

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA QUE PUEDAN PRESENTAR PERFORACIONES DE AGUJEROS E INDENTACIONES SOBRE EL CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Cárdenas D'S. Luis M.
para optar al título de ingeniero
mecánico.

CARACAS, 2005

Caracas, 11 de noviembre de 2.005

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller: *Luis M., Cárdenas D'S*, titulado:

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA QUE PUEDAN PRESENTAR PERFORACIONES DE AGUJEROS E INDENTACIONES SOBRE EL CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA”.

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


Prof. Manuel Martínez

Jurado


Prof. José Chitty

Jurado


Prof. Alberto D. Pertuz C.

Tutor





Los suscritos Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por el bachiller LUIS MANUEL CARDENAS D'SANTIAGO (C. I. V.- 13.727.151), para optar al Título de Ingeniero Mecánico.

Decidimos conferirle al Trabajo Especial de Grado, titulado:

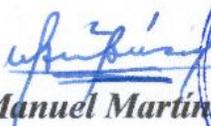
**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA QUE
PUEDAN PRESENTAR PERFORACIONES DE
AGUJEROS DE INDENTACIONES SOBRE EL
CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA”**

la

MENCION HONORÍFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración del referido Trabajo, el cual constituye un aporte importante.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los once días del mes de noviembre del año dos mil cinco, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado, el Prof. Alberto D. Pertuz C.


Prof. Manuel Martínez


Prof. José Chitty


Prof. Alberto Pertuz
Coordinador



AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mi familia, especialmente mis Padres y Hermanos por su paciencia y apoyo incondicional.

A la Universidad Central de Venezuela por permitirme la oportunidad de lograr esta meta académica.

A mi tutor Profesor Alberto Pertuz por su buena disposición a guiar este trabajo y por su dirección oportuna y profesional.

Al personal técnico de los talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por su excelente trabajo en la fabricación de las probetas.

Al personal del laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales por su prestancia al trabajo y soporte en todo momento.

Al Ing. Engels Ochoa por su ayuda, soporte técnico y material durante el desarrollo del trabajo.

Al proyecto de investigación denominado PG 08-00-5673-2004 Etapa 1, "Estudio numérico y experimental de defectos y grietas en elementos de máquinas", por financiar parte del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros que estuvieron presentes durante todo el desarrollo del trabajo.

A todos Gracias.

Cárdenas D'S. Luis M.

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA QUE PUEDAN
PRESENTAR PERFORADO DE AGUJEROS E
INDENTACIONES SOBRE EL CRECIMIENTO DE GRIETAS
POR FATIGA**

**Tutor: Prof: Alberto Pertuz. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Mecánica. 2005, 80 pags.**

RESUMEN

Palabras clave: Fatiga, Técnicas de retraso de crecimiento de grietas, Taladrado, Indentación.

En el presente trabajo se estudiaron las técnicas de taladrado de agujero e indentado en la punta de la grieta, para poder hacer una comparación directa del comportamiento del crecimiento de grietas en función del número de ciclos y así determinar la técnica que proporciona un mayor beneficio para la vida a fatiga.

En el desarrollo experimental se determinó la longitud de grieta, 'c', en función del número de ciclos, 'N', en probetas entalladas de Aluminio 3003 normalizadas para ensayos de fatiga a flexión alternativa. Posteriormente se registró el crecimiento de grieta hasta 10 mm y se aplicó la técnica de taladrado a un grupo de tres probetas y la técnica de indentado a otro grupo de tres probetas. Los resultados obtenidos se compararon con los registrados por tres probetas sin ninguna técnica aplicada.

Se obtiene que el taladrado mejora la vida a la fatiga 15,0% mientras que la indentación la mejora 4,2%. Esto como consecuencia de que en el taladrado se debe volver a nuclear la grieta lo cual toma un número apreciable de ciclos, en cambio en la indentación la mejora es porque la grieta tiene que atravesar una zona plástica con esfuerzos residuales de compresión, retrasando así la propagación de la grieta.

Adicionalmente, se calculó la velocidad de propagación de grietas en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzo y se obtuvieron los valores 'c' y 'm' de la ecuación de Paris para este aluminio, comprobando la validez de esta relación.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.- MARCO REFERENCIAL	3
1.1- FALLA POR FATIGA	4
1.1.1- Fatiga	4
1.1.2- Esfuerzos cíclicos en fatiga	5
1.1.3- Inicio de microgrietas.	6
1.1.4- Crecimiento de macrogrietas	9
1.1.5- Propagación de grietas	11
1.1.6- Evaluación de velocidad de crecimiento de grieta	13
1.2- MECÁNICA DE FRACTURAS	14
1.2.1- Generalidades	14
1.2.2- Factor de Intensidad de Esfuerzos	16
1.2.3- Estimación de la zona plástica en la punta de la grieta	20
1.2.4- Tratamiento superficial	22
1.2.5- Factor de concentración de Esfuerzos	24
1.3- ANTECEDENTES	27
1.3.1- Métodos de frenado del crecimiento de grietas por fatiga	27
1.3.2- Perforaciones de agujeros	29

1.3.3-	Indentación	33
CAPÍTULO II .- METODOLOGÍA		36
2.1-	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO	37
2.1.1-	Composición química	38
2.1.2-	Ensayo de tracción	38
2.1.3-	Ensayo de dureza	39
2.2-	DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA	40
2.2.1-	Elaboración de probetas	40
2.2.2-	Mecanizado de entallas	42
2.3-	ENSAYO DE FATIGA	43
2.3.1-	Ajuste de la máquina	43
2.3.2-	Medición óptica del tamaño de grieta	44
2.3.3-	Taladrado de agujeros	44
2.3.4-	Indentación	45
2.3.5-	Elaboración de gráficas de 'c' vs. 'N'	47
2.3.6-	Elaboración de gráficas de 'dc/dN' vs. ' ΔK '	47
CAPÍTULO III.- RESULTADOS EXPERIMENTALES		48
3.1-	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO	49
3.1.1-	Ensayo de tracción	49
3.1.2-	Ensayo de dureza	50
3.2-	DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA	51

3.2.1-	Elaboración de probetas	51
3.2.2-	Preparación de entallas	53
3.3-	ENSAYO DE FATIGA	53
3.3.1-	Gráficas experimentales de 'c' vs. 'N'	53
3.3.2-	Gráficas de 'dc/dN' vs. ' ΔK '	54
	CAPÍTULO IV.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
4.1-	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO	65
4.1.1-	Ensayo de tracción	65
4.1.2	Ensayo de dureza	65
4.2-	DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA	65
4.2.1-	Elaboración de probetas	65
4.3-	ENSAYO DE FATIGA	66
4.3.1-	Medición del tamaño de grieta vs. número de ciclos	66
4.3.2-	Velocidad de crecimiento de grieta vs ' ΔK '	68
	CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1-	CONCLUSIONES	71
5.2-	RECOMENDACIONES	72
	CAPÍTULO VI.- BIBLIOGRAFÍA	73
	CAPÍTULO VII.- ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS E ILUSTRACIONES

TABLAS

1	Composición química del Aluminio 3003	38
2	Resultados de ensayos de tracción	50
3	Resultado de ensayos de dureza	50
4	Dimensiones de las probetas de Fatiga	51
5	Valores de deflexión, Carga Teórica , Esfuerzo Flector y 'R'	51
6	Re-Inicio de grietas y vida total a la fatiga en las probetas	59
7	Valores de los parámetros 'c' y 'm' de la ecuación de Paris	63

FIGURAS

1	Ciclos típicos de esfuerzos a Fatiga	5
2	Perfil de una superficie PSB en cobre, determinado por interferograma	7
3	Modelo de Cottrell- Hull para la formación de par extrusión intrusión.	8
4	Modelos de paquetes de deslizamiento en bandas de deslizamiento	8
5	Velocidad de propagación de grietas vs. Amplitud del factor de intensidad de esfuerzos.	9

6	Modelo básico de carga involucrando diferentes desplazamientos de superficie de grietas.	16
7	Factores de intensidad de esfuerzo para geometrías comunes en placas	18
8	Factor de intensidad de esfuerzo placa agrietada	19
9	Radio de la deformación plástica en la punta de la grieta	20
10	Distribución de esfuerzo residual luego de granallado con perdigones	22
11	Agujero elíptico en placa larga produce concentración de esfuerzo	26
12	Localización del agujero	30
13	Efecto del diámetro del agujero taladrado sobre el inicio de grietas y vida total a fatiga	31
14	Longitud de grieta vs. 'N' . Probetas con taladrado y expansión en frío.	32
15	Localización de indentaciones en la superficie de la probeta	33
16	Longitud de grieta vs. 'N' en probetas con varias indentaciones	34
17	Procedimiento experimental	37
18	Diseño genérico de la probeta	41
19	Ubicación entalla	42
20	Esquema de instalación de la probeta en la máquina de ensayos	43
21	Ubicación agujero taladrado	45
22	Ubicación indentación en la superficie superior de las probetas	46
23	Gráfico esfuerzo vs. Deformación real de una probeta Aluminio 3003	49
24	Diseño final de probetas	52
25	Diseño final entalla	53

26	Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N' . Promedio probetas base.	55
27	Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N' . Promedio probetas con indentación	56
28	Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N' . Promedio probetas con taladrado.	57
29	Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N'	58
30	Velocidad de crecimiento de grietas vs. Factor de Intensidad de esfuerzos. Probetas base.	60
31	Velocidad de crecimiento de grietas vs. Factor de Intensidad de esfuerzos. Probetas con agujeros.	61
32	Velocidad de crecimiento de grietas vs. Factor de Intensidad esfuerzos.	62

INTRODUCCIÓN

La operación normal de muchos elementos de máquina los someten a esfuerzos alternantes o variables en el tiempo, donde la carga máxima requerida para producir la falla del elemento solicitado es menor que la carga de rotura estática e incluso puede ser inferior al límite elástico del material. Este tipo de falla es conocido como fatiga y una de sus principales características es el hecho que en la región de fractura no es apreciable una deformación plástica, lo cual dificulta su detección debido a que las grietas generadas por fatiga son generalmente finas y una vez que se han desarrollado a tamaños macroscópicos pueden propagarse y causar la fractura completa en un tiempo corto, por lo tanto este fenómeno puede representar un grave problema a los Ingenieros responsables de la inspección y mantenimiento de una planta.

En caso de que se presente una grieta en una pieza sometida a esfuerzos fluctuantes, una de las acciones que se puede tomar es retardar o detener la propagación de la grieta para que el componente continúe en servicio y se pueda controlar la fractura. Con esta finalidad se han desarrollado diferentes métodos de reparación o frenado de grietas por fatiga para alargar la vida útil del componente. Entre estos métodos se encuentran la soldadura de reparación de grietas, el granallado con perdigones, la introducción de ciclos de sobrecarga del elemento solicitado, la inserción de materiales epóxicos en la falla, el perforado de agujeros en la punta de la grieta y la realización de indentaciones en la punta de la grieta.

El procedimiento de taladrado consiste en hacer un pequeño orificio circular en la punta de la grieta para reducir la severidad de la concentración de esfuerzos y cambiar la curvatura asociada a la afilada punta de la grieta a una curvatura mucho más suave correspondiente al radio del agujero. Adicionalmente el perforado de agujeros elimina el material en el frente y la punta de la grieta, lo cual obliga a que se produzca una nueva nucleación de la grieta para poder continuar su propagación. En

consecuencia se tiene un aumento considerable en la vida a fatiga del elemento taladrado.

La técnica de retraso de crecimiento de grieta conocida como indentación consiste en presionar una esfera de acero en la punta de la grieta o en su trayectoria esperada. De esta forma se generan esfuerzos residuales de compresión en la punta y alrededor de la punta de la grieta, lo cual a su vez reduce la tasa de propagación de la misma. La carga aplicada al presionar la esfera debe ser suficiente para poder generar una zona de deformación plástica relativamente grande en el frente de grieta y así disminuir su paso a través de esta zona y mejorar la vida a la fatiga del componente.

A pesar de que se han investigado diferentes formas de aplicación de las prácticas antes mencionadas se ha estudiado poco la comparación directa entre ellas para saber cual es más favorable para la vida a la fatiga. Con base en esto, el presente trabajo se centró en el estudio comparativo del crecimiento de grieta por fatiga frente al taladrado de agujeros en la punta de la grieta y a la aplicación de indentación, para así determinar de manera clara cual procedimiento es más beneficioso para la vida a la fatiga del Aluminio 3003 solicitado a flexión alternativa.

CAPÍTULO I
MARCO REFERENCIAL

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1- FALLA POR FATIGA

1.1.1- Fatiga.

La fatiga es la condición por la cual un material se agrieta o falla como resultado de un número suficiente de esfuerzos y deformaciones cíclicos. Según la ASM^[1], el término fatiga se define como: El cambio estructural permanente localizado, el cual ocurre en materiales sujetos a condiciones que producen fluctuaciones de esfuerzo y deformaciones sobre algún punto o puntos; los cuales culminan en grietas o fractura completa después de una cantidad suficiente de fluctuaciones^[2]. Donde el desarrollo de grietas presenta tres etapas características: 1.- nucleación o inicio del agrietamiento, 2.- propagación de la grieta y 3.- fractura rápida^[3].

Las fallas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, esfuerzos de tracción y deformación plástica resultante en la punta de la grieta^[1]. Si uno de estos no esta presente, las grietas por fatiga no se iniciarán y propagarán. Las grietas por fatiga normalmente resultan de esfuerzos cíclicos, que son menores al punto de fluencia del material (sin embargo, existen casos como en fatiga de bajos ciclos, en donde los esfuerzos pueden ser superiores al punto de fluencia).

Los materiales utilizados habitualmente en Ingeniería, contienen defectos estructurales inherentes al material y proceso de fabricación, en estos se encuentran regiones concentradoras de esfuerzos que intensifican la deformación alrededor de estas fallas, motivo por el cual son sitios con mayor tendencia para que las grietas por fatiga se inicien y propaguen^[1,3].

1.1.2- Esfuerzos cíclicos en fatiga.

Varios tipos de fluctuación de esfuerzos se pueden producir en ensayos de fatiga, algunos son ilustrados y definidos a continuación [2].

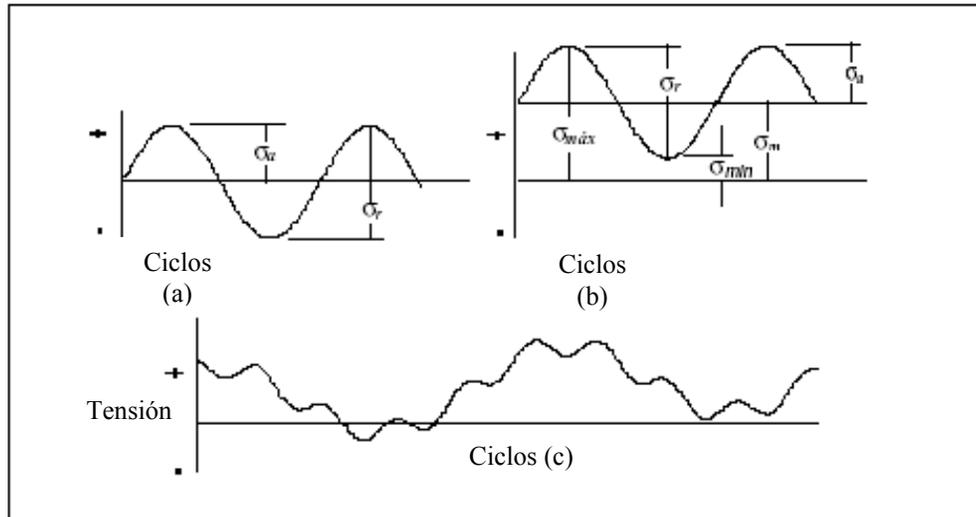


Fig. 1. Ciclos T3picos. a.-esfuerzos alternos (inversi3n), b.- esfuerzos repetidos c.-ciclos de esfuerzo irregular o aleatorio [2]

La primera de las fluctuaciones de esfuerzo presentado corresponde a los ciclos de inversi3n completa o alterna del esfuerzo (Fig. 1a) de forma senoidal. En donde el esfuerzo de tracci3n se considera positivo y el de compresi3n negativo y la variaci3n de esfuerzo sigue el comportamiento de una curva senoidal (encontr3ndose casos en los cuales la variaci3n del esfuerzo con el tiempo sigue un comportamiento triangular, cuadrado, trapezoidal y/o combinaciones entre ellos). En este caso el esfuerzo m3ximo se considera igual al esfuerzo m3nimo pero de magnitudes contrarias por lo que el esfuerzo medio es igual a cero ($\sigma = 0.5 (\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n})$).

El segundo caso considerado es el de ciclos de esfuerzos repetidos (Fig. 1b); en donde el esfuerzo m3ximo y m3nimo son positivos o de signos opuestos.

Finalmente se observa el comportamiento referido a los ciclos complejos de esfuerzos irregulares o aleatorios (Fig. 1c); en los cuales los esfuerzos no siguen ningún patrón determinado.

Los ciclos de esfuerzo están constituidos por esfuerzos medios o estacionarios, ' σ_m ', esfuerzos alternos o variables, ' σ_a ' y por intervalos de esfuerzos, ' σ_r ', así como por la razón de esfuerzo, ' R ', usados frecuentemente en la literatura en el área de fatiga^[2]. Las expresiones matemáticas para los términos antes mencionados se definen a continuación^[2].

Esfuerzo máximo: $\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_m + \sigma_a$

Esfuerzo mínimo: $\sigma_{m\acute{i}n} = \sigma_m - \sigma_a$

Esfuerzo medio: $\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$

Intervalo de esfuerzo: $\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$

Esfuerzo alterno: $\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2}$

Relación de esfuerzos: $R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$

1.1.3- Inicio de microgrietas.

En escala microscópica una característica importante del proceso de iniciación de grietas por fatiga lo constituye el desarrollo de grietas sobre las bandas de deslizamiento persistentes o sobre los límites de grano^[1].

El término " banda de deslizamiento persistente" (PSB abreviatura del término en inglés Persistent Slip Band) fue introducido en el año de 1956 por Thomson et. al^[1] quienes examinaron la superficie electro pulida de cobre y níquel después de varios ciclos de deformación, observaron bandas de deslizamiento sobre las superficies de las muestras. Posteriormente removieron la capa superficial en los especímenes

previamente sometidos a cargas cíclicas, mediante la técnica de electro pulido y cuando reensayaron las mismas probetas, encontraron que las bandas de deslizamiento se formaron de nuevo. Ver Fig. 2

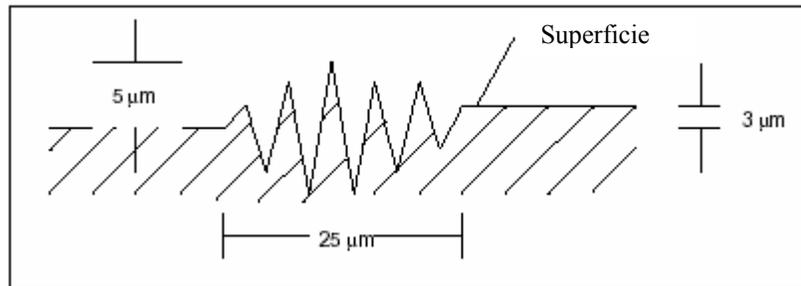


Fig. 2. Perfil de una superficie con PSB en cobre, determinado por interferograma^[1]

Esta teoría también fue demostrada por Hunsche y Neumann^[4], quienes investigaron con cristales de cobre, concluyendo que las intrusiones generadas por las PSB son un sitio preferencial para el inicio de microgrietas^[4,5]. Adicionalmente Rosenbloom y Laird^[5], corroboraron esta explicación para la formación de microgrietas, mediante el desarrollo de modelos computacionales.

Se han desarrollado otros modelos para explicar el inicio de grietas entre los cuales se encuentran:

Cottrell y Hull^[6]: explican un mecanismo sencillo para la formación de un par intrusión - extrusión, sobre dos intersecciones de sistemas de deslizamientos como se muestra en la figura 3. En la primera mitad de un ciclo de esfuerzos un sistema de deslizamientos opera, para luego operar otro sistema produciendo una intrusión (Fig. 3c). Durante la segunda mitad del ciclo, el primer sistema y luego el segundo operan, para obtener un par intrusión - extrusión (Fig. 3e). Una fracción significativa de la vida a fatiga es ocupada por el inicio y la propagación de microgrietas por fatiga.

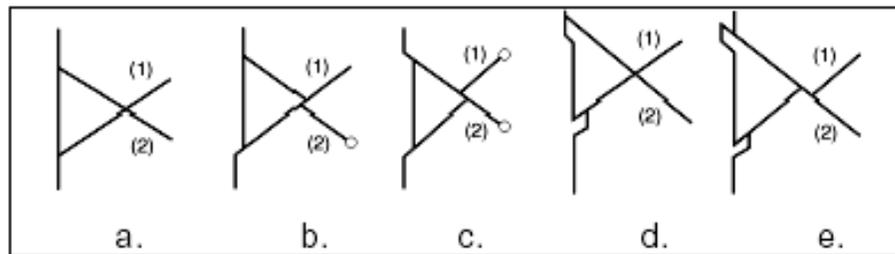


Figura 3. Modelo de Cottrell-Hull para la formación de par intrusión y extrusión^[6]

De acuerdo a Wood^[7] el inicio de grietas se debe a la acción de uno o más sistemas de deslizamiento. La idea básica para un sistema de deslizamiento, está relacionada con el movimiento paralelo de paquetes. Ver Fig. 4.

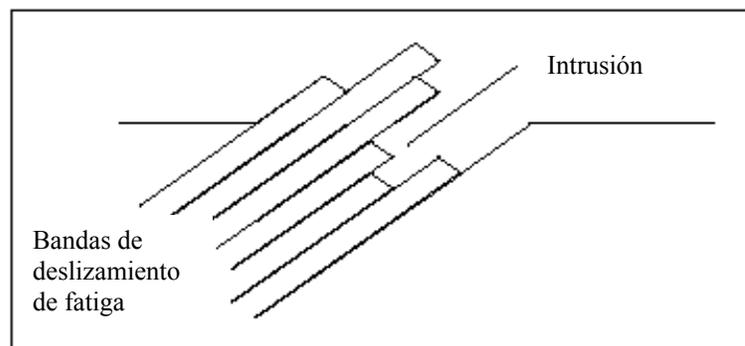


Fig. 4. Modelo de paquetes de deslizamiento en bandas de deslizamiento por fatiga.

Aquí Wood^[7] sugiere que las intrusiones actúan como un concentrador de esfuerzos, los cuales propician bandas de deslizamiento adicionales en la raíz de la muesca o entalla.

Entre otros modelos se tienen: el propuesto por Neumann^[1,8], el cual se basa en el desarrollo de grietas debido a la activación de bandas de deslizamiento, bajo la acción de cargas cíclicas. El modelo para la iniciación de grietas desarrollado por Lynch^[9], en el cual, se considera la formación de un par intrusión - extrusión debido al comportamiento de deformación de capas delgadas de material blando entre zonas de material duro.

1.1.4- Crecimiento de Macrogrietas.

Una vez que una macrogrieta de una longitud de unos pocos milímetros o más se ha formado, el rango del factor de intensidad de esfuerzo ' ΔK ', que será explicado en detalle posteriormente, es tomado de la mecánica de fractura lineal y se convierte en el parámetro que controla el crecimiento de grietas bajo la condición de que sólo se produce fluencia a pequeña escala en la punta de la grieta. Aquí ' ΔK ' es ' $\Delta\sigma(c f(g))^{1/2}$ ', donde ' $\Delta\sigma$ ' es ' $\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$ ', ' c ' es la longitud de la grieta; y ' $f(g)$ ' es una función de la geometría de la probeta, de las condiciones de carga y de la longitud de la grieta.

La velocidad de propagación de grietas por fatiga son típicamente presentadas como gráficos log-log de los términos ' dc/dN ' contra ' ΔK ', (ver Fig. 5). El comportamiento del crecimiento de grieta por fatiga está caracterizado por tres zonas que se aprecian en la siguiente figura.

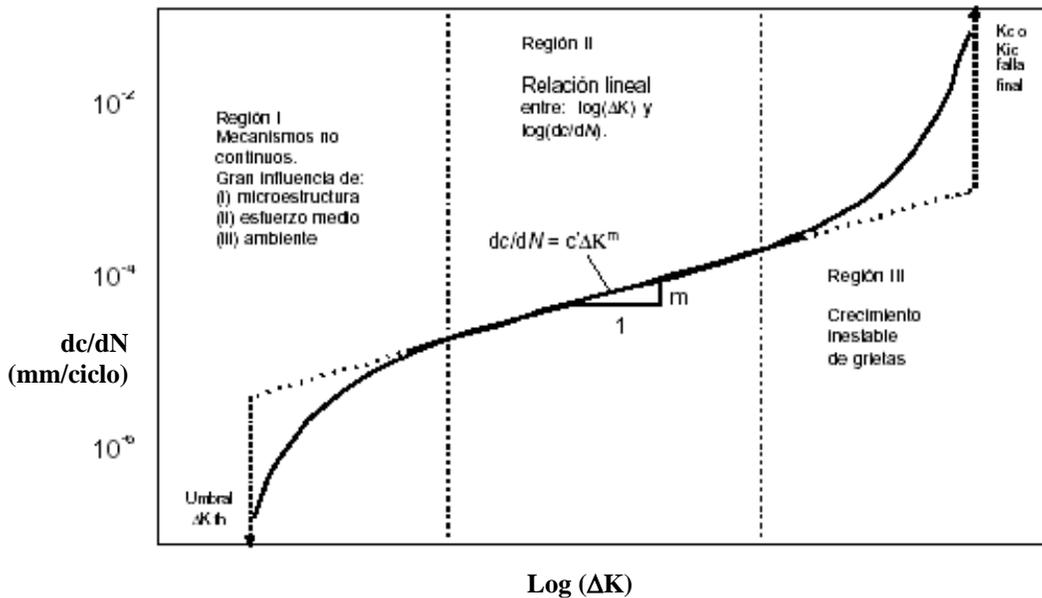


Fig. 5. Velocidad de propagación de grietas, dc/dN , contra amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ' ΔK ', escala log-log^[1].

En la Región I de la figura 5 se tiene el umbral donde ' dc/dN ' disminuye rápidamente con un descenso de ' ΔK ' hasta el valor límite (ΔK_o o ΔK_{th}), por debajo del cual no existe propagación de grieta. Por encima de este valor la tasa de crecimiento de la grieta se incrementa rápidamente con valores ascendentes de ' ΔK '. En esta zona se tiene un comportamiento discontinuo y existe una gran influencia de la microestructura del material, el esfuerzo medio aplicado y las condiciones ambientales^[10]. El comportamiento en esta región, muestra que debajo del umbral las grietas por fatiga no se propagan. Es comúnmente aceptado que las grietas por fatiga se inician o nuclean debido a la formación de pares extrusiones - intrusiones sobre bandas de deslizamiento que usualmente se desarrollan sobre planos de deslizamiento primario^[1] bajo la acción de esfuerzos cíclicos, sobre una superficie libre o imperfecciones características del tipo aleación^[3]. Esta nucleación corresponde a una gran porción de los ciclos totales de la vida a la fatiga del componente^[12].

La Región II es la parte central de la curva, generalmente se encuentra una relación lineal entre ' dc/dN ' y ' ΔK ' cuando se grafica log-log, se llama región de comportamiento continuo donde se cumple la Ley de Paris ($dc/dN = c' \Delta K^m$) y se presenta una influencia mediana de la microestructura dependiendo del material, y gran influencia del esfuerzo medio, las condiciones ambientales y la frecuencia.

En la Región III existe una alta velocidad de crecimiento de grieta y la intensidad del esfuerzo máximo, ' $K_{m\acute{a}x}$ ', alcanza la intensidad de esfuerzo crítico para falla estática, ' K_c '. En esta zona, conocida como de comportamiento de modo estático, existe gran influencia de la microestructura, el esfuerzo medio y el espesor; el medio ambiente no tiene gran influencia^[10]. En esta región ocurre un incremento rápido en la velocidad de crecimiento antes de la fractura del material, por lo tanto, cuando el material ha alcanzado esta zona la grieta por fatiga se está moviendo tan rápidamente que para propósitos prácticos la falla ya ha ocurrido.

La porción relativa de cada región depende del estado de las sollicitaciones y de las propiedades del material. En general, una importante porción de la vida de un componente está involucrada en la propagación de grieta bajo sollicitaciones cíclicas en la región II donde se cumple la Ley de Paris.

1.1.5- Propagación de grietas

Se han generado modelos continuos para evaluar el crecimiento de grieta por fatiga^[11], debido a que la propagación de la misma representa una gran porción de la vida a fatiga, la importancia que tiene el tema en la industria, así como la simplificación analítica del problema a partir de la idealización de grietas en dos dimensiones. En tal sentido si se considera, 'c', como la longitud de la grieta y 'N', el número de ciclos de carga, los modelos, suponen que la velocidad de propagación de grietas, 'dc/dN', es una función continua de las variables: carga aplicada, dimensiones de la grieta y propiedades del material.

Uno de los primeros modelos continuos fue propuesto por Head^[11], quién considerando una lámina infinita con una grieta central de longitud de longitud, 'c', la cual está sujeta a cargas cíclicas con un intervalo de esfuerzo, 'σ' y usando modelos mecánicos los cuales toman en cuenta el endurecimiento por deformación en la punta de la grieta y elementos elásticos sobre el resto del material, desarrolló la siguiente expresión:

$$\frac{dc}{dN} = \frac{C_1 \sigma^3 c^{3/2}}{(\sigma_{ys} - \sigma) \tau^{1/2}} \quad (1)$$

donde 'σ_{ys}' es el esfuerzo de fluencia, 'τ' es el tamaño de la zona plástica considerada constante durante la propagación de la grieta y 'C₁' es una constante la cual depende del material y es determinada experimentalmente.

Posteriormente Frost et. al.^[11], consideraron que 'τ' no es independiente de la longitud de la grieta y basándose en análisis dimensionales, concluyeron que la

velocidad de propagación de la grieta es linealmente dependiente de su longitud, proponiendo la siguiente relación:

$$\frac{dc}{dN} = C_2 \sigma^3 c \quad (2)$$

donde ' C_2 ' es un parámetro característico del material.

Similarmente Liu^[11], mediante un análisis dimensional determinó que:

$$\frac{dc}{dN} = F(\sigma_m, \sigma) c \quad (3)$$

donde ' F ' es una función del esfuerzo medio ' σ_m ', y del intervalo del esfuerzo ' σ '. Posteriormente analizando el problema por un modelo de histéresis de disipación de energía, Liu^[11] puntualizó que el esfuerzo medio no es significativo en la propagación de la grieta por fatiga y que la función, ' F ', es proporcional a ' σ^2 ', por lo que:

$$\frac{dc}{dN} = C_3 \sigma^2 c \quad (4)$$

Por otro lado McEvily^[11], argumentó que el esfuerzo local en la punta de la grieta alcanzaba niveles de fractura como resultado del endurecimiento bajo cargas cíclicas, lo cual conduce a la ruptura. Por lo tanto, la velocidad de propagación de grieta debe ser función del máximo esfuerzo alrededor de la punta de la grieta:

$$\frac{dc}{dN} = f(\sigma_{m\acute{a}x}) \quad (5)$$

Suponiendo que la grieta tiene forma semi elíptica y plana ' $\sigma_{m\acute{a}x}$ ' puede expresarse como:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = K_s \sigma = \left[1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right] \sigma \quad (6)$$

En donde ' K_s ' es el factor de concentración de esfuerzos y ' ρ ' es el radio de curvatura en la punta de la grieta. La forma específica de la ecuación semiempírica propuesta por McEvily^[13] se muestra a continuación:

$$\text{Log}(r) = a - bK_s S - c \frac{EL}{K_s S - EL} \quad (7)$$

Donde ' a ', ' b ' y ' c ' son constantes que dependen de la condición de carga y del material, ' EL ' es el límite de endurecimiento del material, ' K_s ' es el factor de concentración de esfuerzos, ' S ' es el esfuerzo en la sección remanente, ' $r = \Delta l / \Delta N$ ' con ' l ' igual a la mitad de la longitud de la grieta y ' N ' número de ciclos. McEvily^[13] determinó que para secciones de láminas la expresión ' $K_s S$ ' es proporcional al parámetro ' $\sigma(l)^{1/2}$ ' donde ' σ ' es el esfuerzo aplicado, y éste término es simple de evaluar. Considerando que el parámetro ' $K = \sigma(l)^{1/2}$ ' es el factor de intensidad de esfuerzos; McEvily^[13] determinó que la ecuación (5) es una función de ' K '. Según McEvily^[11,13], la expresión determinada experimentalmente en aleaciones de aluminio y cobre es la siguiente:

$$\text{Log}_{10}\left(\frac{dc}{dN}\right) = 0.00509K_s\sigma - 5.472 - \frac{34}{K_s\sigma - 34} \quad (8)$$

Por otro lado en investigaciones independientes, Paris^[14] argumentó, que el factor de intensidad de esfuerzos, es un parámetro el cual representa tanto la geometría de la grieta como las cargas aplicadas, siendo adicionalmente una medida del estado de esfuerzos en la punta de la grieta, concluyendo que:

$$\frac{dc}{dN} = c'K^4 \quad , \quad K = \sigma\sqrt{c} \quad (9)$$

donde ' K ' es el factor de intensidad de esfuerzos y ' c ' es una constante.

1.1.6- Evaluación de velocidad de crecimiento de grieta.

En el año de 1962 en la Universidad de Lehigh en USA, Paris^[15,16], en su tesis de doctorado, propuso que la velocidad de crecimiento de grieta ' dc/dN ' sobre un intervalo de esfuerzo puede correlacionarse con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, ' ΔK ', que experimenta el material en la punta de la grieta. Así la relación propuesta por Paris puede escribirse como:

$$\frac{dc}{dN} = c'\Delta K^m \quad (10)$$

Paris y Erdogan^[14] sugirieron que el valor del exponente de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, ' ΔK ', es cuatro (4), sin embargo trabajos posteriores demostraron que el mismo puede variar entre 2 y 9^[15] (1,44 a 9,66)^[17]. Esta expresión es ampliamente conocida como ley de Paris - Erdogan. La misma es universalmente aplicada para evaluar la velocidad de crecimiento de grieta en la zona II de la curva observada en la figura 5, región en la cual, la velocidad de propagación de grieta bajo un factor de intensidad de esfuerzos alternante, es mayor al valor umbral, ' ΔK_{th} ', pero menor al valor de ' K_{Ic} ', para el cual la propagación de la grieta en el material es inestable.

En esta región II se observa que la evaluación de la velocidad de propagación de grietas por fatiga depende principalmente del factor de intensidad de esfuerzos, y las propiedades mecánicas y metalúrgicas, tienen poco efecto sobre la velocidad de crecimiento de grietas a temperatura ambiente^[1].

Por otra parte, variables como la razón de esfuerzo, el esfuerzo medio, la frecuencia y tipo de onda (senoidal, triangular, cuadrada, trapezoidal), no tiene un efecto marcado sobre la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga en esta región.

1.2- MECÁNICA DE FRACTURAS

1.2.1- Generalidades

La mecánica de fractura relaciona el tamaño y forma de una grieta con las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas. Para esto, se apoya en el cálculo de la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta y en el establecimiento de los balances de energía que tienen lugar durante la extensión de una grieta.

La mecánica de fractura considera que el proceso de fractura inicia con una grieta que se propaga hasta la separación final o fragmentación de la pieza. Si durante la

propagación de la grieta, ésta puede detenerse al disminuir o desaparecer los esfuerzos, se dice que la propagación es estable y si la grieta se propaga de manera rápida, autoacelerada y es prácticamente imposible de detener, entonces la propagación es inestable. Dentro de las limitaciones de la aplicación de la mecánica de fractura se encuentra el hecho que está basada en el análisis del comportamiento elástico de un cuerpo agrietado; esto hace que los conceptos se limiten a situaciones en que la plasticidad esté limitada a una pequeña zona frente a la punta de la grieta, previa y durante la fractura. Por lo tanto, la mecánica de fractura no es aplicable a materiales muy dúctiles que desarrollan grandes zonas plásticas. Algo similar ocurre con materiales de alta tenacidad; para obtener un espécimen válido se debe cumplir que $b > 2.5(K_{IC}/\sigma_{Ut})^2$, donde b es el ancho de la probeta ensayada ^[18].

El tamaño de la zona plástica en la punta de la grieta debe ser pequeño en relación con las dimensiones del espécimen estudiado para garantizar que prevalezcan las condiciones de deformación plana, lo cual puede evaluarse comparando los diversos parámetros geométricos tanto de la grieta como del cuerpo que contiene dicha grieta, con el tamaño de la zona plástica que se genera en la punta de la grieta.

Las fallas estudiadas en mecánica de fracturas se pueden clasificar en función de su dependencia del tiempo. Se tiene la fractura estática en la que la falla ocurre bajo una sola aplicación de carga, relativamente independiente del tiempo y con una rapidez de propagación muy grande en condiciones de inestabilidad. Estos tipos de fractura incluyen la fractura frágil, la ruptura dúctil y el colapso plástico. Además se encuentra la fractura retardada o propagación de grietas, donde el crecimiento de grieta transcurre a través del tiempo o por la acción de cargas repetidas o fluctuantes, es de carácter estable e incluye a la fatiga, la propagación de grietas por termofluencia y al agrietamiento por corrosión.

La fractura de componentes puede ser estudiada usando análisis de esfuerzo basado en conceptos de teoría de elasticidad. Asumiendo soluciones a los requerimientos de equilibrio y compatibilidad para varias configuraciones y patrones de esfuerzo, Westergaard^[19], fue capaz de determinar la naturaleza de la distribución de los

esfuerzos en la punta de la grieta. Los campos de esfuerzo que rodean la punta de la grieta pueden ser divididos en tres modos básicos de carga^[20] que involucran diferentes desplazamientos relativos de la superficie de la grieta como se muestra en la figura 6.

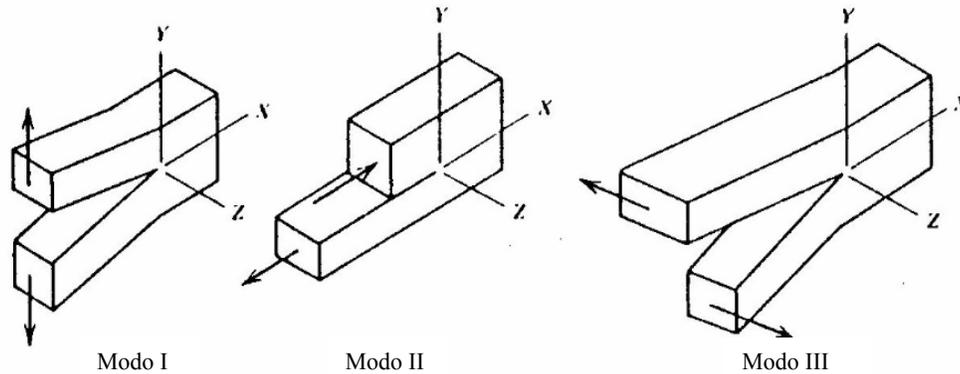


Fig. 6. Modelos básicos de carga involucrando diferentes desplazamientos de superficie de grieta^[24].

En el modo I o modo de tensión, las superficies de la grieta se mueven directamente aparte una de otra, provocando la apertura de la grieta. Este modo de carga es encontrado en la inmensa mayoría de las aplicaciones reales de ingeniería que involucran componentes agrietados. El modo II o modo de deslizamiento en corte se caracteriza por el deslizamiento de las superficies de la grieta una sobre otra en una dirección perpendicular al borde del frente de grieta. El modo II no es encontrado frecuentemente y es de poca importancia en Ingeniería. El modo III o modo de corte puro existe un movimiento relativo de las superficies de grieta separándose una de otra en una dirección paralela al borde del frente de grieta.

1.2.2- Factor de Intensidad de Esfuerzos.

Independientemente del modo de carga aplicado, la diferencia entre dos componentes agrietados reside en la magnitud parámetro 'K' definido como factor de Intensidad de esfuerzo. En esencia 'K' sirve como un factor de escala para definir la magnitud del

estado de esfuerzo en la punta de la grieta. De las investigaciones de Westergaard [19,21], se observa que:

$$K = f(\sigma, c) \quad (11)$$

donde 'K' depende de la configuración del componente agrietado y del tipo de modo en que se está aplicando la carga. Muchas funciones de 'K' han sido determinadas para varias configuraciones de probetas.

El factor de intensidad de esfuerzos, en su forma más general es expresado matemáticamente como:

$$K = \frac{Y \cdot \sigma}{\pi \cdot c} \quad (12)$$

donde: 'Y' es un parámetro llamado factor de forma que involucra la geometría de la grieta y del componente, 'c' es el tamaño de la grieta y ' σ ' una función que representa la magnitud del esfuerzo en el componente.

Para el cálculo del factor de forma en probetas planas se utilizan técnicas numéricas y análisis aproximado. Las principales dificultades para encontrar el factor geométrico en secciones sometidas a esfuerzos son la naturaleza tridimensional de la grieta y el cambio del valor del factor de intensidad de esfuerzo a lo largo del frente de grieta.

No obstante se han determinado funciones del factor de intensidad de esfuerzo utilizando procedimientos matemáticos. Algunas soluciones son mostradas en la figura 7 para configuraciones de componentes agrietados que se encuentran comúnmente y para formas de probetas normalizadas para ensayos de laboratorio^[22]. Se tiene que las funciones de 'K' están definidas para factores de forma 'Y' que dependen de la relación ' l/b '.

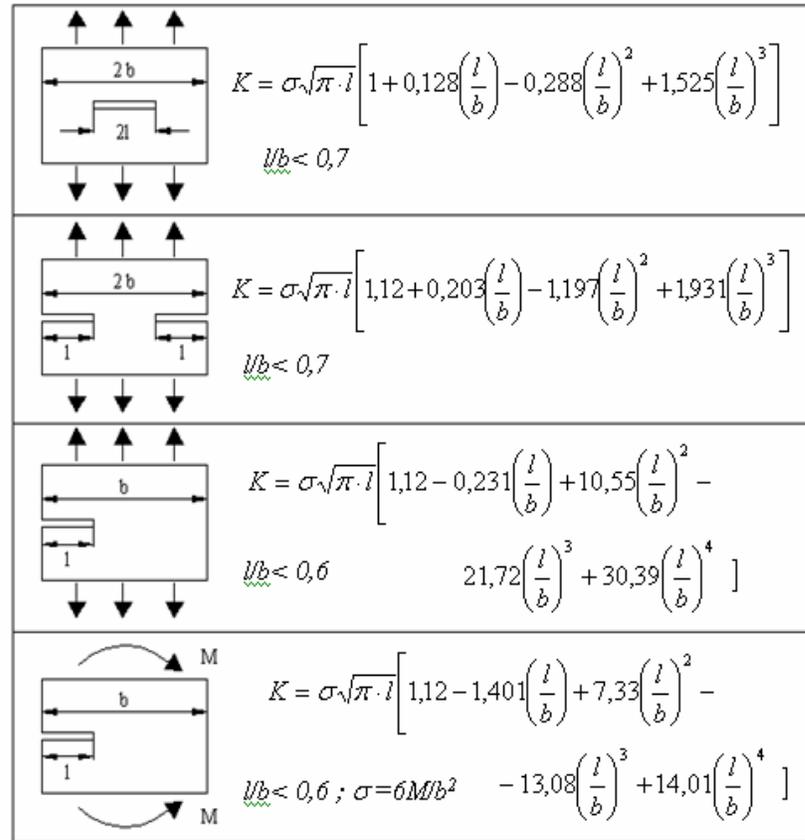


Fig. 7 Factores de intensidad de esfuerzo para geometrías comunes en placas^[22].

El factor de intensidad de esfuerzos en placas de ancho ' b ' entalladas lateralmente, con longitud de grieta ' c ' y que son solicitadas según el Modo I de carga, se obtiene de la siguiente expresión^[22]:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi \cdot c} \tag{13}$$

Donde:
$$Y = 1,12 - 0,231\left(\frac{c}{b}\right) + 10,55\left(\frac{c}{b}\right)^2 - 21,72\left(\frac{c}{b}\right)^3 + 30,39\left(\frac{c}{b}\right)^4 \tag{14}$$

con $\frac{c}{b} \leq 0,6$.

Consistentemente con esta ecuación, la función 'K' en la mayoría de los casos es encontrada como dependiente del esfuerzo en el componente y de la longitud de la grieta.

El factor de intensidad de esfuerzo es útil porque provee información sobre la longitud de la grieta, la concentración de esfuerzos en la probeta y el nivel de esfuerzo aplicado. Una vez que la función de 'K' para un ensayo dado es conocida, entonces es posible determinar el máximo factor de intensidad de esfuerzo que causaría la falla. Este valor crítico es descrito en la literatura como la resistencia a la fractura del material o ' K_{Ic} ' la cual constituye una propiedad del material que es medible por pruebas de laboratorio normalizadas^[23]. No obstante, cualquier tamaño de muestra puede ser utilizado para determinar la resistencia a la fractura para un material dado, si se tiene la función del factor de intensidad de esfuerzo.

La interacción de propiedades del material, tal como la resistencia a la fractura, con el esfuerzo de diseño, el tamaño del defecto o grieta y la expresión del factor de intensidad de esfuerzo, controlan las condiciones para la fractura de un componente^[24]. Por ejemplo, de la figura 8, se tiene que la condición de fractura para una placa agrietada infinitamente larga será :

$$K = K_c = \sigma\sqrt{\pi a} \tag{15}$$

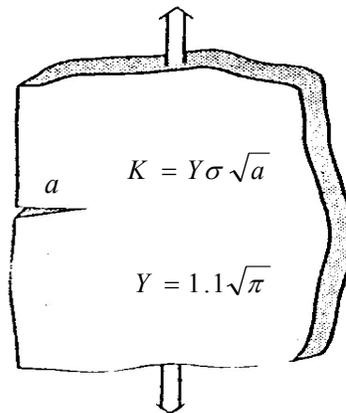


Fig. 8. Factor de intensidad de esfuerzo placa agrietada^[24].

Esta relación puede ser usada en varias formas para diseñar contra la falla de un componente, y su importancia reside en el hecho de que se debe decidir primero que

es más importante acerca del diseño de un componente: ciertas propiedades del material, el nivel de esfuerzo de diseño que puede ser afectado por muchos factores como consideraciones de peso o el tamaño de defecto que puede ser tolerado para la operación segura de la parte. Una vez que se fijan dos de tres variables (resistencia a la fractura, esfuerzo y tamaño de grieta) el tercer factor está determinado. Por ejemplo, si se permite la presencia de una grieta estable relativamente larga (una grieta que puede ser fácilmente detectada y reparada), el esfuerzo de diseño está determinado de la siguiente manera^[24]:

$$\sigma_{DISEÑO} < \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} \quad (16)$$

1.2.3- Estimación de la zona plástica en la punta de la grieta

Existe una región de plasticidad cerca de la punta de la grieta cuando el esfuerzo local excede la resistencia a la fluencia el material. Un estimado del tamaño de esta zona puede ser obtenido de la siguiente manera. Primero, se consideran los esfuerzos existentes directamente delante de la grieta^[24], como se ve en la figura 9.

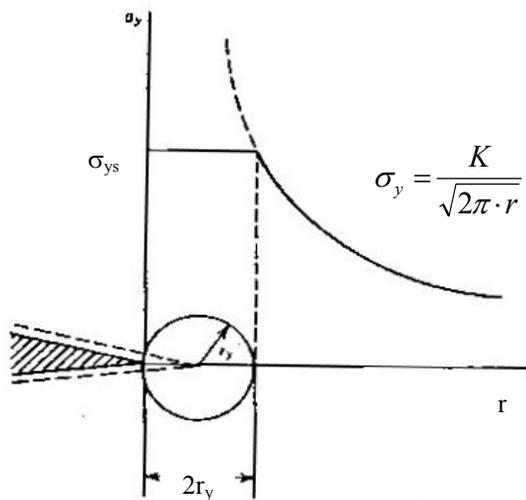


Fig.9 Radio de la deformación plástica en la punta de la grieta^[24]

El esfuerzo elástico ' σ_y ' excederá la resistencia a la fluencia a alguna distancia ' r ' de la punta de la grieta, de modo que se fija el esfuerzo elástico en este valor. Si se permite que ' $\sigma_y = \sigma_{ys}$ ' en el borde elasto-plástico:

$$\sigma_{ys} = \frac{K}{\sqrt{2\pi.r}} \quad (17)$$

y la zona plástica es calculada como:

$$r = \frac{K^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \quad (18)$$

Debido a que la presencia de la región plástica hace al material comportarse como resistente, la grieta es un poco más grande que la medida realmente, la longitud de grieta aparente es asumida como la longitud real de grieta más una fracción del diámetro de la zona plástica. Como una primera aproximación, Irwin^[25] fijó este incremento como igual al radio de la zona plástica, por lo tanto la longitud de grieta aparente es incrementada por esa cantidad. En efecto, el diámetro de la zona plástica es un poco más grande que ' $K^2/2\pi\sigma_{ys}^2$ ' como resultado de las redistribuciones de carga alrededor y es estimada como el doble de este valor. Por lo tanto

$$r_y \approx \frac{K^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \quad (\text{esfuerzo plano}) \quad (19)$$

Para condiciones de deformación plana donde el campo de esfuerzo triaxial suprime el tamaño de la zona plástica, el radio de la zona plástica es más pequeño y ha sido estimado como:

$$r_y \approx \frac{K^2}{6\pi\sigma_{ys}^2} \quad (\text{deformación plana}) \quad (20)$$

Si se comparan los dos radios de la zona plástica hallados considerando esfuerzo plano y deformación plana se observa que el tamaño de la zona plástica varía a lo largo del frente de la grieta, siendo más grande en las dos superficies libres y más pequeña en el plano medio.

1.2.4- Tratamiento superficial.

Aunque los cambios en las propiedades generales de un material influyen el comportamiento a la fatiga de un material, cambios de propiedad más grandes son efectuados por modificaciones localizadas de las muestras de ensayo o la superficie de un componente, ya que la mayoría de las grietas por fatiga se originan en esta región. Para tal fin, un número de tratamientos superficiales han sido desarrollados; estos pueden ser clasificados en tres grandes categorías^[24]: tratamientos mecánicos, que incluyen, granallado con perdigones, laminado en frío, pulido, entre otros; tratamientos térmicos, como el templeado y la realización de recubrimientos superficiales. Uno de los tratamientos mecánicos más ampliamente usados involucra el uso de granallado con perdigones. En este proceso, partículas esféricas pequeñas y duras de aproximadamente 0.08 a 0.8 mm de diámetro son impactadas a alta velocidad sobre la superficie del material a ser tratado. Esta acción puede ser llevada a cabo variando la intensidad de los impactos, la cobertura de los mismos y el medio utilizado para mover las partículas, lo cual resulta en un número de cambios en las condiciones del material en la superficie y en su cercanía^[26]. Primero y más importante una delgada capa de esfuerzo residual de compresión es desarrollada y penetra hasta una profundidad de aproximadamente un $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ del diámetro de las esferas. Ver figura 10

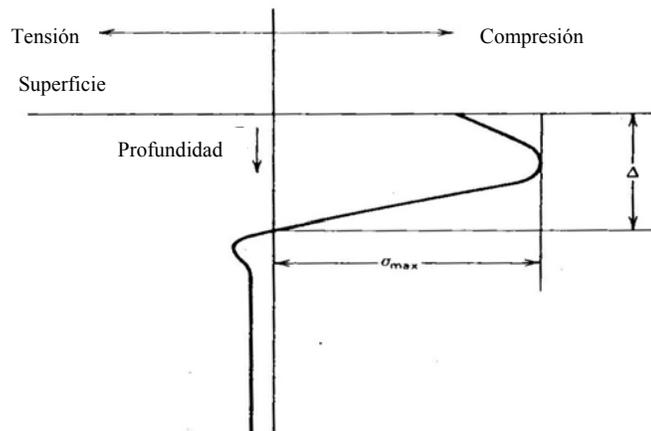


Fig 10. Distribución de esfuerzo residual luego de granallado con perdigones. El esfuerzo de compresión tiene una profundidad Δ ^[24].

Debido a que el proceso de disparado de perdigones involucra deformación plástica localizada, se cree que el material elástico de los alrededores fuerza la región permanentemente deformada por los perdigones de regreso hacia su dimensión original, por lo tanto induciendo un esfuerzo de compresión residual. Dependiendo del tipo de impacto, diámetro de las partículas, presión y velocidad de la corriente de partículas, y duración del proceso, el esfuerzo máximo de compresión puede alcanzar hasta aproximadamente la mitad del esfuerzo de fluencia del material. De modo que la región impactada tiene un esfuerzo medio de compresión localizado, que actúa reduciendo la porción más dañina del esfuerzo de tensión del rango de esfuerzo alternante aplicado, lo que resulta en una mejora sustancial de la vida a la fatiga del material. Una de las técnicas desarrolladas en la década de los 70's y estudiadas actualmente, es la de Impacto de Perdigones con Laser (LSP por sus iniciales en inglés: Laser Shock Peening), el cual tiene la importante característica de generar un esfuerzo residual de compresión que se extiende más de 1mm por debajo de la superficie, comparado con las típicas profundidades de 0.25mm obtenidas con el granallado de perdigones de formas convencionales^[43].

El laminado superficial también produce un esfuerzo residual favorable que puede penetrar más profundo que el producido por el disparado de perdigones y no deteriora el acabado superficial, además tiene un uso extenso en componentes que poseen superficies en rotación.

Los tratamientos térmicos son realizados con el objetivo de hacer la superficie del componente más dura y resistente al desgaste. Esto se logra en algunos aceros calentando las capas superficiales hasta modificar la microestructura para convertirla en una estructura templada más dura. Debido a que la resistencia a la tensión y dureza de esta capa es notablemente incrementada, la resistencia a la fatiga es de la misma forma aumentada. Adicionalmente, el cambio microestructural debido al tratamiento térmico superficial involucra una expansión volumétrica que es resistida por el núcleo del material sin transformarlo; un esfuerzo residual de compresión es

obtenido en esta capa, lo cual contribuye a un incremento adicional en la resistencia a la fatiga.

Otros procesos tales como esmerilado, mecanizado o pulido son muy parecidos al endurecimiento por deformación plástica de una capa delgada de material superficial y a la formación de esfuerzos residuales. Como los fallos por fatiga casi siempre se propagan desde la superficie, estos factores pueden influir apreciablemente en la resistencia a la fatiga. El efecto de endurecimiento por deformación plástica es usualmente beneficioso y los esfuerzos residuales superficiales pueden también aumentar la resistencia a la fatiga siempre que sean de compresión^[27].

1.2.5- Factor de concentración de esfuerzos

El esfuerzo en una pieza bajo carga axial puede suponerse sólo uniforme en su sección transversal, cuando la pieza tiene una gran longitud y es de sección constante o cuando cambia su sección gradualmente. Cualquier cambio brusco, como una entalla, estría o agujero, produce una variación local en la distribución del esfuerzo elástico que depende de la reducción del área de la sección transversal en la discontinuidad y de la forma de ésta. Asimismo, para otras condiciones de carga, los esfuerzos pueden solamente suponerse distribuidos de acuerdo con la teoría simple, alejándose del punto de aplicación de la carga y donde las piezas son de sección constante o que cambian gradualmente.

Una medida de la severidad de una concentración de tensiones viene dada por el factor ' K_t ', que se define como la relación del esfuerzo local máximo en la región de la discontinuidad con el esfuerzo nominal, evaluado por la teoría simple. El esfuerzo nominal puede basarse bien en la sección transversal neta a través de la discontinuidad o en la sección transversal bruta de la pieza, ignorando la discontinuidad. Al presentar los efectos de la concentración de tensiones, el esfuerzo nominal se basa usualmente en la sección neta y se adopta este procedimiento a menos que se establezca otro.

A pesar de que la resistencia a la fatiga se reduce considerablemente por las concentraciones de tensiones geométricas, la reducción es a menudo menor que el factor de concentraciones de tensiones geométricas, y se ha introducido un factor de reducción de la resistencia a la fatiga, ' K_f ', que se define como la relación de la resistencia a la fatiga de una probeta sin concentración de tensiones, a la resistencia a la fatiga con concentración de tensiones.

Se da una medida del grado de concordancia entre ' K_f ' y ' K_t ' por medio del factor de sensibilidad a la entalla ' q ', definido como^[27]:

$$q = \left(\frac{K_f - 1}{K_t - 1} \right) \quad (21)$$

El valor de ' q ' está comprendido entre 0 y 1. Cuando ' $K_f = K_t$ ', ' $q = 1$ ' se dice que el material es completamente sensible a la entalla. Si la presencia de una entalla no afecta la resistencia a la fatiga, ' $K_f = 1$ ' y ' $q = 0$ ' el material no es sensible a la entalla.

Otros estudios se enfocan en el factor de concentración de esfuerzo para geometrías encontradas en el desarrollo de grietas por fatiga. Al analizar una lámina de metal que contenía una entalla en forma de agujero elíptico, Inglis^[28] fue capaz de demostrar que el esfuerzo aplicado ' σ_a ' se incrementaba en las puntas de los ejes mayores de la elipse (figura 11) de manera que:

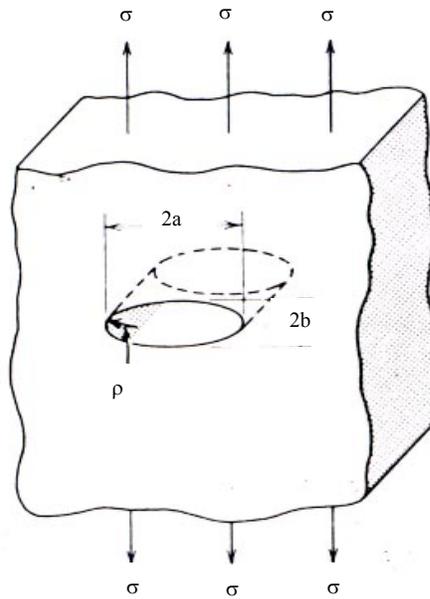


Fig 11 Agujero elíptico en una placa larga produce concentración de esfuerzo^[24]

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_a} = 1 + \frac{2a}{b} \quad (22)$$

Donde $\sigma_{m\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo al final del eje mayor

σ_a = esfuerzo aplicado normal al eje mayor

a = semi eje mayor

b = semi eje menor

Debido a que el radio de curvatura ρ en la punta de la elipse está dado por:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (23)$$

se tiene que

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \sigma_a \quad (24)$$

En la mayoría de los casos $a \gg \rho$ por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2\sigma_a \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (25)$$

El término $2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ es definido como el factor de concentración de esfuerzos ' K_t ' y

describe el efecto de la geometría de la grieta en el nivel de esfuerzo local en la punta

de la grieta. Muchos manuales y libros de texto describen las concentraciones de esfuerzo en componentes con un amplio rango de configuraciones de grietas. Aunque las formulaciones exactas varían de un caso a otro, en general se tiene que ' K_t ' aumenta con el incremento de la longitud de la grieta y con la disminución del radio de la grieta. Por lo tanto, toda grieta, si está presente, debe ser mantenida tan pequeña como sea posible. Una manera de lograr esto es realizando inspecciones periódicas y reemplazando aquellos componentes que posean grietas de longitud peligrosa. Alternativamente, una vez que una grieta se ha desarrollado, la relativa severidad de la concentración de esfuerzos puede ser reducida a través del taladrado de un agujero en la punta de la grieta. De esta manera, ' ρ ' es incrementado de una curvatura asociada a la afilada punta de la grieta a la curvatura mucho más suave correspondiente al radio del agujero. Con esta técnica se logra aumentar la vida a la fatiga de la pieza perforada^[10].

Los factores de concentración de esfuerzo en la mayoría de los materiales no provocarán la intensificación crítica del esfuerzo local en la punta de la grieta hasta niveles peligrosamente altos. En cambio, esta elevación potencialmente dañina del esfuerzo es evitada por un proceso de deformación plástica en la altamente solicitada región en la punta de la grieta. Como resultado, el esfuerzo local no excede grandemente los niveles de resistencia de fluencia del material a medida que la punta de grieta avanza. La habilidad de un componente para deformarse plásticamente en las proximidades de la punta de la grieta es una cualidad que permite la operatividad de muchas estructuras de Ingeniería^[24].

1.3- ANTECEDENTES

1.3.1- Métodos de frenado del crecimiento de grieta por fatiga.

Para lograr el control de la fractura de un componente, retardar o frenar una grieta que se propaga es técnicamente imprescindible si se quiere que el componente agrietado continúe en servicio. La confiabilidad operacional de elementos fisurados

requiere la detección y reparación de grietas así como una evaluación de vida remanente^[29]. En conformidad con las técnicas de detección de grietas utilizadas actualmente, la probabilidad de dejar desatendido un proceso de crecimiento de grieta, permanece baja; como resultado, los elementos agrietados se vuelven tolerantes a las grietas y de esa forma son capaces de prestar servicio satisfactoriamente siempre que estén limitadas con un buen nivel de supervisión segura y mantenimiento.

Muchos métodos de reparación de grietas se utilizan hoy día frecuentemente en ingeniería, entre ellos se encuentra el granallado de perdigones en la superficie de piezas agrietadas. Este método no puede ser repetido muchas veces debido a que el sobre impacto disminuye la integridad de los componentes defectuosos^[30].

Se tiene también la soldadura de reparación, que refuerza el elemento agrietado a través de la superposición de material a lo largo del frente de grieta. Una vez soldado, el material de aporte actúa como un retrasador de la grieta al reducir su fuerza de avance. Se debe tener precaución con los productos desfavorables obtenidos por el proceso de soldadura, como esfuerzos residuales, fragilidad por hidrógeno, agrietado por corrosión, entre otros^[31].

Otra técnica es taladrar un agujero en la punta de la grieta para disminuir la concentración de esfuerzos y así retrasar su propagación^[32,33]. Este proceso de taladrado de agujeros también introduce esfuerzos de compresión residual que retardan el reinicio de grietas y por tanto el crecimiento de la misma. Sin embargo, la punta de la grieta es algunas veces inaccesible o casi invisible, y ubicar con exactitud la punta de la grieta es un asunto que requiere experiencia y destreza técnica. Si un agujero taladrado falla la ubicación de la punta de la grieta, esta puede crecer sin ninguna alteración y el agujero puede empeorar la situación. De forma alternativa, los agujeros pueden ser taladrados a alguna distancia de la punta o en la posición donde se espera la propagación de la grieta. Los agujeros ejercen efectos beneficiosos de retraso en el crecimiento de grietas. No obstante, pueden influenciar la resistencia estructural y no son confiables para recipientes a presión.

La introducción de sobrecargas de esfuerzo durante el ciclaje de estructuras puede también retardar la propagación de grietas^[34]. Esto se logra con el aumento de la zona de deformación plástica en el frente de grieta que ocurre en la sobrecarga. Sin embargo, se debe tener mucha precaución en escoger una magnitud de sobrecarga apropiada tal que el retraso ocurra, y que la estructura agrietada no colapse durante su aplicación.

Otra forma de disminuir el crecimiento de grietas es la introducción de materiales fabricados especialmente para ser insertados en la grieta, lo cual puede promover el cerramiento de la grieta y de esta forma retardar o incluso detener el desarrollo de la misma. Muchos tipos de materiales han sido utilizados, incluyendo resinas epóxicas^[35], metales depositados, polvos cerámicos para reforzar las resinas epóxicas, entre otros. En muchos casos, una grieta es mucho más fina que un cabello y por tanto la infiltración no es realizable.

Adicionalmente existe una práctica que consiste en presionar una esfera rígida de acero para hacer indentaciones en la punta de la grieta y en la zona donde se espera crecimiento de la misma. Esta indentación genera una zona de deformación plástica en el frente de grieta la cual ocasiona un retraso en la propagación de la misma.

1.3.2- Perforaciones de agujeros.

Una técnica para retardar el crecimiento de grietas por fatiga es reducir la concentración de esfuerzos a través del taladrado de agujeros en la punta de la grieta^[33](ver figura12). Esta técnica es relativamente sencilla y económica y ha sido estudiada entre otros por Miyagawa y Goto^[36], quienes determinaron que agujeros taladrados en probetas planas retardaron el crecimiento de grietas en propagación, y el potencial de retraso de la propagación dependió del diámetro del agujero y de su posición. Los agujeros con diámetros apropiados y ubicados adecuadamente, permiten incrementar la vida a la fatiga de componentes en servicio. Además este incremento en las piezas perforadas depende de varias variables, tales como las propiedades del material ensayado y los estados de esfuerzo cerca del agujero^[33].

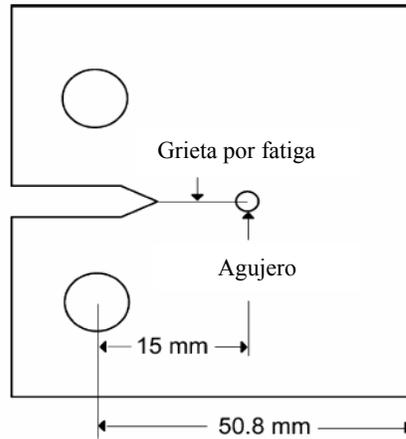


Fig. 12. Localización del agujero^[38].

El incremento en la vida total a la fatiga es consecuencia de que al taladrar un agujero en la punta de la grieta, se disminuye la concentración de esfuerzo y se debe volver a iniciar o nuclear la grieta, lo cual toma un número considerable de ciclos puesto que la nucleación es la fase del crecimiento de grieta que más tiempo lleva, con aproximadamente entre 70% y 80% de la vida a la fatiga.^[37] P.S. Song y Y.L. Shieh^[38] demostraron que mientras más grande es el agujero taladrado en la punta de la grieta más tiempo tarda la iniciación de la grieta, esto como resultado de la disminución de los gradientes de esfuerzo en la punta de la grieta y el decremento de las concentraciones de esfuerzo. El incremento en la vida a la fatiga obtenido por estos autores se aprecia en la Fig. 13

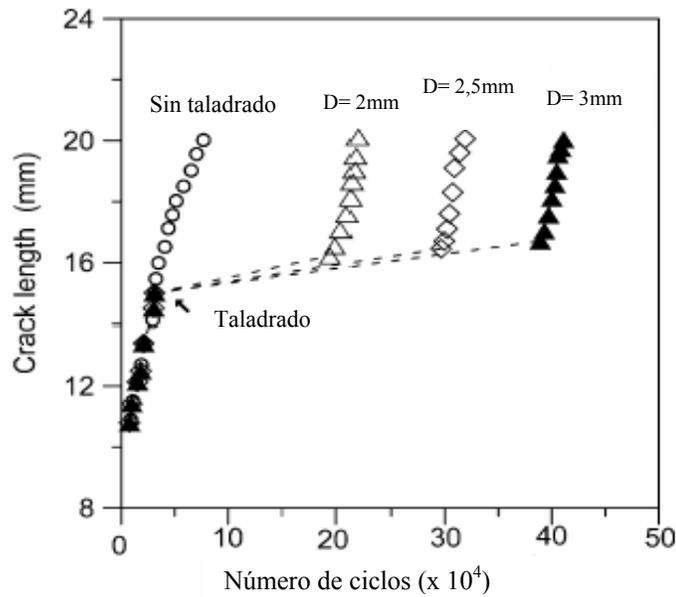


Fig. 13. Efecto del diámetro (D) del agujero taladrado sobre el inicio de grietas y vida total a fatiga^[38].

Existe la posibilidad de mejorar aún más la vida a la fatiga de un determinado elemento a través de la aplicación de una técnica conocida como expansión en frío de agujeros taladrados en la punta de la grieta^[39]. Esta técnica se basa en el hecho de que una grieta de fatiga puede ser retardada por esfuerzos residuales de compresión. Para introducir estos esfuerzos, se taladra un agujero en la punta de la grieta y luego es cuidadosamente aumentado de diámetro a través de la introducción de una esfera de un diámetro deseado, mayor al diámetro del agujero. El proceso de expansión en frío se logra por la deformación plástica que se genera al forzar la esfera a través del agujero. En estudios llevados a cabo por Amrouche y G. Mesmacque^[39], se cuantifica el grado de expansión en frío (GEF) de esta forma:

$$GEF(\%) = \frac{(D - d)}{d} \cdot 100 \quad (26)$$

donde 'd' es diámetro del agujero taladrado y 'D' es el diámetro de la esfera rígida. Se usan tres diámetros de agujeros y se introducen tres grados de expansión en frío que varían de 0 a 4.3% como la indica la figura 14.

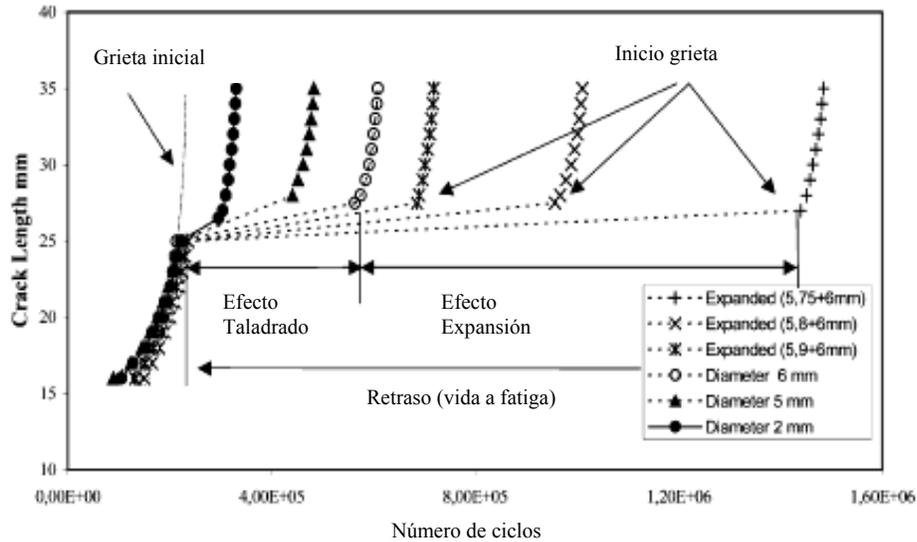


Fig. 14. Longitud de grieta vs. Número de ciclos. Probetas con Taladrado y expansión en frío^[39].

Se observa que el incremento de grado de expansión en frío es acompañado por un incremento en la vida a la fatiga del material estudiado. Este resultado es debido a que el proceso de expansión en frío produce esfuerzos residuales de compresión los cuales son opuestos al esfuerzo aplicado. Adicionalmente, los resultados experimentales muestran que el incremento en el GEF induce una disminución en la tasa de propagación de la grieta. Una vez que la grieta nuclea de nuevo, se presenta una disminución de la velocidad de propagación de grieta que se extiende por todo el tamaño de la deformación plástica obtenida; luego de atravesar esta zona, la grieta alcanza la tasa de propagación inicial.

La combinación de la disminución en el factor de intensidad de esfuerzo inducido por el esfuerzo residual de compresión y el tamaño de la deformación plástica tienen una importante influencia en el retraso de la propagación de grieta, como lo demuestran las investigaciones hechas por Lacarac^[40].

El procedimiento de taladrado de agujeros es utilizado en ingeniería hoy día pero debe ser empleado con precaución. Obviamente, una grieta todavía estará presente luego del taladrado y puede continuar creciendo adelante del agujero luego de la reiniciación de la grieta. Las fallas en campo han ocurrido antes de lo esperado,

simplemente porque el agujero fue taladrado detrás de la punta de la grieta, y el radio afilado en la punta de la grieta no fue eliminado.

1.3.3- Indentación.

Al presionar esferas rígidas de acero para hacer indentaciones en la punta de la grieta de una probeta (ver figura15), Goto y Miyagawa^[41] encontraron que alrededor de la punta de la grieta se acumulan esfuerzos residuales de compresión para reducir la tasa de propagación de la grieta. Mientras más grande sea la carga de indentación, más remarcado es el retardo de la grieta. Sin embargo en la práctica, varios factores subyacentes pueden contribuir al retraso del crecimiento de grieta en las muestras indentadas. Estos incluyen endurecimiento por deformación y el aumento del fenómeno de cierre de grieta que ocurre por efecto de los esfuerzos residuales de compresión.

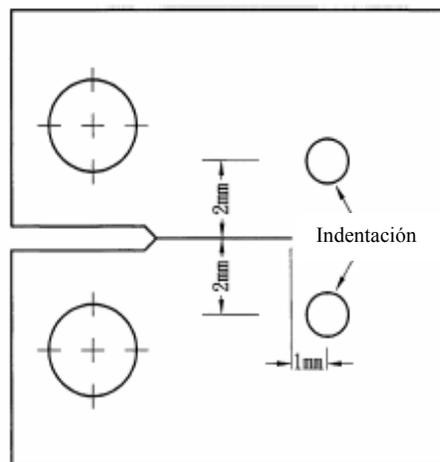


Fig. 15. Localización de indentaciones en la superficie de la probeta^[42].

P.S. Song y G.L. Sheu^[42], investigaron el desarrollo del retraso de grietas luego de aplicar diferentes cargas de indentación en el recorrido esperado de la grieta en el ejemplar de prueba, para así permitir un mejor conocimiento de cómo las cargas de indentación contribuyen al cierre de grieta y al endurecimiento por deformación para retardar la propagación de la grieta. En este estudio se obtuvieron resultados como

los presentados en la figura 16, en la cual se observa que hay un crecimiento lineal hasta el punto de la indentación (indicado por la flecha). La pendiente de la curva cambia apreciablemente durante el paso de la grieta a través de la indentación. Al aumentar la carga de indentación, más grande es la disminución de la pendiente, lo que indica un óptimo mejoramiento en la vida a fatiga. El efecto marcado de retraso de grieta ocurre debido a que las cargas mayores son suficientemente grandes como para desarrollar esfuerzos de compresión residual intensos alrededor de la punta de la grieta y disminuir la grieta en curso. Por tanto, al incrementar la magnitud de la carga de indentación se obtiene un aumento en la vida a la fatiga.

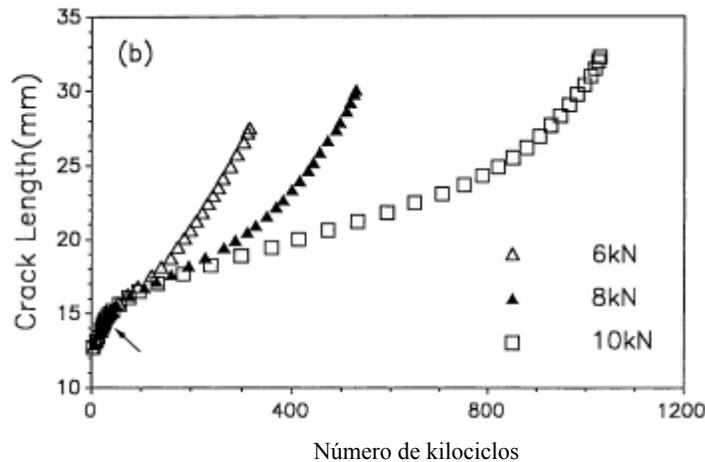


Fig. 16. Longitud de grietas vs. Número de kilociclos en probetas Con varias cargas de indentación^[42].

También se tiene que para una misma carga de indentación, probetas que tengan menor espesor exhiben mayor retraso en el crecimiento de grieta que aquellas con espesores mayores.

Otro fenómeno que se aprecia es que para una carga de indentación y espesor constante, un material con valores bajos de dureza y resistencia presenta una mejor respuesta a la técnica de indentación comparado con un material más resistente y duro, debido a que en el material más suave el diámetro y la profundidad de la indentación son mayores. En consecuencia la región en la punta de la grieta está sujeta a un efecto más notable de restricción de su crecimiento.

El resultado beneficioso para el retraso de crecimiento de grieta obtenido por la técnica de indentación es también en parte explicado por el notable incremento de la microdureza en y cerca de la posición de la indentación. Mientras más grande es la carga de indentación, más grande es el valor de microdureza y en consecuencia es más acentuado el efecto del retraso de la grieta. Así, el endurecimiento por deformación inducido por la aplicación de esta técnica, juega un papel significativo en el retraso de la propagación de la grieta.

Para que la técnica explicada aquí pueda ser aplicada, hace falta tener una forma de calcular el diámetro de la zona plástica que se genera en el material indentado y así poder tener una aproximación de la porción del material afectada que va a reducir el paso de la grieta por fatiga. Con este fin, Lawn^[44] propuso una igualdad para relacionar los términos involucrados en una indentación:

$$\frac{b}{r_o} = \left(\frac{E}{H} \right)^{\left(\frac{1}{2} \right)} \quad (27)$$

donde:

r_o = radio de la esfera o indentador.

b = radio de la zona plástica.

H = dureza del material.

E = módulo de elasticidad del material.

Haciendo uso de esta relación se puede cuantificar la magnitud del radio de la zona de deformación plástica que ocasionará el retraso de la grieta.

CAPÍTULO II
METODOLOGÍA

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

Para cumplir con la parte experimental del presente trabajo, se siguió el procedimiento mostrado en la figura 17.

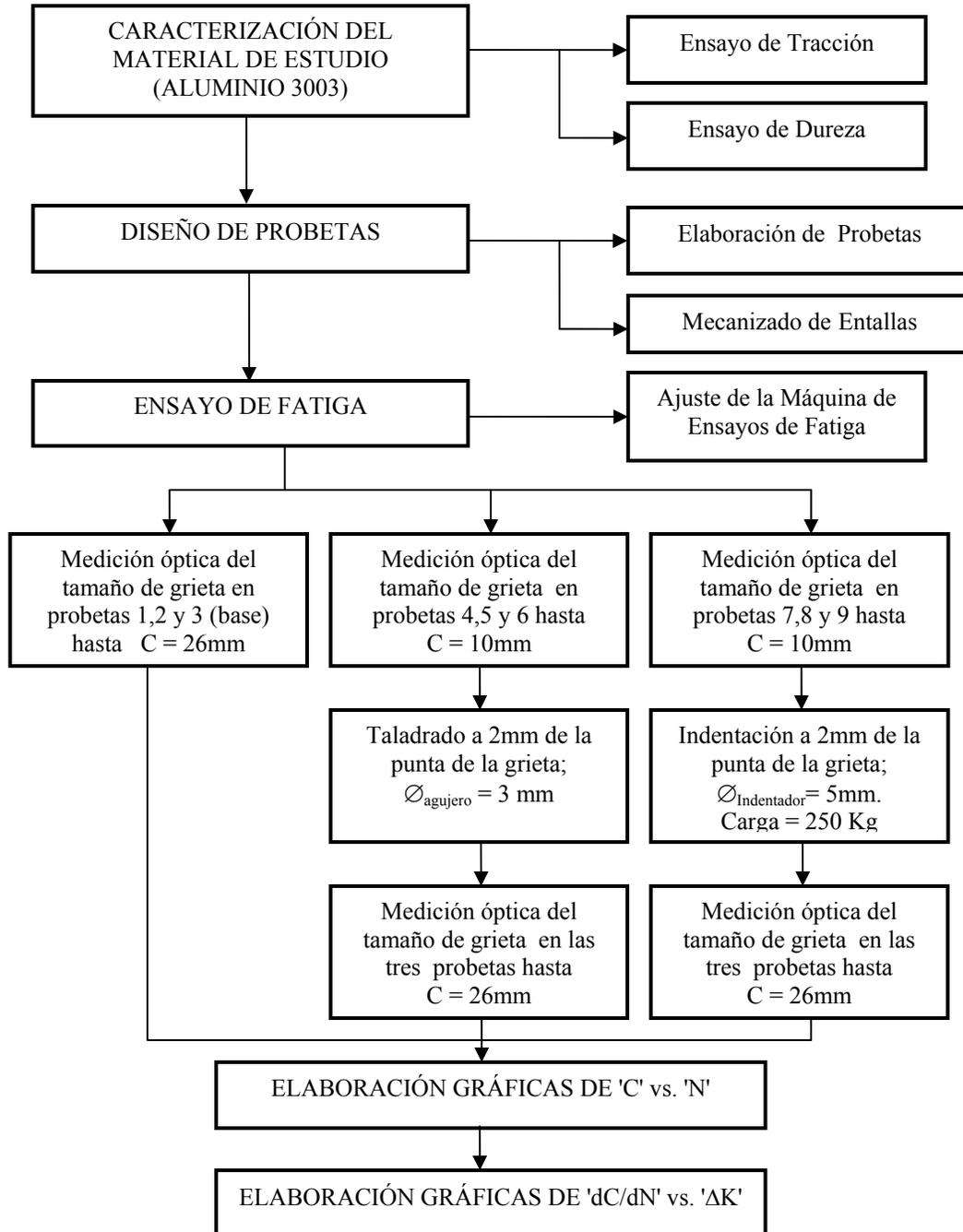


Fig. 17. Procedimiento experimental.

2.1- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

2.1.1- Composición química.

El material utilizado en el presente trabajo es un aluminio comercial Aluminium Association 3003, el cual fue suministrado por el Laboratorio de Aluminio CITALA perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Este aluminio está conformado principalmente por los siguientes elementos de aleación^[45]:

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
Porcentaje	0.6	0.7	0.05-0.20	1.0-1.5	0.1

Tabla1. Composición química Al. 3003.

El material fue adquirido en forma de láminas de 6,0 mm de espesor, 80mm de ancho y 250mm de largo, las cuales fueron posteriormente maquinadas en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica según el diseño normalizado de las probetas para los ensayos de fatiga.

2.1.2- Ensayo de Tracción

Para la realización de este ensayo, se utilizaron probetas del mismo material, las cuales cumplen con la norma ASTM B557M recomendada para la realización de probetas de sección rectangular para ensayos de tracción. Se fabricaron tres probetas que fueron ensayadas a tracción en una máquina universal de ensayos mecánicos marca INSTRON, modelo 8502, con una capacidad de 25 toneladas. Se determinó el esfuerzo de fluencia ' σ_y ' a 0,02% de la deformación total y el esfuerzo real a carga máxima ' σ_u '.

Luego del ensayo de tracción se procesaron los datos emitidos por la máquina de ensayos mecánicos y se construyeron las gráficas de esfuerzo real ' σ ' en función de

la deformación real ' ε '. Para esto se procedió a eliminar el efecto de la deformación elástica de los componentes de la máquina dispuesta para hacer ensayos de tracción uniaxial, involucrados en el sistema de carga. Posteriormente se procesaron los datos obtenidos en cada ensayo para corregir el alargamiento de la probeta, aplicando las siguientes expresiones:

$$(\Delta l_i)_{corr} = \Delta l_i - F_i \cdot \left(\frac{K_{teo} - K_{exp}}{K_{teo} \cdot K_{exp}} \right) \quad (28)$$

$$K_{teo} = \frac{A_o \cdot E}{l_o} \quad (29)$$

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta l_i} \quad (30)$$

Donde: ' $(\Delta l_i)_{corr}$ ' es la elongación corregida de la probeta, ' Δl_i ' es la elongación sin corregir de la probeta, ' F_i ' es la carga aplicada por la máquina, ' A_o ' es el área inicial de la sección transversal de la probeta, ' l_o ' es la longitud inicial calibrada de la probeta, ' E ' es el módulo de Young, ' K_{exp} ' es la rigidez experimental del sistema y ' K_{teo} ' es la rigidez teórica de la probeta.

2.1.3- Ensayo de dureza

Mediante este ensayo se determinó la dureza Brinell de una muestra de Aluminio 3003, para lo cual se utilizó un durómetro marca Wilson/Rockwell tipo Hardness Tester Series 500 con una capacidad máxima de 150 Kg. Este equipo cuenta con un indicador con escala de dureza para ensayos tipo Rockwell B,C y Brinell. Se empleó un indentador esférico de acero de 5mm de diámetro y se aplicó una carga de trabajo de 30 Kg. Se efectuaron 5 mediciones en diferentes zonas de la muestra y se determinó la dureza promedio del material empleando las tablas normalizadas de equivalencia.

2.2- DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA

2.2.1- Elaboración de Probetas

Las probetas de fatiga se diseñaron con base en las indicaciones sugeridas por el manual de la máquina para ensayos de fatiga marca Fatigue Dynamics & Co., modelo LFE-150^[46]. La configuración geométrica general para probetas planas de sección transversal rectangular sometidas a un esfuerzo flector (ver figura 18), es determinada con la siguiente relación:

$$S = \frac{6PL}{bt^2} \quad (31)$$

donde: ' P ' es la carga aplicada, ' L ' es la longitud de ensayo, ' b ' es el ancho de la probeta, ' t ' es el espesor de la muestra y ' S ' es el esfuerzo de flexión.

Si el espesor ' t ' y la relación largo a ancho ' L/b ' se mantienen constantes; entonces para cada valor de carga ' P ', el esfuerzo de flexión ' S ' se mantendrá constante en cada fibra de la probeta. La relación ' L/b ' constante significa que la probeta debe tener una geometría triangular.

El cálculo de la deflexión a la que fue sometida la probeta en el ensayo de fatiga, se realizó a partir de la siguiente expresión:

$$D = \frac{S \cdot L^2}{E \cdot t} \quad (32)$$

Donde: ' E ' es el módulo de Young del material.

Para fines de realizar los ensayos de fatiga se tomó el valor del esfuerzo de flexión ' S ' como ' $S = 0,8\sigma_y$ ' con ' σ_y ' igual al esfuerzo de fluencia del material determinado por el ensayo de tracción^[47].

Una vez maquinadas las probetas se procedió a pulirlas superficialmente hasta llegar al papel abrasivo N° 2000.

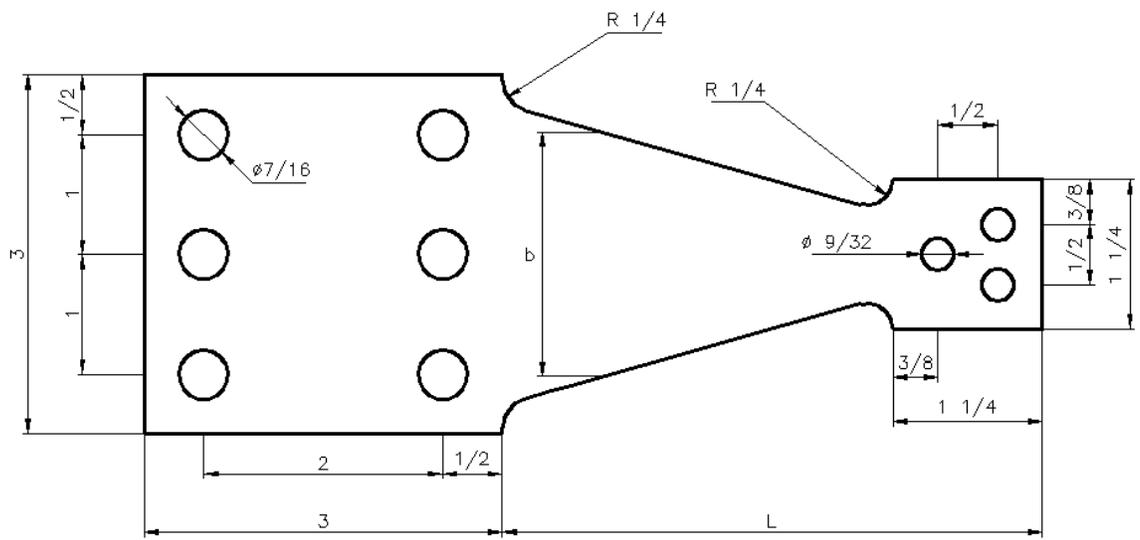


Fig. 18 Diseño genérico de la probeta.

2.2.2- Mecanizado de entallas

Con la finalidad de introducir un concentrador de esfuerzos, las probetas de fatiga fueron entalladas mediante fresado de una cara lateral, empleando una fresa para entallas de ensayo charpy 3x5/8x1-60° HSS. La entalla tiene una longitud 'S' de 3mm como se aprecia en la figura 19. Además se ubica perpendicular a la cara lateral de la probeta a una distancia 'Le' de 85 mm del extremo base de la probeta. De esta forma se garantiza que la grieta de fatiga crezca a partir de la entalla inicial generada.

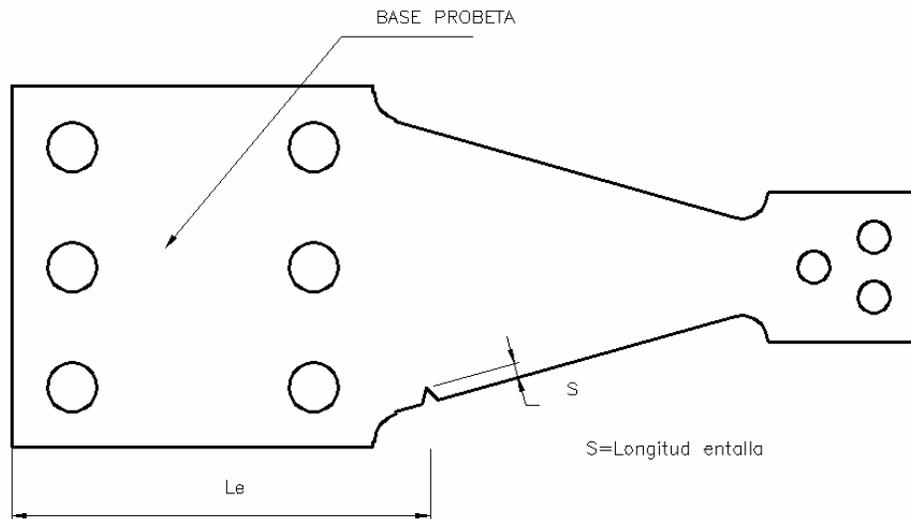


Fig. 19. Ubicación entalla.

2.3- ENSAYO DE FATIGA

2.3.1- Ajuste de la máquina

Los ensayos de fatiga se realizaron según la norma ASTM E-647. Dichos ensayos fueron realizados en una máquina de ensayos de fatiga de flexión alternativa en voladizo, marca Fatigue Dynamics & Co, modelo LFE -150 (ver figura 20). Este equipo pertenece al laboratorio de Aluminio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería U.C.V. En esta máquina el torque del motor se transmite a través de un acople al brazo principal de mando, el cual está soportado rígidamente sobre cojinetes. La carga se transmite desde el engranaje a la muestra de ensayo a través de un sistema biela-manivela y una pletina reciprocante vertical que se puede variar desde 0 hasta 2 pulgadas para ajustar la deflexión requerida. La capacidad básica de carga de la máquina es de 150 libras en la pletina reciprocante.

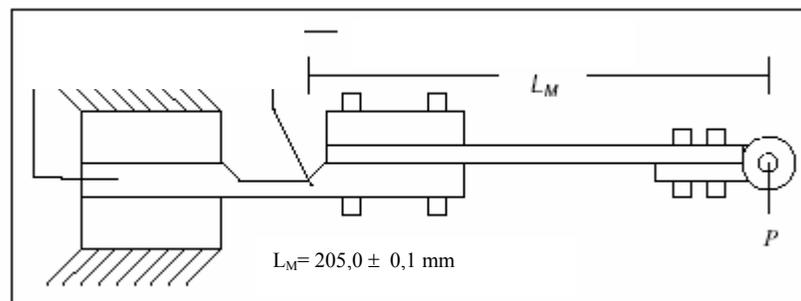


Fig. 20. Esquema instalación probeta en la máquina de ensayos de fatiga.

Con el fin de evitar el desbalance que se produce en la máquina de fatiga, se consideró trabajar con una frecuencia menor o igual a 40 Hz y una deflexión máxima por debajo de 25.4 mm (1.00 pulg.). Esto se debe a que el equipo de fatiga produce un desbalance de fuerzas de 1.36078 Kg-f, si se opera a un 'g nivel' por encima de 75, lo cual dificulta la operación ordinaria del equipo.

La calibración de la máquina de ensayos de fatiga debe ser realizada en función del tipo de material a ensayar y de las dimensiones del mismo, para lo cual se hace necesario determinar la deflexión de la misma, de forma de garantizar la carga a aplicar^[46].

2.3.2- Medición óptica del tamaño de grieta

Se realizó mediante la observación directa de la longitud de la grieta en la cara superior de la probeta pulida. Se utilizó un aumento de 5X y una retícula de 10 divisiones/cm. La retícula se ubicó de forma que coincidiera con el eje de la entalla. Se almacena la información obtenida: longitud de grieta en milímetros y número de ciclos en función de la longitud de grieta.

2.3.3- Taladrado de agujeros

Con el fin de aplicar la técnica de detención del crecimiento de grieta, se taladraron agujeros de alivio de esfuerzos a una distancia de 2 mm de la punta visible de la grieta en la superficie superior de tres probetas. Esto con la finalidad de asegurar que el agujero quede ubicado al frente de la punta de la grieta. Se taladró un agujero pasante por probeta luego de que la grieta se propagó desde la base de la entalla hasta una longitud de 10 mm; como se indica en la figura 21.

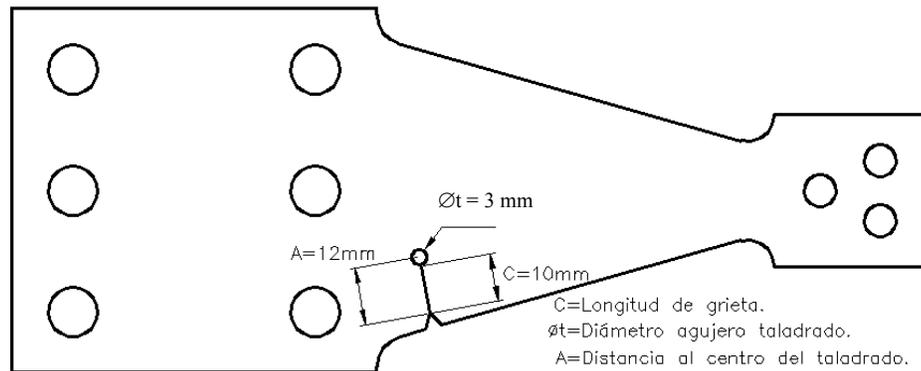


Fig. 21. Ubicación agujero taladrado.

Inmediatamente después de la operación de taladrado del agujero se re-ensaya la probeta bajo las condiciones originales de carga.

El número de ciclos para iniciar una grieta de fatiga de 0.5 mm desde el agujero taladrado es tomado como el punto de reinicio o nucleación de la grieta y por tanto este punto es usado para cuantificar la ganancia de vida a fatiga ' N_i ' en las probetas taladradas respecto de aquellas sin taladrar (probetas base) y respecto a las indentadas.

El proceso de taladrado se llevó a cabo en los talleres de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Se utilizó un taladro universal con una mecha HSS de 3 mm de diámetro.

2.3.4- Indentación

Se realizó una indentación a 2 mm de la punta visible de la grieta en la superficie superior de tres probetas. Esto con la finalidad de garantizar que la zona de deformación plástica quede ubicada en el frente de la grieta. Esta indentación fue realizada con un penetrador Brinell usado para ensayos de dureza de 5mm de diámetro y con una carga de 250 Kg.

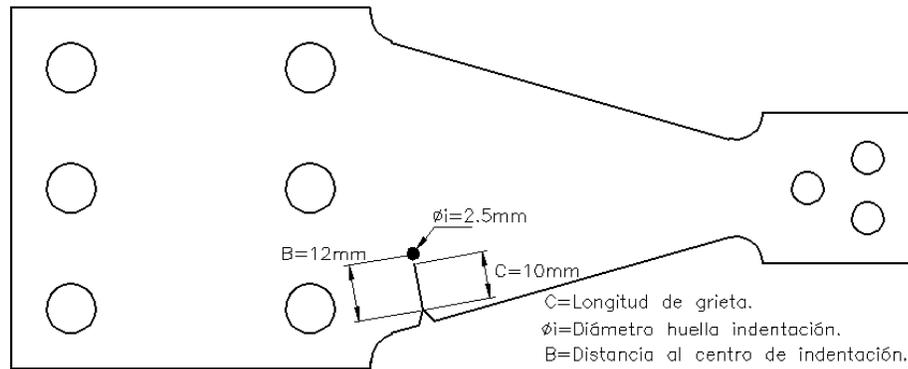


Fig. 22. Ubicación indentación en la superficie superior de las probetas.

Luego de aplicar la indentación se procede a re-ensayar la probeta bajo las condiciones de carga originales. Como no se puede observar la grieta en su paso a través de zona indentada (ϕ_i de la figura 22), se toma el valor de longitud de grieta antes y después de pasar por la huella dejada por el indentador. Se toma el valor de 0.5 mm de longitud de grieta luego de la huella, como el valor de reinicio de grieta ' N_i ' para poderlo comparar con el valor correspondiente en el proceso de taladrado y con las probetas base. Cabe mencionar que en el proceso de indentación no existe reinicio o nucleación de grieta.

La técnica de indentación se efectuó en la máquina de dureza marca Wolpert-Werke tipo Dia Testor 2Rc para hacer ensayos tipo Brinell y Rockwell, con capacidad para 250 Kg perteneciente al laboratorio de Aluminio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Este durómetro cuenta además con un micrómetro ocular, que permite la lectura del diámetro de la huella dejada por el indentador esférico. El durómetro cuenta además con un micrómetro ocular con un aumento de 10x, que permite la lectura del diámetro de la huella dejada por el indentador esférico sobre la superficie de la muestra.

2.3.5- Elaboración de Gráficas de 'c' vs. 'N'

Durante los ensayos de fatiga se registraron la longitud de la grieta 'c' en función del número de ciclos acumulados, 'N' para cada grupo de probetas. Así, se obtuvieron tres tipos de gráficas para su posterior análisis: las gráficas de 'c' vs. 'N' en probetas donde se aplicó la técnica del taladrado, las gráficas correspondientes a las probetas en las cuales se aplicó la técnica de indentación y las respectivas a las probetas sin ninguna técnica de retraso de crecimiento de grieta, referidas como probetas base. Luego se promediaron los valores correspondientes a cada grupo de tres probetas.

2.3.6- Elaboración de gráficas de 'dc/dN' vs. ' ΔK '

Una vez obtenidos los tamaños de grieta en función del número de ciclos, se determinó el factor de intensidad de esfuerzo, según la relación (13) y (14). Posteriormente, se calculó la velocidad de propagación de grieta a partir del Método de la Secante, tomado de la Norma ASTM 647 y de la ASM^[48]. De las gráficas obtenidas se determinan los valores de los coeficientes 'c' y 'm' de la ecuación de Paris, así como el factor de correlación 'R²'.

CAPÍTULO III
RESULTADOS EXPERIMENTALES

CAPÍTULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

3.1.1- Ensayo de tracción.

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas del Aluminio 3003, se realizaron tres ensayos de tracción uniaxial. En la figura 23 se presenta una gráfica esfuerzo-deformación real de una probeta, mientras que en la Tabla 2, se muestran los resultados de las propiedades mecánicas determinadas a partir de las gráficas esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas.

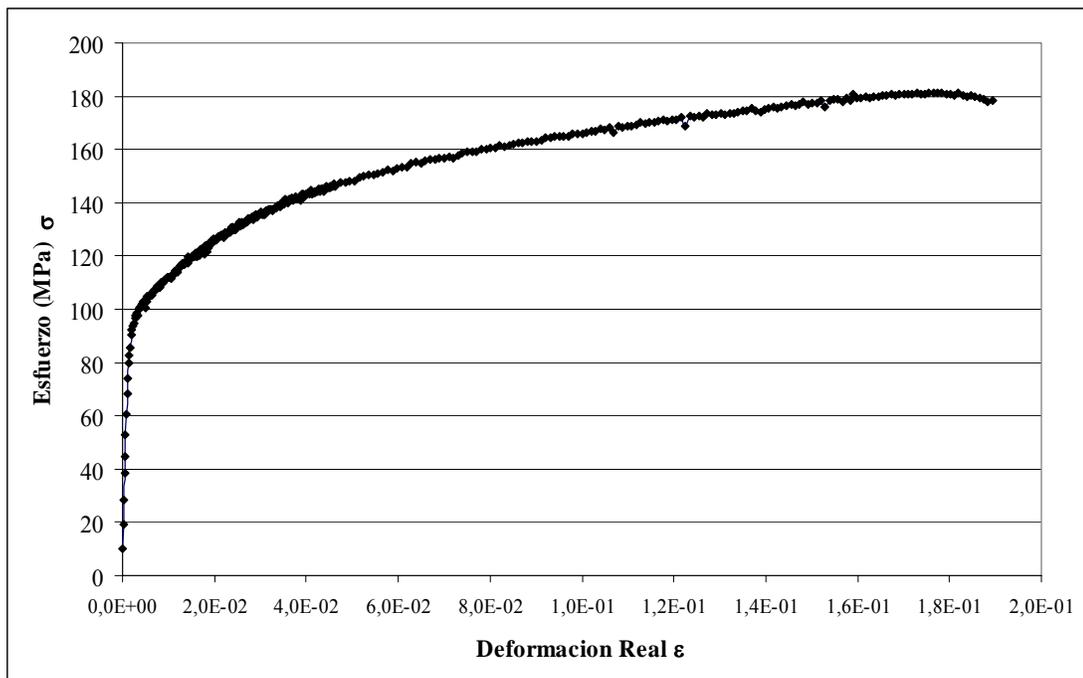


Fig. 23. Gráfica Esfuerzo-Deformación real de una probeta de Aluminio 3003.

Probeta tracción N°	Aluminio 3003		
	Límite de fluencia (σ_y) (MPa)	Resistencia a la tracción (σ_u) (MPa)	Módulo de Elasticidad (E) (MPa)
1	96,6	181,1	69000
2	99,3	175,3	69000
3	112,3	179,5	69000
Promedio	102,7	178,6	69000

Tabla 2. Resultados de los Ensayos de Tracción

De estos ensayos se extrajo el valor promedio del esfuerzo de fluencia ' σ_y ' a 0,02% de la deformación total, con el fin de ser utilizado en el diseño de la probeta usada en los ensayos de fatiga.

3.1.2- Ensayo de dureza.

En la Tabla 3, se muestra el valor promedio de la dureza superficial determinado para el Aluminio 3003.

Aleación	Tipo de ensayo	Dureza
Aluminio 3003	Brinell	46,0 ± 0,5

Tabla 3. Resultados de ensayo de dureza.

3.2- DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA

3.2.1- Elaboración de probetas.

En la Tabla 4 se muestran las dimensiones de las probetas para los ensayos de fatiga y en la figura 24 se puede observar el diseño final de las probetas.

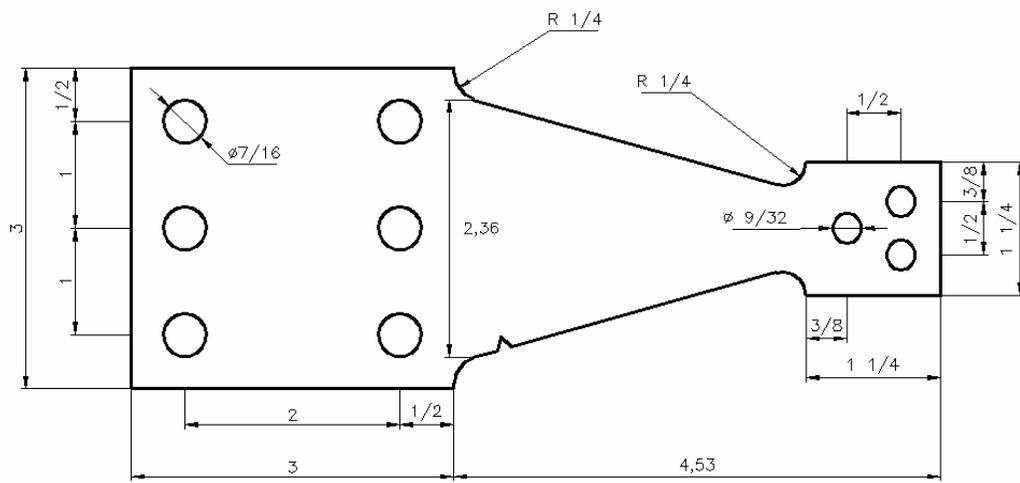
Material	Longitud de ensayo 'L' ($\pm 0,1$ mm)	Ancho base probeta 'b' ($\pm 0,1$mm)	Espesor 't' ($\pm 0,1$ mm)
Al 3003	123,7	60,0	6,0

Tabla 4. Dimensiones probetas de fatiga.

En la Tabla 5 se presentan los valores de deflexión, esfuerzo flector y carga teórica determinados a través de las ecuaciones (31) y (32), así como también se muestra la relación de esfuerzo utilizada en los ensayos.

Material	Deflexión 'D' ($\pm 1,20$mm)	Esfuerzo flector 'S' ($\pm 1,00$ Mpa)	Carga 'P' ($\pm 1,0$ kg)	$R = \sigma_{\text{mín}} / \sigma_{\text{máx}}$
Al 3003	3,17	82,16	27,5	0,0

Tabla 5. Valores de Deflexión, Carga Teórica, Esfuerzo Flector y relación de esfuerzo utilizados.



Medidas en pulgadas.

Fig. 24. Diseño final probetas

3.2.2- Preparación de entallas.

La ubicación y dimensión de la entalla generada a través del maquinado se aprecian en la figura 25.

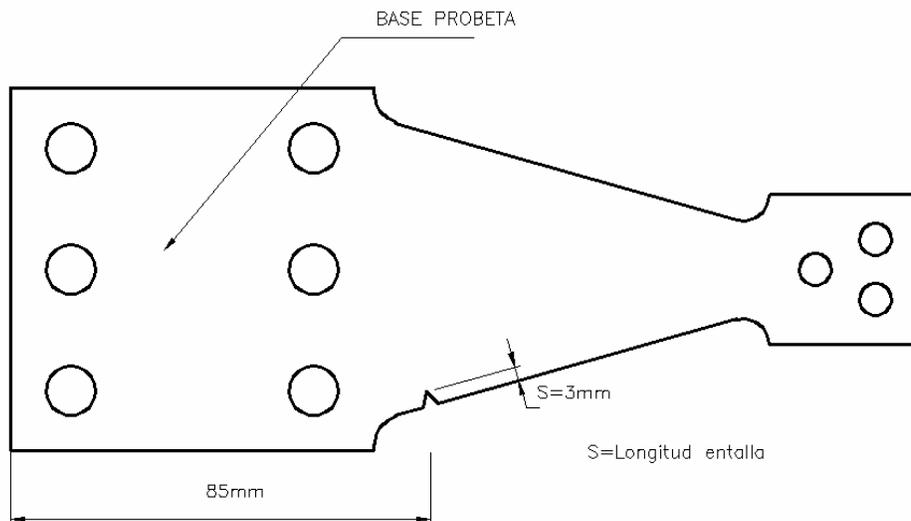


Fig. 25. Diseño final entalla.

3.3- ENSAYO DE FATIGA

3.3.1- Gráficas experimentales, longitud de grieta 'c' contra número de ciclos 'N'.

Durante el desarrollo de la parte experimental se ensayaron tres probetas con la técnica del taladrado, tres con indentaciones y tres sin ninguna técnica de frenado de grietas (probetas base). Se determinaron la longitud de la grieta 'c' para los respectivos valores de ciclos acumulados 'N'. Las representaciones gráficas se muestran en las figuras 26, 27, 28 y 29 (los datos en forma numérica se pueden observar en al Anexo 1).

3.3.2- Gráficas de ' dc/dN ' contra ' ΔK '.

Las curvas de velocidad de propagación de grieta ' dc/dN ' en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ' ΔK ', se pueden apreciar en las figuras 30,31 y 32, donde el eje de las abscisas corresponde a la variable ' dc/dN ', siendo ' c ' la longitud de grieta.

Fig. 26.- Longitud de grieta 'c' vs. Número de Ciclos 'N'. Promedio probetas base

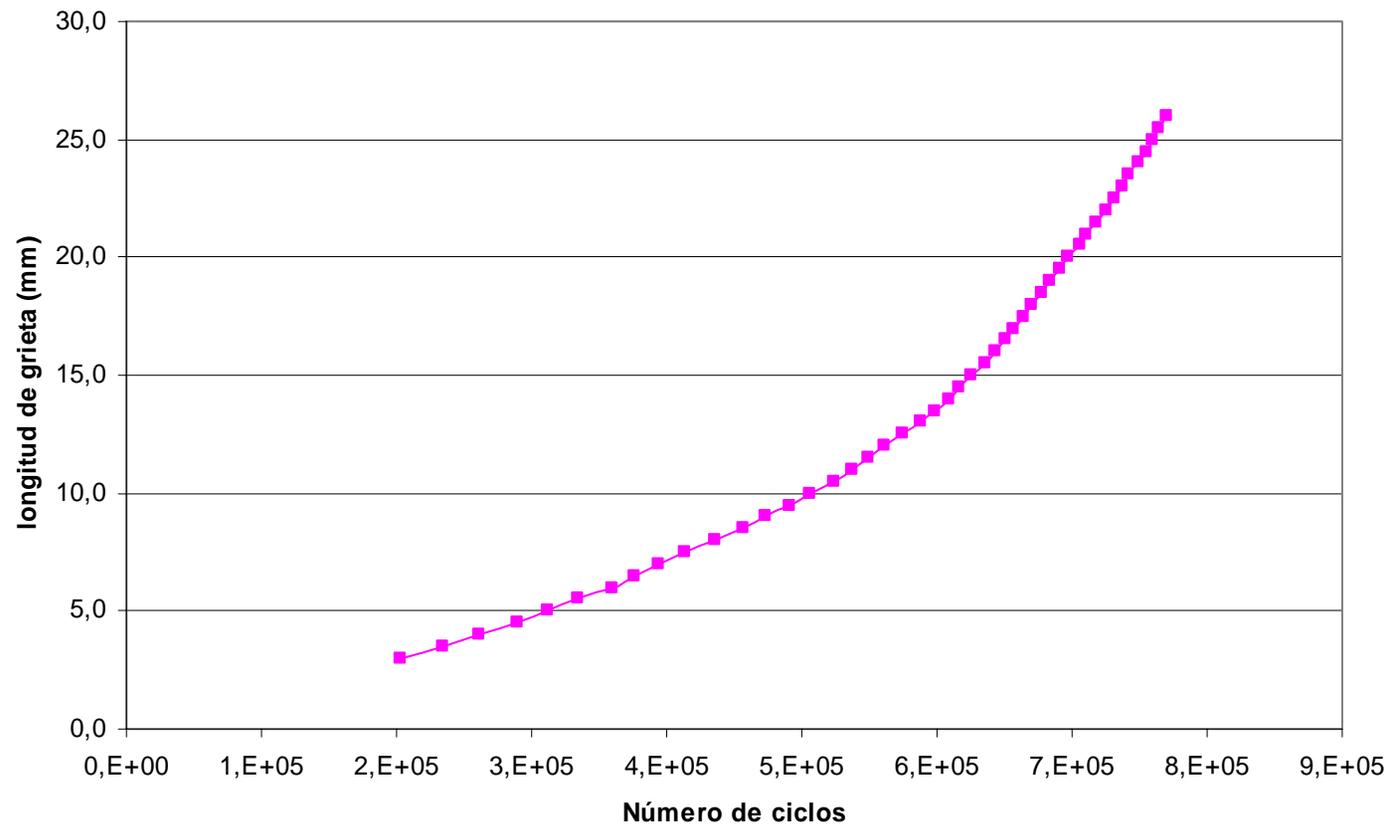


Fig. 28.- Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N' Probetas Indentadas.

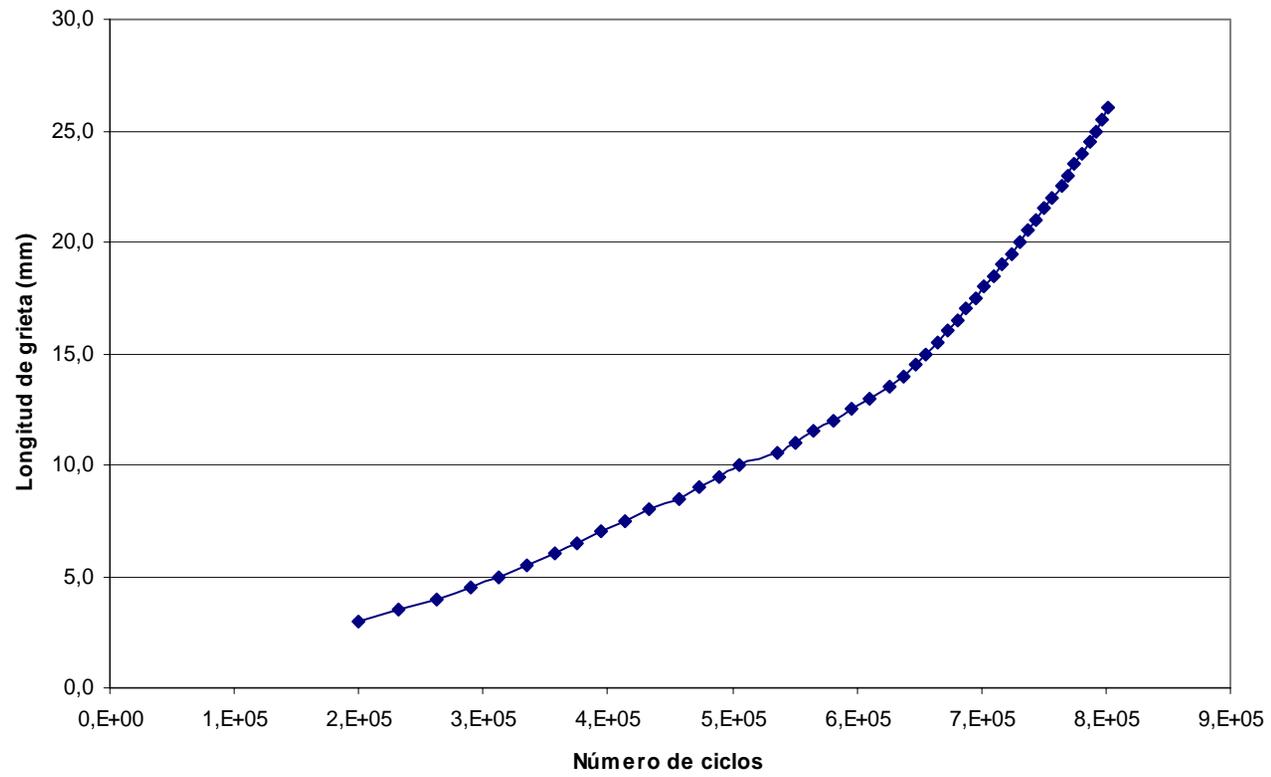


Fig. 27.- Longitud de grieta 'c' vs. Número de Ciclos 'N'. Promedio probetas con agujeros

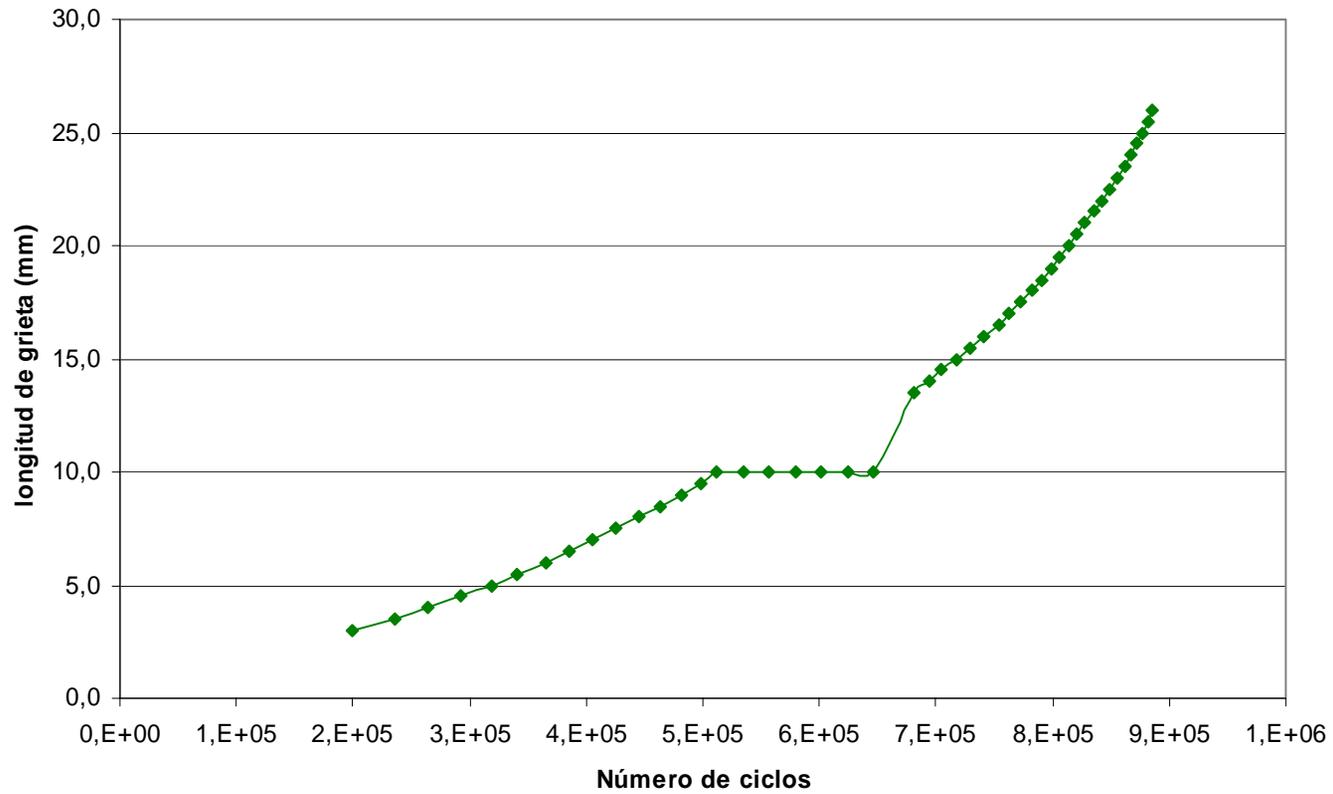
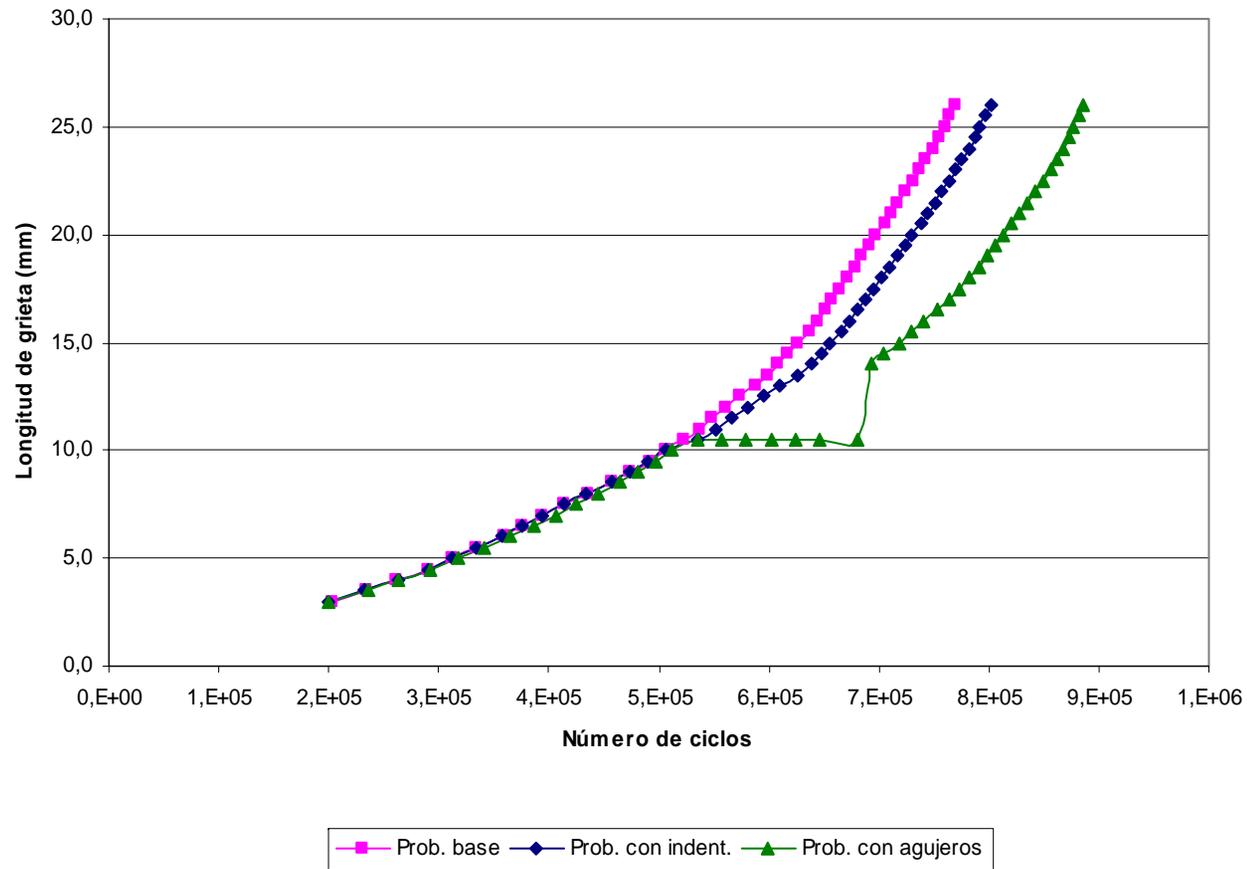


Fig. 29.- Longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos.



Probetas	Re-Inicio de grieta por fatiga 'N_i' (ciclos)	Vida total a fatiga 'N_T' (ciclos)	Mejora vida a fatiga (%)^(*)
Base	-	769.601	-
Indentación	11.256	801.632	4,2
Taladrado	159.159	885.663	15,0

Tabla 6. Reinicio de grieta y vida total a fatiga en las probetas.

(*) ($[N_T - N_{T \text{ Base}}] / N_{T \text{ Base}}$)

Fig. 30.- Velocidad de crecimiento de grieta vs Factor de Intensidad de Esfuerzos. Probetas base.

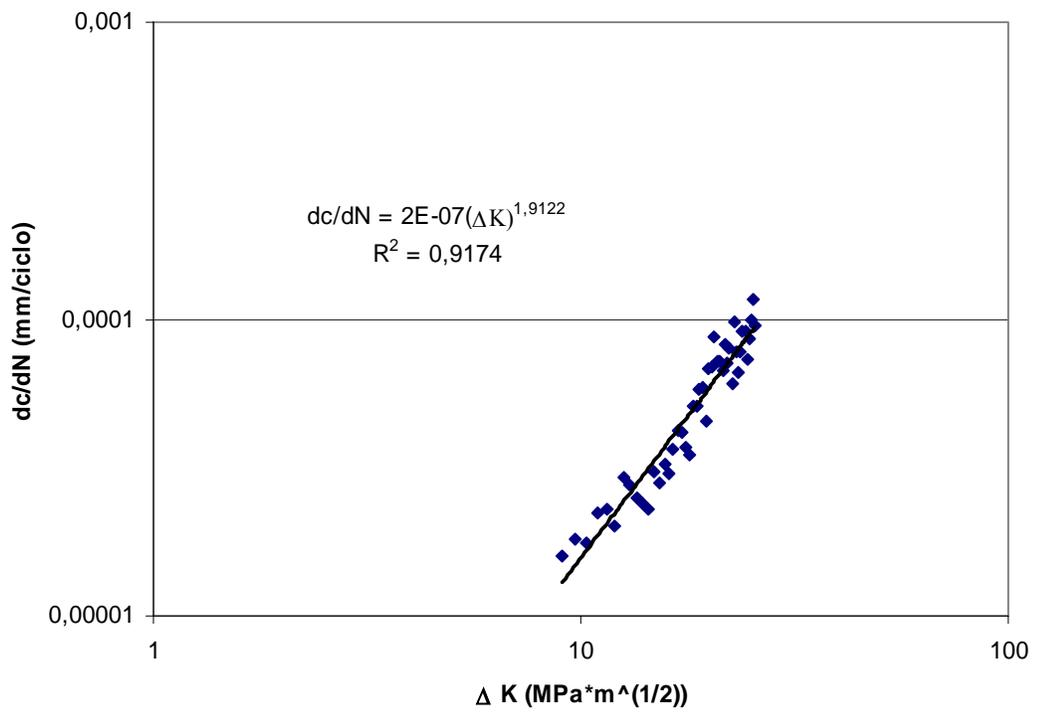


Fig. 31.- Velocidad de crecimiento de grieta vs. Factor de Intensidad de Esfuerzos. Probetas con agujeros.

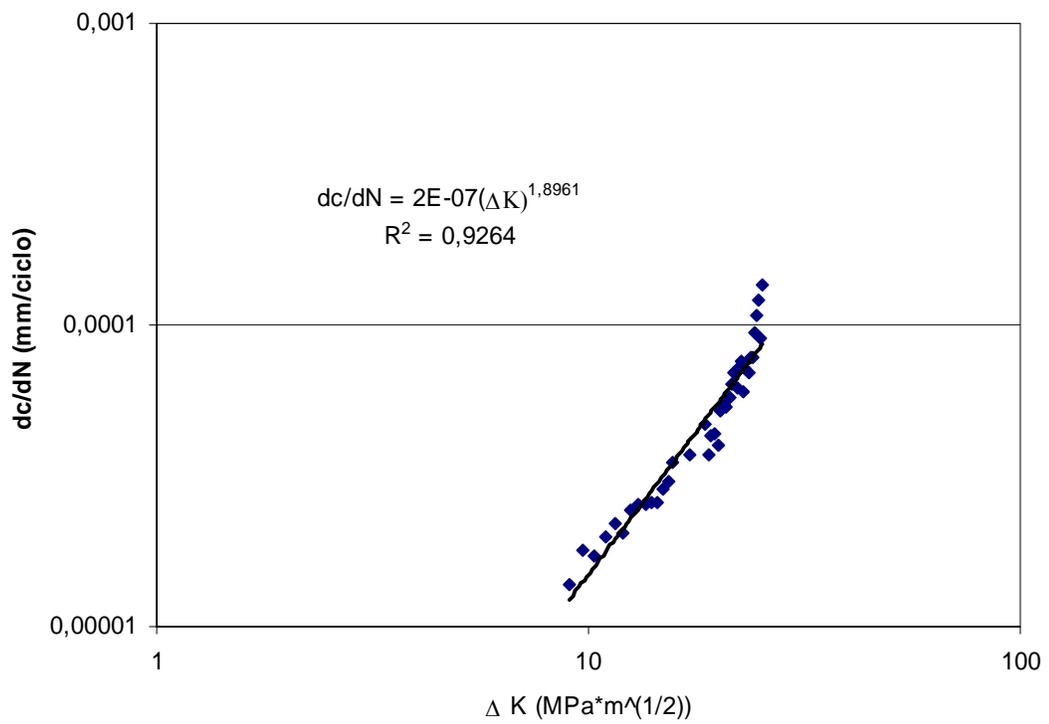
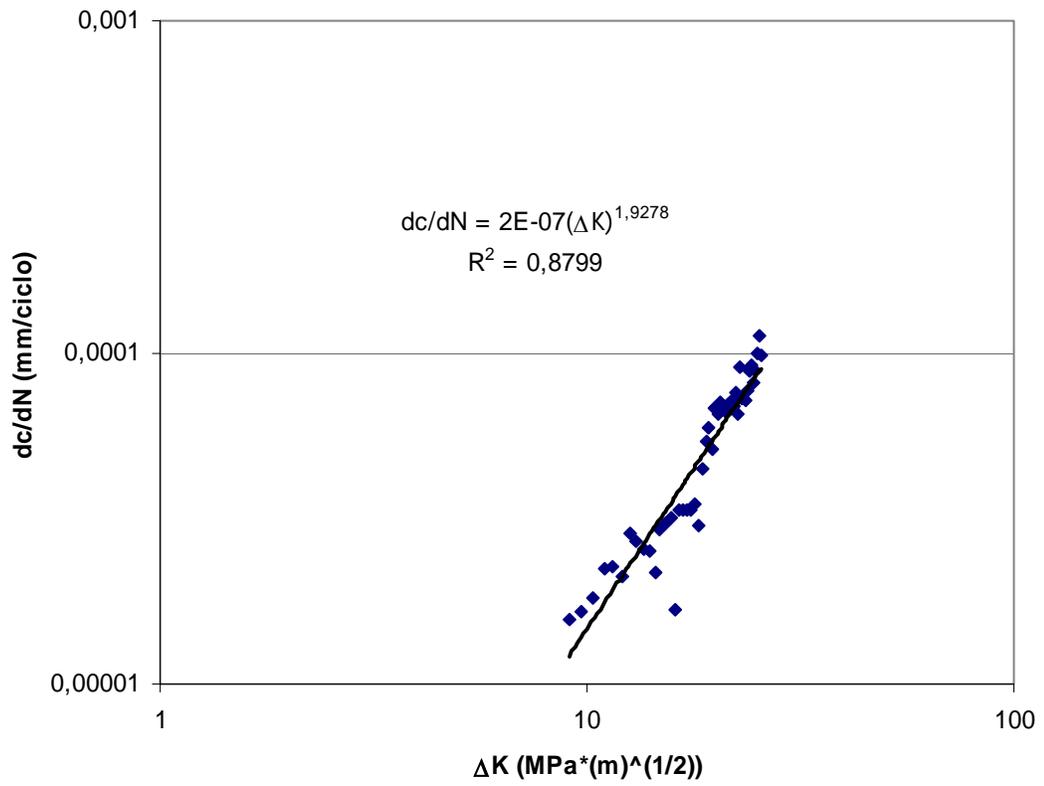


Fig. 32.- Velocidad de crecimiento de grieta vs. Factor de Intensidad de Esfuerzo. Probetas con Indentación.



Probetas	c	m	R²
Base	2,3398E-7	1,9122	0,92
Indentación	2,8056E-7	1,9278	0,88
Taladrado	2,7564E-7	1,8961	0,93

Tabla 7. Valores de los parámetros 'c' y 'm' de la ecuación de Paris.

CAPÍTULO IV
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

4.1.1- Ensayo de Tracción

En la figura 23, se muestra una gráfica esfuerzo-deformación de las probetas, mientras que en la tabla 2, se presentan los valores de fluencia y resistencia a la tracción obtenidos de la gráfica. Los valores promedios presentados, están dentro de los valores reportados en la bibliografía consultada^[45], dichos valores corresponden a las propiedades mecánicas del material ensayado. El valor del esfuerzo de fluencia determinado permite establecer uno de los parámetros necesarios para la realización de los ensayos de fatiga, dichos ensayos se realizaron a un valor por debajo del límite de fluencia, de manera tal de garantizar que durante la deflexión de las probetas no se llegue a condiciones de deformación plástica.

4.1.2- Ensayo de dureza

El valor promedio de la dureza presentado en la Tabla 3, está dentro del intervalo de valores reportado en la literatura para el aluminio 3003.

4.2- DISEÑO DE PROBETAS DE FATIGA

4.2.1- Elaboración de probetas.

La Tabla 4, presenta las dimensiones de las probetas para los ensayos de fatiga, dichas dimensiones fueron calculadas a partir del diseño genérico recomendado por el manual de operación de la máquina de ensayos^[46]. Las probetas fueron fabricadas

considerando el esfuerzo de flexión 'S', siendo éste un 80% del esfuerzo de fluencia del aluminio en estudio. En la figura 24, se muestra el diseño final de las probetas como se usaron para los ensayos. Esta geometría junto con la ubicación y dimensiones de la entalla (figura 25), garantizan la concentración de esfuerzos en la punta de la entalla y en consecuencia la grieta crece a partir de esta, permitiendo conocer con precisión el punto de aparición de la grieta.

4.3- ENSAYO DE FATIGA

4.3.1- Medición del tamaño de grieta vs. Número de ciclos.

Las figuras 26,27 y 28 muestran la variación de la longitud de grieta 'c' en función del número de ciclos 'N', estos resultados experimentales fueron obtenidos mediante la medición óptica de la longitud visible de grieta en la superficie superior de la probeta y el conteo de los ciclos durante los ensayos de fatiga. Posteriormente mediante la relación (14), se determinó el Intervalo del Factor de Intensidad de Esfuerzos ' ΔK ' como función de la longitud de grieta, y se construyeron las gráficas de Velocidad de Crecimiento de Grietas ' dc/dN ' usando el método de la secante. Es pertinente aclarar que la medición de la longitud de grieta se hizo desde la punta de la entalla y se comenzaron a registrar los datos de longitud con número de ciclos, sólo después que la grieta mostró una apreciable longitud de 3 mm.

En la figura 26, se observa el crecimiento promedio de grietas que se obtuvo de las tres probetas base o las probetas que no fueron sometidas a ninguna técnica de retraso de grieta. Se observa que a medida que aumenta el número de ciclos aumenta la longitud de la grieta. Similarmente en la figura 27, se aprecia el crecimiento de grieta contra el número de ciclos para el promedio de las tres probetas en las cuales se llevó a cabo la técnica de indentación.

En la figura 28, se muestra el comportamiento del crecimiento promedio de grietas en las tres muestras ensayadas con la técnica del taladrado de agujeros en la punta de la grieta. Se tiene una zona horizontal que corresponde al agujero taladrado ($\varnothing_t = 3$

mm) y se extiende desde aproximadamente los 530.000 ciclos hasta los 680.000. Esto no significa que se anuló el crecimiento de grieta, sólo representa el número de ciclos que tarda el volver a nuclear y crecer la grieta en el borde del agujero taladrado, hasta una longitud apreciable de 0,5 mm desde este borde. Una vez que se alcanza esta nueva longitud de grieta (para un total de 14 mm medidos desde la punta de la entalla) es registrado el número de ciclos correspondientes para así saber cuanto tiempo tomó la grieta en nuclear.

En la figura 29, se superponen las gráficas 26,27 y 28, mostrando un claro contraste entre los tres resultados obtenidos. Al comparar las tres tendencias, se aprecia el retraso del crecimiento de grieta en las probetas con aplicación de la indentación y el taladrado con respecto a las probetas base.

El retraso presentado por las probetas indentadas es consecuencia del aumento de la zona plástica en la punta de la grieta creada por la introducción de esfuerzos residuales de compresión en el frente de grieta al hacer la indentación.

De la ecuación (19) se tiene que el radio de la zona plástica en el frente de grieta es de 3 mm, y de la ecuación (27) se calcula el radio de la zona plástica generada por la indentación, dando un valor de 12 mm, por lo tanto la zona plástica generada con la indentación es mucho mayor que la zona plástica en el frente de grieta presentada por efecto de la aplicación del esfuerzo alternante. Esto retarda el subsiguiente crecimiento de grieta cuando esta pasa a través de esta zona de esfuerzo residual de compresión

La carga de 250 kg fue suficientemente alta para desarrollar un esfuerzo de compresión residual alrededor de la punta de la grieta y así disminuir su crecimiento. Se tiene de la Tabla 6 que el número de ciclos que tarda la grieta en tener 0,5 mm de longitud desde la huella de la indentación ("re-incipio" de grieta por fatiga ' N_i ') es de 11.256 y además se tiene una mejora de 4,2 % en la vida a la fatiga respecto de las probetas base. Es importante destacar que en este proceso de indentación no existe nucleación de grieta como ocurre en el proceso de taladrado. Simplemente se establece el valor de 0,5mm de longitud de grieta luego de la huella de indentación

como el valor para poder comparar el retraso en el crecimiento de grieta respecto de las probetas base y las probetas taladradas.

El retraso en el crecimiento de grieta mostrado por las probetas con agujeros taladrados es debido a que se disminuyó la concentración de esfuerzos en la punta de la grieta al aumentar el radio de curvatura ' ρ ' y además se remueve totalmente la zona al frente de la misma. Esto da paso a que la grieta debe volver a generarse a través del proceso de nucleación que toma un tiempo considerable de la vida a la fatiga (aproximadamente entre 70% y 80%^[37]) y se lleva una cantidad de 159.159 ciclos hasta que se puede apreciar una grieta de 0,5 mm desde el agujero taladrado (ver Tabla 6). De esta forma se tiene un desplazamiento apreciable de la gráfica en relación con las probetas base por la presencia del número de ciclos ' N_i ' que tarda en nuclear la grieta. Dicha nucleación de la grieta desde el agujero taladrado produce una mejora de la vida a fatiga de 15 % respecto de las probetas base.

Para estos procesos de crecimiento de grietas con o sin retraso se fijó como vida a la fatiga, la cantidad de ciclos que se toma la grieta en alcanzar una longitud de 26 mm.

4.3.2- Velocidad de crecimiento de grieta vs. variación del factor de intensidad de esfuerzos

En la tabla 7 se presentan los valores de los parámetros ' c ' y ' m ' de la ecuación de Paris, para la propagación de grietas por fatiga en la superficie de las muestras ensayadas. Estos resultados muestran que los valores promedios de ' c ' y ' m ' para una relación de esfuerzos ' R ' = 0, son 2,6339E-07 y 1,92, con un factor de correlación R^2 de 0,98. Con estos resultados, la ecuación para la velocidad de crecimiento de grieta para el material estudiado es de la forma:

$$dc/dN = 2,63E-07(\Delta K)^{1,92} \quad \text{mm/ciclo} \quad (33)$$

Los valores de 'c' y 'm' están comprendidos en el intervalo propuesto en la ASM^[45] para los aluminios. Estos valores dependen del material; es por esto que se mantienen constantes aún aplicando técnicas de retraso de crecimiento de grietas al material estudiado.

En las figuras 30,31 y 32 se presentan las gráficas de velocidad de crecimiento de grieta ' dc/dN ' contra la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, ' ΔK ', para las probetas de aluminio 3003 sometidas a los ensayos de fatiga. A partir de estas curvas y conociendo el esfuerzo al cual está sometido el material, es posible determinar el factor de intensidad de esfuerzos y los parámetros 'c' y 'm', con lo cual integrando la ecuación (33), se puede encontrar la longitud de la grieta por fatiga en función del número de ciclos a los cuales está sometido el material, según lo propuesto por Paris^[14].

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La técnica de perforado de agujeros aumenta el radio de curvatura en la punta de la grieta disminuyendo la concentración de esfuerzos en este punto. Además con el taladrado se remueve el material en el frente de la grieta, lo que causa que la grieta tenga que nuclearse de nuevo para poder propagarse, retrasando así su crecimiento en el material e incrementando de forma apreciable la vida total a la fatiga.

La nucleación o inicio de la grieta toma un tiempo considerable en la vida total a la fatiga de un componente.

La técnica de indentación genera un esfuerzo residual de compresión y una zona de deformación plástica en el frente de la grieta, lo cual causa un retraso en el crecimiento de la grieta a medida que atraviesa esta zona.

La zona de deformación plástica generada por la indentación es mayor que la zona plástica en el frente de grieta causada por los esfuerzos alternantes, para las condiciones de aplicación de carga utilizadas en este trabajo.

La ganancia en vida a la fatiga es mayor usando taladrado que usando indentación para las condiciones de carga, forma de aplicación de esfuerzo y geometría de probetas utilizadas en el presente trabajo.

Se comprueba que los parámetros 'c' y 'm' de la ecuación de Paris dependen del material ensayado a fatiga y no varían apreciablemente con la aplicación de técnicas de retraso de crecimiento de grietas.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio por tecnología computacional de elementos finitos para lograr un modelado del comportamiento de la grieta presentado en este trabajo.

Realizar un estudio por elementos de contorno para estimar de forma más exacta el factor geométrico del factor de la amplitud de intensidad de esfuerzo.

Emplear un sistema de medición de la grieta tipo microscopio móvil para registrar el tamaño de grieta con más exactitud y precisión.

Emplear un sistema de transductor de momento para tener los valores precisos del momento flector aplicado durante la realización del ensayo de fatiga a flexión alternativa.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- [1].- ASM Handbook.1992. "Fatigue and Fracture Section: Publication". Volume 19.

- [2].- Fuchs, Stephens. 1980. "Metal fatigue in Engineering". Editorial John Wiley.

- [3].- Dieter, George. E. 1986. "Mechanical Metallurgy". Second Edition. McGraw Hill. pp.375-431.

- [4].- Hunschie A. y Neumann. P. 1986. "Quantitative Measurement of Persistent Slip Band and Crack Initiation". Acta Metallurgical. Vol. 14. N° 2. pp. 207-217.

- [5].- Rosenbloom S. N. y Laird. C. 1993. "Fatigue Crack Nucleation Based on a Random Slip Process -I. Computer Model". Acta Metallurgical, Material. Vol. 41 N° 12. pp. 3473-3482.

- [6].- Cottrell A. H. y Hull. D. 1957."Extrusion and Intrusion by cyclic Slip in Copper". Proceeding of the Royal Society. Serie A. Vol. 242. N° 1229. pp 211-213.

- [7].- Wood. W. A. 1958. "Formation of Fatigue Cracks". Philosophic Magazine. Serie VIII. Vol. 3. pp. 692-699.

- [8].- Neumann. P. September 1969. "Coarse Slip Model of Fatigue". Acta Metallurgical. Vol. 17. pp. 1219-1225.

- [9].- Lynch. S. P . 1980."A new Model for Initiation and Growth of Fatigue Cracks". Metal Science. Vol. 9. pp 1167-1178.
- [10].- Ewalds H. L. 1985 , Wanhill R. J. " Fracture Mechanics" Edward Arnold.
- [11].- Fazil Erdogan.1968"Crack Propagation Theories". Fracture and Advanced Treatise Academic Press Inc. Volume II. Mathematical Fundamentals. Chapter 5. pp. 497-590.
- [12].- Czyryca. Ernest J. 1992. "Fatigue Crack Initiation". ASM Handbook. Mechanical Testing. Vol. 8.
- [13].- Mc Evily A. J. y Boettner. R. C. July 1963. "On Fatigue Crack Propagation in FCC Metals". Acta Metallurgical. Vol. 11.
- [14].-Paris P., Erdogan F. 1963. "A Critical Analisis of Crack Propagation Laws. Transactions of the ASME Serie D". pp 528-534.
- [15].- Cortie M. B. y Garrett. G. G. 1988. "On the Correlation Between the C and m in the Paris Equation for Fatigue Crack Propagation". Engineering Fracture Mechanics. Vol. 30. N° 1. pp. 49-58.
- [16].-Schütz. Walter "A History of Fatigue". Engineering Fracture Mechanics. Vol. 54. N° 2. pp. 263-300.
- [17].- Xiulin Zheng y Manfred A. Hirt. 1983. " Fatigue Crack Propagation in Steels". Engineering Fracture Mechanics. Vol. 18. N° 5. pp. 965-973.
- [18].- González. J. 1998. "Mecánica de Fractura". Limusa S.A. Grupo Noriega. México

- [19].- Matthews, W.T. 1970. "ASTM STP " Vol.466. p. 3.
- [20].- Robertson. T.S. 1951 "Engineering". Vol.172. p. 445.
- [21].- E. A. Lange , F. J. Loss. "ASTM STP" Vol.466. 1970. p.241.
- [22].- Klesnil M. and Lukás. P. 1980. "Fatigue of Metallic Materials" Materials Science Monographs, 7.
- [23].-Merizalde C. "Estudio de tenacidad de fractura en aleaciones de aluminio" Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales UCV. Tesis. 2001.
- [24].- Hertzberg R. W. 1978. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials " Mc Graw Hill.
- [25].- Irwin. G. R. 1958 " Handbuch der Physik". Vol. VI. Springer. Berlín. p.551.
- [26].- Sherret. F. Feb. 1976. " The Influence of Shot Peening and Similar Surface Treatments on The Fatigue Properties of Metals". Part I, S&T Memo 1/66. Ministry of Aviation. U.S. Gov't. Report 487487.
- [27].- Forrest. P. 1972. " Fatiga de los Metales" Ediciones URMO. Bilbao.
- [28].- Inglis. C. E. 1933. " Proceedings". Institute of Naval Architects. 55. p.219.
- [29].- Domazet Z. 1996 . "Comparison of Fatigue Crack Retardation Methods". Engineering Failure Analysis. Vol. 3 . pp. 137-147.

- [30].- Popp HG, Wilbers LG. 1971. " Fatigue Damage and Repair of jet Engine Components" ASTM STP 495. pp. 535-546.
- [31].- Linnert G. " Welding Metallurgy" Vol. 2 . New York. American Welding Society.
- [32].- Landy Ml. Armen, H. J. 1986. "Enganced stop drill repair procedure for cracked structures". ASTM STP 927. 190-220.
- [33].- Ghrifi R. , Amrouche A. , Imad A. , Mesmacque G. "Fatigue Life Estimation after crack repair in 6005 A-T6 aluminium alloy using the cold expansion technique".Fatigue Fracture Engineering mater. Struct. 2000. Vol. 23. pp. 911-916.
- [34].- Novotny LG."Overstressing of pressure vessels to increase service life" .Proc. Inst. Mech. Engrs. UK. 1986 C/268. pp. 249-256
- [35].- Sheu BC, Song PS., " The effect of infiltration induced crack closure on crack growth retardation". Scripta Metall. 1994. Vol 31. pp. 1301-1306.
- [36].- Miyagawa H, Nisitani H. "Retardation of fatigue crack propagation due to additional holes or indentations in plate specimens". Bull JSME 1985. Vol 28. 2219-2223.
- [37].- Suresh S. 1991. "Fatigue of Materials". Cambridge: Cambridge University Press.
- [38].- Song P.S., Shieh Y.L."Stop drilling procedure for fatigue life improvement". International Journal of Fatigue. Vol 26. 2004. pp.1333-1339.

- [39].- Amrouche A., Mesmacque G., S. García, A. Talha. "Cold expansion effect on the initiation and the propagation of the fatigue crack". *International Journal of Fatigue*. Vol. 25. 2003. pp. 949-954.
- [40].- Lacarac V. D., García Granada. A.A "Prediction of the growth rate for fatigue cracks emanating from cold expanded holes". *International Journal of Fatigue*. Vol. 26. 2004. pp. 585-595.
- [41].- Goto M., Miyagawa H. "Crack growth arresting property of a hole and brinell type dimple". *Fatigue Fracture Engineering Material Structure* 1996. Vol. 19. pp 39-49.
- [42].- Song P. S., Sheu. G. L. " Retardation of fatigue crack propagation by indentation technique" *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79. 2002. pp. 725-733.
- [43].- Yang J. M., Her Y. C., "Laser shock peening on fatigue behaviour of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes". *Materials Science and Engineering* . A298. 2001. pp. 296-299.
- [44].- Lawn B.R., A.G. Evans, D. B. Marshall, " Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system" *Journal of American Ceramic Society* 63, Issues 9-10. 1994. 574.
- [45].- ASM Handbook. Vol. 2 "Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special Purpose Materials". p.18.
- [46].- Instruction Manual. Model LFE-300. "Variable Speed Life, Fatigue, and Endurance Testing Machine".
- [47].-Perdigón. J. "Evaluación de la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga mediante la técnica no destructiva de corrientes inducidas". *Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Los Materiales. U.C.V. Tesis*. 2003.
- [48].- ASM Handbook. "Fatigue and Fracture Section: Publication". Vol. 19.1992.

CAPÍTULO VII
ANEXOS

Anexo I. Valores obtenidos para longitud de grieta 'c' vs. Número de ciclos 'N'

Cprom_base (mm)	Nprom_base	Nprom_agujeros	Nprom_Indentación
3,0	202500	199057	200300
3,5	233973	235546	232033
4,0	261706	263591	262267
4,5	290005	292859	289867
5,0	312537	318184	312167
5,5	334368	341064	334433
6,0	359167	365667	358167
6,5	376197	386160	375667
7,0	394195	405876	394167
7,5	414158	425481	413667
8,0	435167	444809	433500
8,5	457033	464194	456667
9,0	473301	481634	473667
9,5	491079	498131	490167
10,0	506602	512351	505833
10,5	523202	534684	535833
11,0	536879	557018	550833
11,5	548734	579351	565833
12,0	560800	601684	580833
12,5	574376	624018	595833
13,0	588630	646351	610167
13,5	598428	680416	626874
14,0	608237	693843	638093
14,5	616890	704461	647327
15,0	625420	717972	655713
15,5	636461	729607	665454
16,0	643833	741135	672850
16,5	651122	753688	680520
17,0	656821	763266	687549
17,5	663726	772536	694845
18,0	670635	781832	702431
18,5	678083	790486	709618
19,0	684169	798332	716562
19,5	691194	805536	723840
20,0	697423	813600	730413
20,5	705725	820521	738060
21,0	710864	827135	743580
21,5	717300	835441	750482
22,0	724891	842439	757411
22,5	731346	849628	763967

23,0	736872	856010	769685
23,5	742403	862416	775160
24,0	749239	867682	781347
24,5	755047	872306	787007
25,0	760060	876455	792074
25,5	764345	881963	796530
26,0	769601	885663	801632