

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRUEBAS
DE FATIGA EN UNA ALEACION TRABAJADA
DE ALUMINIO

POR:

NANCY ELIZABETH VAZQUEZ CALVILLO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CO. UNIVERSITARIA

AGOSTO DEL 2004

METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRUEBAS
DE FATIGA EN UNA ALBAÑERIA DE TRABAJO
DE ALUMINIO

N.E.V.C.

TM
Z5853
.M2
FIME
2004
.V3

Asociación



1020150053

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRUEBAS
DE FATIGA EN UNA ALEACION TRABAJADA
DE ALUMINIO

POR:

NANCY ELIZABETH VAZQUEZ CALVILLO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DEL 2004

585326

TM
75853
.M2
FJHE
2004
.V3

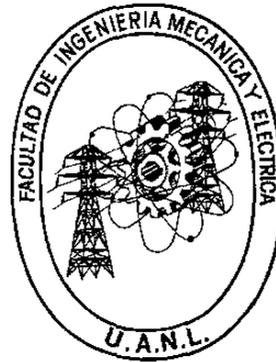


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRUEBAS DE
FATIGA EN UNA ALEACIÓN TRABAJADA DE ALUMINIO

POR

NANCY ELIZABETH VÁZQUEZ CALVILLO

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES.

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO 2004

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

División de Estudios de Posgrado

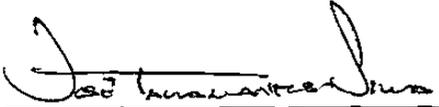
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "**Metodología para el estudio de las pruebas de fatiga en una aleación trabajada de aluminio**", realizada por el Ing. Nancy Elizabeth Vázquez Calvillo, con número de matrícula 0952966 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Dr. Rafael Colás Ortiz

Asesor



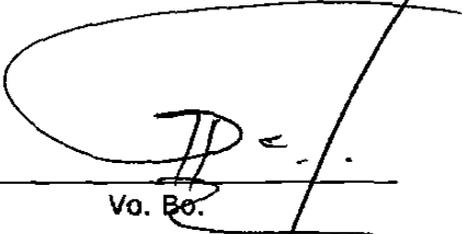
Dr. José Talamantes Silva

Revisor



Dr. Rafael Mercado Solís

Revisor



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Posgrado

Ciudad Universitaria, a Agosto del 2004.

Dedicatoria

A mis padres:

Este “pequeño logro” no podía ser para nadie más que para mis dos más grandes pilares, Sr. y Sra. de Vázquez, con todo mi corazón, de su hija que los ama. . . . y a mi padre Dios por haberme dejado pertenecer a esta hermosa familia.

Agradecimientos

- A CONACYT, por la oportunidad y el apoyo brindado para la realización de la maestría.
- Al los profesores del DIMAT, por los sabios consejos dentro y fuera de aulas, a mis compañeros de generación, gracias por los momentos que hemos compartido.
- A NEMAK S.A., por la oportunidad del proyecto y los Doctores, Masters e Ingenieros del departamento de Investigación y Desarrollo por su compañerismo y ayuda.
- A las personas que hacen especial mi vida, mis hermanas CP. Sonia Vázquez, Dra. Karla Vázquez y Lic. Edit Quintanilla, por su gran apoyo y a Salvador Cuellar por su paciencia y su amor.

Índice

	Página
Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	1
1 Capítulo Aluminio	3
1.1 Historia del aluminio	3
1.2 El aluminio y sus aleaciones	5
1.2.1 Lingotes para fundición	5
1.2.2 Formas vaciadas	5
1.2.3 Productos trabajados mecánicamente	6
1.2.3.1 Aleaciones endurecidas por trabajo	10
1.2.3.2 Aleaciones endurecidas por trabajo térmico	11
2 Capítulo Fatiga	12
2.1 Introducción	12
2.2 Propagación de grietas en el proceso de fatiga	15
2.3 Estudios de pruebas de fatiga para aleaciones trabajadas	23
3 Capítulo Procedimiento experimental y de análisis	25
3.1 Introducción	25
3.2 Pruebas de fatiga	25
3.2.1 Equipo y registro	26
3.2.2 Obtención de muestras para fatiga	29
3.2.3 Método de control de pruebas de fatiga	30
3.3 Pruebas de microdureza	32
3.4 Pruebas de tensión	32
3.5 Análisis químico	32
3.6 Preparación metalográfica	33
3.7 Fractografía	33
3.8 Microscopía de fuerza atómica	33

3.9 Determinación del área de propagación de fractura por fatiga	34
4 Capítulo Resultados y discusión	35
4.1 Microestructura	35
4.2 Reporte del Análisis químico	38
4.3 Reporte de la Microdureza	38
4.4 Reporte de las Propiedades Mecánicas	39
4.5 Reporte de la prueba de escalón	40
4.6 Determinación del factor de intensidad de esfuerzos	48
4.7 Fractografía	50
4.8 Microscopia de fuerza atómica	51
5 Capítulo Conclusiones y recomendaciones	53
5.1 Conclusiones	53
5.2 Recomendaciones	55
Anexo A Método de operación de la maquina MTS 810 para pruebas de fatiga	57
1. Encendido del sistema hidráulico de la máquina MTS 810	57
2. Encender la PC	57
3. Formas de acceder al programa	58
4. Inicio del Programa	59
5. Colocación de la Probeta de Fatiga	62
6. Alta de parámetros en el Software	64
7. Ciclo de Prueba de Fatiga	66
8. Apagado del equipo	68
9. Diagrama del método de operación de la maquina de fatiga MTS 810	70
Anexo B Gráficas	71

Bibliografía	74
Listado de Figuras	77
Listado de Tablas	81
Resumen Autobiográfico	82

Resumen

En el desarrollo del proyecto se aplican técnicas de análisis y control de datos del proceso de fatiga en un aleación de aluminio trabajada mecánicamente, Al 6061 T6, obtenidas a partir de ensayos realizados en una máquina para pruebas de fatiga.

Dentro de los objetivos del proyecto es asegurar la calidad de los ensayos desarrollados en la máquina para pruebas de fatiga MTS 810, bajo éste concepto se trabajó en lo siguiente:

- Detectar y analizar los posibles efectos, sobre los resultados de las pruebas de fatiga en el régimen de ciclo moderado, al implementar algunas adecuaciones a la maquina de fatiga.
- Observar lugares como la fractura por fatiga, donde puede detectarse la influencia de éstos efectos, realizando un control y análisis de los inicios de fractura por fatiga de cada ensayo, para de esta manera comprobar que las fracturas por fatiga no inicien en el mismo lugar aparente ya que esto, significa una mala alineación de la máquina.
- Asegurar que la fractura que presenten las muestras sea similar en apariencia a las descritas por la literatura en fractura por fatiga de ésta manera se verifica que no se esté presentando algún fenómeno extraordinario sobre los ensayos.

Otro de los objetivos es el de establecer un método de control de prueba que provea de información suficiente para un posterior análisis y obtención de correlaciones. Así como determinar los métodos fractográficos

para conseguir una correcta y precisa información de la superficie de fractura.

Lo anterior se consiguió mediante una profunda búsqueda bibliográfica con el fin de determinar de acuerdo a las condiciones y tipo de material, los métodos de control de prueba, métodos de análisis de datos y de caracterización metalográfica que mejor se adaptaran.

Los ensayos se llevaron a cabo bajo el régimen de ciclo moderado, las superficies de fractura se analizaron con técnicas de microscopía electrónica de barrido, la microestructura con técnicas de análisis metalográfico y la topografía con la técnica de microscopía de fuerza atómica.

Al término de los ensayos y obtención de resultados se continuó con la determinación de relaciones, valores tal como vida media en fatiga del material, así como el factor de intensidad de esfuerzo K . Las propiedades que presentó el material durante el ensayo se compararon con los reportados en la literatura encontrando correlación con ellos, para de esta manera haber determinado el desarrollo y evaluó de una metodología para el estudio de las pruebas de fatiga en una aleación trabajada de aluminio.

1. CAPITULO

ALUMINIO

1.1 Historia del aluminio

A diferencia de metales como el oro o la plata, el aluminio no existe en estado puro. En realidad, es un hallazgo del hombre, de su tecnología.

La corteza terrestre provee en abundancia la materia prima, un polvo rojo conocido como bauxita. De él se extrae la alúmina que, luego de ser tratada convenientemente mediante un proceso de electrólisis, se convierte en aluminio. [1]

Desde el descubrimiento del proceso electrolítico del aluminio por Paul Louis Heroult en Francia y Charles Martin Hall en Estados Unidos, el aluminio ha tenido una creciente demanda de tal manera que en la actualidad se considera como un importante elemento en la vida cotidiana, ya que se

pueden encontrar desde utensilios domésticos fabricados con aluminio, hasta partes de automóviles y en la aeronáutica desarrollados con alta tecnología.

Propiedad	Descripción
Ligero, resistente	El aluminio es un metal muy ligero con un peso específico de 2.7 g/cm^3 , un tercio el peso del acero. Su resistencia puede adaptarse a la aplicación que se desee modificando la composición de su aleación.
Muy resistente a la corrosión	El aluminio genera de forma natural una capa de óxido que lo hace muy resistente a la corrosión. Los diferentes tipos de tratamiento de revestimiento pueden mejorar aún más esta propiedad. Resulta especialmente útil para aquellos productos que requieren de protección y conservación
Excelente conductor de la electricidad	El aluminio es un excelente conductor del calor y la electricidad y, en relación con su peso, es casi dos veces mejor que el cobre.
Buenas propiedades de reflexión *	El aluminio es un buen reflector tanto de la luz como del calor. Esta característica, junto con su bajo peso, hacen de él el material ideal para reflectores, por ejemplo, de la instalación de tubos fluorescentes, bombillas o mantas de rescate.
Muy dúctil	El aluminio es dúctil y tiene una densidad y un punto de fusión bajos. Su ductibilidad permite que los productos de aluminio se fabriquen en una fase muy próxima al diseño final del producto.
Impermeable e inocuo	La lámina de aluminio, incluso cuando se produce a un espesor de 0.007 mm es completamente impermeable y no permite que las sustancias pierdan ni el aroma o sabor. Además, el metal no es tóxico, ni desprende olor o sabor.
Totalmente reciclable	El aluminio es cien por cien reciclable sin merma de sus cualidades. El refundido del aluminio necesita poca energía. El proceso de reciclado requiere sólo un 5% de la energía necesaria para producir el metal primario inicial.

Tabla 1.1. Propiedades del aluminio. [2]

Las aleaciones de aluminio fueron empleadas a principios del pasado siglo con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los productos de aluminio. El futuro del aluminio se vislumbra con una gran expansión de su producción, tal y como se muestra en la tabla 1.1.

Con el transcurso del tiempo y el consiguiente avance tecnológico que ha tenido la producción de aluminio, éste penetró en multitud de mercados, produciéndose la diversidad de usos que hoy se conocen. Además, la drástica reducción del costo del metal, sobre todo a partir de su obtención por el proceso electrolítico, ha contribuido fundamentalmente a extender sus aplicaciones.

1.2 El aluminio y sus aleaciones

El aluminio y sus aleaciones se dividen en 3 clases: lingotes para fundido, formas vaciadas y productos trabajados mecánicamente la última clase mencionada se dividen a su vez en aleaciones endurecidas por trabajo y aleaciones para trabajo térmico.

1.2.1 Lingotes para fundición

Es el aluminio sólido o aleaciones de aluminio sin trabajar en una gran variedad de formas y tamaños que dependen de su uso posterior.

1.2.2 Formas vaciadas

Los procesos derivados de la clase formas vaciadas son: a) el vaciado en moldes de arena, en el que los moldes se alimentan por gravedad o por baja presión (LP), b) el proceso de vaciado en moldes permanentes, en el cual los moldes metálicos se alimentan por gravedad, por un gas inerte a baja presión (LP) o por alta presión (HP-Die casting) y c) el proceso de vaciado por inyección, en el cual el metal fundido se obliga a pasar por un dado o matriz a una elevada presión mediante uno o varios pistones hidráulicos.

El sistema de dígitos utilizado para las aleaciones de aluminio en formas vaciadas según La Asociación de Aluminio consta de 3 dígitos, en el que el primero indica el grupo de la aleación de acuerdo a los principales elementos aleantes [3]:

- 1XX.X** – Aluminio puro
- 2XX.X** – Al – Cu
- 3XX.X** – Al – Si – Cu, Al – Si – Mg
- 4XX.X** – Al – Si
- 5XX.X** – Al – Mg
- 6XX.X** – Al – Mg – Si
- 7XX.X** – Al – Mg – Zn
- 8XX.X** – Al – Sn

Las aleaciones de los tipos 2XX.X, 3XX.X, 6XX.X y 7XX.X son susceptibles de ser tratadas térmicamente en la tabla 1.2 se describen la nomenclatura estándar para describir el tratamiento térmico según la Asociación de Aluminio.

0	Anulado.
T4	Solución tratada térmicamente y enriquecida.
T5	Envejecido artificial.
T6	Solución tratada térmicamente, enriquecida y envejecida artificialmente.
T7	Solución tratada térmicamente, enriquecida y estabilizada.
T8	Reducción de enfriamiento antes del envejecido.

Tabla 1.2. Nomenclatura estándar para describir el tratamiento térmico según la Asociación de Aluminio. [4]

1.2.3 Productos trabajados mecánicamente

La designación los dígitos para el aluminio trabajado y sus aleaciones se encuentran especificados según la serie 1470-1475 de las British Standard y la Asociación de aluminio, de acuerdo a cuatro dígitos del cual el primero

indica el grupo de la aleación de acuerdo a los principales elementos aleantes.

1XXX – Aluminio puro, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica muy alta, estas aleaciones contienen formabilidad, solubilidad, buena a excelente resistencia limitada. Se presenta el diagrama del aluminio – hierro figura 1.1., ya que es el principal contaminante que se presenta cuando se procesa el aluminio de alta pureza.

2XXX – Aleaciones al Cobre, hace las aleaciones tratables térmicamente; aumenta la resistencia y la dureza. En la figura 1.2. se presenta el diagrama del aluminio – cobre. Estas aleaciones pueden exceder la resistencia de un acero medio hasta en un 50%. Resistencia a la corrosión y soldabilidad limitada. Algunas aleaciones de esta familia tienen una maquinabilidad superior.

3XXX – Aleaciones al Manganeso, mejora la resistencia natural y la resistencia a la corrosión. En la figura 1.3. se presenta el diagrama del aluminio – manganeso. El agregado de alrededor de 1.2% de Mn incrementa la resistencia alrededor de un 20% sobre el Al puro pero reteniendo su alta formabilidad.

4XXX – Aleaciones al Silicio, baja el punto de fusión, mejora la colabilidad y, en combinación con el magnesio, produce aleaciones tratables térmicamente con buena formabilidad y resistencia a la corrosión. El agregado de silicio hasta el 12% hace las aleaciones particularmente convenientes como material de aporte para soldadura por su bajo punto de fusión. Aleaciones con Si se usan para piezas de fundición, el Si imparte gran fluidez al metal a colar. En la figura 1.4. se presenta el diagrama del aluminio – silicio.

5XXX – Aleaciones al Magnesio, aumenta la resistencia a la tensión, a la corrosión marina, mejora la soldabilidad y la dureza. Cuando se agrega 0.3 a 5% de Mg al aluminio resultan aleaciones de moderada a alta resistencia, buena colabilidad y generalmente buena resistencia a la corrosión en atmósfera marina. En la figura 1.5. se presenta el diagrama del aluminio – magnesio.

6XXX – Aleaciones al Magnesio – Silicio, los más conocidos miembros de esta familia son las aleaciones 6061 y 6063 que tienen buena formabilidad. Alta resistencia a la corrosión, son rápidamente soldables, fácilmente maquinables y pueden ser terminadas en muchas formas.

7XXX – Aleaciones al Cinc, tiende a mejorar la resistencia y la dureza; en combinación con pequeños porcentajes de magnesio produce aleaciones tratables térmicamente con muy alta resistencia. La adición de 3 a 8% de Zn, más un pequeño porcentaje de magnesio, cuando es tratado térmicamente y envejecido, resulta una familia de aleaciones con muy alta resistencia. En la figura 1.6. se presenta el diagrama del aluminio – Cinc.

8XXX – Otras Aleaciones además de los elementos aleantes comunes, otros elementos metálicos agregados en variadas cantidades proveen efectos especiales a las familias básicas de aleaciones.

- a) El bismuto, plomo y estaño mejora el maquinado.
- b) El berilio mejora las características de soldadura y colado.
- c) El boro ayuda a aumentar la conductividad eléctrica.
- d) El cromo, circonio y vanadio se usan para proveer efectos especiales.
- e) El níquel confiere mejor resistencia a elevadas temperaturas.
- f) El titanio ejerce un poderoso efecto de refinación de grano que confiere resistencia y ductilidad.

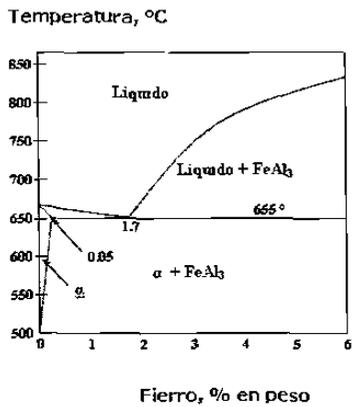


Fig. 1.1. Diagrama de equilibrio: aluminio-hierro. [5]

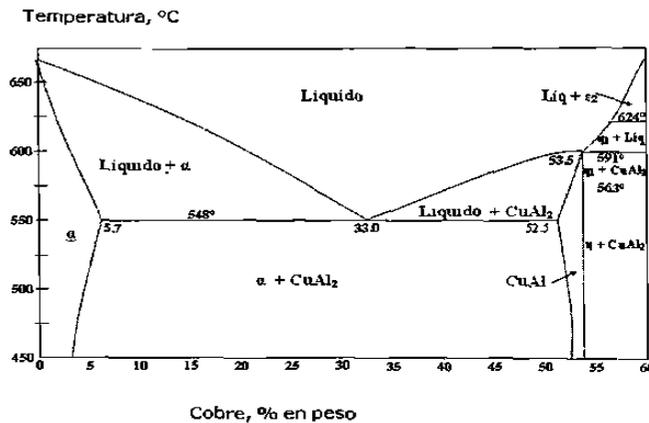


Fig. 1.2. Diagrama de equilibrio: aluminio-cobre. [5]

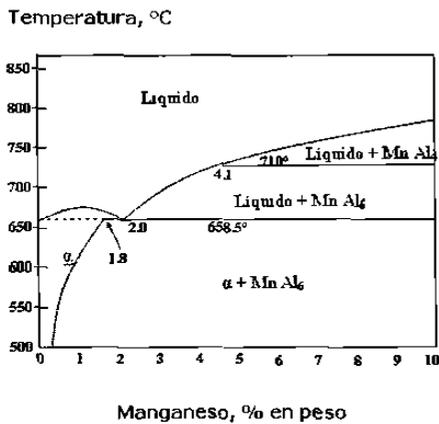


Fig. 1.3. Diagrama de equilibrio: aluminio-manganeso. [5]

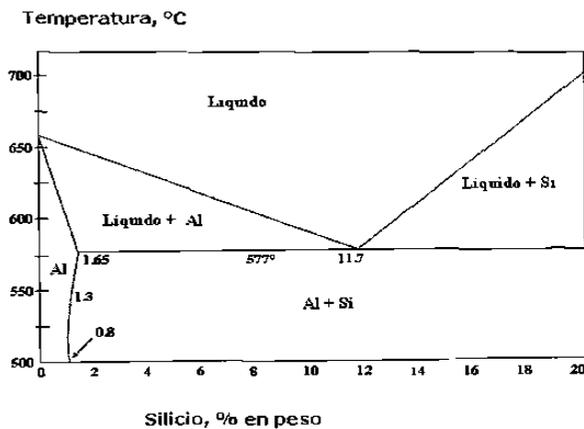


Fig. 1.4. Diagrama de equilibrio: aluminio-silicio. [5]

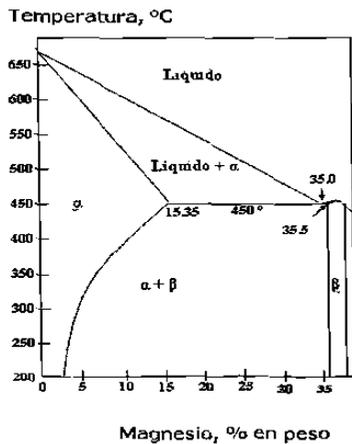


Fig. 1.5. Diagrama de equilibrio: aluminio-magnesio. [5]

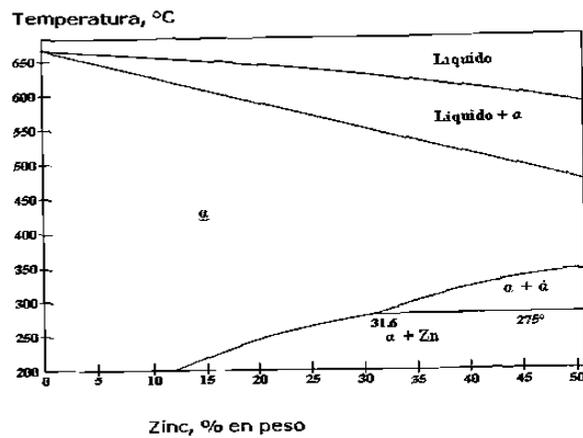


Fig. 1.6. Diagrama de equilibrio: aluminio-cinc. [5]

1.2.3.1 Aleaciones endurecidas por trabajo

Los materiales trabajados, obtienen su resistencia por aleación y trabajo en frío (endurecimiento por deformación) también se les llama aleaciones endurecidas por trabajo.

El grado de endurecimiento se expresa con el sufijo "H" con una cifra que la cual describe, la cifra 1 indica que el endurecimiento se alcanzó mediante la deformación por trabajo. La cifra 2 indica que el endurecimiento se obtuvo por deformación en una cantidad mayor a la requerida. La cifra 3 indica que después del trabajo en frío, las propiedades se estabilizan mediante un tratamiento a bajas temperaturas. Tabla 1.3.

El recocido se presenta con el sufijo "O"; "M" ("F" en EE.UU.) indica como se fabricó el material.

Símbolo	Descripción
H	Endurecimiento por deformación, material no tratable térmicamente.
H1	Solo endurecimiento por deformación.
H2	Endurecimiento por deformación y recocido en parte.
H3	Endurecimiento por deformación y estabilización.
H12 , H22, H33	Un cuarto de dureza.
H14, H24, H34	Semiduro.
H16, H26, H36	Tres cuartos de dureza.
H18, H28, H38	Totalmente duro (el revenido mas duro practicable en el comercio).
H19	Un revenido en especial duro para aplicaciones especificas.
F	Como se fabrico.
O	Recocido, blando.

Tabla 1.3. Designación de los sufijos para el endurecimiento (según el sistema EE.UU). [6]

1.2.3.2 Aleaciones endurecidas por trabajo térmico

El sufijo utilizado para la descripción de los tratamientos térmicos es "T" además de otra cifra del 1 al 10, para describir alguno de los 10 tratamientos térmicos básico. También se le pueden agregar otra cifra para describir las variaciones en el tratamiento térmico. Tabla 1.4.

Símbolo	Descripción
T1	Enfriada desde un proceso de conformación a una temperatura elevada y envejecida de forma natural hasta una condición sustancialmente estable.
T2	Enfriada desde un proceso de formación a temperatura elevada, trabajada en frío y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.
T3	Solución tratada térmicamente, trabajada en frío envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.
T4	Solución tratada térmicamente y envejecida en forma natural hasta una condición considerablemente estable.
T5	Enfriada desde un proceso de conformación a una temperatura elevada y luego envejecida de manera artificial.
T6	Solución tratada térmicamente y luego envejecida en forma artificial.
T7	Solución tratada térmicamente y estabilizada.
T8	Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y luego envejecida en forma artificial.
T9	Solución tratada térmicamente, envejecida de manera artificial y luego trabajada en frío.
T10	Enfriada desde un proceso de conformación a temperatura elevada trabajada en frío y luego envejecida de modo artificial.
T73	Solución tratada térmicamente y envejecida en forma artificial de dos etapas.
T76	Solución tratada térmicamente y envejecida de manera artificial en dos etapas (difieren de T73).

Tabla 1.4. Sufijos empleados para la designación de tratamiento térmico en aleaciones trabajadas (Asociación Americana de Aluminio). [6]

2. CAPITULO

FATIGA

2.1 Introducción

El inicio del estudio de fatiga empieza en los años 1800, cuando un grupo de investigadores en Europa observaron que ciertos componentes empezaban a fracturarse al ser sometidos a repetidos ciclos de carga. Pero es hasta los años 1900, cuando se tiene un significativo avance en los estudios de los efectos de la fatiga en la ingeniería de los materiales, investigaciones realizadas por Wöhler, en las que se definió el concepto de fatiga como un proceso de agrietamiento paulatino.

La importancia en el estudio de la fatiga radica en que esta es frecuentemente un factor crítico en la prueba, análisis y diseño de materiales para maquinas, estructuras, aeronaves, motores, etc.

El incremento en el uso del aluminio en estructuras y partes de estructuras como las anteriormente mencionadas, ha conllevado al estudio de la fatiga en aleaciones de este metal

¿Qué es fatiga?

Fatiga, es el proceso progresivo localizado en una estructura permanente en la que ocurren cambios en el material sujeto a condiciones que producen fluctuaciones de esfuerzo y deformación en algún punto o puntos y que culminan en la grieta o fractura completa del material después de un número suficiente de fluctuaciones, cuyo valor máximo es menor a al esfuerzo de cedencia. Las fluctuaciones ocurren con la combinación una carga y un tiempo (frecuencia), como en el caso de las vibraciones aleatorias. [7]

A pesar de los estudios ya realizados, la fatiga aún no es completamente entendida y muchas investigaciones se realizan con el propósito de predecir la vida en fatiga, desarrollar materiales resistentes a ella y comprender mejor sus mecanismos.

La fatiga es evaluada en términos del tiempo o números de ciclos que tarda en ocurrir la fractura final, a esto se le llama vida en fatiga. La vida se determina de esta manera, ya que teóricamente siempre se presenta la fatiga, por lo que se define el tiempo que tarda ésta en culminar como fractura final y no solamente si ocurrirá o no el proceso de fatiga.

Algunas estructuras y componentes en los que se presenta la fatiga son partes estructurales de avión, toda clase de motores, grúas, elevadores y equipos de movimiento de materiales, ruedas y rieles de ferrocarril, etc. En cuanto a los efectos que se tiene sobre la vida en fatiga respecto a la amplitud de esfuerzo se sabe que cuanto mayor sea éste, el número de ciclos de carga necesarios para producir fatiga y que culmine en fractura se

reduce a una relación exponencial. La presencia en el componente, de un concentrador de esfuerzos, tales como entalladuras, raspones o grietas, reducirán drásticamente el número de ciclos antes de la falla, figura 2.1.

Para que se presente la fatiga, se tiene que cumplir 3 factores: [8]

- 1.- Un valor de esfuerzo, suficientemente alto, pero menor al esfuerzo de cedencia.
- 2.- Variación o fluctuaciones de la carga.
- 3.- Número suficiente de ciclos de carga.

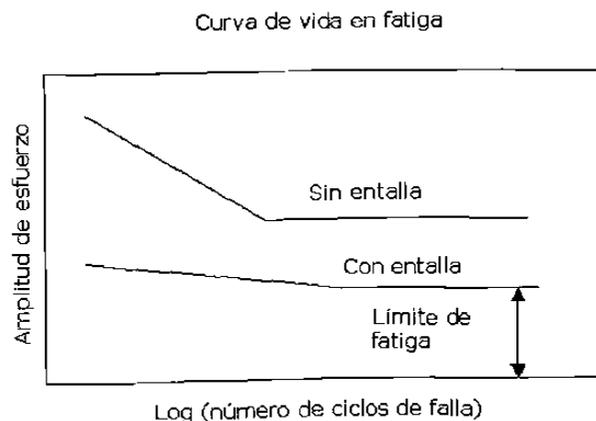


Figura 2.1. Diagrama de amplitud de esfuerzo vs logaritmo del número de ciclos de falla. (Diagrama realizado por Wölher, conocido como curva de vida).

Las curvas de vida se elaboran en base a las pruebas de vida S-N, las cuales son los ensayos las más utilizados dentro de los ensayos de fatiga y consisten aplicar una amplitud uniforme a una probeta sin grietas ni entalladuras y de una geometría que produce un esfuerzo uniforme, dando una relación de esfuerzos R , temperatura y frecuencia constante en condiciones ambientales controladas y determinando de esta manera el número de ciclos hasta la falla, se denomina también fatiga de altos ciclos.

Los resultados de la pruebas se presentan en gráficas de la magnitud de la amplitud de esfuerzo contra el número de ciclos hasta la fractura N_f . En

la gráfica, cuando la curva se hace asíntota en el eje X (N_f) se le denomina límite de fatiga. No todos los materiales exhiben ni en todos los casos, se observa un límite de fatiga. En materiales como el aluminio, magnesio y aleaciones de cobre la presencia de entallas y ambientes corrosivos, hace que no se presente un límite de fatiga, es decir la curva S-N, nunca se vuelve horizontal con el incremento de los ciclos, para estos casos es común caracterizar las propiedades de fatiga del material obteniendo el esfuerzo de fatiga a un determinado número de ciclos, que puede ser, 10^8 ciclos.

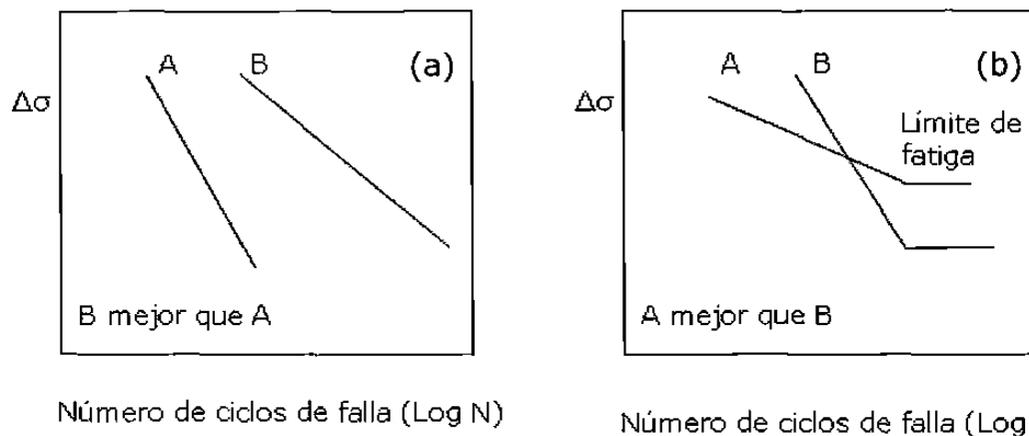


Figura 2.2. Comparación de curvas S-N, para diferentes materiales con y sin presencia de límite de fatiga.

En los ejemplos de la figura 2.2 se analiza en la figura (a) que el material B es mejor que A, debido a que la curva está más a la derecha, en el caso de la figura (b), el material A es mejor que B, porque está el límite de fatiga más arriba.

2.2 Propagación de grietas en el proceso de fatiga

La característica principal de la fatiga, desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, es el tipo de ciclo de carga (amplitud, frecuencia y

esfuerzo promedio), que este puede variar dependiendo de la relación R, de la frecuencia y de la forma de variación de la carga.

Las características mecánicas del ciclo de carga se presentan esquemáticamente en la figura 2.3.

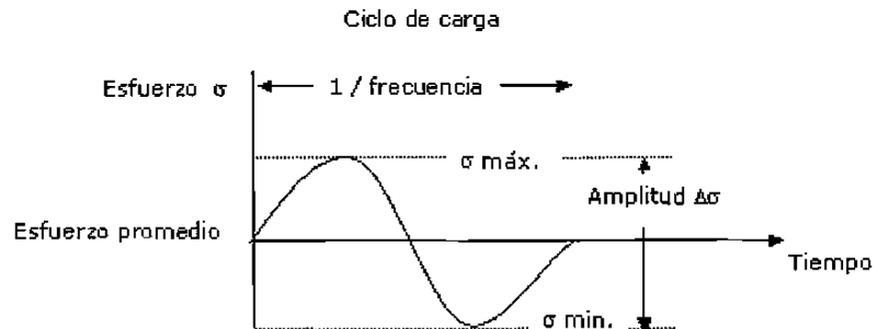


Figura 2.3. Diagrama de las características principales del ciclo de carga. [9]

Si el rango de esfuerzo es algebraicamente la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo de un ciclo se puede representar como: [8]

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad (2.1)$$

El esfuerzo medio es la media algebraica del esfuerzo máximo y mínimo en el ciclo:

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2 \quad (2.2)$$

La manera más usual de representar el ciclo de carga de los datos de fatiga es mediante la relación de esfuerzos: [8]

$$R = \sigma_{\text{mín}} / \sigma_{\text{máx.}} \quad (2.3)$$

La forma del ciclo de carga puede dividirse en los siguientes tipos:

1. Senoidal: El aumento y la disminución de la carga es paulatino y sigue la forma de una función seno.
2. Pulsante: El incremento y disminución de la carga es muy rápido y la carga se mantiene fija durante un tiempo en sus valores máximo y mínimo.
3. Triangular: La carga aumenta y disminuye a una rapidez constante, sin tiempo de espera en el nivel máximo o mínimo.
4. Aleatoria: La variación de carga sigue un patrón de variación aleatorio en amplitud y forma.

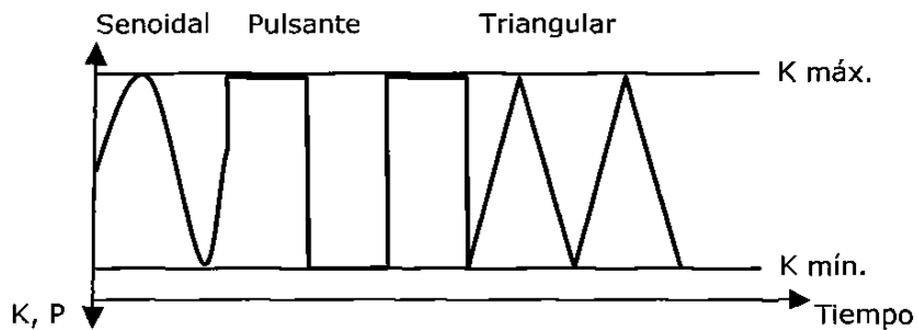
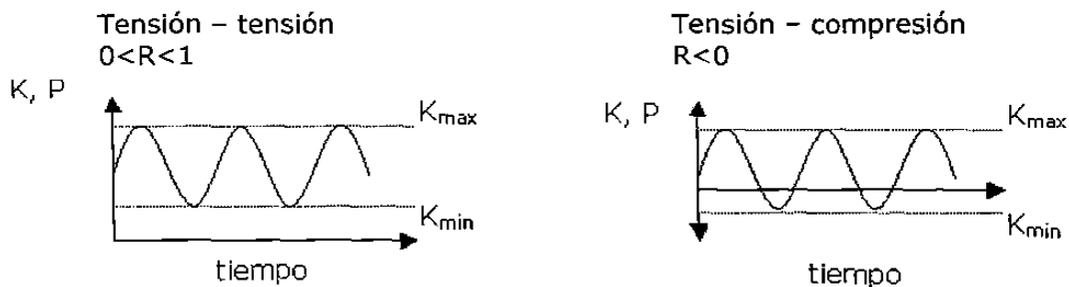


Figura 2.4. Formas típicas de los ciclos de carga en fatiga.

A su vez, los ciclos se subdividen en otros tipos de de ciclos de carga de acuerdo a la relación de carga R , figura 2.5. [10]



$$\sigma_{ij} = [\sigma(\pi a)^{1/2} / (2\pi r)^{1/2}] f_{ij}(\theta) \quad (2.4)$$

Por lo que para una posición dada, (r, θ) la magnitud del esfuerzo depende del término:

$$\sigma (\pi a)^{1/2}$$

A lo cual se le define como K, factor de intensidad de esfuerzos:

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (2.5)$$

En condiciones lineal elástica la rapidez de la propagación de grietas depende del factor de intensidad de esfuerzos K y esta varia en el ciclo un intervalo de amplitud ΔK , en el cual:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} \quad (2.6)$$

$$\Delta K = \sigma_{\text{máx}} \sqrt{\pi a} - \sigma_{\text{mín}} \sqrt{\pi a} = \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad (2.7)$$

Siendo $\sigma_{\text{máx}}$ el esfuerzo máximo aplicado en MPa, $\sigma_{\text{mín}}$ el esfuerzo mínimo aplicado en MPa dentro de un ciclo y a en mm, la longitud de la grieta.

La propagación de la grieta esta dada por la razón de da/dN (longitud de la grieta a , por cada N números de ciclos), en el cual:

$$da/dN = C \sigma_a^m a^n \quad (2.8)$$

Donde a es la longitud de la grieta, C es una constante empírica para cada material y σ_a es el esfuerzo alternativo, en diferentes investigaciones los valores de m están en un rango de 2 a 4 y n varia de 1 a 2.

La relación entre la propagación de fractura por fatiga da/dN y ΔK , esta representada en la figura 2.7.

Durante la etapa de nucleación de grietas y crecimiento lento de grietas, se presenta la formación de discontinuidades geométricas, que después se desarrollarán como grietas, estas discontinuidades se deben a la deformación cíclica que produce alteraciones en la subestructura de dislocaciones. Los esfuerzos en esta etapa están debajo del ΔK_{lim} , siendo la curva del ΔK_{lim} , la región donde la propagación de grietas es nula. Esta etapa puede significar en ocasiones hasta el 90% de vida en fatiga del componente, debido a que esta depende de la amplitud de esfuerzos, de tal forma que si la amplitud llega a ser muy baja, la nucleación de grietas llevara el tiempo antes estimado (alrededor del 90% de la vida en fatiga).

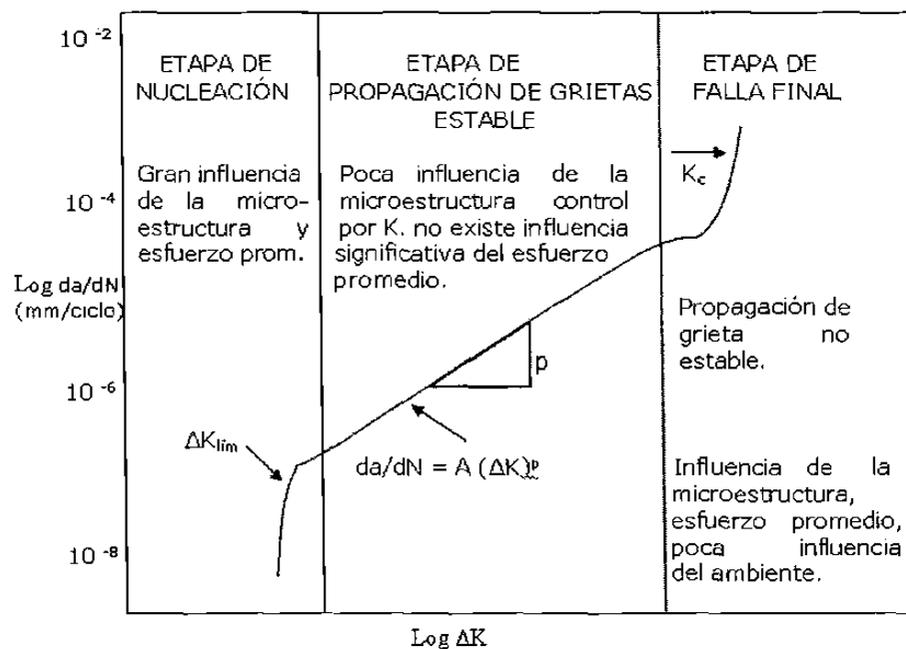


Figura 2.7. Representación esquemática de la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ΔK . [8][9]

En la etapa de propagación de grietas estable se presenta la fractura debida a la amplitud del esfuerzo cíclico en la punta de la grieta, cuando ésta se encuentra ya en el intervalo de deformación plástica del material se

empezará a propagar una grieta estable, siendo posible que el resto de la pieza esté aún deformándose en forma elástica. La relación entre $\log da/dN$ y $\log \Delta K$ es de manera lineal, por lo que p es una relación empírica, obtenida de la pendiente de la curva y A es el valor encontrado de prolongar la línea recta a $\Delta K = 1 \text{MPa m}^{1/2}$, donde el valor de p es de aproximadamente 3 para los aceros y de un rango entre 3 a 4 para los aluminios. [8]

Durante la última etapa la falla final o propagación rápida la microestructura y el estado de esfuerzos en la pieza influyen ya que la estabilidad de la fractura se ve controlada por la tenacidad a la fractura del material. Durante esta etapa, la grieta alcanza su tamaño crítico y la fractura o falla se presenta en forma catastrófica. En esta etapa $K_{\text{máx}}$ se acerca a K_c , la tenacidad de fractura del material y ocurre la fractura del material.

Existen factores que afectan seriamente la vida de fatiga de los materiales, en la figura 2.8 se muestra la influencia que estos pueden tener, los cuales son: [9]

1. Geometría (debido a los concentradores de esfuerzos provocados por defectos tales como óxidos, porosidad, inclusiones, etc.).
2. Estado de esfuerzos y deformaciones.
3. Microestructura.
4. Propiedades mecánicas.
5. Temperatura.
6. Ambiente.
7. Esfuerzos residuales.
8. Combinación de esfuerzos.
9. Acabado superficial.

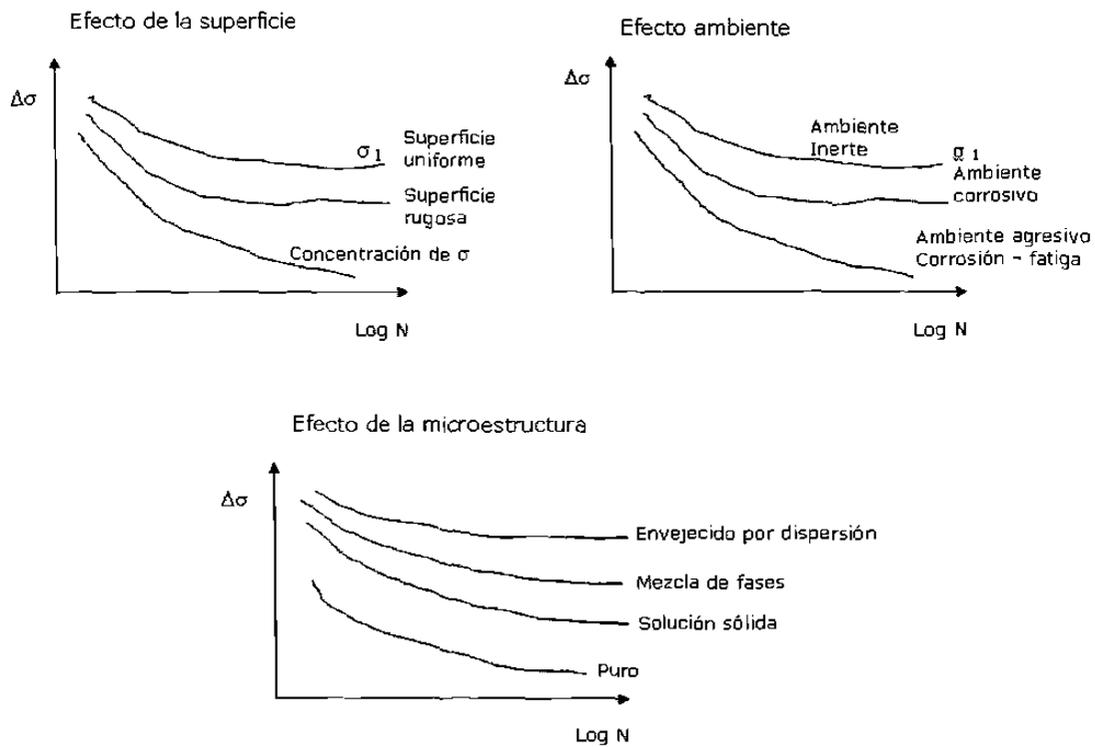


Figura 2.8. Ejemplos del efecto de la superficie, ambiente y microestructura, sobre la curva S-N.

El área de fractura por fatiga es de una apariencia peculiar y por lo tanto es de fácil identificación; consta de tres zonas principales que se esquematizan en la figura 2.9.

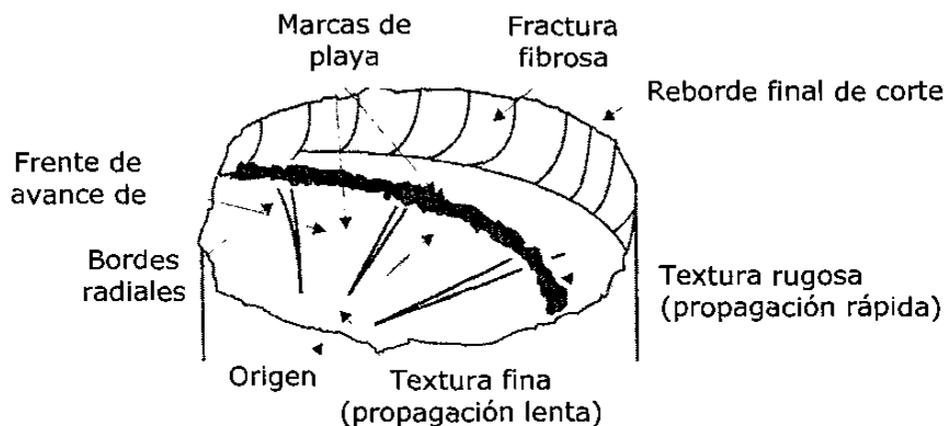


Figura 2.9. Identificación de zonas en el área de fractura por fatiga. La zona de inicio en que la superficie es de una apariencia lisa, plana, con pocas líneas de grietas visibles, el límite de esta zona con la siguiente está definida por una línea que marca el frente de propagación de la grieta. [9]

En la zona de propagación estable sobresalen dos características, la primera son marcas de playa, debido a la semejanza que tiene en apariencia con las ondas formadas en la arena de playa por efecto del viento y la marea, la superficie presenta marcas de ondas paralelas entre si, llamadas marcas de playa, y con un centro que converge hacia el punto de inicio. La siguiente característica son escalones radiales que se presentan de forma paralela a la dirección de propagación de la grieta y se forman cuando la grieta se propaga a niveles diferentes, la propagación es rápida.

En la zona de fractura final ocurre un cambio en el proceso de fractura, ya que pasa de ser una falla por fatiga a una por esfuerzo de corte, debido a la reducción de área que presenta debido a la propagación de la fractura. Las características en esta zona, por lo tanto son semejantes a las características presentadas en la fractura por corte, superficie rugosa, además de una inclinación aproximada a los 45° , puede incluso presentar una deformación severa o estricción dependiendo de la ductilidad del material.

2.3 Estudios de pruebas de fatiga para aleaciones trabajadas

Dentro de los estudios realizados de pruebas de fatiga para aleaciones trabajadas se ha logrado definir características más precisas que intervienen en el límite de fatiga y en la vida en fatiga de las aleaciones.

Por lo que se le atribuyen la corta vida en fatiga a la formación temprana de una grieta inicial, siendo los sitios preferenciales para la iniciación de la grieta partículas grandes y agrietadas.

Los factores que afectan la vida en fatiga de las estructuras trabajadas mecánicamente son:

Factor	Importancia
✓ Orientación de la extrusión	Menor
✓ Tamaño de grano	Significativa
✓ Acabado superficial	Significativa

Entre los datos relevantes que se encontró en los reportes de la literatura, es la influencia que tienen los tratamientos térmicos sobre los precipitados y los granos, teniendo como consecuencia cambios en las características mecánicas de las aleaciones. Dicha influencia se debe a la difusión de partículas provocando precipitados de mayor tamaño y un consecuente cambio en el endurecimiento y para el caso de los granos, su cambio en tamaño ya sea en crecimiento u obtención de granos más finos. Esto causará menos obstáculos al movimiento de dislocaciones y por lo tanto las características mecánicas comienzan a cambiar, y con un comportamiento de fractura intergranular con estrías en el proceso de fatiga. [12][13]

3. CAPITULO

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y DE ANÁLISIS

3.1 Introducción

En el este capítulo se presenta el seguimiento al procedimiento utilizado para la realización de las pruebas en esta investigación, así como de la metodología a seguir para el análisis de los resultados.

3.2 Pruebas de Fatiga

Las modificaciones realizadas a la maquina MTS 810, fue el cambio de las mordazas tipo MTS 647 Hydraulic Wedge Grip figura 3.1, por las del tipo ER25 SPR 15-16, 5/8 y mordazas tipo ST $\frac{3}{4}$ "X2" ER25E figura 3.2. Dicho

cambio se realizó ya que las mordazas tipo MTS 647 Hydraulic Wedge Grip provocan un desorden mecánico, debido al considerable peso que presentan éstas mordazas, lo cual se consideró un impedimento para el correcto funcionamiento de la maquina y los ensayos.



Figura 3.1. Mordaza MTS 647

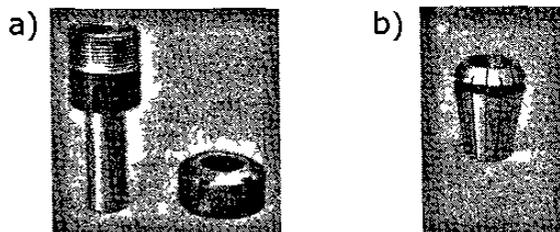


Figura 3.2. (a) Shock ER25 SPR 15-16 y (b) collets ST $\frac{3}{4}$ "X2" ER25E.

3.3 Equipo y registro

Para investigar los efectos es necesario desarrollar pruebas y monitorear los resultados de las mismas. Para la realización de éstas se utilizó la maquina de fatiga de frecuencia moderada MTS 810. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones ambientales de temperatura de 25 °C.

Las unidades principales de la maquina MTS 810, son:

1. Unidad de Control de carga.
2. Servoválvula.
3. Computadora y programas de control.
4. Bomba hidráulica.
5. Estación de control remoto.
6. Conectores con módulos de identificación de sensores.
7. Sensor de fuerza.
8. Actuador de fuerza (HSM).
9. LVDT.

El principio del sistema de la máquina MTS 810 consiste en una unidad de control de carga con el cabezal fijo y un cabezal móvil controlado por un servomecanismo. La probeta se sujeta entre ambos cabezales, por las mordazas mostradas en la figura 3.3. [16] [17]

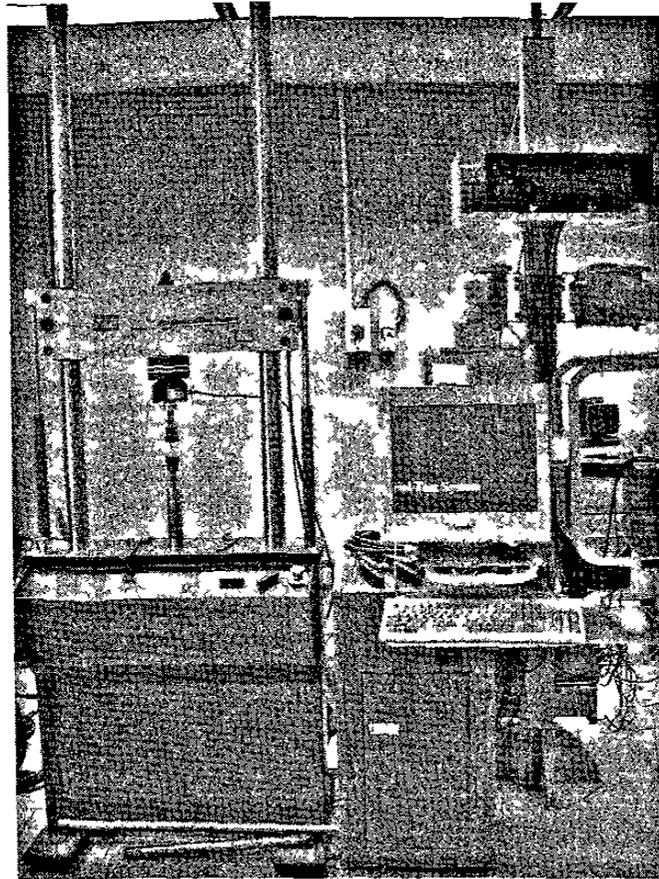


Figura 3.3. Fotografía de la máquina MTS 810.

Los sensores de la celda de carga del sistema figura 3.4, registran y envían una señal a un comparador, el cual registra y compara la diferencia entre este valor y uno previamente determinado, para ejercer una acción de control dependiendo de la diferencia entre ambos; si el valor es menor que el predeterminado, el sistema ordenará seguir incrementando la carga o deformación, si se ha alcanzado dicho valor, entonces el sentido del ciclo se invertirá y si la diferencia es mayor entonces la señal será para ordenar al controlador disminuir la carga o la deformación. Cuando se llega al valor

mínimo predeterminado el ciclo volverá a cambiar de sentido y se iniciará un nuevo ciclo. De tal manera que el monitoreo de carga contra tiempo desarrolla una curva de histéresis. (Figura 3.5.) [16] [17]

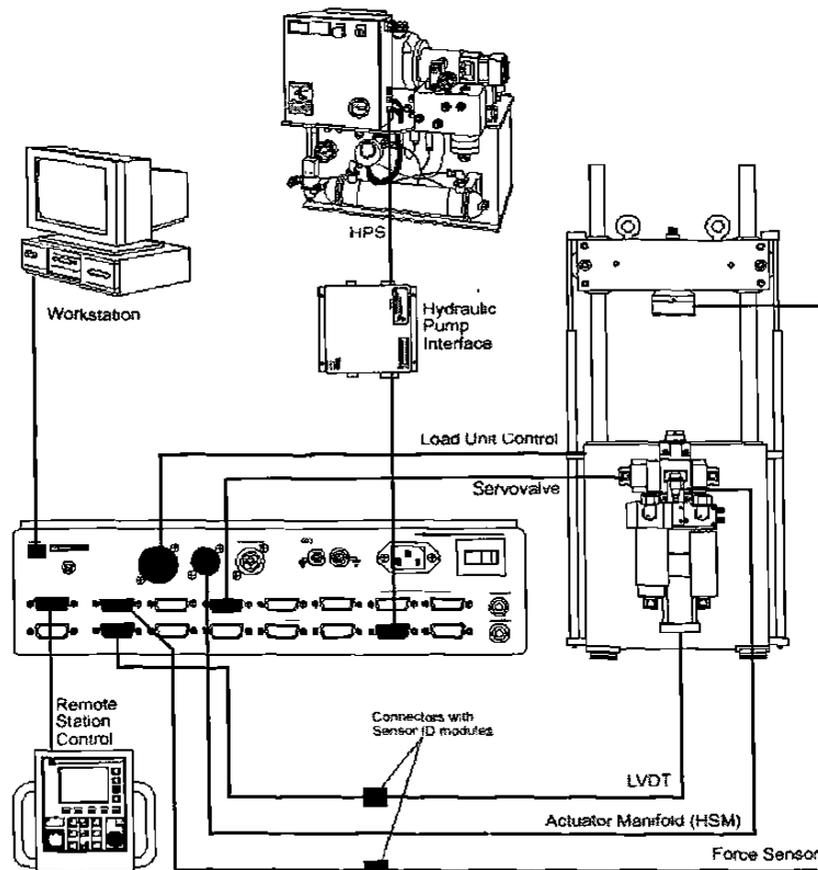


Figura 3.4. Sistema de la maquina MTS 810, para pruebas de fatiga.

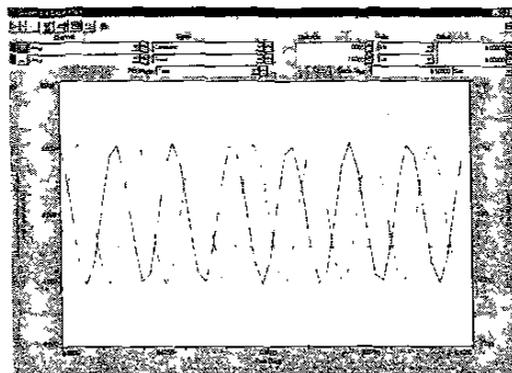


Figura 3.5. Curva tipo Histéresis obtenida durante el monitoreo de una prueba de fatiga.

3.2.2 Obtención de muestras para pruebas de fatiga

El material utilizado para las pruebas de fatiga fue la aleación de aluminio 6061 T6 extruido. Como ya se describió en el segundo capítulo, la aleación de la serie 6xxx se refiere al tipo aluminio-magnesio-silicio con el tratamiento térmico T6, referido a las condiciones de enfriamiento artificial a la salida de la extrusión y el consecuente envejecimiento.

Se obtuvieron dos barras cilíndricas de esta aleación bajo las condiciones ya mencionadas y se maquinaron para obtener especímenes con las dimensiones de la norma ASTM de especímenes para pruebas de fatiga de alto ciclo ASTM E 466-96, Figura 3.6. [19] [20]

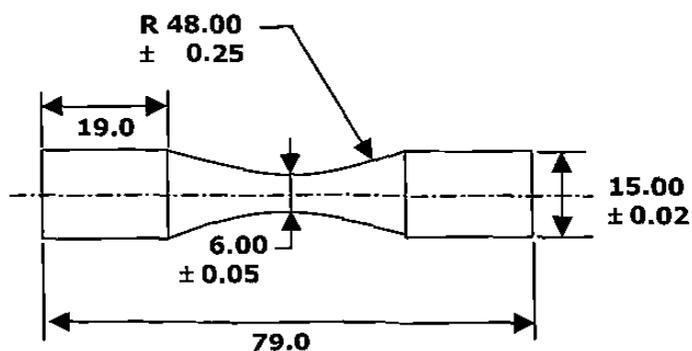


Figura 3.6. Forma y dimensiones del espécimen (mm) para pruebas de fatiga.

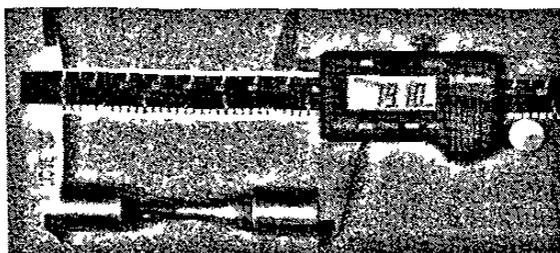


Figura 3.7. Fotografía de un espécimen preparado para el ensayo de fatiga.

En el procedimiento se recomienda no tener rallas o marcas en la dirección del maquinado, para asegurar su eliminación se optó por pulir los especímenes con lijas de SiC numero 2400 de manera longitudinal a la forma de reloj de arena que tiene el espécimen y finalmente se limpiaron con alcohol etílico, Figura 3.7.

3.2.3 Método del control de pruebas de Fatiga

El método que se utilizó para el control de pruebas en laboratorio es el método de escalón o escalera (staircase), debido a que se usa cuando se tiene un limitado número de probetas.

Procedimiento de prueba [21] [22]

- I. Definir la carga y el esfuerzo del primer espécimen a ensayar. En este paso se recurre a los datos de las curvas S-N del material, para tener una referencia del valor medio del límite de fatiga.
- II. Si el espécimen ensayado no falló al alcanzar un dado número de ciclos, 10^7 en este caso, el siguiente espécimen tendrá un incremento en la carga, y así sucesivamente hasta que se produzca la falla o fractura total. El incremento o escalón podrá ser un porcentaje de la carga aplicada al espécimen anteriormente ensayado.
- III. Al fallar un espécimen, antes de alcanzar el número de ciclos (10^7) se reduce la carga del siguiente espécimen, el decremento o escalón podrá ser el mismo porcentaje de carga aplicada al espécimen anteriormente ensayado para llevar un control.

- IV. De esta manera el valor de la carga o esfuerzo disminuirá o será incrementado dependiendo de lo que haya pasado con el espécimen ensayado, si sufrió fractura o no.
- V. Graficar cada espécimen con un número secuencial, contra la cantidad de esfuerzo o carga al que fue sometido en el ensayo, diferenciando los especímenes fallados o fracturados de los que no sufrieron fractura.

El procedimiento de ensayo se describe en el Anexo A.

Las probetas que no fracturaron por el proceso de fatiga se ensayaron en tensión, con el fin de detectar una posible nucleación de grietas por fatiga.

Con fines de control de resultados, en cuanto al inicio de zona de fractura, se utilizó el diagrama de reloj (figura 3.8 a.). En el cual la probeta a ensayar una vez montada en la máquina para el inicio de la prueba de fatiga, se marca con una línea longitudinal, de manera que esta línea esté de frente al operador (figura 3.8 b.) y será tomada como hora 6 y, a partir de ésta se toman el resto de los números comunes de un reloj para formar el diagrama. La hora o número a tomar del diagrama será dependiendo de la zona de inicio de fractura. En el diagrama de reloj, la circunferencia se refiere a la sección transversal de la probeta.

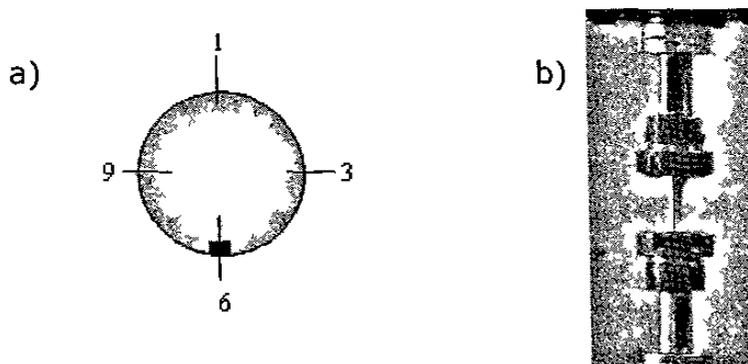


Figura 3.8. (a) Diagrama de reloj. (b) Probeta lista para ensayar y marcada.

3.3 Pruebas de Microdureza

Las pruebas de microdureza Vickers se llevaron a cabo en un microdurómetro marca Future Tech. Las muestras a medir se montan en acrílico y posteriormente se desbastan de manera convencional desde las lijas de SiC número 180 hasta 2400 seguido de un pulido fino hasta acabado espejo con alúmina de $0.1\ \mu\text{m}$ y sílica de $0.05\ \mu\text{m}$.

Para llevar a cabo las pruebas se aplicó una carga de 100 g durante 15 seg para realizar la indentación, posteriormente se toman las medidas de las longitudes de la huella de la indentación y se convierten a dureza de manera automática.

3.4 Pruebas de Tensión

Se maquinaron cinco probetas para pruebas de tensión, las cuales fueron ensayadas bajo el procedimiento estándar B-557.

Las condiciones de las pruebas fueron de carga a una velocidad constante de 5 mm por minuto. Las pruebas se llevaron a cabo en la máquina universal electromecánica marca Zwick/Roell, modelo Z100.

3.5 Análisis químico

Se realizó el análisis químico de las barras antes de maquinaslas. Los 15 especímenes se obtuvieron de dos barras de la aleación 6061 T6, por lo que se decidió realizar sólo un análisis químico de cada barra, haciéndolo representativo para la población.

Los especímenes se pulieron con lija de SiC número 360 y 180, con el fin de eliminar la superficie rugosa obtenida por el corte, en un espectrómetro de chispa.

3.6 Preparación metalográfica

Para la observación metalográfica se siguió la norma ASTM E-3 para finalizar con un pulido en suspensión de alúmina de $0.1\ \mu\text{m}$ y sílica de $0.05\ \mu\text{m}$ en paño Metal - o - graphic, XL- 17320 10" tipo T. Billar Metal obteniendo superficies metalográficas con acabado espejo.

3.7 Fractografía

El estudio de las superficies de fractura se dio a través del microscopio electrónico de barrido marca Leica modelo S440, en el cual las muestras requerían medir 5-7 mm de alto para su observación. Las técnicas que se emplearon fueron electrones secundarios y electrones retrodispersados a diferentes magnificaciones.

3.8 Microscopía de fuerza atómica

Con el fin de obtener los perfiles topográficos para observar la dispersión de precipitados de Mg_2Si y $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, presentes en la aleación, se utilizó la técnica de microscopía de fuerza atómica, con el microscopio marca Newport XY translation Stage modelo 401.

Para la realización de los barridos se requirió de la preparación de la muestra mediante las técnicas metalográficas ya descritas en el apartado

III.IV del presente capítulo. Las trayectorias del barrido se realizaron de manera longitudinal y transversal al espécimen.

3.9 Determinación del área de propagación de fractura por fatiga

El método que se utilizó para la determinación del porcentaje de área de propagación de fractura por fatiga utilizado para la grafica de esfuerzo vs área de propagación se realizó de la siguiente manera:

1. Se tomo una imagen del espécimen fracturado mediante la técnica del estereoscopio, se delimito la zona fracturada por fatiga y la zona fracturada por el esfuerzo de corte con ayuda del analizador de imágenes para posteriormente imprimir las imágenes.
2. La imagen del área de propagación de fractura una vez impresa se peso y posteriormente se recorto la imagen por la línea que delimita ambas zonas, la zona fracturada por el esfuerzo de corte y la fracturada por fatiga para pesarse por separado.
3. Con las diferencias en peso de las zonas y mediante la regla de tres simple, se determino el porcentaje de la zona fracturada por fatiga y la zona fracturada por el esfuerzo de corte.
4. Asumiendo que el área total fracturada es de 28.27 mm^2 , debido a que la fractura se da en el encuellamiento de la probeta y se tiene un diámetro de 6 mm, se utilizó la regla de tres simple para determinar el área de fractura por fatiga mediante la diferencia en el porcentaje de la zona fracturada por fatiga y la fracturada por el esfuerzo de corte.

4. CAPITULO

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Microestructura

La determinación del grano de la aleación 6061 T6 se realizó siguiendo la preparación metalografica descrita en el apartado 3.6 y la inmersión una solución de 190 (20)ml de agua destilada, 3 (20)ml ácido clorhídrico 32%, 5 (20)ml ácido nítrico 65% y 1 (5)ml ácido fluorhídrico 40%, (Keller). Las figuras 4.1 a y b fueron tomadas en el analizador de imágenes tipo Olympus PMG3 a 50x, en las cuales se observa la variación de tamaño de granos que presenta el material. [23] [24]

En la microestructura presentada por la aleación Al 6061 T6 se distinguen los precipitados de Mg_2Si (con una tonalidad negra) y de Fe_3SiAl_{12} (con un tono gris). Figura 4.2. Las partículas se encuentran siguiendo una aparente distribución lineal siguiendo la dirección de la extrusión. [14]

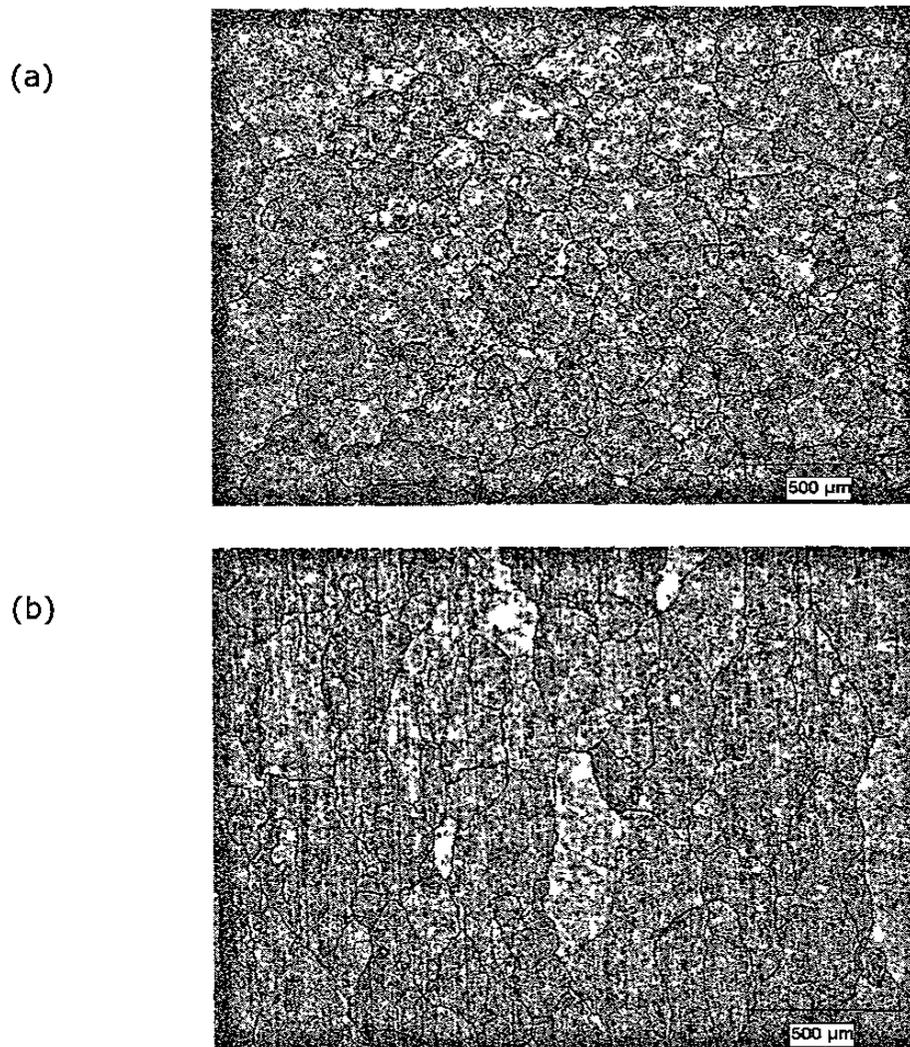


Figura 4.1. Grano de la aleación 6061 T6. a) Foto transversal de la barra extruída. b) Foto longitudinal de la barra extraída, con un ataque químico con Keller.

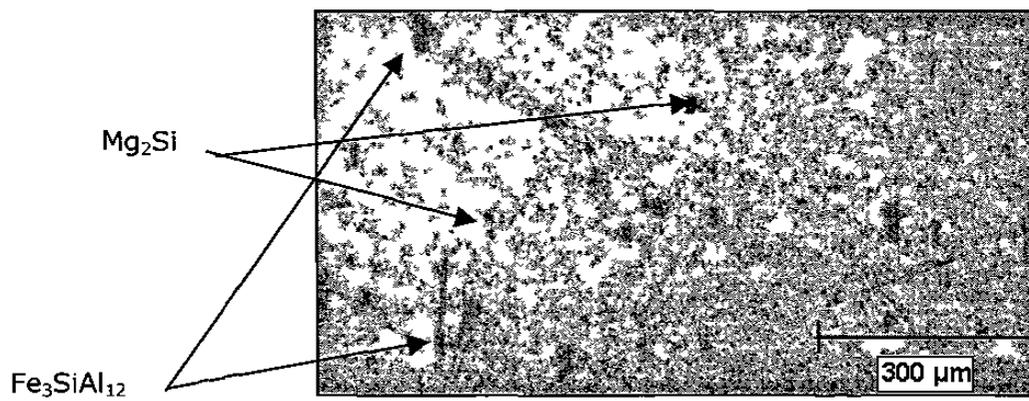


Figura 4.2. Fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el analizador de imágenes, sin aplicación de ataque química.

En las fotografías tomadas a los precipitados de la aleación 6061, figuras 4.3 (a) y 4.4 (a), se presentan las dimensiones de cada precipitado. Los espectros tomados a dichos precipitados se incluyen, con el fin de corroborar sus elementos, los precipitados de la figura 4.3 (a) son precipitados de Mg_2Si y los precipitados de la figura 4.4 (a) son precipitados de Fe_3SiAl_{12} .

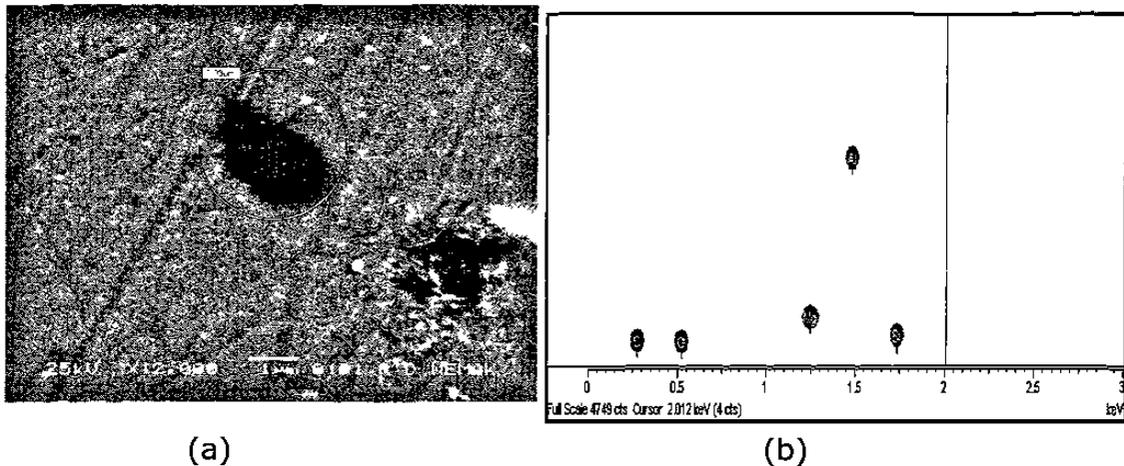


Figura 4.3. La imagen a), es una fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el SEM, sin aplicación de solución química, la imagen b), es el espectro tomado al precipitado.

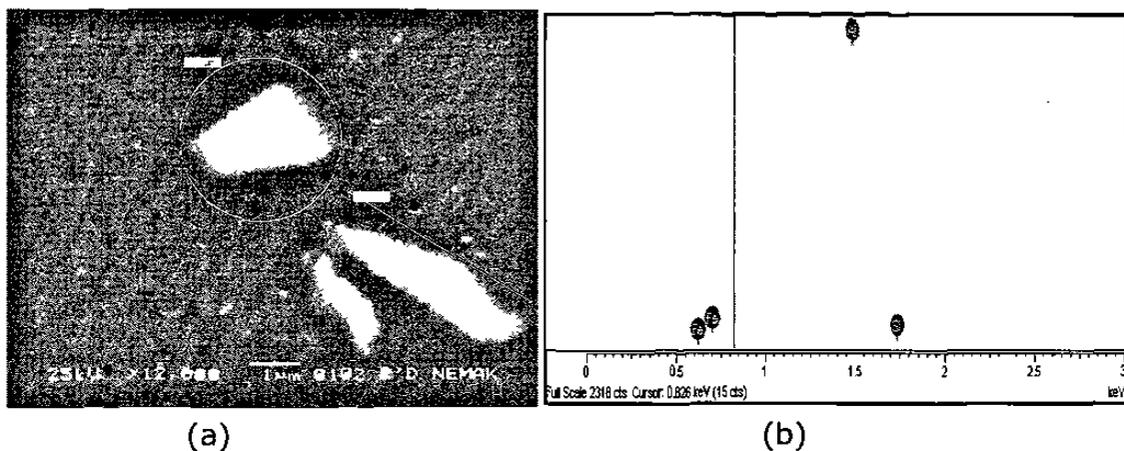


Figura 4.4. La imagen a), es una fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el SEM, sin aplicación de solución química, la imagen b), es el espectro tomado al precipitado.

4.2 Reporte del Análisis químico

Los resultados del análisis químico de las barras se reportan en la Tabla 4.1. Los cuales están dentro de los parámetros del análisis químico para la aleación 6061 T6, encontrados en la literatura. [2]

% Peso	% Si	% Mg	% Cu	% Fe	% Mn	% Zn	% Ti
Barra 1	0.699	0.852	0.207	0.357	0.029	0.026	0.024
Barra 2	0.810	0.851	0.210	0.351	0.029	0.026	0.024

% Peso	% Cr	% Sn	% Ni	% Pb	% Be	% Cd	% As
Barra 1	0.065	<0.001	0.001	0.001	0.0002	<0.001	0.0018
Barra 2	0.064	<0.001	0.001	0.001	0.002	<0.001	0.0016

ppm	Na	Sr	P	B	Ca	Sb	Bi	Al
Barra 1	51.831	2.057	11.48	22.0	42.496	139.7	<10.0	Balance
Barra 2	31.952	2.4421	11.03	20.5	31.377	153.9	<10.0	Balance

Tabla 4.1. Análisis químico de las barras.

4.3 Reporte de la Microdureza

Las mediciones de microdureza Vickers de las probetas para las pruebas de fatiga se presentan en la Tabla 4.2. Se obtuvieron 3 mediciones de cada probeta y se reporta la media obtenida, las pruebas se llevaron a cabo con una carga de 100 g durante 15 seg.

Los resultados de las pruebas de microdureza se encuentran dentro de los parámetros de microdureza para la aleación 6061 T6, reportados en la literatura, Tabla 4.2. [2]

No. Probeta	Dureza promedio (HV)	No. Probeta	Dureza promedio (HV)
1	110.3	9	110.8
2	109.6	10	109.2
3	111.0	11	111.6
4	110.8	12	112.0
5	111.1	13	109.0
6	110.8	14	112.7
7	110.5	15	111.3
8	111.6		

Tabla 4.2. Reporte de mediciones de microdureza Vickers, con una carga de 100 g durante 15 seg.

4.4 Reporte de las Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas se determinaron mediante pruebas de tensión que se realizaron a cinco especímenes maquinados de las barras de la aleación de aluminio, bajo el procedimiento descrito en el apartado 3.4. Los resultados de dichas pruebas se presentan en las Tablas 4.3 y 4.4 y figura 4.5.

Especímen	Módulo Elástico	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo máximo	Elongación plástica	Elongación total
	GPa	MPa	MPa	%	%
1	67.35	293.06	323.50	9.51	9.99
2	66.78	294.15	323.98	8.99	9.48
3	69.80	291.83	322.64	9.49	9.95
4	68.53	293.36	323.94	9.38	9.85
5	70.02	294.57	324.87	9.08	9.55

Tabla 4.3. Reporte de las propiedades mecánicas.

Espécimen	Módulo Elástico	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo máximo	Elongación total	Elongación plástica
n = 5	GPa	MPa	MPa	%	%
Promedio	68.50	293.39	323.79	9.76	9.29
Desv. estándar	1.44	1.06	0.81	0.23	0.24

Tabla 4.4. Tabla estadística de las propiedades mecánicas del material.

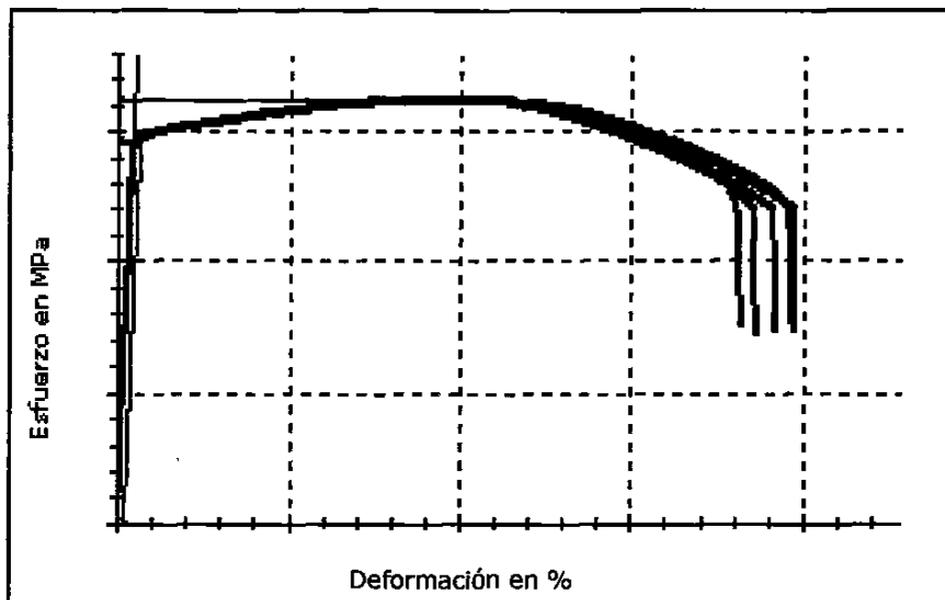


Figura 4.5. Cuerva de esfuerzo vs deformación de las cinco probetas ensayadas a tensión uniaxial para la determinación de las propiedades mecánicas.

4.5 Reporte de la prueba en escalón

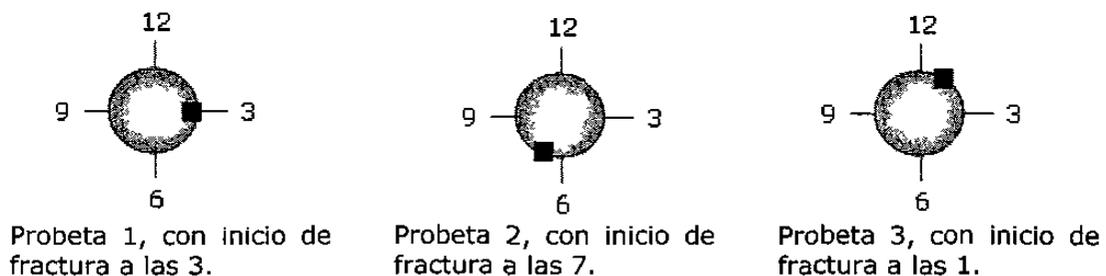
Las condiciones en las que se llevaron a cabo las pruebas de fatiga fueron a una frecuencia de 70 Hz y temperatura de 25° C. Las condiciones de las probetas fueron diámetro de 6 mm, con un área de 28.27 mm², carga completamente reversible ($R = -1$). En la Tabla 4.5 se resumen los resultados obtenidos por las pruebas de fatiga.

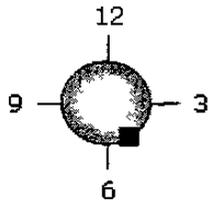
Los datos arrojados por la Tabla 4.5 determinan las propiedades de fatiga de la aleación Al 6061 T6. Se realizó el análisis de las pruebas de fatiga, de acuerdo al tipo escalón con una carga completamente reversible ($R = -1$) en forma de onda senoidal.

El inicio de zona de fractura de las probetas fracturadas por fatiga se reportan en los esquemas de la figura 4.6. En el cual el diagrama de reloj de las probetas que no fracturaron por fatiga se omite.

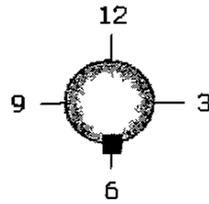
Probeta	Carga (+ / - N)	Esfuerzo reversible (\pm MPa)	Número de ciclos a la fractura ($\text{máx } 10^7$)	Área de propagación de fractura por fatiga (%)
1	5089	180	1,982,872	40.87
2	4806	170	1,807,507	47.40
3	4523	160	8,418,642	46.92
4	4241	150	10,000,000	0.000
5	4382	155	7,880,680	46.70
6	4241	150	4,218,301	49.00
7	4099	145	6,287,634	53.08
8	3958	140	10,000,000	0.000
9	4099	145	7,535,921	52.00
10	3958	140	8,787,030	53.00
11	3816	135	10,000,000	0.000
12	3958	140	10,000,000	0.000
13	4099	145	9,118,947	51.23
14	3958	140	10,000,000	0.000
15	4099	145	10,000,000	0.000

Tabla 4.5. Reporte del control de prueba. [25]

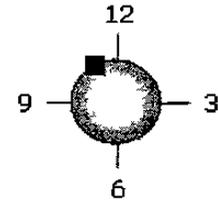




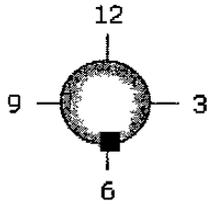
Probeta 5, con inicio de fractura a las 5.



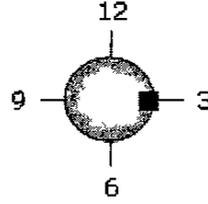
Probeta 6, con inicio de fractura a las 6.



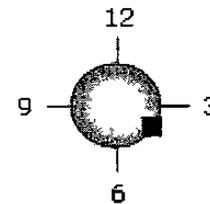
Probeta 7, con inicio de fractura a las 11.



Probeta 9, con inicio de fractura a las 6.



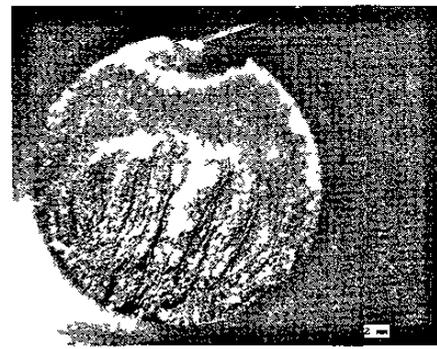
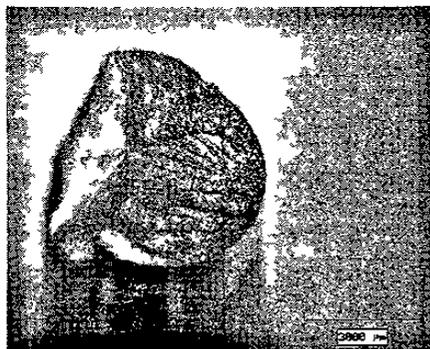
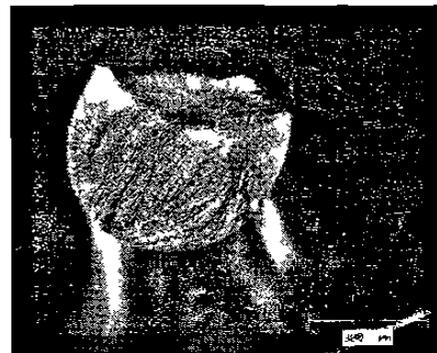
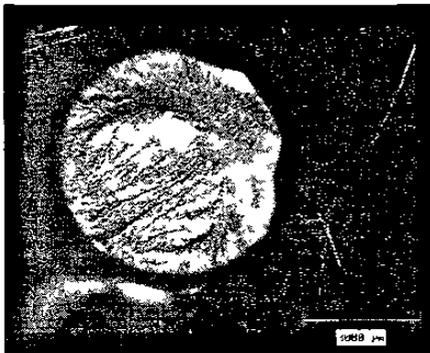
Probeta 10, con inicio de fractura a las 3.



Probeta 13, con inicio de fractura a las 4.

Figura 4.6. Diagramas de reloj para el control y reporte del inicio de fractura por fatiga de cada espécimen.

A continuación se presentan algunas imágenes tomadas con la técnica del estereoscopio figura 4.7.



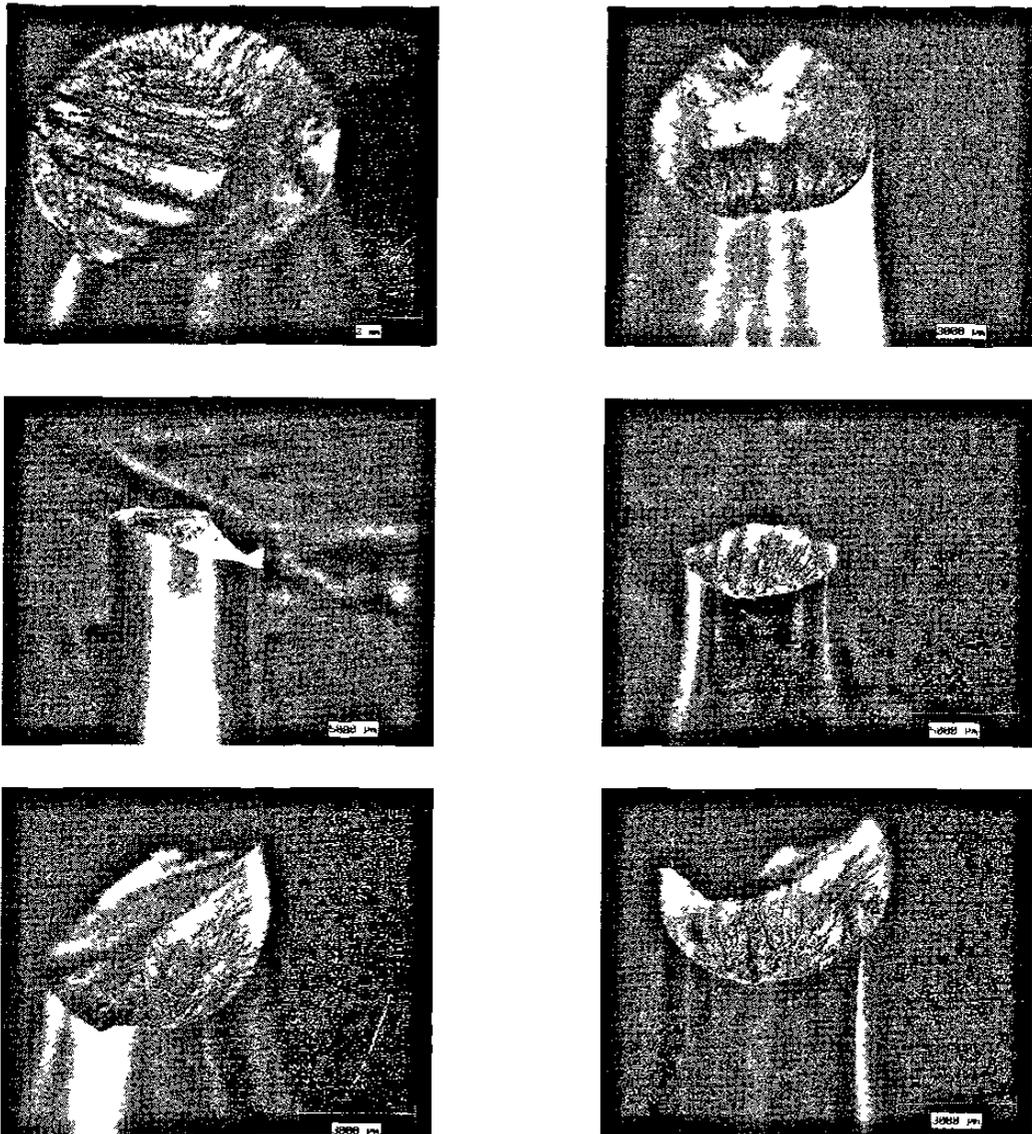


Figura 4.7 Imágenes de fracturas por fatiga de algunos especímenes obtenidas por la técnica de estereoscopio.

En el anexo B, se agregan las gráficas de esfuerzo vs deformación de las probetas que no registraron fractura en las pruebas de fatiga y que fueron sometidas a una carga constante con fines ilustrativos y no como una prueba de tensión debido a que no cumple con los parámetros de dimensiones y geometría estándar en la probeta que se requieren para las pruebas de tensión establecidas por la ASTM.

Se analizaron las probetas a las que se les aplicó la carga constante, detectándose solo en una de ellas una nucleación de grietas por fatiga. La probeta 4, sometida a 150 MPa y soportando 1×10^7 ciclos sin fractura catastrófica por fatiga fue a la que se le detectó tal nucleación de grietas, figura 4.8. Origen de la nucleación, según el diagrama de reloj, figura 4.9.

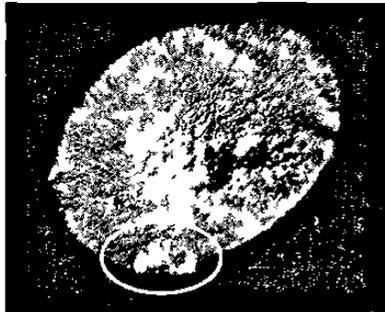


Figura 4.8. Imagen de la probeta 4, con una nucleación de grietas.

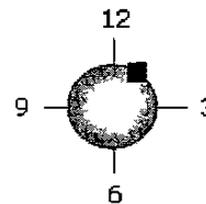


Figura 4.9. Probeta 4 con origen de nucleación de grietas a la 1.

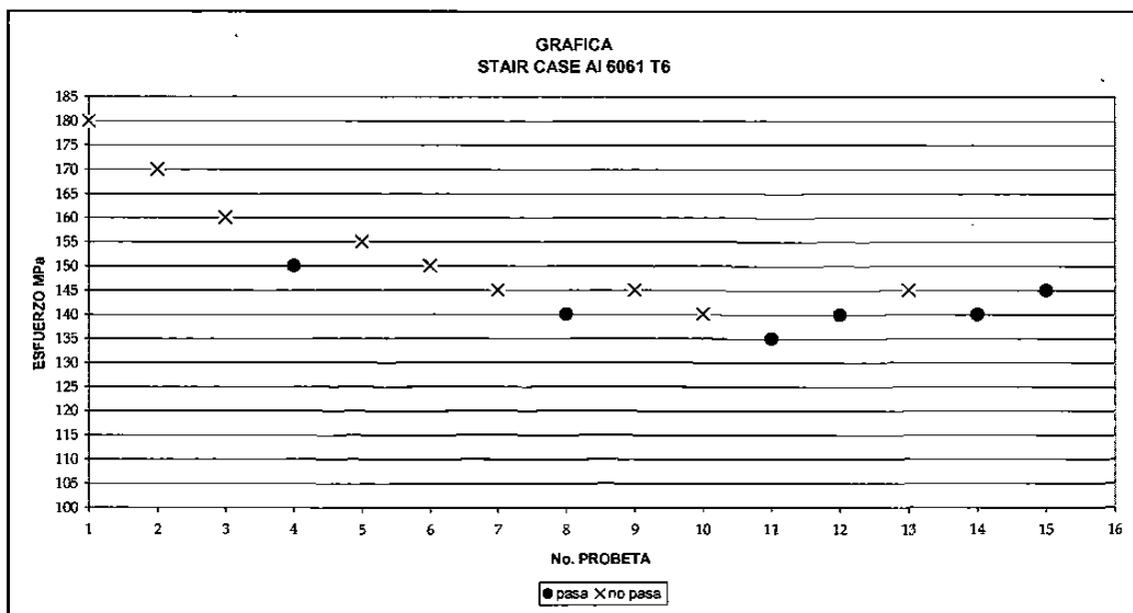


Figura 4.10. Gráfica de la prueba de escalón de la aleación Al 6061 T6.

Siguiendo con el método de escalón, de la grafica en la figura 4.10 se escoge el grupo de probetas con el valor mas bajo, en cantidad de probetas

ya sea de las probetas que fracturaron o las que no sufrieron fractura total para el uso de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo medio de fatiga} = S_0 + d \left(\frac{\sum iN_i}{n} + b \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Desviación estándar} = 1.62 * d(C + 0.029) \quad (4.2)$$

$$\text{Factor de convergencia } C = \frac{n * \sum i^2 N_i - (\sum iN_i)^2}{n^2} \quad (4.3)$$

C debe ser ≥ 0.30 para la validación de la desviación estándar.

Donde:

S_0 = Nivel de esfuerzo más bajo.

d = Tamaño de paso.

N_i = Número de probetas sin fractura o fracturadas de cada nivel de esfuerzo i , (Dependiendo con las que se trabajen).

i = 0 para el nivel de esfuerzo más bajo, 1 para el siguiente nivel, etc.

n = Número total de probetas fracturadas y sin fractura.

b = + 1/2 para probetas con fractura y -1/2 para probetas sin fractura.

C = Factor de convergencia.

En este caso se tomaron las probetas que no fracturaron, ya que son las menores en número. Por lo que utilizando los resultados de la tabla 4.6 se obtiene:

Esfuerzo medio de fatiga = 144.2 MPa

Desviación estándar = 7.4 MPa

Factor de convergencia $C = 0.89$ $C \geq 0.30$, para sea válida la desviación.

Esfuerzo	i	Ni	iNi	i ² Ni
150	3	1	3	9
145	2	1	2	4
140	1	3	3	3
135	0	1	0	0
Sin fractura		$\Sigma Ni = 6$	$\Sigma iNi=8$	$\Sigma i^2Ni=16$

Tabla 4.6. Tabla de cálculos realizados para la obtención del esfuerzo medio de fatiga.

Los resultados obtenidos por la prueba de escalón y por las ecuaciones (4.1) a (4.3), se grafican en la figura 4.11, siendo las marcas con puntos sólidos las probetas que sufrieron fractura por fatiga y las marcas con puntos claros las probetas no fracturaron. En la gráfica se observa una tendencia en la que a menor esfuerzo aplicado la probeta resiste una mayor cantidad de ciclos, observándose finalmente un límite de fatiga para 10^7 ciclos un esfuerzo de 144.2 MPa, con una desviación estándar de 7.4 MPa. También se puede observar que puede haber mejores resultados si las pruebas no se terminaran a 1×10^7 ciclos, es decir que se llevaran a cabo por lo menos a 2×10^7 ciclos, esto con el fin de tener mayor exactitud en la cantidad de ciclos que soporta el Al 6061 T6, con un esfuerzo de 142.2 MPa, recordando que las aleaciones de aluminio no presentan un verdadero límite de fatiga, sino que solo se caracteriza las propiedades de fatiga del material obteniendo la cantidad de ciclos que soporta el material a un determinado esfuerzo de fatiga.

De la relación entre número de ciclos a la falla contra el área de propagación (mm^2) y el esfuerzo aplicado (MPa) se observa la tendencia a que el número de ciclos se reduzca conforme el esfuerzo se incrementa y que el área de propagación se incremente conforme el número de ciclos aumenta, figura 4.12.

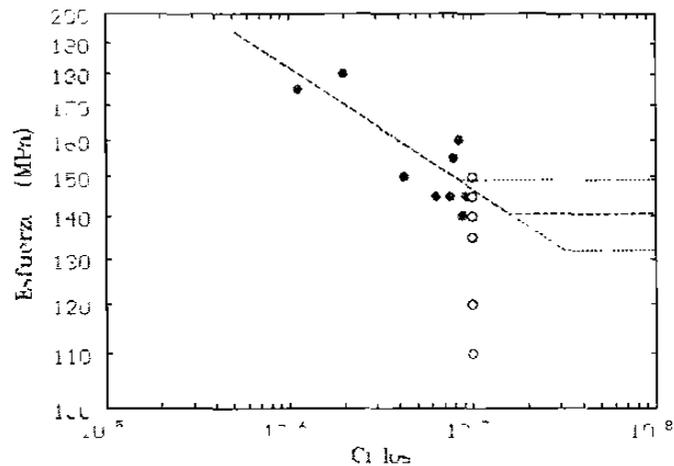


Figura 4.11. Gráfica de esfuerzo (MPa) vs número de ciclos. Los valores del límite de fatiga se grafican con una confianza del 66%.

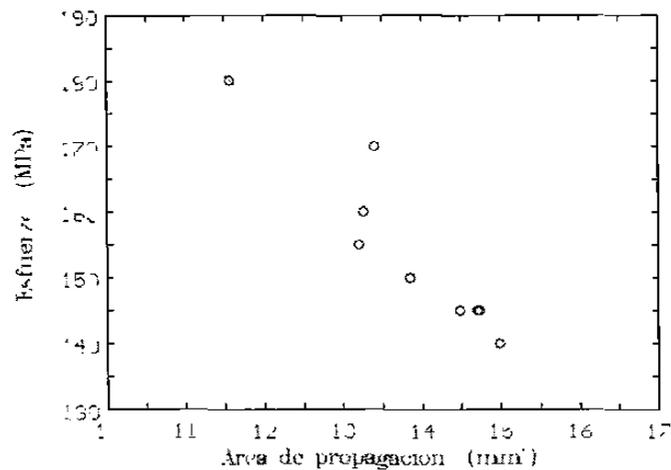


Figura 4.12. Gráfica de esfuerzo (MPa) y área de propagación (mm²) vs número de ciclos.

De la relación, entre área de propagación en fatiga (mm²) y el esfuerzo aplicado (MPa), figura 4.13, se observa una tendencia lineal, en la que a menor esfuerzo aplicado mayor será el área de propagación ocasionada por el proceso de fatiga. Para la elaboración de la gráfica solo se tomaron en cuenta las probetas que sufrieron fractura por fatiga.

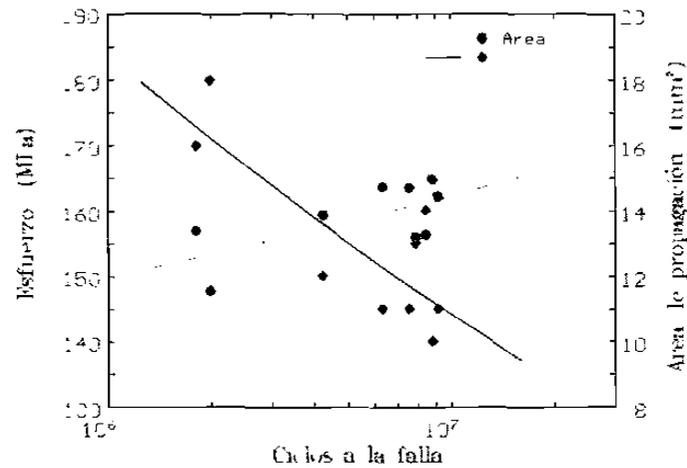


Figura 4.13. Gráfica de esfuerzo (MPa) vs área de propagación (mm²).

4.6 Determinación del factor de intensidad de esfuerzos

Para una placa infinita con un esfuerzo uniforme y una grieta central de tamaño $2a$, el factor de intensidad de esfuerzos esta dado por ecuación 4.4, figura 4.14 (a) y la ecuación para determinar el factor de intensidad de esfuerzos de una placa cuya grieta comienza en la superficie con un tamaño a , estará dada por ecuación 4.5, figura 4.14 (b).

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.4)$$

$$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.5)$$

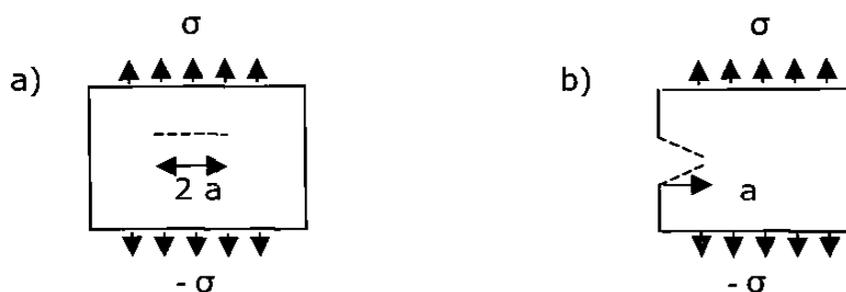


Figura 4.14. (a) Placa agrietada en el centro. (b) Placa con grieta en la superficie.

Número de probeta	$K = 1.12\sigma\sqrt{na}$ MPa(mm ^{1/2})	σ MPa	a mm	\sqrt{na}
4	581.6945	150	3.354	3.246
5	607.3439	155	3.896	3.499
7	552.2610	145	3.681	3.401
13	545.5438	145	3.592	3.359
1	623.6356	180	3.046	3.093
2	611.1011	170	3.279	3.21

Tabla 4.7. Factor de intensidad de esfuerzos K, con el esfuerzo σ , aparente.

En la Tabla 4.7 se determinó el factor de intensidad de esfuerzos K, con el esfuerzo σ aparente, es decir tomando el valor de esfuerzo al que fue sometida la probeta en la prueba de fatiga y el valor de a, el área de propagación de grieta por fatiga con origen en la superficie (figura 4.9. b), obteniendo de esta manera un valor promedio de $K = 586 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Para la Tabla 4.7, el propósito de determinar el factor de intensidad de esfuerzos K con el último esfuerzo, fue primero para detectar cual fue el último esfuerzo al que fue sometido el espécimen, es decir, cuando la fractura pasó de ser una propagación por fatiga a una por esfuerzo de corte, tomando como el valor de a, el área de propagación de grieta por fatiga con origen en la superficie (figura 4.11. b). Comparando con los resultados de las pruebas de tensión Tabla 4.3 y 4.4, se observa que el esfuerzo máximo que soporto el material en las pruebas de tensión es similar al determinado en la tabla 4.8.

Número de probeta	$K = 1.12\sigma\sqrt{na}$ MPa(mm ^{1/2})	σ MPa	a mm	\sqrt{na}
4	1095.7671	301.4	3.354	3.246
5	1139.4554	290.8	3.896	3.499
7	1176.5064	308.9	3.681	3.401
13	1118.8347	297.4	3.592	3.359
1	1054.6371	304.4	3.046	3.093
2	1161.8111	323.2	3.279	3.21

Tabla 4.8. Factor de intensidad de esfuerzos K, con el último esfuerzo σ .

El factor de intensidad de esfuerzo K , reportado en la literatura para el material Al 6061 T6 es de $K = 903 \text{ MPa m}^{1/2}$, y en promedio del factor de intensidad de esfuerzos de la Tabla 4.7 es $K = 1100 \text{ MPa m}^{1/2}$ por lo que la diferencia puede ser atribuida a la orientación del material y precipitados y otras discontinuidades presentes en el material.

4.7 Fractografía

Los especímenes fracturados por fatiga y analizados en el microscopio electrónico de barrido presentan el tipo demostrado en la fractura por fatiga, figura 4.15. (a) y (b). En estas imágenes se puede observar el avance de grieta ocasionado por el proceso de fatiga en la que se identifican diversas zonas. La zona de propagación de las grietas por fatiga se identifican por una superficie de apariencia lisa, plana, con pocas líneas visibles, el límite de esta zona se define por una línea que marca la propagación catastrófica de la grieta, una vez que alcanzó un tamaño crítico.

En la imagen 4.15 (c), se hace un acercamiento a la zona de inicio de fractura, en la que se observa en el borde de la superficie diminutas grietas con orientación aproximada de 45° , lo cual las definen como grietas por esfuerzos cortantes.

En la imagen 4.15 (d), la probeta se coloca de perfil, en donde se alcanza a apreciar que al término de la propagación de grietas por fatiga la fractura catastrófica se lleva a cabo por corte y se logra distinguir una inclinación de alrededor de 45° , característica de las fracturas por esfuerzos de corte.

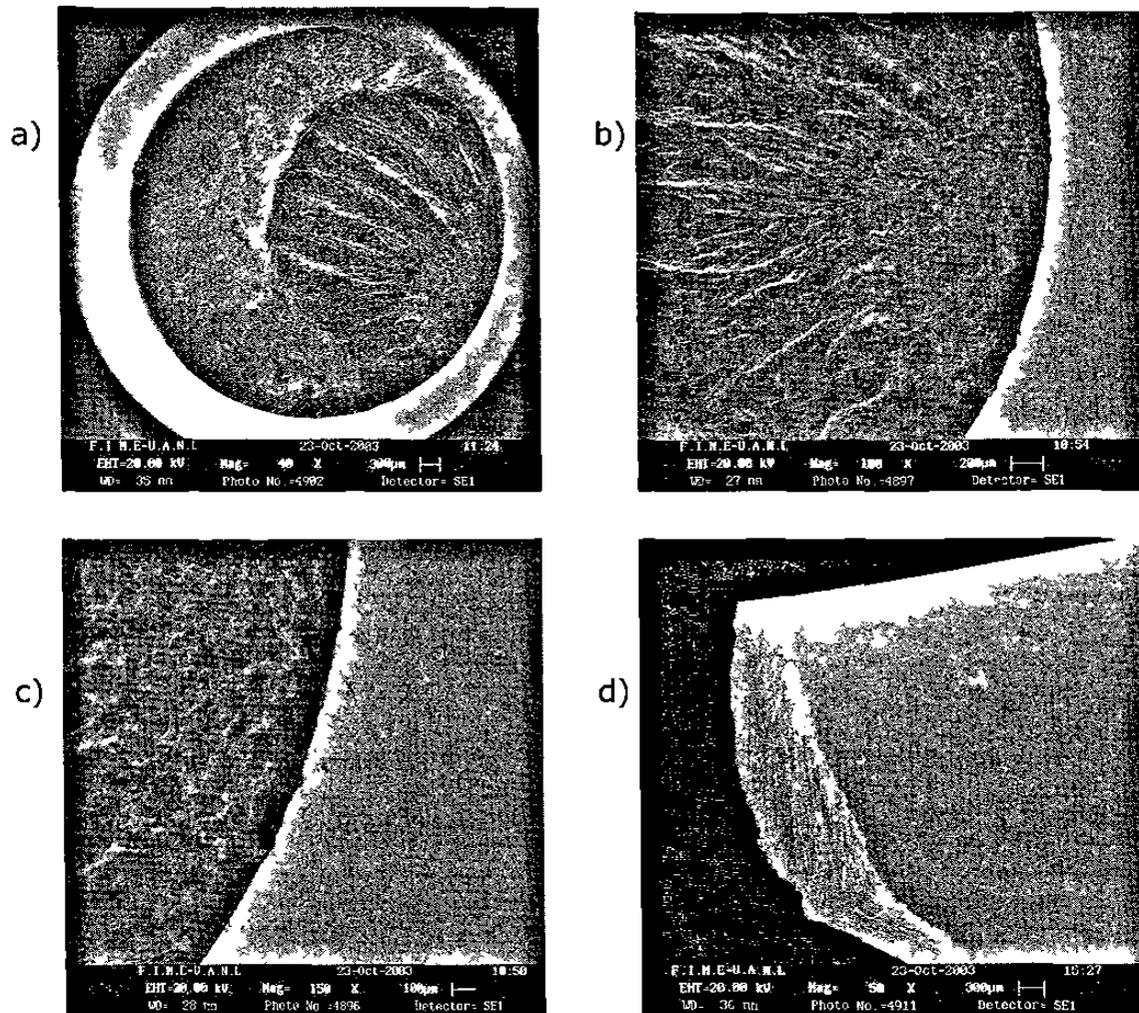
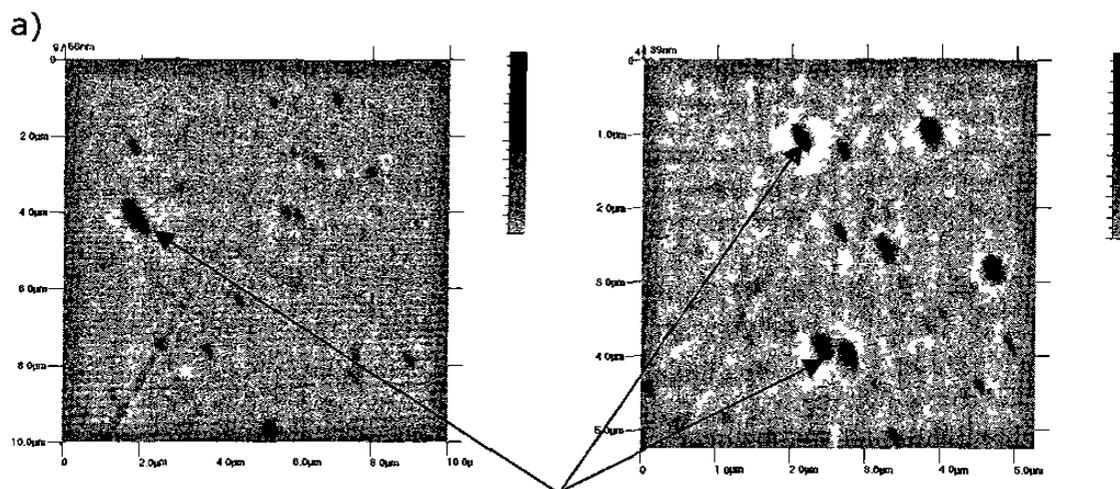


Figura 4.15. Imágenes tomadas en el SEM.

4.8 Microscopia de fuerza atómica

El análisis de las imágenes obtenidas en el microscopio de fuerza atómica (MFA), indica un alineamiento u orientación preferencial de los precipitados que presentan una apariencia tipo hojuela, figura 4.16 (a). En la figura 4.16 (b) se muestra las dimensiones el espesor de los precipitados.

150053



Precipitados deformados en dirección de la extrusión

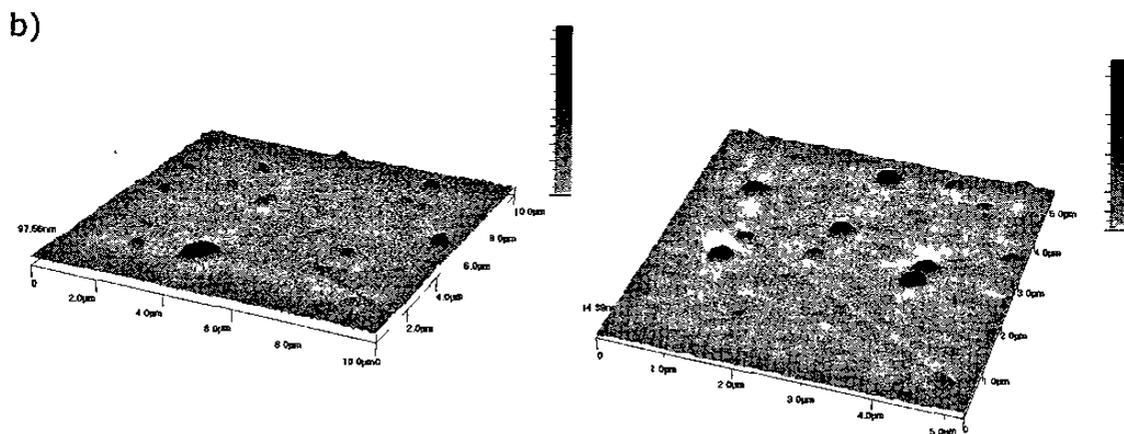


Figura 4.16. Imágenes topográficas tomadas en el MFA.

Las zonas más oscuras son las partes más altas de la muestra. Ambas figuras 4.16 a y b, confirman la aparente distribución de precipitados detectado en el análisis de la microestructura (Figura 4.2), lo cual puede ser la causa de que las superficies de las grietas catastróficas sean del tipo bisel, inclinadas a 45° con respecto a la dirección de la carga.

V. CAPITULO

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

V.I Conclusiones

- El diagrama de reloj utilizado para el control de inicio de fatiga para los ensayos reporta una variación de lugares de inicio de fractura de cada espécimen, por lo que se determina que la máquina se encuentra alineada correctamente.
- En el análisis de las fracturas en el microscopio electrónico de barrido (SEM) se aprecian las tres zonas reportadas en la literatura como propagaciones de grietas por fatiga.

- Por el punto anterior se estima que la máquina se encuentra en condiciones de operación correctas para estas pruebas sin intervención de algún otro fenómeno extraordinario que afecte su funcionamiento.
- Las propiedades de fatiga, las propiedades mecánicas, el análisis microestructural y las fracturas por fatiga analizadas con diferentes técnicas coinciden con varios reportados en la literatura, por lo que la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto se considera aceptable.
- La orientación y distribución preferencial que presentaron los precipitados es tomado como un factor que influye en los valores obtenidos ya que actúan como concentradores de esfuerzos y presentándose en la propagación de grieta por fatiga un comportamiento de fractura intergranular con estrías.
- El valor del factor de intensidad de esfuerzo K , encontrado es el referente a la etapa de falla final K_c , ya que el valor de la longitud de grieta a , tomado fue el toda la longitud de grieta por fatiga y cuyo valor es muy cercano al reportado en la literatura.
- El objetivo este proyecto fue logrado ya que se determino una metodología a seguir para el estudio de las pruebas de fatiga en una aleación de aluminio, metodología que será utilizada para el estudio de las pruebas de fatiga en Nemak.

V.II Recomendaciones

- Las pruebas con 1×10^7 millones de ciclos para este material no son suficientes, para tener un valor más acertado de esfuerzo de fatiga es recomendable llevarlo hasta 2×10^7 ciclos como mínimo o inclusive hasta su fractura total por fatiga.
- Diseñar una prueba de tensión controlada para las probetas que no son fracturadas por fatiga y someterlas a ésta, con el fin de que los resultados que se obtengan puedan ser tomados en cuenta para un análisis y determinar o cuantificar si existe, endurecimiento por deformación.
- Desarrollar pruebas variando las condiciones ambientales tales como alta temperatura, ambiente corrosivo, acabado superficial con el fin de ver la variación del límite de fatiga en diferentes condiciones.
- En el estudio de la propagación de grietas por fatiga, se puede desarrollar una serie de pruebas de propagación de grietas, ensayando un espécimen previamente agrietado con el fin de registrar el valor en longitud de dichas grietas e ir observando y midiendo su crecimiento a través de cierta cantidad de ciclos, para de esta manera obtener la propagación de grietas (da/dN) en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos K , con el propósito de predecir la vida en fatiga y la investigación de los mecanismos de fatiga entre otros.
- Las pruebas se realizaron bajo el control de carga, para futuras investigaciones, también se puede evaluar en la probabilidad de controlar los ensayos mediante deformación (mediante el uso de strain gages), con el fin de comparar los resultados que se tienen

mediante el control de carga y analizar si existe una variación entre ellos.

- Para lograr una mayor confiabilidad en los resultados de las pruebas de fatiga es recomendable realizar una mayor cantidad de ensayos por cada prueba o variables. La cantidad de ensayos puede oscilar alrededor de los 30 ensayos por cada prueba de escalón.

ANEXO A

A. Método de operación de la maquina MTS 810 para pruebas de fatiga. [16][17][26]

I. Encendido del sistema hidráulico de la máquina MTS 810.

- Girar la perilla en contra de las manecillas del reloj hasta la posición 1.
- Observar que los botones se encuentren iluminados.
- Presionar el botón Reset de color negro.
- Observar que los botones se encuentren apagados, sólo el de Power (color verde) debe permanecer iluminado. En el caso de que otro botón se encuentre iluminado, contactar al proveedor del equipo o acudir al departamento de mantenimiento para realizar el mantenimiento, ya que corresponde a una señal de alerta (Fig. A.1).
- Verificar que el Servidor TestStar IIs tenga iluminado de color verde el botón Power, en caso de que el botón Service se encuentre iluminado de color ámbar verificar las conexiones de equipo (Fig. A.2).

II. Encender la PC

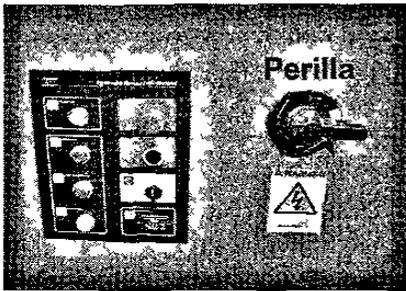


Figura A.1. Señal de alerta.

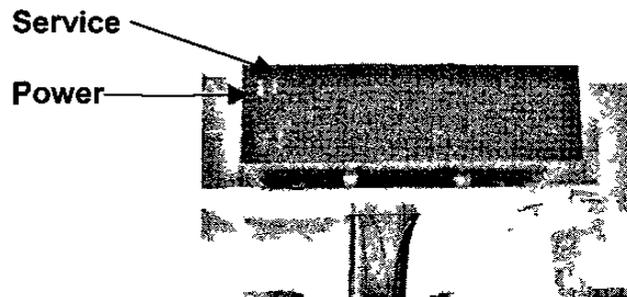


Figura A.2. Servidor TestStar IIs.

III. Formas de acceder al programa

- Se puede acceder al programa Station Manager con un doble clic en el ícono que se encuentra en el escritorio (Fig. A.3).

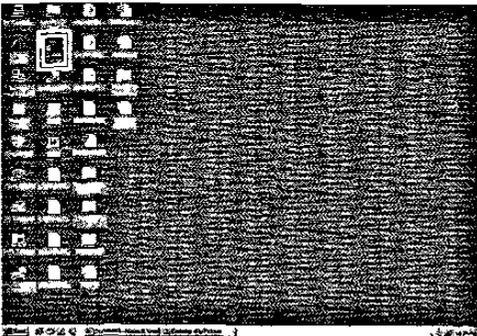


Figura A.3. Pantalla del escritorio.

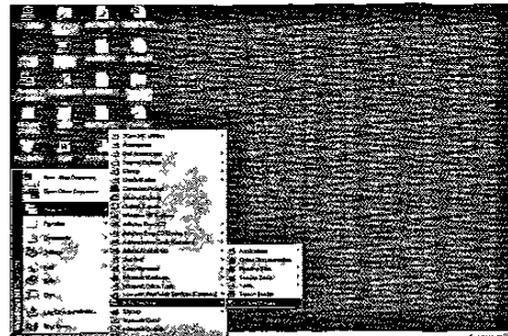


Figura A.4. Pantalla del escritorio.

- En el caso de que el ícono no se encuentre en el escritorio otra manera de acceder al programa es (Fig. A.4): Start/ Programs/MTS/Station Manager.
- Se despliegan las siguientes ventanas (Fig. A.5):
- Seleccionar el archivo Basic.cfg de la carpeta config en la ventana Open Station, al hacer esto, se despliega en el comando Parameter Set, los archivos contenidos en dicha carpeta y se seleccionará la opción Fatiga 70Hz con un doble clic (Fig. A.6).

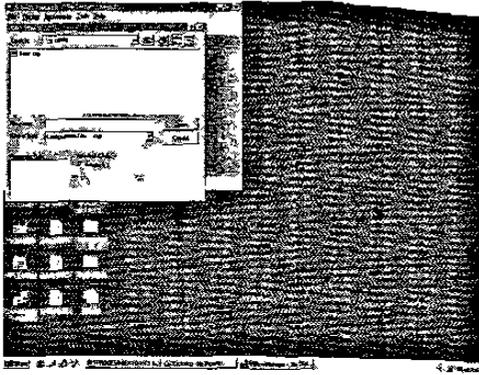


Figura A.5. Pantalla del escritorio.

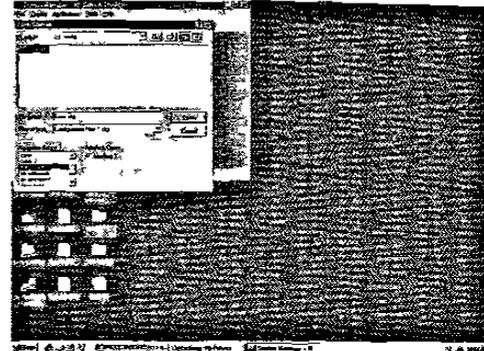


Figura A.6. Pantalla del escritorio.

IV. Inicio del Programa

Al seleccionar el archivo Fatiga 70 Hz, se despliegan las siguientes ventanas (Fig. A.7): Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70Hz>, Scope 1 <Basic.cfg>, Meters 1 <Basic.cfg>

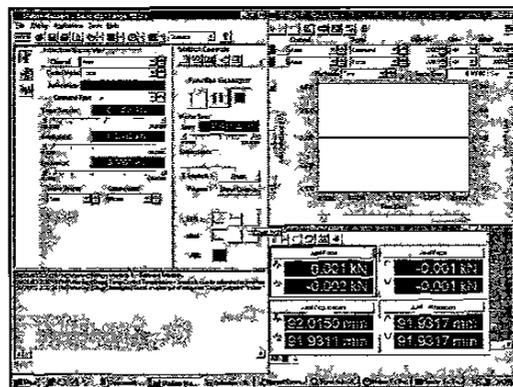


Figura A.7. Ventana del Station Manager.

- Si ocurre el caso de que no se despliegan las dos últimas ventanas, acceder al menú y en el comando Display, seleccionar Meters y Scope. Ventana: Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70Hz>.
- En la ventana los íconos que se encuentran del lado izquierdo corresponden a (Fig. A.8):

Function Genera Auto T External Command MPT 

Figura A.8. Íconos de la ventana : Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70Hz>.

- Los parámetros a controlar dentro de Function Generator son los siguientes (Fig. A.9):

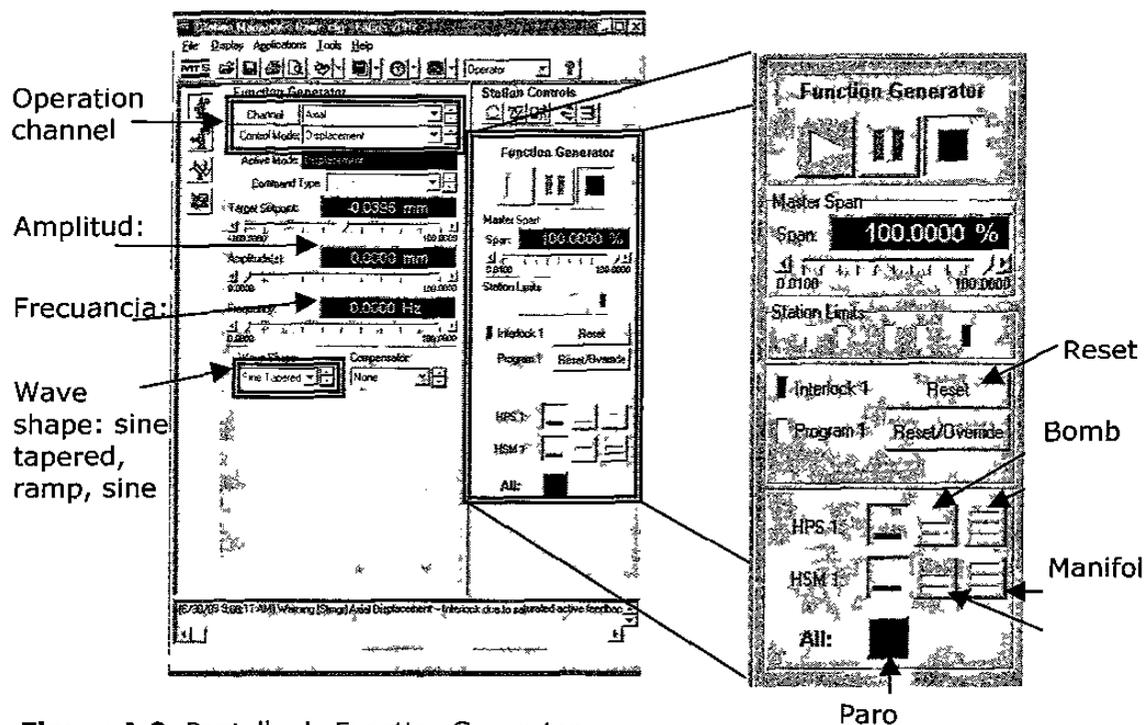


Figura A.9. Pantalla de Function Generator.

- Se encenderá el sistema hidráulico mediante el encendido de la bomba de la siguiente manera:
 1. Verificar que los paros de emergencia (Paro portátil, Paro de la bomba y Paro del tablero) estén desactivados.

2. Observar que el Interlock 1 no se encuentre marcado de color rojo. Si el Interlock 1 está marcado con rojo, presionar Reset hasta eliminar el marcado.
3. Presionar en HPS 1; Power Low, para que el aceite empiece a circular, enseguida presionar Power High para que esté a su máxima potencia el sistema hidráulico.
4. Presionar en HSM 1; Power Low, para mover las mordazas lentamente, enseguida presionar Power High para que esté a su máxima potencia el desplazamiento de las mordazas.
5. Sin colocar la probeta, asignarle valores en los parámetros de Amplitud (3-5 mm) y Frecuencia (10 Hz) (Fig. A.9) con el fin de que el aceite empiece a circular en el sistema hasta que se establezca la temperatura en un valor de 42° C – 47° C (observar la secuencia de las fotografías. Fig. A.10).

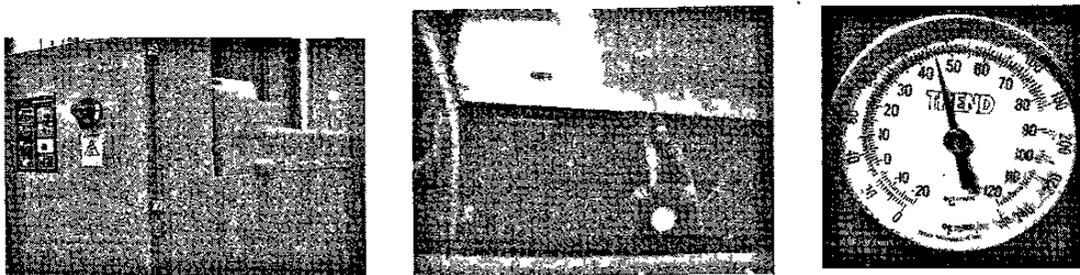


Figura A.10. Secuencia de las fotografías para el registro de temperatura.

6. Antes de empezar la prueba, checar la temperatura del agua de enfriamiento (<21 °C) a la entrada y avisar al encargado del área de sopladoras de CDT el tiempo de prueba. (Fig. A.11.).
7. Accionar el Paro de la bomba (Fig. A.9), Paro portátil y el Paro del tablero.

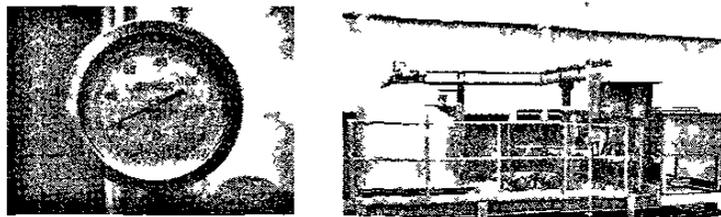


Figura A.11. Lugares en donde se debe checar la temperatura.

V.Colocación de la Probeta de Fatiga

1. Colocar la probeta en la mordaza inferior (Fig. A.12).

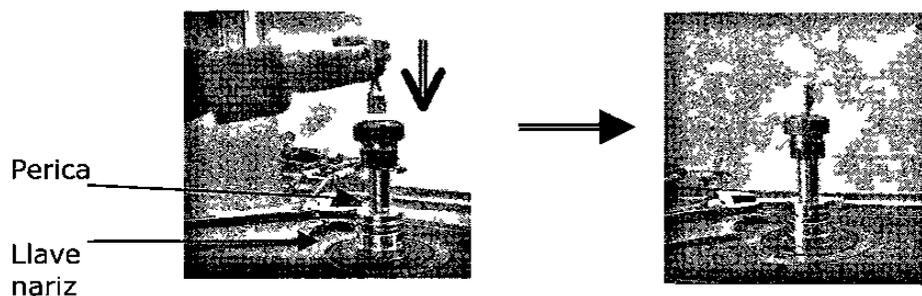
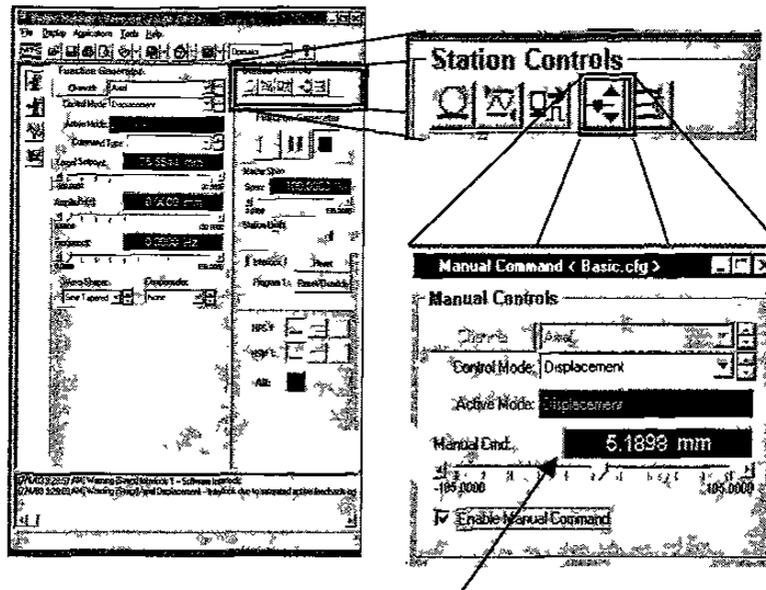


Figura A.12. Colocación de la probeta.

2. Dentro de la ventana de Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70 Hz>, en el área de Station Control, activar la ventana Manual Command<Basic.cfg> y habilitar los parámetros observados en la Fig.A.13.
3. Cambiar el valor de distancia que hay entre la probeta y la mordaza superior, hasta un punto donde sea posible introducir manualmente la probeta a dicha mordaza, (Dichas variaciones son mediante el Manual Comand).

4. Subir el cabezal inferior hasta que entre las mordazas quede visible el inicio del cuello de la probeta (Fig. A.14).



Comando para la variación de distancia en forma manual. (Punto 3)

Figura A.13. Ventana de Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70 Hz>.

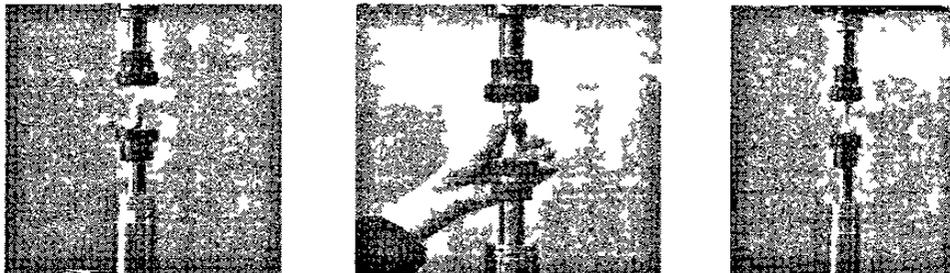


Figura A.14. Secuencia de colocación de probeta.

5. Apretar firmemente la mordaza inferior utilizando la llave nariz, la llave perica y el tubo palanca (Fig. A.15).
6. Realizar las mismas acciones para la mordaza superior (Fig. A.16).

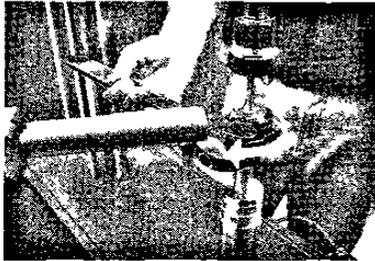


Figura A.15. Sujeción de probeta inferior.

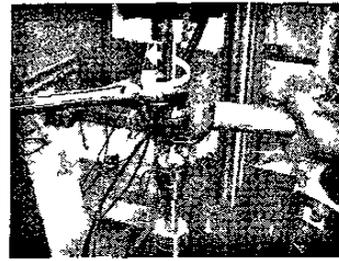


Figura A.16. Sujeción de probeta superior.

VI. Alta de parámetros en el Software

- Los parámetros a controlar dentro de MPT son los siguientes (Volver sección IV para recordar):
1. Asignarle el nombre correspondiente a la prueba de fatiga en el recuadro de Espécimen (Fig. A.17).

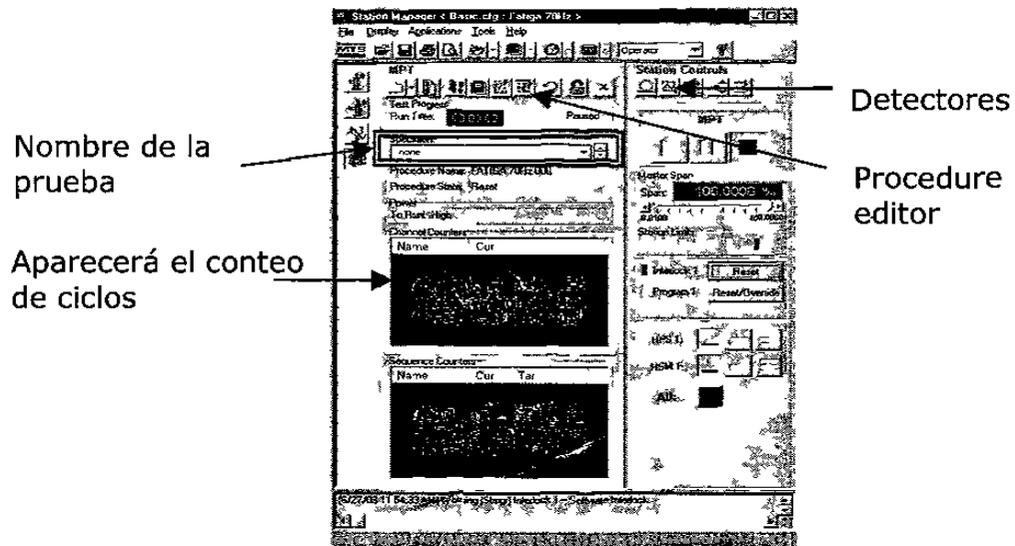


Figura A.17. Alta de parámetros en el Software.

2. En el comando Procedure Editor se asignan los parámetros reales de fuerza y desplazamiento que le serán aplicados a la probeta (Dichos parámetros son los especificados en los recuadros, Fig. A.18).

- En el caso de que no aparezcan las ventanas mostradas, darle doble clic al icono correspondiente.

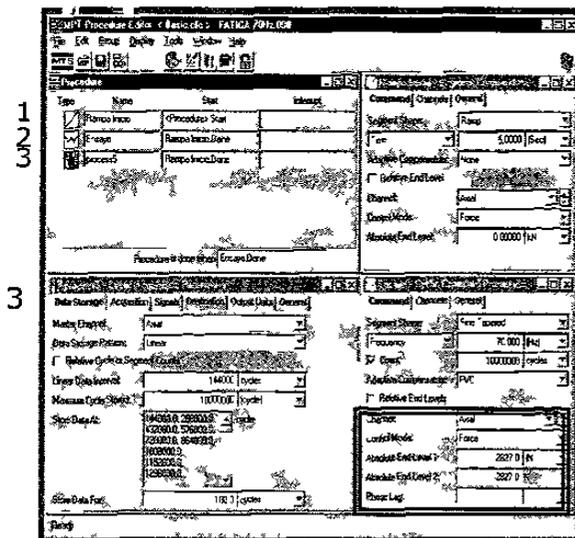


Figura A.18. Asignación de los parámetros reales de fuerza y desplazamiento.

Introducir los valores de fuerza, correspondientes el esfuerzo según la tabla A.1

Tabla de Esfuerzo/Carga para probeta "Hourglass"			
Diametro (mm)	Area (mm ²)	Stress (Mpa)	Fuerza (N)
6	28.27	160	4524
6	28.27	145	4100
6	28.27	135	3817
6	28.27	125	3534

Tabla A.1. De esfuerzo/carga para probetas hourglass

- En el comando Detector, se asignan los límites de fuerza y desplazamiento que le serán aplicados a la probeta (Fig. A.19).
 - El Desplazamiento Axial, será entre el rango de 3 - 5 mm, con el fin de que si la probeta falla, se detenga en ese límite.
 - La Fuerza Axial será asignada dependiendo del esfuerzo, al cual será sometida la probeta ver la tabla A.1. Ventana: Scope 1 <Basic.cfg>.
 - En esta ventana en la columna de Signal se deben de elegir el parámetro de fuerza (Fig.A.20). Ventana: Meters 1 <Basic.cfg>.
 - En esta ventana se observan los cambios de fuerza y desplazamiento medidos cada instante (Fig. A.21).

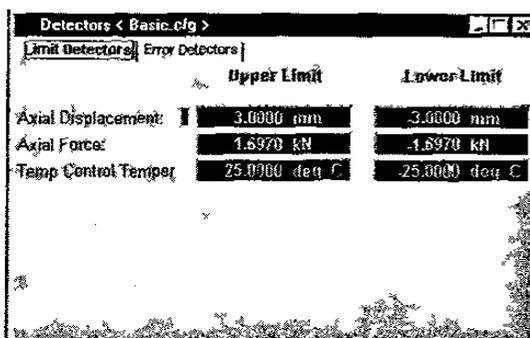


Figura A.19. Asignación de los límites de fuerza y desplazamiento que le serán aplicados a la probeta

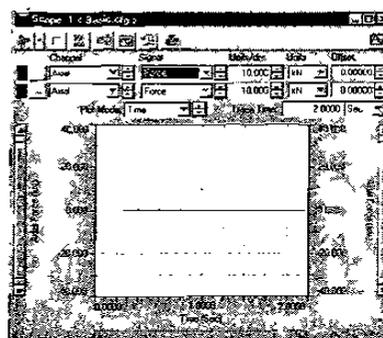


Figura A.20. Elección de los parámetros de fuerza.

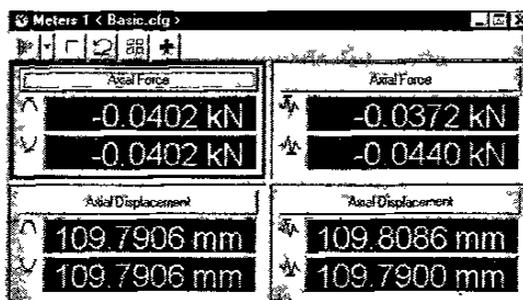


Figura A.21. Ventana donde se observan los cambios de fuerza y desplazamiento medidos cada instante.

VII. Ciclo de Prueba de Fatiga

1. Inicio de la Prueba: Una vez realizado todo lo anterior, el inicio a la prueba de fatiga se da presionando Program Run en la ventana Station Manager<Basic.cfg: 70Hz> (Fig. A.22).
2. Fin de la Prueba: La prueba de fatiga puede finalizar por dos casos:
 - A. Que la probeta halla fallado y no se cumplió el total de ciclos de fatiga que se había programado.

B. Que se terminaron los ciclos de fatiga programados y la probeta no falló.

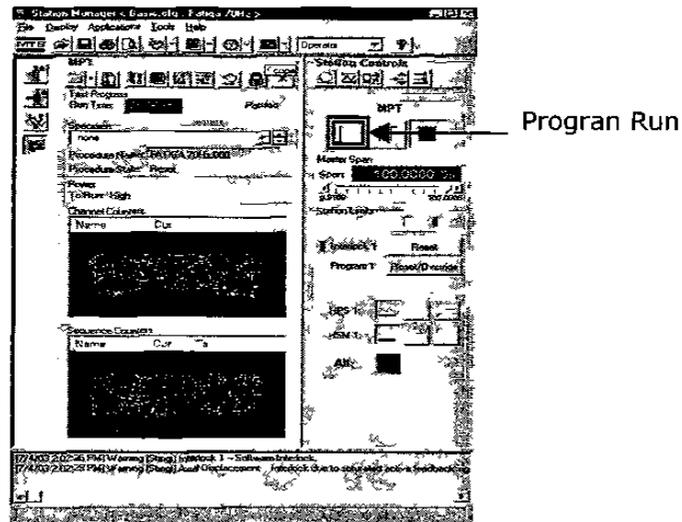


Figura A.22. Ventana Station Manager<Basic.cfg: 70Hz>.

Para el caso **A**, el retiro de la probeta se hará de la siguiente manera: Cuando la probeta ha fallado y se han anotado los valores deseados, se hará el retiro de la probeta. Primero se desplazará el cabezal inferior hacia abajo, de manera que quede espacio suficiente para maniobrar con las herramientas (Fig. A.23).

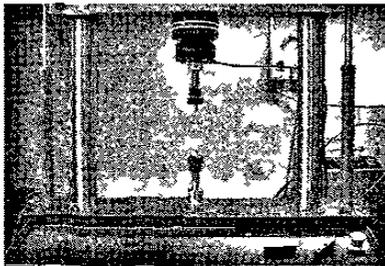


Figura A.23. Desplazamiento del cabezal.

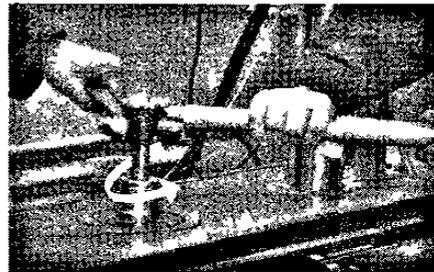


Figura A.24. Retiro de la probeta inferior.

- De manera indistinta (mordaza superior o inferior) se procede a retirar la probeta de la mordaza, empezando en esta ocasión por la probeta

inferior. Aflojar cuidadosamente la mordaza inferior utilizando la llave nariz, la llave perica y el tubo palanca (Fig A.24).

- De igual manera desapretar la mordaza superior (Fig. A.25).

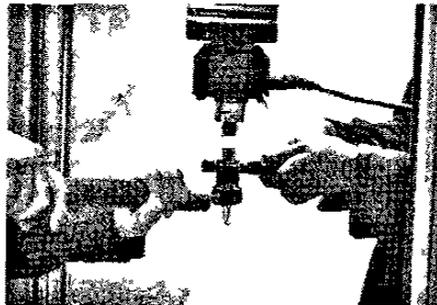


Figura A.25. Retiro de la probeta superior.

Para el caso **B**, el retiro de la probeta se hará de la siguiente manera, cuando los ciclos de fatiga han concluido y se han anotado los valores deseados, posteriormente se hará el retiro de la probeta. En esta ocasión se deberá de aflojar primero la mordaza inferior, con la finalidad de no dañar la celda de carga. El desajuste de la mordaza es similar a la figura A.24. Se deberá tener especial cuidado, ya que no habrá mucho espacio para maniobrar.

Enseguida se retirará la probeta de la mordaza superior, se podrá desplazar primera la mordaza inferior hacia abajo, para tener mas espacio. El aflojar es similar a la figura A.25.

VIII. Apagado del equipo

Una vez terminada la prueba o pruebas cerrar el programa Station Manager y proceder a apagar el sistema hidráulico girando la perilla a favor de las manecillas del reloj (Fig. A.26).

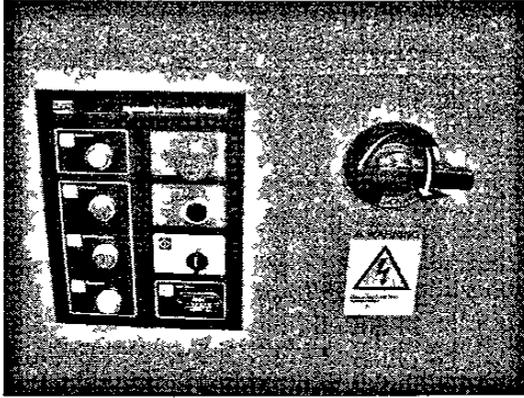
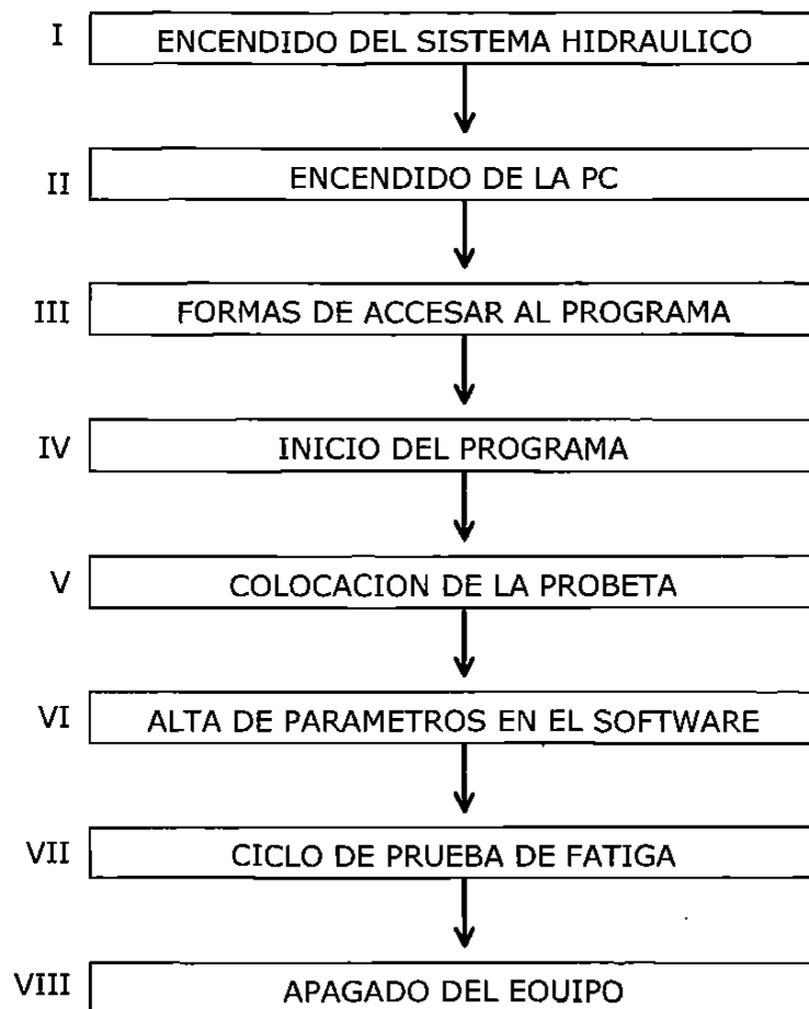


Figura A.26. Apagado del sistema hidráulico.

IX. Diagrama del método de operación de la maquina de fatiga MTS 810



ANEXO B

A continuación se presentan las graficas de esfuerzo vs deformación obtenidas de las pruebas de tensión realizadas a las probetas que no tuvieron fractura por fatiga al concluir el ensayo. Las graficas solo se muestran con fines ilustrativos, figura B.1 y B.2.

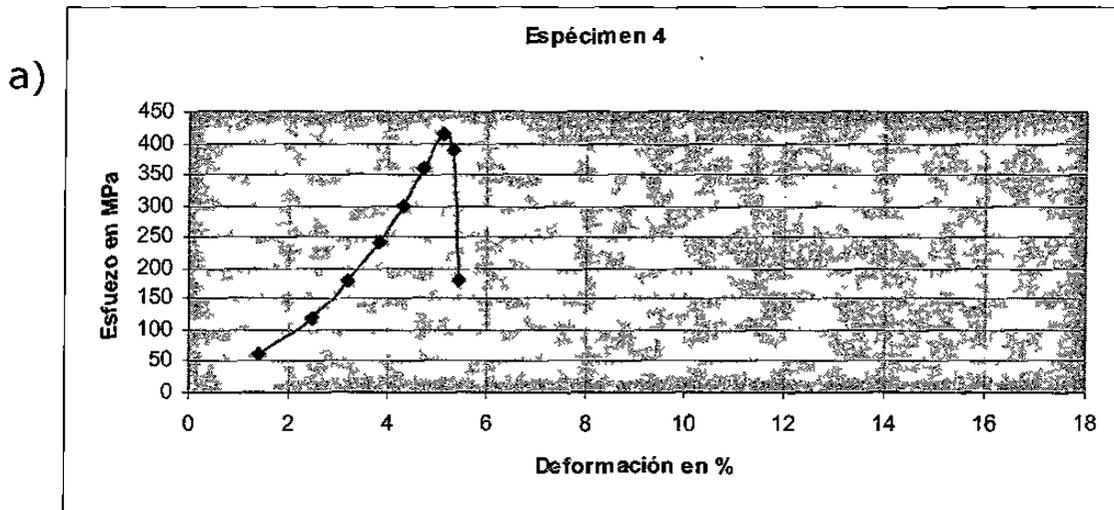


Figura B.1. Gráficas de aplicación de carga a probetas que no fracturaron por fatiga, (a) espécimen 4.

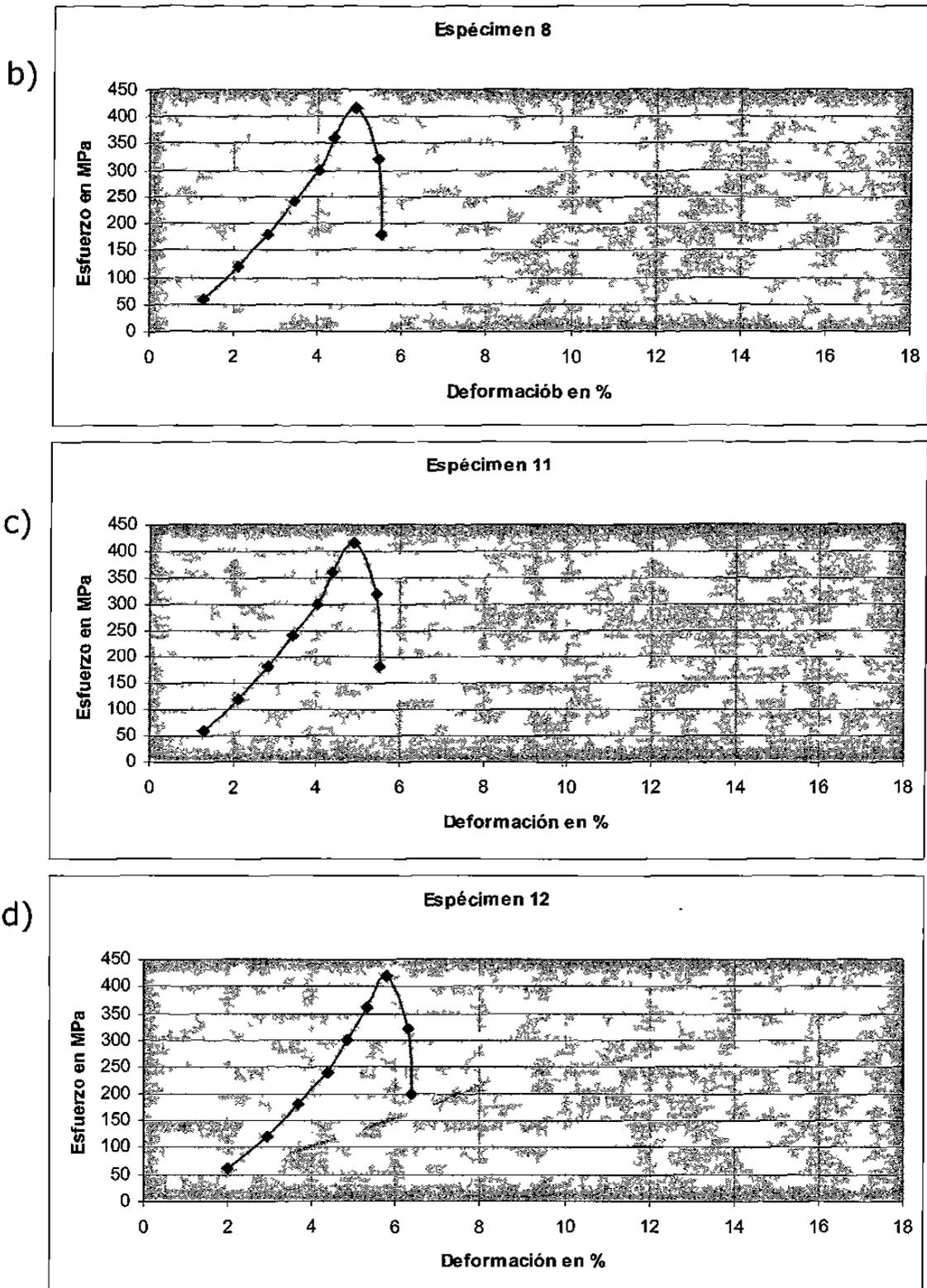
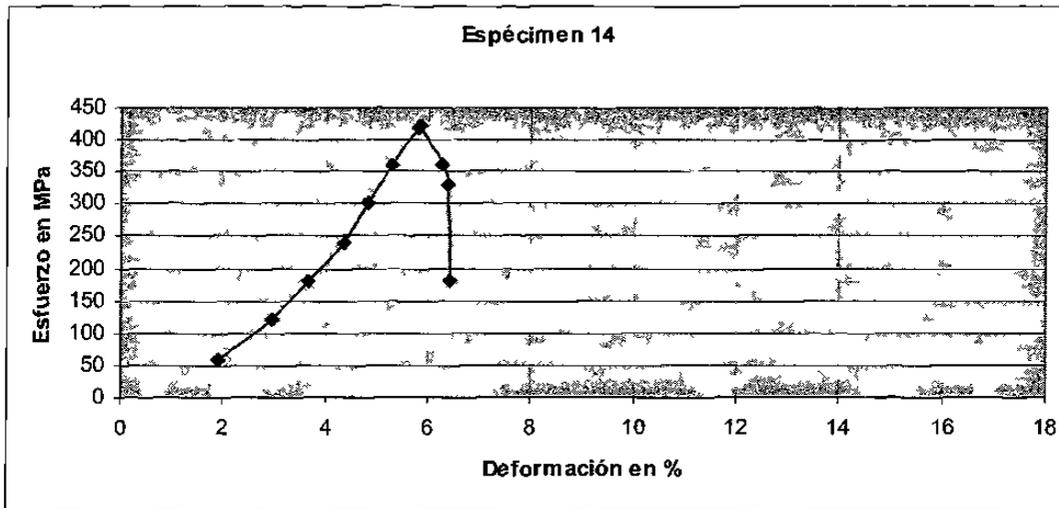


Figura B.2. Gráficas de aplicação de carga a probetas que não fraturaram por fadiga, (b) espécimen 8, (c) espécimen 11 y (d) espécimen 12.

e)



f)

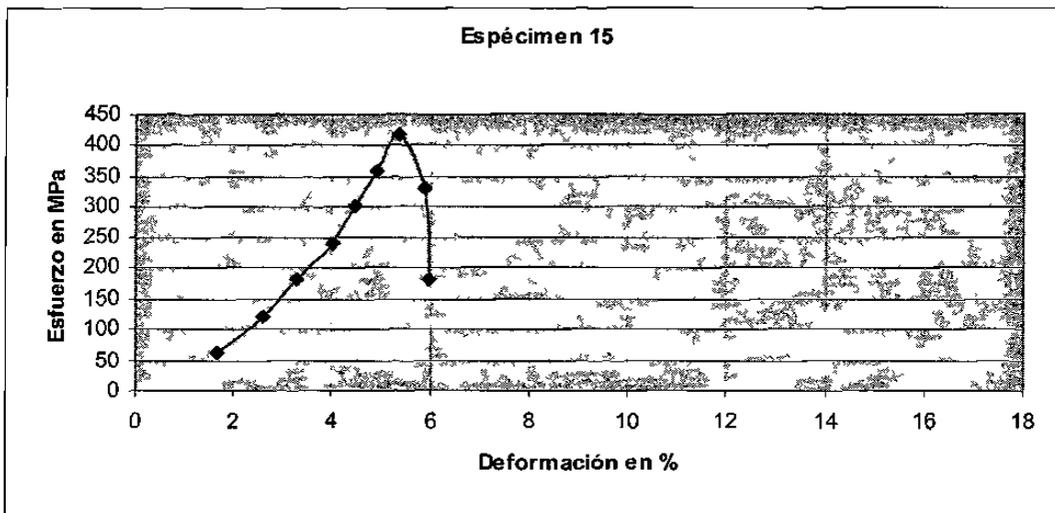


Figura B.3. Gráficas de aplicação de carga a probetas que não fracturaram por fadiga, (e) espécimen 14 y (f) espécimen 15.

Referencias

- [1] Aluminum: Properties and physical metallurgy, 1984 by American Society for metals.
- [2] Mat Web - On line Material Data sheet, www.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=MA6016
- [3] Metals Handbook, 9^a edition, Vol. 15 CASTING, 1988, ASM International, The Materials Information Society.
- [4] Rafael Colás, Eulogio Velasco y Salvador Valtierra, Handbook of aluminum Vol. 1. Physical Metallurgy and Processes, por Merce Dekker, Inc. 2003.
- [5] Aluminum: Properties, physical metallurgy and phase diagrams, edited by Kent R. Van Horn. 1967 by the American Society for metals.
- [6] El aluminio y sus aleaciones, Frank King, M.I.M. Limusa, Grupo Noriega Editores, 1992.
- [7] Handbook volume 8, Mechanical Testing, Ninth Edition, ASM International handbook committee, The International Materials Information Society.
- [8] Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, por George E. Dieter, Mc Graw Hill Materials Science and Metallurgy 1988.
- [9] Mecánica de la fractura por Jorge Luis González Velázquez, Limusa Noriega Editores 1998.

- [10] Metalurgia Mecánica por Dr. Jorge Luis González Velázquez, Limusa Noriega Editores 1999.
- [11] Principles of fracture Mechanics por R. J. Sanford, Prentice Hall Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458.
- [12] Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminum alloy, Rafiq A. Siddiqui, December 1999.
- [13] Fatigue properties of Al₂O₃-particle-reinforced 6061 aluminium alloy in the high-cycle regime, M. Papakyriacou*, September 1995.
- [14] Handbook volume 19, Fatigue and fracture, 1996, ASM International handbook committee, The International Materials Information Society.
- [15] Fatigue capítulo 27, Physical Metallurgy cuarta edición por Robert W. Chain, Elsevier Science BV. 1996.
- [16] Controller Installation & Calibration, MTS For Test Star™ IIs Version 2.4C 1999 MTS Systems Corporation.
- [17] Model 793.00 System Software Version 3.1, MTS For Test Star™ IIs Version 2.4C 1999 MTS Systems Corporation.
- [18] Handbook of fatigue testing, ASTM special technical publication 566 S. Roy Swanson, Editor. ASTM society for testing and materials 1974.
- [19] Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials, ASTM designation: E 466-96.
- [20] Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials, ASTM designation: E 468-90.

- [21] Fatigue Data Analysis, Handbook Vol. 8, Mechanical Testing, novena edición, ASM International, The Materials Information Society.

- [22] www.shay.ecn.purdue.edu/~ee595tp/lecturenotes2002/pp100102.pdf

- [23] Metallographic Etching, 2^{da} edición, por Günter Petzow, ASM Internacional, The materials Information Society.

- [24] Calentamiento adiabático en una aleación termotratable de Al, por Jacobo Hernández Sandoval, Tesis maestría, agosto del 2001.

- [25] Fatigue Data Book: Light Structural Alloys, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. ASM International The Materials Information Society.

- [26] Handbook of fatigue testing, ASTM special technical publication 566 S. Roy Swanson, Editor. ASTM society for testing and materials 1974.

Listado de figuras

Número	Descripción
1.1.	Diagrama de equilibrio: aluminio-hierro.
1.2.	Diagrama de equilibrio: aluminio-cobre.
1.3.	Diagrama de equilibrio: aluminio-manganeso.
1.4.	Diagrama de equilibrio: aluminio-silicio.
1.5.	Diagrama de equilibrio: aluminio-magnesio.
1.6.	Diagrama de equilibrio: aluminio-cinc.
2.1	Diagrama de amplitud de esfuerzo vs logaritmo del número de ciclos de falla. (Diagrama realizado por Wölher, conocido como curva de vida).
2.2.	Comparación de curvas S-N, para diferentes materiales con y sin presencia de límite de fatiga.
2.3	Diagrama de las características principales del ciclo de carga.
2.4.	Formas típicas de los ciclos de carga en fatiga.
2.5	Tipos de ciclos de carga en fatiga, de acuerdo a R.
2.6.	Diagrama del campo de esfuerzos de una grieta.
2.7.	Representación esquemática de la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ΔK .
2.8.	Ejemplos del efecto de la superficie, ambiente y microestructura, sobre la curva S-N.
2.9.	Identificación de zonas en el área de fractura por fatiga. La zona de inicio en que la superficie es de una apariencia lisa, plana, con pocas líneas de grietas visibles, el límite de esta zona con la siguiente está definida por una línea que marca el frente de propagación de la grieta.
3.1.	Mordaza MTS 647.
3.2.	(a) Shock ER25 SPR 15-16 y (b) collets ST $\frac{3}{4}$ "X2" ER25E.
3.3.	Fotografía de la máquina MTS 810.

Número	Descripción
3.4	Sistema de la maquina MTS 810, para pruebas de fatiga.
3.5.	Curva tipo Histéresis obtenida durante el monitoreo de una prueba de fatiga.
3.6.	Forma y dimensiones del espécimen (mm) para pruebas de fatiga.
3.7.	Fotografía de un espécimen preparado para el ensayo de fatiga.
3.8.	(a) Diagrama de reloj. (b) Probeta lista para ensayar y marcada.
4.1.	Grano de la aleación 6061 T6. a) Foto transversal de la barra extruída. b) Foto longitudinal de la barra extraída, con un ataque químico con Keller.
4.2.	Fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el analizador de imágenes, sin aplicación de ataque química.
4.3.	La imagen a), es una fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el SEM, sin aplicación de solución química, la imagen b), es el espectro tomado al precipitado.
4.4.	La imagen a), es una fotografía de la aleación 6061 T6 tomada en el SEM, sin aplicación de solución química, la imagen b), es el espectro tomado al precipitado.
4.5.	Cuerva de esfuerzo vs deformación de las cinco probetas ensayadas a tensión uniaxial para la determinación de las propiedades mecánicas.
4.6.	Diagramas de reloj para el control y reporte del inicio de fractura por fatiga de cada espécimen.
4.7.	Imágenes de fracturas por fatiga de algunos especímenes obtenidas por la técnica de estereoscopio.
4.8.	Imagen de la probeta 4, con una nucleación de grietas.
4.9.	Probeta 4 con origen de nucleación de grietas a la 1.
4.10	Gráfica de la prueba de escalón de la aleación Al 6061 T6.
4.11	Gráfica de esfuerzo (MPa) vs número de ciclos. Los valores del límite de fatiga se grafican con una confianza del 66%.

Número	Descripción
4.12	Gráfica de esfuerzo (MPa) y área de propagación (mm ²) vs número de ciclos.
4.13	Gráfica de esfuerzo (MPa) vs área de propagación (mm ²).
4.14	Placa agrietada en el centro. (b) Placa con grieta en la superficie.
4.15	Imágenes tomadas en el SEM.
4.16	Imágenes topográficas tomadas en el MFA.
A.1.	Señal de alerta.
A.2.	Servidor TestStar IIs.
A.3.	Pantalla del escritorio.
A.4.	Pantalla del escritorio.
A.5.	Pantalla del escritorio
A.6.	Pantalla del escritorio
A.7.	Ventana del Station Manager.
A.8.	Íconos de la ventana: Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70Hz>.
A.9.	Pantalla de Function Generator.
A.10.	Secuencia de las fotografías para el registro de temperatura.
A.11.	Lugares en donde se debe checar la temperatura.
A.12.	Colocación de la probeta.
A.13.	Ventana de Station Manager<Basic.cfg: Fatiga 70 Hz>.
A.14.	Secuencia de colocación de probeta.
A.15.	Sujeción de probeta inferior.
A.16.	Sujeción de probeta superior.
A.17.	Alta de parámetros en el Software.
A.18.	Asignación de los parámetros reales de fuerza y desplazamiento.
A.19.	Asignación de los límites de fuerza y desplazamiento que le serán aplicados a la probeta.
A.20.	Elección de los parámetros de fuerza.
A.21.	Ventana donde se observan los cambios de fuerza y desplazamiento medidos cada instante.
A.22.	Ventana Station Manager<Basic.cfg: 70Hz>.
A.23.	Desplazamiento del cabezal.

Número	Descripción
A.24.	Retiro de la probeta inferior.
A.25.	Retiro de la probeta superior.
A.26.	Apagado del sistema hidráulico.
B.1.	Gráficas de aplicación de carga a probetas que no fracturaron por fatiga, (a) espécimen 4.
B.2.	Gráficas de aplicación de carga a probetas que no fracturaron por fatiga, (b) espécimen 8, (c) espécimen 11 y (d) espécimen 12.
B.3.	Gráficas de aplicación de carga a probetas que no fracturaron por fatiga, (e) espécimen 14 y (f) espécimen 15.
C.1.	Imágenes de fracturas por fatiga de algunos especímenes obtenidas por la técnica de estereoscopio.
C.2.	Imágenes de fracturas por fatiga de algunos especímenes obtenidas por la técnica de estereoscopio.

Listado de tablas

Número	Descripción
1.1.	Propiedades del aluminio.
1.2.	Nomenclatura estándar para describir el tratamiento térmico según la Asociación de Aluminio.
1.3.	Designación de los sufijos para el endurecimiento (según el sistema EE.UU.).
1.4.	Sufijos empleados para la designación de tratamiento térmico en aleaciones trabajadas (Asociación Americana de Aluminio).
4.1.	Análisis químico de las barras.
4.2.	Reporte de mediciones de microdureza Vickers, con una carga de 100 g durante 15 seg.
4.3.	Reporte de las propiedades mecánicas.
4.4.	Tabla estadística de las propiedades mecánicas del material.
4.5.	Reporte del control de prueba.
4.6.	Tabla de cálculos realizados para la obtención del esfuerzo medio de fatiga.
4.7.	Factor de intensidad de esfuerzos K, con el esfuerzo σ , aparente.
4.8	Factor de intensidad de esfuerzos K, con el último esfuerzo σ .
A.1.	De esfuerzo/carga para probetas hourglass.

Resumen autobiográfico

Nancy Elizabeth Vázquez Calvillo, nacida el 1 de septiembre de 1980 en la ciudad de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, tercera hija del Sr. Gorgonio Vázquez Vázquez y la Sra. María del Rosario Calvillo de Vázquez, inició sus estudios medio superior en la preparatoria número 7 de la Universidad Autónoma de Nuevo León, egresada en Julio de 1997, continuó realizando sus estudios superiores en la misma universidad, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica como Ingeniero Mecánico Administrador, egresada en Julio del 2002, continuando con estudios de posgrado como Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales en la misma facultad en el Departamento de Ingeniería en Materiales en agosto del 2002, mediante una beca otorgada por CONACYT y finalizando sus estudios en agosto del 2004.

