

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENACIDAD DE FRACTURA DEL ACERO ASTM A36

**Diego Alejandro Gómez López
Cristian Fabian Llorente Romero**

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título
de
Ingenieros Mecatrónicos

Supervisor: Jairo Useche Vivero, Ph.D.

**Programa de ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Tecnológica de Bolívar
Marzo, 2012**

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENACIDAD DE FRACTURA DEL ACERO ASTM A36

Por

Diego Alejandro Gómez López

Cristian Fabian Llorente Romero

Universidad Tecnológica de Bolívar

Marzo 2012

Este documento fue realizado usando MiKTeX 2.9, 2011.

Dedicatoria

A quienes me enseñaron a nadar contra la corriente, mis amados padres, Néstor y Damaris. A mis hermanos por impulsarme cada día a ser un mejor ejemplo a seguir. A mis grandes amigos, casi hermanos que me han entregado su apoyo incondicional y aliento cuando lo he necesitado.

Diego Alejandro Gómez López

Dedicatoria

A mis padres, quienes con su amor y comprensión, forjaron una persona íntegra, a mis hermanos, que me dieron todo su apoyo y compañía, y en especial, a mis amigos, por siempre inspirarme la perseverancia y la confianza.

Cristian Fabián Llorente Romero

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a:

Todas aquellas personas que participaron directa e indirectamente en nuestra formación como profesionales. Al Ing. Mecánico Jairo Useche Vivero quien como tutor fue nuestro guía y mentor en este trabajo. Al Ing. Mecánico Dawin Jimenez y al Ing. Electrónico Edgard Mulford quienes nos brindaron todo su apoyo y colaboración para realizar las pruebas en el laboratorio de Resistencia de materiales. Al Ing. Mecánico Pedro Osorio Viaña y a su querida esposa por haber puesto a nuestra disposición los recursos técnicos de su gran empresa.

Índice general

1. Marco Teórico	4
1.1. Introducción a la Mecanica de Fractura	4
1.1.1. Fractura Ductil	5
1.1.2. Fractura Frágil	5
1.2. Grietas en una estructura	7
1.3. Mecánica de fractura lineal elástica (LEFM)	8
1.3.1. El balance de energía de Griffith	9
1.3.2. Modificación de la ecuación de Griffith	13
1.3.3. Tasa de liberación de energía y energía de fractura	14
1.3.4. Factor de intensidad de tensiones	16
1.3.5. La inestabilidad y la curva R	22
2. Metodología Experimental	25
2.1. Determinación experimental de la tenacidad de fractura K_{IC}	25
2.1.1. Probetas para los ensayos.	26
2.1.2. Características Exigidas de la Grieta	28
2.1.3. Medición de la abertura de la grieta	30
2.1.4. Procedimiento experimental	33
2.1.5. Cálculo e Interpretación de los Resultados	34
3. Experimentación	39
3.1. Dimensiones de probetas	39
3.2. Equipos para la prueba de dobléz	39
3.2.1. Medidor de desplazamiento	40
3.3. Prueba de dobléz	42
4. Análisis de los resultados	49
Anexos	56
A. Medidas Extensometro	57

B. Instalación de galgas extensiometricas	59
B.1. Preparación de la superficie	59
B.1.1. Limpieza burda	59
B.1.2. Suavizar la superficie	59
B.1.3. Eliminar grasas	59
B.1.4. Lijado	60
B.1.5. Limpieza fina	61
B.1.6. Marcar la superficie	61
B.2. Adhesión de las galgas	61
B.2.1. Posicionamiento de la galga	61
B.2.2. Alineación de la galga	61
B.2.3. Preparación final	62
B.2.4. Aplicación del adhesivo	63
B.2.5. Adhesión	63
B.2.6. Aplicación de presión	64
B.2.7. Retirar la cinta	65

Índice de figuras

1.1.	<i>Tipos de fractura observados en metales Ductiles. a) Cizalladura en monocristales, b) Totalmente dúctil en policristales, c) Relativamente dúctil en policristales. Mj Anglada [9, pág. 18]</i>	5
1.2.	<i>Curva esquemática esfuerzo-deformación para materiales que muestran comportamiento dúctil o frágil acompañadas por las respectivas superficies de fractura de probetas rotas en tracción uniaxial. Mj Anglada [9, pág. 17]</i>	6
1.3.	<i>El problema de ingeniería. a) Curva de crecimiento de la grieta. b) Curva de esfuerzo residual. Broek [8, pág. 6]</i>	8
1.4.	<i>Agujero elíptico de una placa plana. Arana [12, pág. 26]</i>	10
1.5.	<i>Placa de grandes dimensiones (infinita), con una grieta pasante de tamaño 2a. Arana [12, pág. 28]</i>	11
1.6.	<i>Evaluación de la energía superficial γ_s. Arana [12, pág. 30]</i>	12
1.7.	<i>Incremento de la longitud da de la grieta. Arana [12, pág. 33]</i>	14
1.8.	<i>a) Placa con extremos fijos sometida a tensión, b) reducción de energía por extensión de grieta. Ávila [17, pág. 172]</i>	16
1.9.	<i>a) Placa con extremos libres sometida a tensión uniforme, b) Placa con extremos libres sometida a carga, c) Reducción de energía por extensión de grieta. Ávila [17, pág. 172]</i>	17
1.10.	<i>a) Modos de agrietamiento. Broek [8, pág. 8]</i>	18
1.11.	<i>a) Coordenadas de campo de esfuerzos en la vecindad de una grieta bajo carga de tensión perpendicular al plano de grieta. Hernandez [10, pág. 16]</i>	19
1.12.	<i>Factores para el cálculo de K de diversas geometrías comunes. Arana [12, pág. 58]</i>	21
1.13.	<i>Diagramas esquemáticos de las curvas de fuerza motriz y de R para dos materiales con distinto tipo de comportamiento. Arana [12, pág. 40]</i>	23
1.14.	<i>Diagrama esquemático de la fuerza motriz y la curva R que compara el control de la carga y el control del desplazamiento. Arana [12, pág. 41]</i>	24
2.1.	<i>Probeta para ensayo de flexión. ASTM E 1820 [7]</i>	26
2.2.	<i>Probeta compacta. ASTM E 1820 [7]</i>	27
2.3.	<i>Montaje de la probeta de flexión en tres puntos en la máquina de pruebas. ASTM E 1820 [7]</i>	29

2.4.	<i>Efecto del radio ρ de la muesca sobre el valor critico de intensidad de esfuerzos K_C. Broek [8, pág. 125]</i>	30
2.5.	<i>Formas de entalla en V. ASTM E 1820 [7]</i>	31
2.6.	<i>Medida de la grieta de fatiga. ASTM E 1820 [7]</i>	31
2.7.	<i>Galga extensiométrica utilizado en el extensómetro</i>	32
2.8.	<i>Relación esfuerzo y deformación</i>	33
2.9.	<i>Medidor de desplazamiento (extensómetro) diseñado para 8.0 mm o rangos más grandes. ASTM E 1820 [7]</i>	34
2.10.	<i>Registro $P - v$ para diversos ensayos. Arana [12]</i>	36
2.11.	<i>Principales tipos de curvas carga-desplazamiento de ensayos con distintos comportamiento. ASTM E 1820 [7]</i>	38
3.1.	<i>Dimensiones y forma de la entalla de la probeta. Dimensiones en mm.</i>	40
3.2.	<i>A) Disco de sierra circular de acero rápido de alta velocidad (HSS). B) Taladro fresador marca SHENYANG MACHINE TOOL modelo ZX45</i>	41
3.3.	<i>Dimensiones de probeta de doblez. Dimensiones en mm.</i>	42
3.4.	<i>A) Máquina de pruebas universales SHIMADZU UH-600I. B) Panel de control.</i>	43
3.5.	<i>Soporte de rodillos para el montaje de la probeta.</i>	44
3.6.	<i>Esquema del extensómetro para mediciones mayores a 8 mm.</i>	44
3.7.	<i>A) Barra de aluminio 1100. B) Placas laterales en acero AISI M2. C) Tornillos de acero galvanizado de ϕ 1/8" x 1 1/4" de longitud UNC</i>	45
3.8.	<i>Montaje para caracterización del extensómetro</i>	45
3.9.	<i>Sistema de adquisición de datos</i>	46
3.10.	<i>Curvas de desplazamiento Vs corriente para cada galga extensiométrica y ecuaciones obtenidas de la regresión lineal de cada conjunto de datos.</i>	46
3.11.	<i>Configuración de la prueba de doblez para obtener la tenacidad de fractura</i> .	47
3.12.	<i>Probeta deformada por propagación de la grieta</i>	47
3.13.	<i>Grafica de carga (KN) vs alargamiento vertical (mm) realizado por la máquina de pruebas universales Shimadzu UH-I</i>	48
3.14.	<i>Probeta de doblez después de realizado el ensayo en la máquina de pruebas universales</i>	48
4.1.	<i>Grafica $P-v$ de prueba de flexión en tres puntos</i>	50
A.1.	58
B.1.	<i>Galga y terminal adheridos a la cinta</i>	62
B.2.	<i>Galga alineada en el espécimen</i>	63
B.3.	<i>Levantar la cinta en un ángulo agudo</i>	64
B.4.	<i>Posicionar la cinta para que la parte de debajo de la galga quede expuesta</i> .	64
B.5.	<i>Aplicación del adhesivo</i>	65
B.6.	<i>Adhesión</i>	66
B.7.	<i>Aplicación de presión en la galga</i>	66
B.8.	<i>Cómo retirar la cinta</i>	67

Objetivos

Objetivos Generales

- Obtener a través de los ensayos estandarizados por la norma ASTM E1820 - 01 el valor de tenacidad de fractura para el acero ASTM A36.

Objetivos Específicos

- Establecer conceptos y procedimientos para el desarrollo de pruebas a la tenacidad de fractura basados en la norma ASTM E1820 - 01.
- Diseñar y fabricar las probetas que se utilizarán en el procedimiento de determinación de K_{IC} .
- Fabricar un extensómetro para medir el desplazamiento en la boca de la grieta (diseño y calibración).
- Realizar pruebas de ensayo con el acero ASTM A 36 en la maquina de pruebas universales.
- Utilizar el grafico de carga vs tiempo proyectado por la maquina universal y el grafico obtenido con el extensómetro para obtener el grafico de carga vs desplazamiento y así determinar el valor de tenacidad de fractura del acero ASTM A 36.

Introducción

Las múltiples aplicaciones que tienen los materiales, han llevado al hombre a innovar constantemente y obtener de éstos nuevas propiedades y usos, aplicaciones en las cuales se requiere bajo peso del material y una resistencia igual o mayor, como en el área aeroespacial o en el automovilismo; pero a medida que los materiales cambian en sus propiedades y su forma en la micro estructura (granos), van apareciendo nuevas formas de comportamiento con respecto a los eventos o efectos que suceden en su alrededor y en su interior, factores como las altas o bajas temperaturas, corrosión, fatiga, desgaste, abrasión, concentración de esfuerzos en porosidades, (o combinación de éstos) y otros, provocan la aparición de grietas que lenta o rápidamente se pueden propagar por la estructura del material y terminar en una fractura con esfuerzos menores a los de diseño.

El desarrollo de la mecánica de fractura se basa en tres factores principales que controlan la susceptibilidad de una estructura a la fractura frágil. Estos son: La tenacidad de fractura del material, medida de la fisura, y nivel de esfuerzo aplicado. La tenacidad de fractura puede ser definida como la capacidad del material de soportar carga o deformación plástica en presencia de una grieta, este parámetro es considerado el más importante en el estudio de la mecánica de fractura de un material por dos Razones:

- En esas condiciones ocurren la mayoría de las roturas catastróficas en la práctica.
- Representa un valor mínimo de la tenacidad del material cargado estáticamente y, por tanto, permite el diseño con la máxima seguridad de estructuras para las que no se prevén cargas dinámicas.

El acero ASTM A36 es una aleación de acero al carbono de propósito general muy comúnmente usado en nuestro entorno en las construcciones metalme-cánicas de toda índole, en el presente trabajo se realiza el procedimiento experimental para la determinación de la tenacidad de fractura del acero ASTM A36 basado en la norma ASTM E-1820, esta norma considera varios tipos de probetas, entre las cuales se encuentran la de flexión en tres puntos, a la cual se realiza una entalla tipo V, la grieta se establece mediante un

preagrietamiento por fatiga. En el procedimiento de ensayo se va aplicando una carga P progresivamente creciente hasta que se produzca la fractura por crecimiento inestable de la grieta y se va midiendo el desplazamiento relativo v entre dos puntos localizados simétricamente en lados opuestos de la grieta, con base en el diagrama $[P - v]$ la norma contempla el cálculo de un factor de intensidad de esfuerzos K_Q el cual es evaluado para determinar si esta satisface los requerimientos y es tomado como valor crítico de la tenacidad de fractura del material.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Introducción a la Mecanica de Fractura

La mecánica de fractura es una ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos, así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades, sometidos a cierta tensión externa. Esta ciencia surgió con los trabajos fundamentales de Griffith (1921, 1924) [1] sobre criterios de propagación de grietas en sólidos, basados en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie y por esta razón se conoce como una formulación energética de la mecánica de fractura.

Se puede definir a la Fractura como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un dado estado de cargas. Algunos metales sometidos a un ensayo de tracción presentarán una estricción en la zona central de la probeta para romper finalmente con valores de reducción de área que pueden llegar en algunos casos al 100 %. Este tipo de fractura se denomina dúctil. Por el contrario, muchos sólidos presentan fracturas precedidas por cantidades muy pequeñas de deformación plástica, con una fisura propagándose rápidamente a lo largo de planos cristalográficos bien definidos que poseen baja energía superficial. Este tipo de fractura se denomina frágil.

1.1.1. Fractura Dúctil

La figura 1.1 muestra esquemáticamente tres perfiles macroscópicos característicos de fracturas dúctiles por tensión uniaxial. En monocristales de metales con estructura cristalina hexagonal (HCP, Hexagonal Close-Packed), tales como Ti o Zn, se produce deslizamiento en planos basales hasta la separación del cristal por cizalladura (Figura 1.1a). La configuración mostrada en la figura 1.1b se encuentra en metales muy blandos, tales como oro y plomo a temperatura ambiente, y en otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperatura elevada. En estas situaciones los materiales se comportan de manera muy dúctil y rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, presentando una fuerte reducción de área. Pero el tipo más común de perfil de fractura a tracción en los materiales dúctiles es el presentado en la figura 1.1c, en la cual la fractura es precedida por sólo una cantidad moderada de estricción¹. [9, pág. 18]

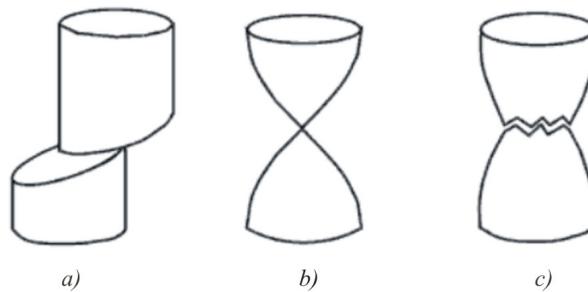


Figura 1.1: *Tipos de fractura observados en metales Ductiles. a) Cizalladura en monocristales, b) Totalmente dúctil en policristales, c) Relativamente dúctil en policristales. Mj Anglada [9, pág. 18]*

1.1.2. Fractura Frágil

La fractura frágil ocurre sin deformación plástica apreciable y por propagación rápida de una grieta. La dirección del movimiento de la grieta es perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana, tal como se observa en la figura 1.2.

¹Disminución de una sección de un cuerpo sometido a un esfuerzo de tracción.

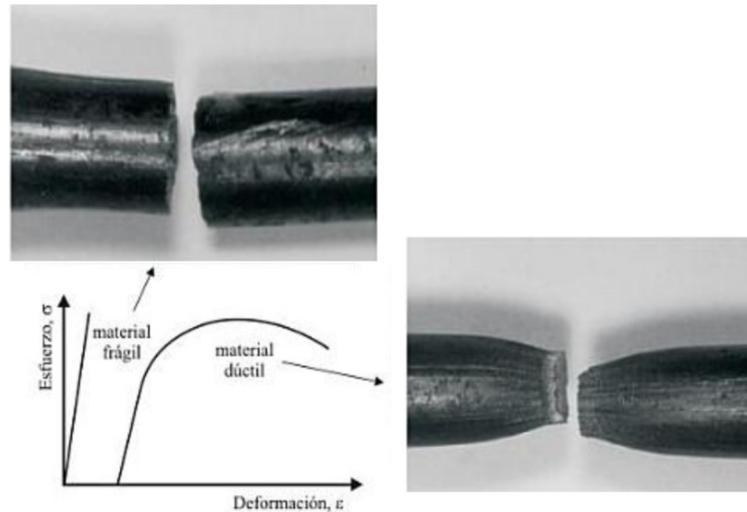


Figura 1.2: Curva esquemática esfuerzo-deformación para materiales que muestran comportamiento dúctil o frágil acompañadas por las respectivas superficies de fractura de probetas rotas en tracción uniaxial. Mj Anglada [9, pág. 17]

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta se debe a la rotura sucesiva de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos. Proceso que se denomina descohesión o clivaje. Este tipo de fracturas se dice que es transgranular (o transcristalina), debido a que las fisuras pasan a través de los granos. El proceso de clivaje implica fracturas transgranulares a lo largo de planos cristalográficos específicos. La rotura por clivaje es más probable cuando el deslizamiento de dislocaciones se encuentra restringido. Por ello el clivaje es observado en metales de estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC, Body-Centered-Cubic), pues sus redes cristalinas ofrecen una mayor resistencia al movimiento de dislocaciones y tiene un número limitado de sistemas de deslizamiento activos, en tanto que rara vez aparece en metales cúbicos centrados en las caras (FCC, Face-Centered-Cubic) los cuales poseen un gran número de sistemas de deslizamiento. En materiales cerámicos con enlaces iónicos y covalentes el clivaje también es un mecanismo frecuente. En materiales no cristalinos, tales como vidrio y polímeros amorfos, la rotura puede producirse de forma análoga, aunque lógicamente no sigue direcciones cristalográficas pues estas no existen. [9, pág. 20]

1.2. Grietas en una estructura

Considérese una estructura en la cual se desarrolla una grieta, debido a la aplicación de cargas repetidas o a la combinación de carga y un ataque del ambiente, esta grieta crecerá con el tiempo, esto implica que la velocidad de propagación de la grieta también se incrementara con el tiempo. La propagación de la grieta como una función del tiempo puede ser representada por una curva creciente como se muestra en la figura 1.3a. Debido a la presencia de la grieta la resistencia de la estructura decrece: esta es más baja que la resistencia original para la cual fue diseñada, la resistencia residual de la estructura decrece progresivamente con el incremento del tamaño de la grieta, como es mostrado diagramáticamente en la figura 1.3b. Muchas estructuras son diseñadas para llevar cargas de servicio que son lo suficientemente altas para iniciar una grieta, particularmente cuando existen defectos o se presentan concentraciones de esfuerzos. El diseñador tiene que anticipar esta posibilidad de agrietamiento y consecuentemente aceptar un cierto riesgo de que la estructura falle, esto implica que la estructura puede tener solo un tiempo de vida limitado, por supuesto, la probabilidad de falla debería estar en un nivel bajo aceptable durante toda la vida de servicio.

En orden de garantizar esta seguridad se tiene que predecir cuán rápido la grieta crece y cuán rápido la resistencia residual decrece. Hacer estas predicciones y desarrollar los métodos de dichas predicciones son los objetivos de la mecánica de fractura. [8, pág. 6].

En la práctica, todas las estructuras ingenieriles contienen fisuras, o defectos tipo fisuras a alguna escala, en la mayoría de los casos detectables por medio de ensayos no destructivos. Muchas veces, estos ensayos revelan algún defecto; como en general la estructura o pieza se ha estado comportando satisfactoriamente, se produce la discusión si el defecto deberá ser reparado o no. La situación se complica cuando se sabe, o se sospecha, que el defecto puede crecer lentamente por fatiga o por acción del medio ambiente. Además, sabemos que cuando existen ciertas condiciones, se puede producir una fractura frágil inestable a niveles de tensión bien por debajo del límite de diseño elástico (por ejemplo: bajas temperaturas de servicio, defectos de soldadura, etc.).

El conocimiento de la mecánica de fractura mejora las condiciones de diseño donde los efectos de los defectos y las condiciones de operación son

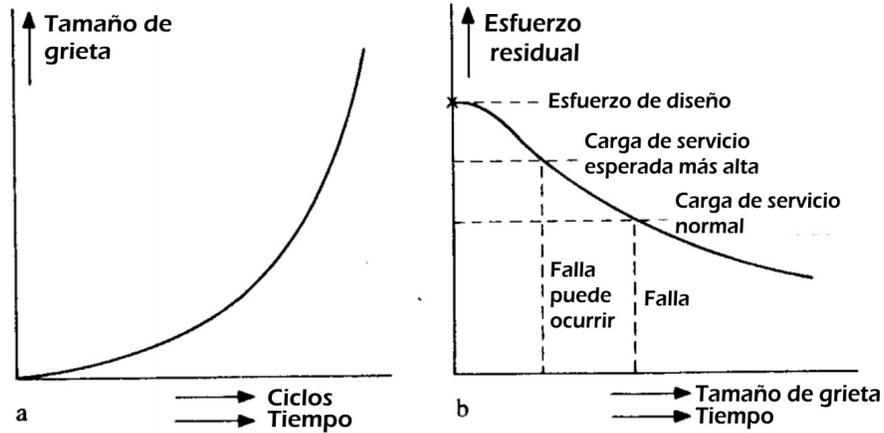


Figura 1.3: *El problema de ingeniería. a) Curva de crecimiento de la grieta. b) Curva de esfuerzo residual. Broek [8, pág. 6]*

explícitamente tomados en cuenta para reducir las consecuencias de una posible fractura. El concepto básico de la mecánica de fractura es relacionar las condiciones de carga aplicadas en el cuerpo (o estructura) fisurado y la resistencia del material al crecimiento de fisura y fractura. La falla ocurrirá si la resistencia del material a la fractura, con la presencia de una fisura aguda, es menor que las condiciones tensión-deformación impuestas por las condiciones de carga y geometría.

1.3. Mecánica de fractura lineal elástica (LEFM)

La fractura elástica lineal fue la primera teoría específicamente desarrollada para explicar la propagación de grietas y la rotura de materiales estructurales. Hasta su aparición a mediados del siglo XX sólo el agotamiento de las estructuras por colapso plástico tenía unos fundamentos físicos y matemáticos bien estructurados. La Mecánica de Fractura vino a ocuparse de la situación extrema de agotamiento de una estructura opuesta al agotamiento plástico, que se produce cuando el elemento se divide frágilmente en dos o más partes, generalmente con niveles de esfuerzo muy inferiores a los correspondientes al colapso plástico. La principal aplicación de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica consiste en explicar y predecir la rotura de materiales frágiles, en los que la rotura aparece en presencia de muy poca plasticidad. Inicialmente se

aplicó exclusivamente a los materiales metálicos, sobre todo aceros de alta resistencia y aceros estructurales con zonas fragilizadas, y aunque hoy en día se sigue empleando con éxito en estos materiales su campo de aplicación se ha ampliado a los materiales cerámicos e incluso a algunos polímeros. [16]

1.3.1. El balance de energía de Griffith

De acuerdo con el Primer Principio de Termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado de no-equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de la energía del sistema. A partir de este principio, Griffith [1] estudió las condiciones de fractura de cuerpos sólidos frágiles con grietas y estableció la teoría inicial en la que se sustenta la Mecánica de la Fractura. Griffith llegó a la conclusión de que; *Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante.*

La primera evidencia cuantitativa del efecto de la concentración de tensiones en las grietas fue enunciada por Inglis [2], el cual analizó los agujeros elípticos en placas planas. Inglis analizó una placa plana con un agujero elíptico, de longitud $2a$ y de ancho $2b$, a la que se le aplica una tensión perpendicular al eje mayor de la elipse (Figura 1.4), Inglis asumió que el agujero no está influenciado por las condiciones de contorno de la placa; la anchura de la placa $\gg 2a$ y la altura $\gg 2b$. A partir de este enunciado la tensión en el extremo del eje mayor está dada por:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (1.1)$$

La relación σ_A/σ se define como el factor de concentración de tensiones, K_t . Cuando $a = b$, el agujero es circular y en este caso $K_t = 3$. Cuando el eje mayor a aumenta respecto a b , el agujero elíptico comienza a tener la apariencia de una grieta aguda. Para este caso, Inglis encontró más conveniente que la expresión anterior 1.1, una nueva ecuación en función del radio de curvatura ρ :

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (1.2)$$

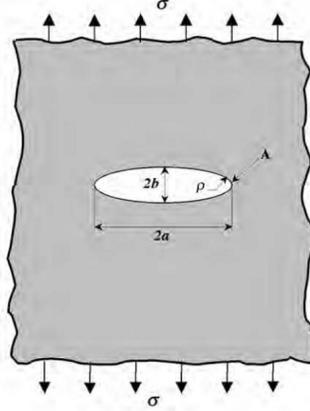


Figura 1.4: *Agujero elíptico de una placa plana. Arana [12, pág. 26]*

donde:

$$\rho = \left(\frac{b^2}{a} \right) \quad (1.3)$$

Cuando $a \gg b$, la ecuación 1.2 pasa a ser:

$$\sigma_A = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1.4)$$

Inglis demostró que esta ecuación 1.4 da una buena aproximación para la concentración de tensiones en una placa con una entalla que no es elíptica excepto en la punta. Si aplicamos la ecuación 1.4 a una placa infinita con un radio $\rho = 0$ resulta un valor de tensión infinito. Este resultado causó un alto grado de preocupación cuando se descubrió, ya que no existe un material capaz de soportar una tensión infinita, de forma que un material que contiene una grieta aguda, teóricamente fallaría simplemente por la aplicación de una carga infinitesimal. Esta paradoja animó a Griffith a desarrollar una teoría de la fractura basada en la energía en vez de en la concentración de tensiones. Supongamos una placa de grandes dimensiones (infinita) de espesor B , sometida a una tensión constante σ , que contiene una grieta pasante de longitud $2a$ (Figura 1.5). Griffith establece que para que esta grieta introducida en el sólido, cargado elásticamente, aumente de tamaño, la energía potencial disponible para la propagación en la placa debe ser suficiente para superar

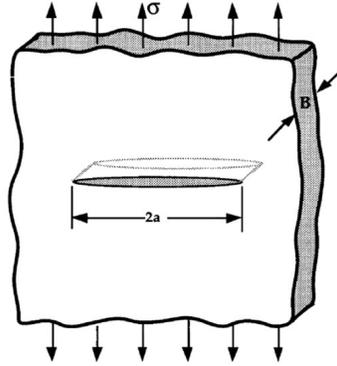


Figura 1.5: *Placa de grandes dimensiones (infinita), con una grieta pasante de tamaño $2a$. Arana [12, pág. 28]*

a la energía superficial del material, de forma que se establece un equilibrio entre la disminución de la energía elástica almacenada en el cuerpo y el incremento de la energía superficial total, como consecuencia de la formación de la superficie libre de la grieta, de forma que la grieta existente crecerá y se producirá una fractura si la energía requerida para propagar la grieta (suma del trabajo desarrollado por la tensión aplicada y la energía elástica liberada al extenderse la grieta) puede ser suministrada por el sistema.

Energía Superficial

La energía superficial γ_S (energía/unidad de superficie, constante característica de un sólido) se interpreta por el hecho de que los átomos que se encuentran en la superficie de cualquier sólido tienen un número de átomos vecinos inferior al correspondiente a los átomos interiores. La energía superficial debida a la presencia de la grieta en la placa de la Figura 1.6, será igual al producto del área total libre de la grieta por la energía superficial del sólido, así:

$$E_S = (2a.B)2\gamma_S \quad (1.5)$$

Llamando entonces U_0 , a la energía del sólido sin grieta y U a la correspondiente al mismo cuerpo con grieta, el cambio energético total lo podemos expresar como sigue:

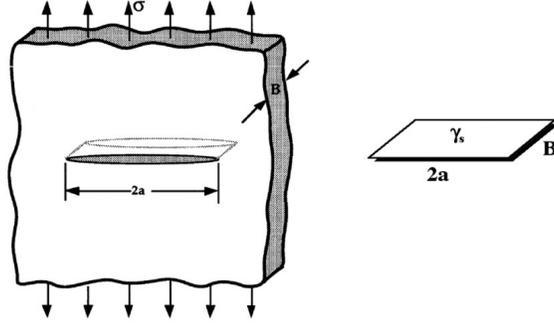


Figura 1.6: *Evaluación de la energía superficial γ_s . Arana [12, pág. 30]*

$$\Delta U = U - U_0 = -\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a^2 \cdot B}{E} + 4 \cdot a \cdot B \cdot \gamma_s \quad (1.6)$$

Condición de equilibrio energético durante la rotura: $\frac{d\Delta U}{da} = 0$; la energía disponible se consume en propagar la grieta.

$$\frac{d\Delta U}{da} = -\frac{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot a \cdot B}{E} + 4 \cdot a \cdot B \cdot \gamma_s = 0 \quad (1.7)$$

De esta manera llegamos a calcular la tensión de rotura de un sólido agrietado:

$$\frac{\sigma^2 \pi a}{E} = 2\gamma_s \Rightarrow \sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1.8)$$

Por lo tanto, según el planteamiento de Griffith:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a}} \quad (1.9)$$

1.3.2. Modificación de la ecuación de Griffith

La ecuación de Griffith es una condición necesaria, pero no suficiente para el fallo del material, dado que además la grieta existente en el sólido debe ser lo suficientemente aguda en sus extremos como para crear la concentración de tensiones en su entorno, suficiente para sobrepasar la resistencia cohesiva del material (fuerzas de enlace interatómicas), de forma que la ecuación de Griffith es válida solamente para sólidos frágiles, Griffith obtuvo un buen compromiso entre la resistencia a fractura experimental y los cálculos de su ecuación para el caso de vidrios, cerámicas, pero su ecuación no puede interpretar el comportamiento de los metales, en los que la energía necesaria para su fractura resultó ser varios órdenes de magnitud mayor que sus energías superficiales respectivas. Ello se debe a que en estos casos la concentración de tensión, existente en los frentes de grieta, crea una zona plástica de tamaño importante, de manera que la ecuación que expresa la tensión de rotura debe corregirse, introduciendo el término energético debido a la deformación plástica. En el año 1948, Irwin [3] y Orowan [5] independientemente, modificaron la expresión de Griffith para incluir el comportamiento plástico, la expresión revisada sería la siguiente:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (1.10)$$

donde: γ_p es el trabajo plástico por unidad de área, que normalmente es mayor que σ_s .

En un sólido frágil ideal, una grieta puede formarse y explicarse simplemente por la rotura de enlaces atómicos y precisamente γ_s refleja la energía total de los enlaces rotos por unidad de área. Sin embargo, cuando una grieta se propaga a través de un metal, se produce un movimiento de dislocaciones en la proximidad de la punta de grieta, originando una disipación adicional de energía. Aunque Irwin y Orowan plantean la ecuación 1.10 solamente para los metales, es posible generalizar el modelo de Griffith teniendo en cuenta todo tipo de disipación de energía, tal que:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2EW_f}{\pi a}} \quad (1.11)$$

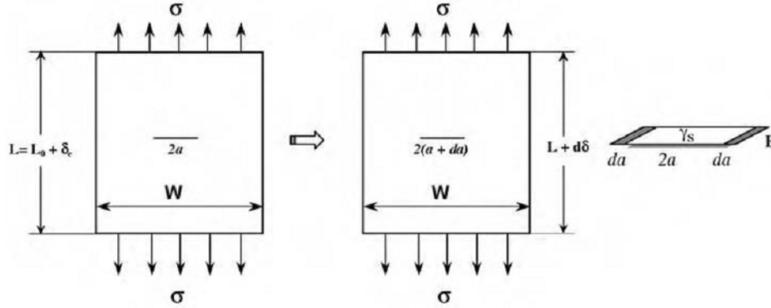


Figura 1.7: Incremento de la longitud da de la grieta. Arana [12, pág. 33]

Donde W_f es la energía de fractura, que puede incluir los efectos plásticos, viscoelásticos o viscoplásticos, dependiendo del material. La energía de fractura puede también estar influenciada por el serpenteo o por las ramificaciones que aumentan la superficie.

1.3.3. Tasa de liberación de energía y energía de fractura

En 1956 Irwin [4] propone una solución, esencialmente equivalente al modelo de Griffith, pero más conveniente para resolver los problemas de Ingeniería, extendiendo a los metales la ecuación de Griffith. Irwin define el concepto de *tasa de liberación de energía* G , que es la medida de la energía disponible para la propagación de un incremento de grieta da (Figura 1.7).

$$\frac{dU}{da} = G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (1.12)$$

Por su parte, la energía requerida (dW/da), también conocida como energía de fractura o tasa crítica de liberación de energía es una propiedad del material que se puede considerar constante en comportamiento elástico. Por la forma como está expresada, tiene dimensiones de fuerza por unidad de extensión de grieta y por eso también se le denomina *fuerza resistente al agrietamiento* (R).

$$R = 2\gamma_s \quad (1.13)$$

Aplicando la condición de equilibrio del sistema, la cual se da cuando $R = G$; Igualando estos factores encontramos el valor de la *tensión en rotura* de Griffith:

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma_s \Rightarrow \sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1.14)$$

Gráficamente, el proceso de fractura puede representarse de la siguiente manera: considérese una placa como la de la Figura 1.8a que al estar sometida a una tensión σ , almacena una energía elástica que se puede representar por el área OAB de la Figura 1.8b. Si los extremos de la placa permanecen fijos (deformación constante) y la grieta se prolonga una longitud da , entonces la rigidez se reduce, puesto que inicialmente correspondía a la pendiente de la línea OA y ahora corresponde a la de la línea OC . Esto implica que parte de la carga se relaja. La energía que queda almacenada en la placa después de haberse extendido la grieta está representada ahora por el área OCB , es decir, se produjo una reducción de la energía elástica y la tasa de liberación de energía G , está representada ahora por el área OAC . La grieta continúa prolongándose si la energía representada por dicha área es igual o superior a la requerida por el material para que ocurra tal extensión.

Teniendo en cuenta que la placa sometida a tensión permanece fija en los extremos, la carga externa no se desplaza, por lo tanto el trabajo realizado por las fuerzas externas es cero. En esas condiciones, toda la energía requerida para que la grieta se propague debe ser proporcionada por la reducción de la energía elástica de la placa, como lo indica la ecuación 1.12.

En el caso de una placa de extremos libres sometida a una tensión σ constante o de forma equivalente, a una carga P constante (Figuras 1.9a y 1.9b), la tasa de liberación de energía se representa en la curva carga Vs desplazamiento por el triángulo $OAE O$ (Figura 1.9c). Puede verse que a excepción de la pequeña área infinitesimal $AECA$, la energía liberada en deformación constante o en carga constante es igual y por lo tanto G es independiente de la variación de carga o en general, de la trayectoria de tensiones (Broek, 1984) [8].

De manera general, se puede decir que de acuerdo con el criterio de Griffith, para que una grieta se prolongue una longitud da , es necesario que la energía elástica liberada por tal prolongación sea igual o mayor a la energía de superficie que se requiere para que la grieta se prolongue, si la energía

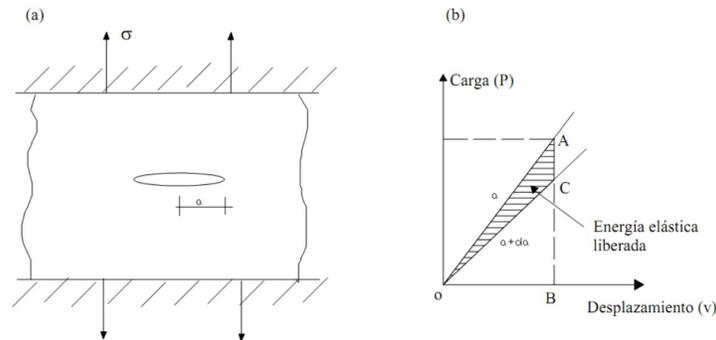


Figura 1.8: a) Placa con extremos fijos sometida a tensión, b) reducción de energía por extensión de grieta. Ávila [17, pág. 172]

liberada es inferior a la energía necesaria para la propagación, entonces la grieta permanecerá estable.

Las investigaciones de Griffith hicieron dos aportes fundamentales para sentar las bases de la mecánica de fractura: en primer lugar presentan un modelo racional del criterio de avance de una grieta y demuestran que la fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que no depende solamente de la tensión aplicada, sino también del tamaño mismo de la grieta y en segundo lugar, como lo indica González (1998) [11], mediante la ecuación 1.14 se tiene una relación entre tensión de fractura y tamaño de grieta que ha sido comprobada repetidamente en materiales frágiles.

1.3.4. Factor de intensidad de tensiones

Como se mencionó anteriormente, Griffith planteó el criterio de extensión de grieta basado en un análisis de balance de energía para evitar el problema de la singularidad en la punta, donde de acuerdo con la solución elástica, las tensiones tienden a infinito al aplicarse cualquier carga externa. Irwin² [4] desarrolló uno de los más importantes avances de la LEFM al formular el problema de extensión de grietas en términos del estado de tensiones del material cerca de la punta y probó que este enfoque es en esencia igual al

²Irwin fue llamado por la oficina de investigación naval (ONR) para investigar la falla de los buques Liberty durante la segunda guerra mundial

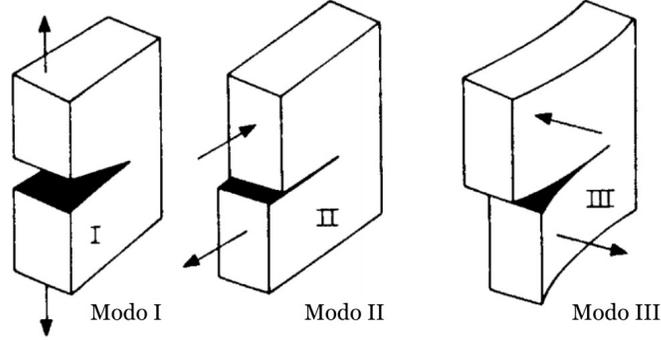


Figura 1.10: a) *Modos de agrietamiento. Broek [8, pág. 8]*

perpendiculares al plano de la grieta y los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta.

- **Modo III:** Cuando los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta y los labios de esta se mueven en dirección paralela, este modo de crecimiento de grieta se denomina de desgarramiento.

La superposición de los modos descritos describe el caso general de tensiones de un sólido. El Modo I es técnicamente el más importante y las discusiones se centran generalmente en este Modo I de fractura. El Modo II, menos frecuente, se produce cuando tenemos grietas sobre planos que forman ángulos de 90° y finalmente el Modo III aparece en barras con grietas que están sometidas a esfuerzos de torsión.

Para la solución de la función de tensión de Airy se pueden usar diferentes funciones complejas. Si el agrietamiento es del modo I, resulta conveniente usar la solución propuesta por Westergaard [6], en cuyo caso el campo de tensiones alrededor de la punta de la grieta (Figura 1.11) esta dada por:

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.15)$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.16)$$

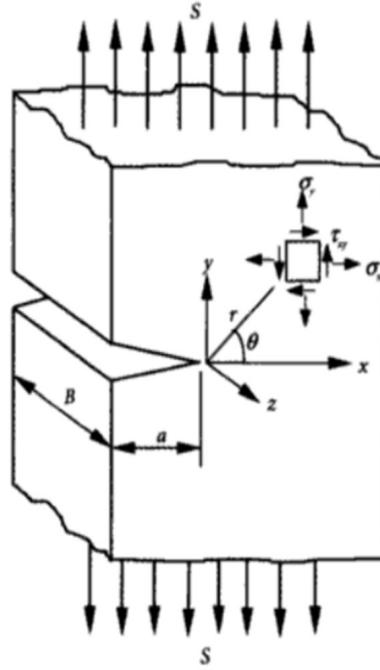


Figura 1.11: a) *Coordenadas de campo de esfuerzos en la vecindad de una grieta bajo carga de tensión perpendicular al plano de grieta. Hernandez [10, pág. 16]*

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (1.17)$$

O de forma general por:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1.18)$$

Donde $f_{ij}(\theta)$ es una función conocida de θ y K_I es el *factor de intensidad de tensiones (FIT)* para el modo I de agrietamiento y se puede expresar como:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{a} \quad (1.19)$$

Donde a es la longitud de la grieta inicial o entalla inicia y β es un factor adimensional, que para una placa infinita corresponde a $\sqrt{\pi}$ y en tal caso:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.20)$$

Para un elemento de tamaño finito, β depende de la longitud de la grieta y de la geometría del cuerpo sometido a tensión, que de manera general se expresa como la longitud (L) de una de sus dimensiones. Usualmente los FIT de estos elementos se expresan en términos del FIT de la placa infinita, de tal manera que el factor $\sqrt{\pi}$ se saca de β (Broek)[8] y la ecuación 1.19 se expresa como:

$$K_I = \beta_{(a/L)}\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.21)$$

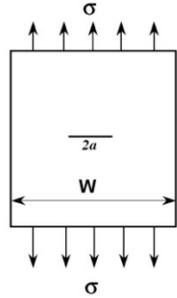
La importancia del factor de intensidad de tensiones radica entonces en que al conocerse K_I , se puede determinar completamente el campo de tensiones alrededor de una grieta. Además K_I constituye un parámetro de similitud útil para poder comparar las características de agrietamiento de elementos de un mismo material pero con diferente geometría y diferente longitud de grieta, pues este principio indica que si dos diferentes grietas, en diferentes estructuras tienen un mismo K_I y están sometidas al mismo modo de agrietamiento, se debe esperar un comportamiento similar en cuanto al avance o estabilidad de la grieta, debido a que el campo de tensiones es el mismo en ambos casos, por lo tanto, una grieta se propagará cuando el factor de intensidad de tensiones alcance un valor crítico, denominado *factor de intensidad de tensión crítico* (K_{IC}), también conocido como *tenacidad a la fractura*. El valor de K_{IC} puede obtenerse de ensayos de fractura para una condición en la cual la tensión es la crítica ($\sigma = \sigma_{cr}$) y se considera una propiedad del material, que de acuerdo con 1.21 está dada por:

$$K_{IC} = \beta_{(a/L)}\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (1.22)$$

El criterio de avance de una grieta en términos del factor de intensidad de tensiones está dado por las siguientes condiciones:

- Si $K_I < K_{IC}$, entonces no hay extensión de grieta (estable).

Fisura pasante en placa finita

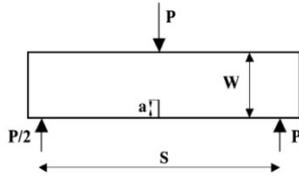


$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$Y = \left(\frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2} ; a = 0 \rightarrow K_I = \sigma \sqrt{\pi a} ; a = \frac{W}{2} \rightarrow K_I \text{ es muy grande}$$

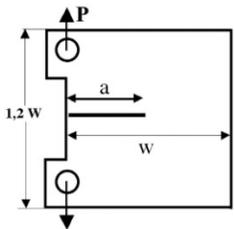
$$Y = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W} \left(1 - 0,025 \frac{a^2}{W^2} + 0,06 \frac{a^4}{W^4} \right)}$$

Probeta de flexión



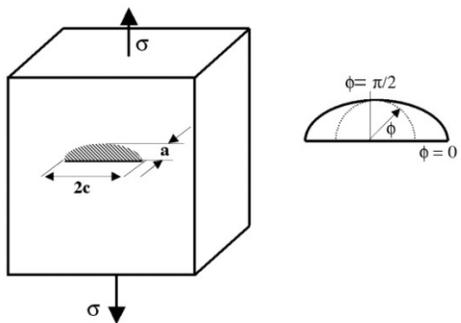
$$K_I = \frac{P}{B \sqrt{W}} \cdot \frac{3}{2} \frac{s}{W} \sqrt{\frac{a}{W}} \left[\frac{1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2} \right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \right]$$

Probeta compacta



$$K_I = \frac{P}{B \sqrt{W}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[0,866 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \frac{a^2}{W^2} + 14,72 \frac{a^3}{W^3} - 5,60 \frac{a^4}{W^4} \right]$$

Fisuras no pasantes en placas



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{\lambda_s \cdot f(\Phi)}{\sqrt{Q}}$$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}$$

$$\lambda_s = \left[1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c} \right) \right] \left[1 + 0,1 (1 - \text{sen } \Phi)^2 \right]$$

$$f(\Phi) = \left[\text{sen}^2 \Phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos \Phi \right]^{1/4}$$

Figura 1.12: Factores para el cálculo de K de diversas geometrías comunes. Arana [12, pág. 58]

- Si $K_I = K_{IC}$, entonces posible extensión cuasi-estática de grieta.
- Si $K_I > K_{IC}$, entonces crecimiento dinámico de grieta (inestable).

En la figura 1.12 se muestran diversos factores para diversas configuraciones:

1.3.5. La inestabilidad y la curva R

Como hemos explicado, Irwin y Orowan plantean la ecuación 1.11 teniendo en cuenta todo tipo de disipación de energía, en la que W_f es la energía de fractura, que puede incluir los efectos plásticos, viscoelásticos o viscoplásticos, dependiendo del material. La propagación de la grieta se produce cuando $G = 2W_f$, pero esta propagación de grieta puede ser estable o inestable, dependiendo de cómo varían G y W_f en función del crecimiento de grieta. Para estudiar el comportamiento estable o inestable, es conveniente reemplazar $2W_f$ por R que como hemos visto es la resistencia del material a la propagación de la grieta. La curva que representa G versus la propagación de grieta, es la curva de fuerza motriz. Consideremos una placa con una grieta pasante de tamaño inicial $2a$ sometida a una tensión, σ lejos de la grieta; la tasa de liberación de energía G varía linealmente respecto al tamaño de grieta.

Los valores de G se pueden presentar para los casos de pequeños espesores (tensión plana) o de grandes espesores (deformación plana) en la placa plana infinita:

$$\text{Tensión plana: } G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

$$\text{Deformación plana: } G = (1 - \nu^2) \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

En la Figura 1.13 representamos esquemáticamente, las curvas de fuerza motriz G y de tenacidad R para dos materiales con distinto tipo de comportamiento, con un valor inicial de longitud de grieta a_0 . En el primer caso, representado en la Figura 1.13(a), se muestra un material con una curva R plana, cuando la resistencia del material a la propagación de la grieta es constante con respecto al crecimiento de grieta. En este caso cuando la placa está sometida a la *tension* $= \sigma_1$, la grieta es estable, pero cuando la tensión alcanza el valor σ_2 , la propagación de la grieta es inestable porque la fuerza

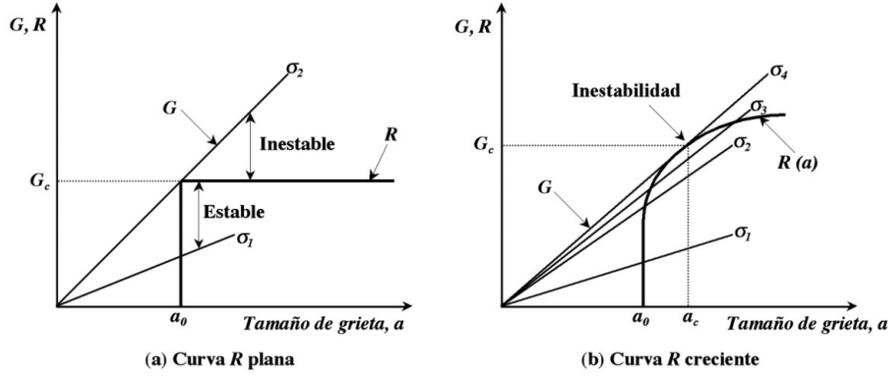


Figura 1.13: Diagramas esquemáticos de las curvas de fuerza motriz y de R para dos materiales con distinto tipo de comportamiento. Arana [12, pág. 40]

motriz crece cuando crece el tamaño de grieta, pero la resistencia del material permanece constante. La Figura 1.13(b) muestra un material con una curva R creciente. La grieta crece ligeramente cuando la tensión crece desde σ_1 a σ_2 , pero no puede crecer más mientras no aumente la tensión. Cuando la tensión es fija en σ_2 , la fuerza motriz aumenta en menor proporción que la resistencia R y el crecimiento estable continúa hasta que la tensión alcanza el valor σ_3 . Finalmente, cuando la tensión alcanza el valor σ_4 , la fuerza motriz es tangente a la curva R . Con un crecimiento adicional de la grieta la placa es inestable porque la tasa de crecimiento de la fuerza motriz es mayor que la pendiente de la curva R .

La condición de la grieta estable puede ser expresada por:

$$G = R \longrightarrow \frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (1.23)$$

La propagación de grieta puede ser estable o inestable cuando:

$$\text{Inestable} : G > R \longrightarrow \frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (1.24)$$

$$\text{Inestable} : G < R \longrightarrow \frac{dG}{da} < \frac{dR}{da} \quad (1.25)$$

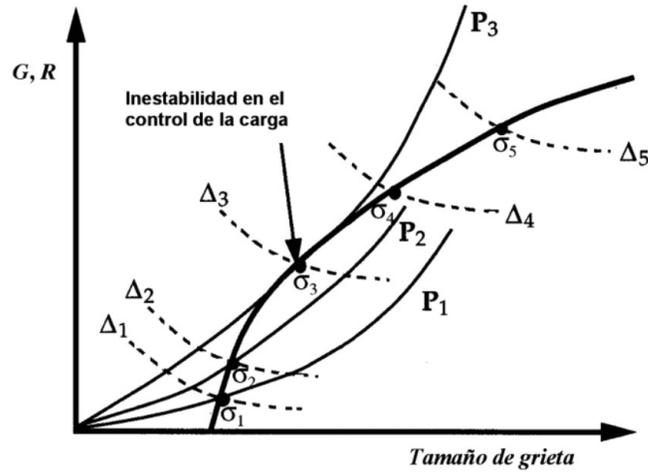


Figura 1.14: Diagrama esquemático de la fuerza motriz y la curva R que compara el control de la carga y el control del desplazamiento. Arana [12, pág. 41]

Cuando la curva de resistencia R es plana, como en la Figura 1.13(a), se puede definir un valor crítico de G sin ambigüedad, sin embargo, un material con una curva R creciente no permite ser caracterizado con un único valor de tenacidad, como en el caso de los metales de alta ductilidad. De acuerdo con la ecuación 1.24, una estructura agrietada falla cuando la curva de fuerza motriz es tangente a la curva R , pero este punto de tangencia depende de la forma de la curva de fuerza motriz, en razón de su dependencia de la configuración de la estructura. La fuerza motriz para la configuración de una placa con una grieta pasante es lineal, pero normalmente $G(a)$ no es lineal, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 1.14, en la que la fuerza motriz G varía en función de a^2 ; estas dos configuraciones pueden originar valores de G_c diferentes para una curva $R(a)$ dada, que por otro lado tampoco es lineal ya que la mayor parte de los materiales presentan comportamiento elasto-plástico.

Capítulo 2

Metodología Experimental

2.1. Determinación experimental de la tenacidad de fractura K_{IC}

El ensayo para la determinación de la tenacidad de fractura K_{IC} ha exigido muchos esfuerzos para la determinación de unos criterios que garanticen, en ensayos sencillos y reproducibles, la obtención de las condiciones previstas por la definición de K_{IC} .

La Sociedad Americana de pruebas y materiales (ASTM¹)[7] ha estandarizado este procedimiento de tal forma que se pueda cumplir con los requisitos en probetas pequeñas de fácil manipulación en un laboratorio. En el año de 1974 se editó la primera edición de la norma E 399² adoptada por la ASTM como metodo para la determinación de K_{IC} . posteriormente la ASTM agrupo junto a la norma E 399 otros procedimientos para caracterizar las propiedades de fractura de los materiales metalicos en un contexto más general, utilizando los parametros: J , $CTOD$, y curva R , dando como resultado la publicación de la norma E 1820.

Actualmente estas normas tienen una aceptación general para medir el factor critico de intensidad de tensiones, en Modo I (apertura a tracción perpendicular a los bordes de la grieta) y deformación plana en condiciones de carga estática. En Europa existe actualmente la Norma EN ISO 12737³, que

¹American Society for Testing and Materials

²Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, (1974)

³EN ISO 12737, Febrero 1999, Materiales metálicos. Determinación de la resistencia a

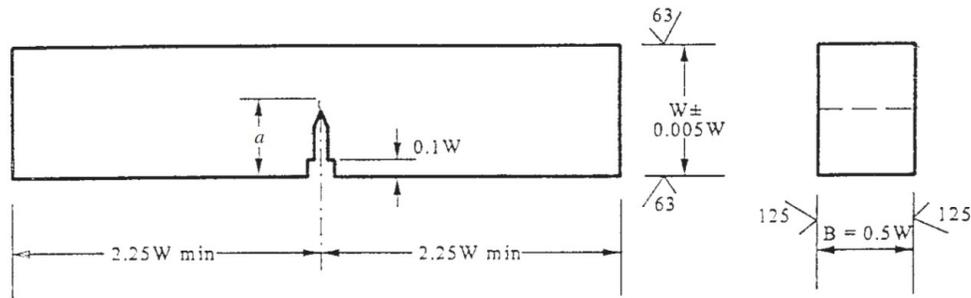


Figura 2.1: *Probeta para ensayo de flexión. ASTM E 1820 [7]*

juntamente con la Británica BS:7448, confieren el conjunto de Normas para caracterizar, el parámetro más importante de la tenacidad de un material, por dos razones:

- En esas condiciones ocurren la mayoría de las roturas catastróficas en la práctica.
- Representa un valor mínimo de la tenacidad del material cargado estáticamente y, por tanto, permite el diseño con la máxima seguridad de estructuras para las que no se prevén cargas dinámicas.

En este capítulo se explicarán los aspectos más sobresalientes de la norma ASTM E 1820, la cual es el objeto de estudio de este trabajo.

2.1.1. Probetas para los ensayos.

La norma ASTM E 1820 sugieren distintos tipos de probetas, siendo las más utilizadas las probetas de flexión (figura 2.1) y la probeta compacta (figura 2.2). El método de ensayo con estas probetas consiste en el plegado (con tres puntos de apoyo), para la probeta de flexión y la tracción, para la probeta compacta. Los apoyos de la probeta de flexión están separados $S = 4W$ y la carga se aplica en el punto medio, en el lado opuesto a la entalla. El esfuerzo de carga y las reacciones en los apoyos se aplican a la probeta a través de rodillos cuyo diámetro ha de ser superior a $W/4$, la carga de la probeta de tracción, compacta, se hace a través de pasadores, con mordazas de horquilla, que permiten la rotación de la probeta durante la carga.

la fractura por deformación plana, CEN Comité Europeo de Normalización.

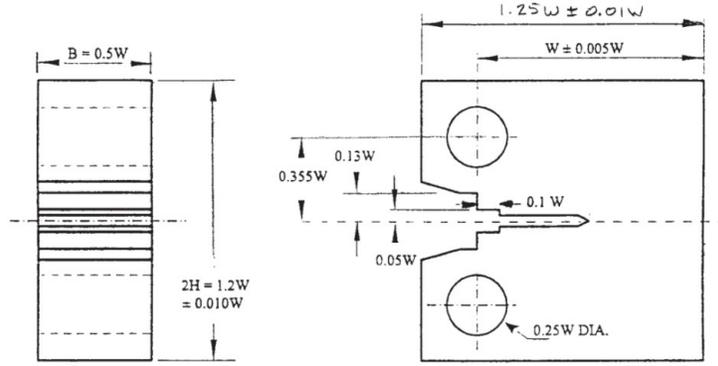


Figura 2.2: *Probeta compacta. ASTM E 1820 [7]*

Las probetas usadas para medir el K_{IC} deben ser diseñadas de tal forma que se garantice que el tamaño de la zona plástica ligada a la punta de la grieta sea muy pequeña en relación al espesor de la probeta, y a las condiciones dominantes alrededor de la punta de la grieta para lo cual la norma sugiere respetar una razón de $1 \leq W/B \leq 4$ para la probeta de flexión en tres puntos y de $2 \leq W/B \leq 4$ para la probeta compacta.

Las expresiones válidas para el cálculo del factor de intensidad de tensiones de estas probetas en régimen elástico se deducen a partir de las que se han indicado en la figura 1.12, desarrolladas a partir de un análisis elástico lineal aplicado a la geometría específica de las probetas normalizadas y que son las siguientes:

- Probeta de flexión

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{3S}{2W} \sqrt{\frac{a}{W}} \left[\frac{1,99 - \frac{a}{W} \left[1 - \frac{a}{W} \right] \left[2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2} \right]}{\left[1 + 2 \frac{a}{W} \right] \left[1 - \frac{a}{W} \right]^{3/2}} \right] \quad (2.1)$$

En general

$$K_I = \frac{PS}{BW^{1,5}} \cdot f_1 \left[\frac{a}{W} \right]$$

Con f_1 tabulada, donde si: $a = 0,5W$; $f_1 = 2,66$

- Probeta de tracción compacta

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left[1 - \frac{a}{W}\right]^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \frac{a^2}{W^2} + 14,72 \frac{a^3}{W^3} - 5,6 \frac{a^4}{W^4} \right] \quad (2.2)$$

En general

$$K_I = \frac{PS}{BW^{0,5}} \cdot f_2 \left[\frac{a}{W} \right]$$

Con f_2 tabulada, donde si: $a = 0,5W$; $f_2 = 9,66$

Los valores a , W y B , son mostrados en la figura 2.1 y 2.2, y S es la distancia entre los puntos de soporte de la probeta de doblez figura 2.3.

2.1.2. Características Exigidas de la Grieta

Por grieta se entiende una discontinuidad plana limitada por un borde agudo. La grieta ideal está formada por las dos superficies planas (caras) que se unen a lo largo de una curva (frente de grieta) y se superponen cuando el sólido se encuentra libre de tensiones. El modelo elástico lineal para los campos de tensiones y deformaciones en la proximidad de una grieta considera el límite de ésta como una singularidad, es decir, supone un radio cero en el borde de la grieta, tal como es asumido en el análisis del factor de intensidad de esfuerzos. para simular la grieta teórica se debe garantizar que el radio ρ de

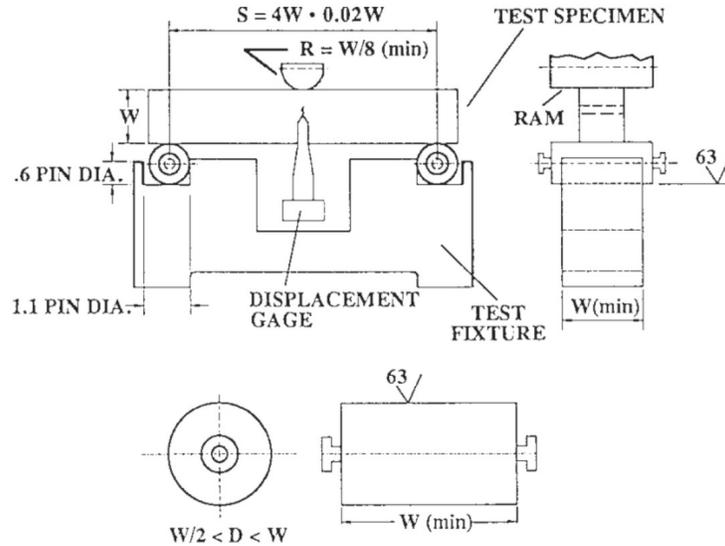


Figura 2.3: Montaje de la probeta de flexión en tres puntos en la maquina de pruebas. ASTM E 1820 [7]

la grieta sea menor que el radio limite ρ_C , tal como se observa en la figura 2.4.

Las grietas generadas por fatiga debe ser lo más perfecta posible, verificando cuidadosamente su uniformidad y simetría. Esta grieta se genera por un proceso de fatiga sometiendo la probeta a carga cíclicas variable de tracción o flexión, por un numero de ciclos usualmente entre 10^4 y 10^6 dependiendo del tamaño de la grieta, preparación de la muesca e intensidad de esfuerzos. Para facilitar la creación y propagación controladas de la grieta, asegurar la posición de la grieta de fatiga, así como para poder desarrollarla con niveles de intensidad de tensiones bajos, las probetas se mecanizan con una entalla cuya forma más conveniente es la entalla terminada en V (véase la Figura 2.5), pues evita la progresión de la grieta fuera del plano central de la probeta y favorece la propagación de la grieta con un frente aproximadamente normal a las caras externas.

La longitud de la grieta de fatiga a partir del punto máximo de penetración de la entalla mecanizada debe ser superior al cinco por ciento de la longitud total de grieta, ($\delta a_f > 0,005a$) y, en todo caso, debe ser superior a 1,3 mm. Con esta condición la Norma pretende minimizar la influencia de la geometría de

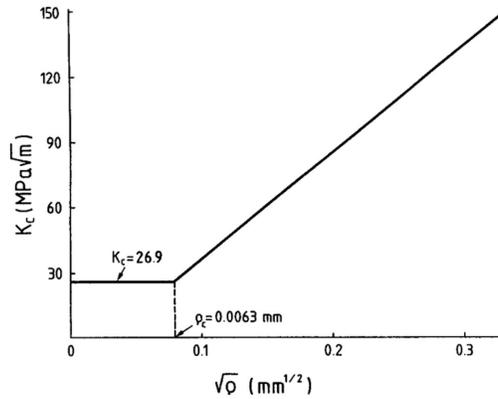


Figura 2.4: Efecto del radio ρ de la muesca sobre el valor crítico de intensidad de esfuerzos K_C . Broek [8, pág. 125]

la entalla en el estado de tensiones en el frente de la grieta, así como eliminar los posibles efectos locales que el mecanizado de la entalla hubiera producido en el material. La longitud de la grieta debe medirse, según la norma, como la media de las longitudes en el centro de la probeta y en los dos puntos medios entre el centro y las caras de la probeta, como se aprecia en la figura 2.6.

2.1.3. Medición de la abertura de la grieta

Durante el ensayo, es necesario registrar la carga, P , en función de la abertura de la grieta, V . Para realizar la medición de la variación de la abertura de la grieta se utiliza un instrumento denominado extensómetro, existen muchos tipos de extensómetros: mecánicos, ópticos, electrónicos (basados en varios principios, por ejemplo las galgas extensométricas, LVDT, etc.), incluso láser. Los extensómetros más utilizados son los que usan galgas extensométricas como elemento sensor, similares a las observadas en la figura 2.7, de tipo de hilo conductor, estos elementos están constituidos básicamente por una base muy delgada no conductora y flexible, sobre la cual va adherida un hilo metálico muy fino con terminales adecuados a sus extremos. El principio de funcionamiento de las galgas extensométricas se basa en el efecto piezoeléctrico de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en

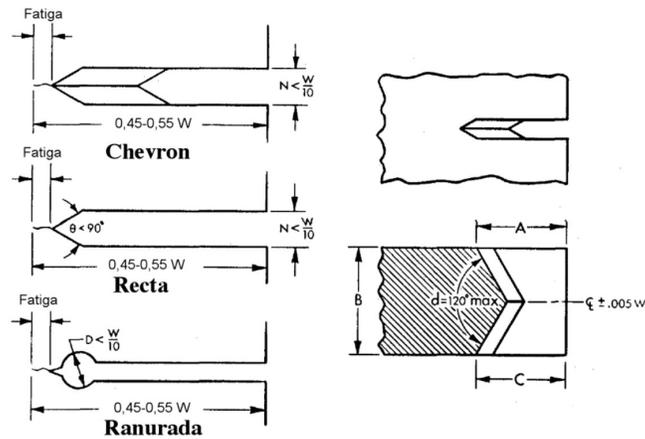


Figura 2.5: Formas de entalla en V. ASTM E 1820 [7]

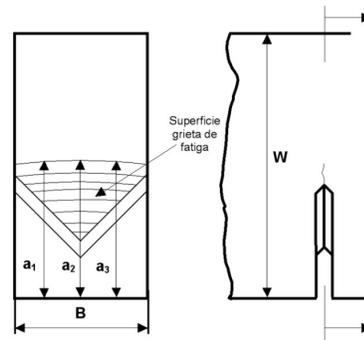


Figura 2.6: Medida de la grieta de fatiga. ASTM E 1820 [7]

función de la deformación a la que es sometida.

Si se considera un hilo metálico de longitud L , sección transversal A , y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto el cambio de



Figura 2.7: Galga extensiométrica utilizado en el extensómetro

R se puede expresar como:

$$dR = \frac{A(\rho dl + ld\rho) - \rho l dA}{A^2}$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, (figura 2.8) está dado por la ley de Hooke, como sigue:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E\frac{dl}{l}$$

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad de la materia, esta proporción se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -\frac{dD/D}{dl/l} = E\varepsilon = E\frac{dl}{l}$$

Donde D es el diámetro del hilo y es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, siendo por ejemplo, de, 0.17 para la fundición maleable, de 0.303 para el acero y de 0.33 para el aluminio y el cobre.

La Norma ASTM E-1820 nos exige usar un extensómetro muy preciso en el mismo borde de la entalla, cuando el desplazamiento esperado es mayor a $3,7mm$ la Norma recomienda el uso de un medidor más largo como el que se presentan en la Figura 2.9. El cual consiste en dos bandas fijas a una pieza separadora, trabajando a flexión, dotadas de galgas extensométricas.

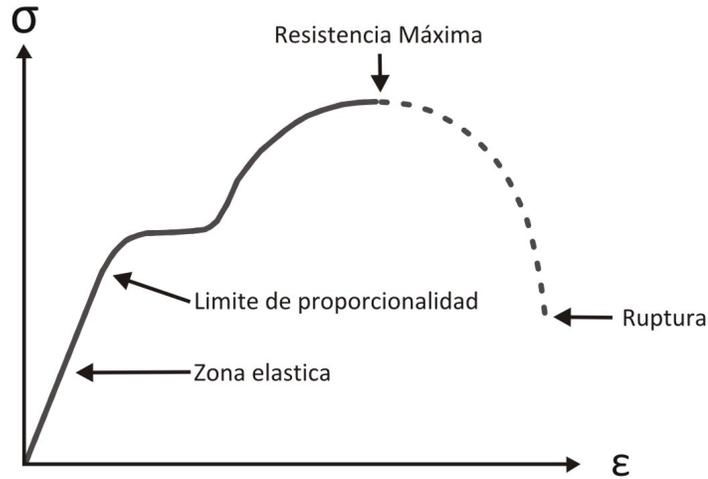


Figura 2.8: *Relación esfuerzo y deformación*

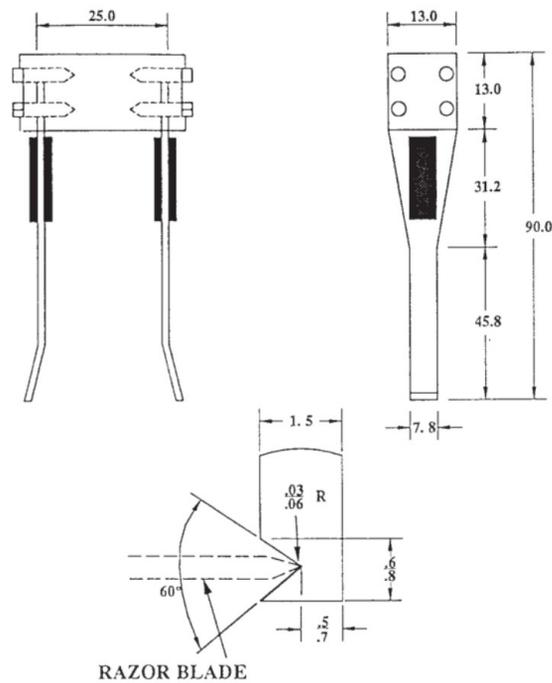
2.1.4. Procedimiento experimental

Se realiza el montaje completo para la probeta de flexión como se observa en la Figura 2.3. Se inicia la prueba y se va aplicando a la probeta una carga P progresivamente creciente hasta que se produzca la fractura por crecimiento inestable de la grieta y se va midiendo el desplazamiento relativo v entre dos puntos localizados simétricamente en lados opuestos del plano de grieta, de tal manera que pueda obtener una curva de $[P - v]$.

Para obtener un buen registro de la curva $[P - v]$ la Norma establece que la pendiente de la parte lineal de este registro debe estar entre 0,7 y 1,5, y son útiles las expresiones de la abertura de la grieta para las probetas normalizadas en régimen elástico por debajo de la carga crítica:

$$v = \frac{P}{EB} f \left[\frac{a}{W} \right] \quad (2.3)$$

Los valores de la función $f(a/W)$ para los distintos tipos de probetas se encuentran en la Norma, como se muestra en el cuadro 2.1, para la probeta de flexión.



Nota: Medidas en milímetros

Figura 2.9: Medidor de desplazamiento (*extensometro*) diseñado para 8.0 mm o rangos más grandes. ASTM E 1820 [7]

2.1.5. Cálculo e Interpretación de los Resultados

Se considera que se ha alcanzado el factor de intensidad de tensiones crítico cuando se alcanza un nivel de carga que produce una propagación significativa de la grieta. El diagrama $[P - v]$ puede tener varias formas como se muestra en la Figura 2.10. Inicialmente la apertura de grieta crece linealmente con la carga P . En el caso ideal, como se presenta en la Figura 2.10(a) de un régimen elástico lineal perfecto, la relación $P - v$ es lineal y, con la geometría y condiciones de carga de las probetas de tracción o flexión, al alcanzarse la carga crítica la propagación ocurriría de manera inestable. En materiales metálicos reales, es inevitable la desviación, en algún grado, del comportamiento lineal y es frecuente que ocurra alguna propagación estable

a/W	$f(a/W)$	a/W	$f(a/W)$
0,450	2,29	0,500	2,66
0,455	2,32	0,505	2,70
0,460	2,35	0,510	2,75
0,465	2,39	0,515	2,79
0,470	2,43	0,520	2,84
0,475	2,46	0,525	2,89
0,480	2,50	0,530	2,94
0,485	2,54	0,535	2,99
0,490	2,58	0,540	3,04
0,495	2,62	0,545	3,09
		0,550	3,14

Cuadro 2.1: Valores de $f(a/W)$ para valores específicos de a/W para la probeta de flexión. ASTM E 1820 [7]

previa a la fractura inestable final. En muchos casos, se produce una propagación de la grieta en el momento de la carga P_Q . Esta propagación se asocia a menudo con un pequeño chasquido, perfectamente audible, que se denomina «pop-in» y se caracteriza en el gráfico por un pequeño escalón en este punto, como se ve en la Figura 2.10(b). El crecimiento de grieta se detiene, tanto porque se ha producido una caída de la carga como porque se produce un incremento de la resistencia de la grieta. Después del «pop-in» se puede aumentar la carga, hasta que se produce la fractura para la carga P_F . A veces se producen nuevos «pop-ins». En principio la carga del «pop-in» P_Q se debe utilizar para la evaluación de K_Q .

Los materiales con buena tenacidad presentan un incremento gradual no lineal entre la carga y el desplazamiento, como se ve en la Figura 2.10(c). Esta no linealidad es el resultado de dos factores: deformación plástica y el gradual agrietamiento que precede a la fractura. Si esta no linealidad esta causada por el crecimiento de grieta solamente, podemos encontrarnos con un tipo de diagrama como el del caso anterior Figura 2.10(b). Si la propagación estable con carga creciente es importante, es síntoma de que estamos lejos de las condiciones de deformación plana o próximos a las de deformación plástica generalizada y el ensayo debe rechazarse a los efectos de medida del K_{IC} . Pero para la determinación experimental de la carga crítica se ha de admitir

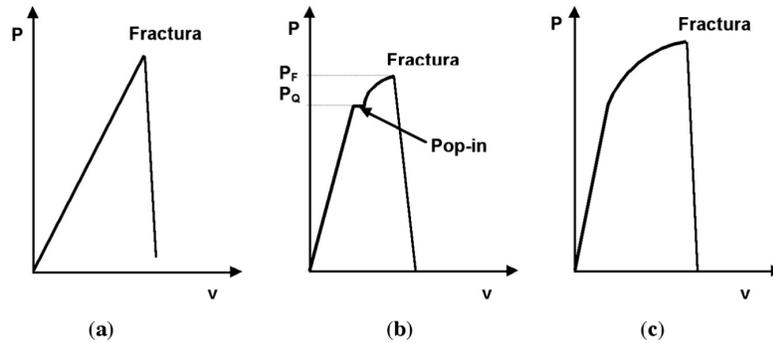


Figura 2.10: Registro $P - v$ para diversos ensayos. Arana [12]

la posibilidad de un cierto grado de no linealidad y, puesto que el punto crítico de propagación no queda inequívocamente definido como en el caso de un material elástico ideal, se tiene en cuenta un criterio convencional del punto de propagación de una grieta, que guarda semejanza con la definición del límite elástico convencional (0,2%) para materiales reales. Se define P_Q como la carga a la que se ha producido en torno a un 2% de extensión de grieta, para ello se acepta el criterio normalizado de que ha ocurrido una propagación significativa de la grieta cuando la relación P/v es un 5% inferior a la relación elástica lineal inicial del ensayo.

Parte de la desviación del comportamiento lineal durante la carga de las probetas corresponde precisamente al aumento del tamaño efectivo de la grieta, al ir aumentando el tamaño de la zona plástica; puesto que para que un ensayo se acepte como válido ese tamaño no debe sobrepasar aproximadamente el 2% del tamaño inicial de la grieta, el criterio de propagación de la grieta, definido por el -5% de desviación de la recta $P - v$ inicial, corresponde precisamente al criterio de asegurar que la grieta ha comenzado a propagarse realmente, para esa carga crítica convencional $P_{5\%}$.

Una vez realizado el ensayo y obtenido el diagrama $P - v$, se traza la secante de pendiente $1/1,05 \simeq 0,95$ veces de la pendiente de la zona lineal del inicio, desde el origen de coordenadas⁴ La intersección con la curva $P - v$ determina la carga $P_{5\%}$.

⁴A estos efectos no debe tenerse en cuenta la no linealidad que ocurre frecuentemente justo al comienzo del ensayo, debida a ajustes de la probeta y puntos de apoyo o mordazas, etc.

Las curvas $P - v$ se ajustan a alguno de los tres tipos que contemplan las Normas ASTM representadas en la Figura 2.11. Si $P_5 \%$ es superior a cualquier valor previo de la carga (caso I) se tomará $P_5 \%$ como valor condicional de la carga crítica. Si existe un máximo de carga previo $P_5 \%$ (casos II y III) se toma éste como P_Q . El caso III corresponde a la propagación inestable frágil de un material real y el caso I, a la fractura de un material dúctil y tenaz que admite propagación estable apreciable antes de alcanzar el punto crítico inestable. En el caso II, intermedio, ocurre un comienzo de propagación con «pop-in» que se continúa por un crecimiento estable antes de la fractura final. Para un mismo material, espesores crecientes conducen a un desplazamiento de las curvas del tipo I al tipo III, conforme se aproximan las condiciones de deformación plana. Como ya se ha citado, una propagación estable importante es síntoma de que las condiciones del ensayo están lejos de los supuestos de la mecánica lineal de la fractura en condiciones de deformación plana. La Norma establece como criterio de validez del ensayo que la relación entre la carga máxima P_{max} , y la carga crítica condicional, P_Q no sobrepase la relación 1,1. Si esta condición no se cumple, el ensayo es rechazable a los efectos de determinación de K_{IC} . En caso contrario se procede a la determinación de un factor crítico de intensidad de tensiones condicional, K_Q introduciendo P_Q en las ecuaciones indicadas 2.1 y 2.2. Si el valor de K_Q cumple las condiciones de espesor establecidas para el tamaño máximo de la zona plástica ($2,5[K_Q/\sigma_{YS}]^2$), el valor condicional K_Q se acepta definitivamente como K_{IC} válido del material. Si el ensayo es inválido por excesiva propagación estable o por excesiva zona plástica, lo que procede, a efectos de caracterizar un material para la medida de la tenacidad a fractura es iniciar una nueva serie de ensayos con probetas de espesor más grande; se recomienda ensayar espesores al menos 1,5 veces mayores que el espesor previo inaceptable.

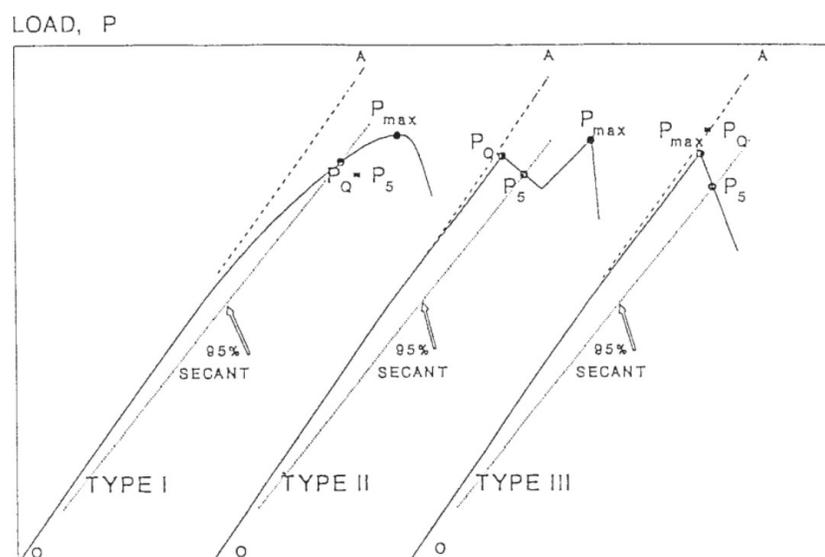


Figura 2.11: Principales tipos de curvas carga-desplazamiento de ensayos con distintos comportamiento. ASTM E 1820 [7]

Capítulo 3

Experimentación

3.1. Dimensiones de probetas

la probeta para el ensayo de doblez se manufacturo a partir de un sector rectangular de lamina de acero ASTM A36 de un espesor $B = 12,7mm$, se considero una relación $W/B = 4$, y una entalla de caras paralelas de 3.175 mm de espesor terminada en v como se observa en la figura 3.1, la cual se generó con un disco de sierra circular de acero rápido de alta velocidad (HSS) con ángulo de incidencia de 60° y un espesor de $1/8"$ (3.175 mm), el cual fue afilado en su punta con el fin de obtener una radio máximo en la raíz de la entalla de 0.2 mm; en la figura 3.2A se observa la herramienta de corte usada y el proceso de manufactura, el cual se realizo en un taladro fresador marca SHENYANG MACHINE TOOL modelo ZX45 (figura 3.2B). Las dimensiones finales de la probeta de doblez se muestran en la figura 3.3; estas fueron configuradas en base a la norma ASTM E-1820 que toma de referencia el alto de la probeta indicada con la letra W que es de 50.8 mm y una longitud L igual a 228,6 mm.

3.2. Equipos para la prueba de doblez

Este ensayo se realizo en una máquina de pruebas universales SHIMADZU UH-I con capacidad de 600 KN , la cual cuenta con un panel de control que permite configurar los parametros de la prueba así como guardar e imprimir los resultados obtenidos. Esta máquina está localizada en el laboratorio de

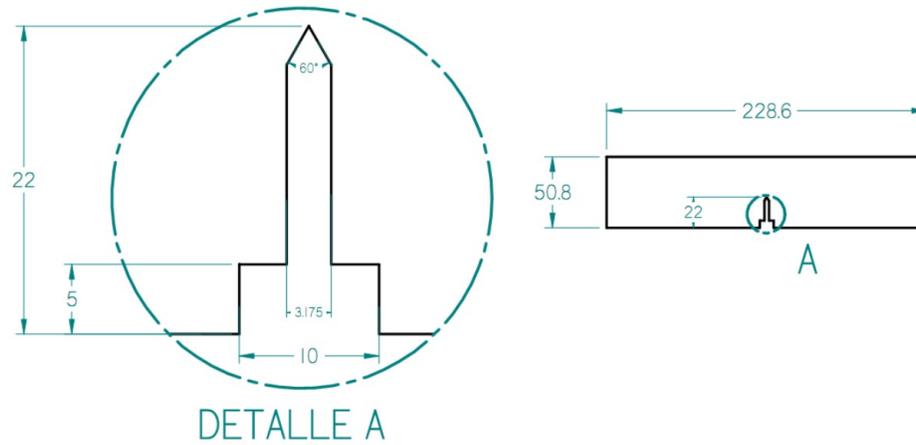


Figura 3.1: Dimensiones y forma de la entalla de la probeta. Dimensiones en mm.

resistencia de materiales de la universidad tecnológica de Bolívar.

Para el montaje de la probeta en la máquina se utilizó el conjunto de soportes de rodillo como se observa en la figura 3.5 el cual sirve para minimizar los efectos de la fricción producida cuando la probeta alcanza la deformación por la carga aplicada.

3.2.1. Medidor de desplazamiento

Para el desarrollo de las pruebas se fabricó un medidor de desplazamiento (Extensómetro) según características sugeridas en la norma ASTM E1820 (figura 2.9), el esquema del extensómetro se observa en la figura 3.6, el cuerpo del extensómetro se obtuvo a partir de una barra de aluminio 1100 el cual fue cortado a la medida requerida y se le realizó cuatro perforaciones de 1/8" para el alojamiento de la tornillería, las placas laterales se manufacturaron en acero AISI M2 el cual se obtuvo de una hoja de serrucho, este material permite una gran flexibilidad sin deformación plástica característica necesaria para este medidor, para garantizar un armado firme se utilizaron cuatro tornillos de acero galvanizado de ϕ 1/8" x 1 1/4" de longitud, como se observa en la figura 3.7 las medidas detalladas de los elementos se observan en el anexo A.

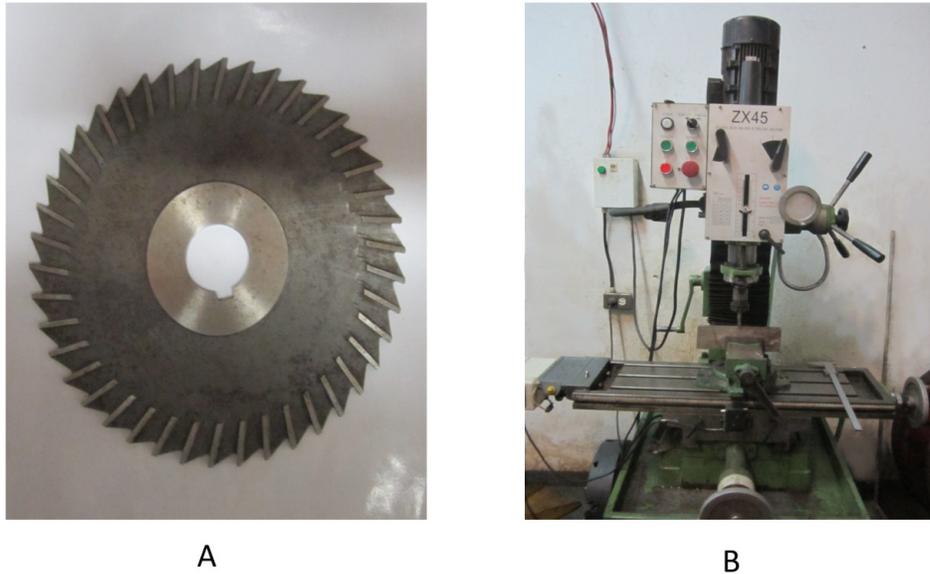


Figura 3.2: A) Disco de sierra circular de acero rápido de alta velocidad (HSS). B) Taladro fresador marca SHENYANG MACHINE TOOL modelo ZX45

Se instalo una (01) galga extensiometrica en la cara externa de cada una de las platinas flexibles del extensometro, el procedimiento para la instalación de estas galgas se observa en el anexo B, estas galgas fueron conectadas a un computador de escritorio a travez de una tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS, la cual permite visualizar en tiempo real valores caracteristicos de corriente según la deformación generada en cada galga. Para obtener valores confiables de longitud en función de la deformación se realizo la caracterización del sistema galga-extensometro, se utilizo un micrometro marca MITUTOYO de 25mm a 75mm, montado en una base metalica junto al extensometro como se observa en la figura 3.8. Para este procedimiento se tomo como referencia cero (0 mm) la abertura sin deformación hasta un desplazamiento de 8 mm en intervalor de 0.25 mm, (figura 3.10)

En la figura 3.10 se observa la grafica de desplazamiento vs corriente para cada galga extensiometrica, y las ecuaciones obtenidas de la regresion lineal de cada conjunto de datos, así:

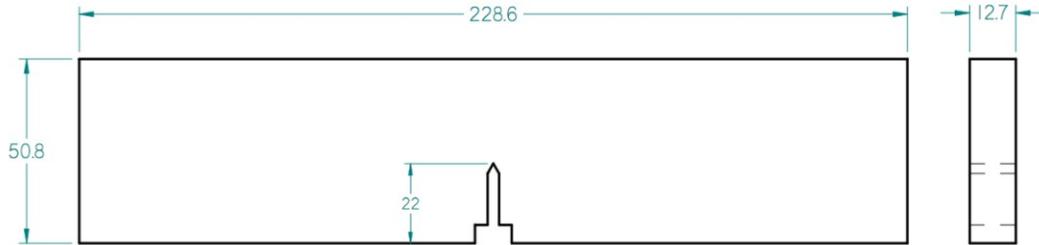


Figura 3.3: Dimensiones de probeta de dobléz. Dimensiones en mm.

Galga A:

$$Y_A = 5913,9X_A + 0,0049$$

Galga B:

$$Y_B = 5797,1X_B + 0,0304$$

De donde obtenemos que el desplazamiento en un punto sera igual a:

$$D = Y_A + Y_B \quad (3.1)$$

La ecuación 3.1 fue implementada en un programa en LABVIEW el cual permite visualizar valores directos de desplazamiento (mm) en tiempo real segun la deformación en el extensometro.

3.3. Prueba de dobléz

Para el desarrollo de la prueba de dobléz en tres puntos se realizo la configuración mostrada en la figura 3.11 (norma ASTM E 1820), en ella se observa el soporte de rodillos, la probeta y el extensometro.

Se verifica que el sistema de adquisición de datos funcione correctamente, se verifica la calibración del extensómetro.

Se da inicio al ensayo, la máquina de pruebas universales y el sistema de adquisición del extensómetro comienzan a almacenar los datos de manera independiente pero en forma sincronizada.



A



B

Figura 3.4: A) Máquina de pruebas universales SHIMADZU UH-600I. B) Panel de control.

La máquina de pruebas universales generó un archivo con todos los datos de carga y tiempo, además una grafica de carga vs alargamiento vertical donde se puede observar la carga máxima aplicada (figura 3.13).



Figura 3.5: Soporte de rodillos para el montaje de la probeta.

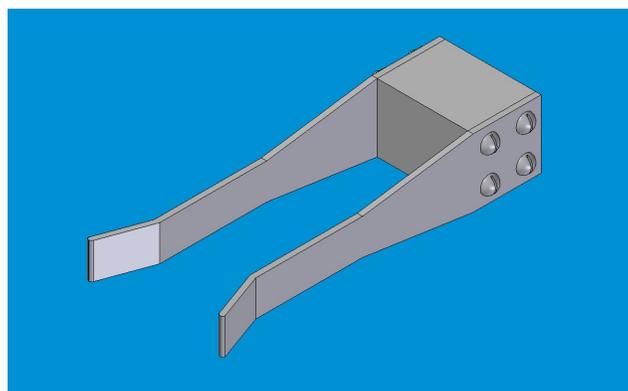


Figura 3.6: Esquema del extensometro para mediciones mayores a 8 mm.

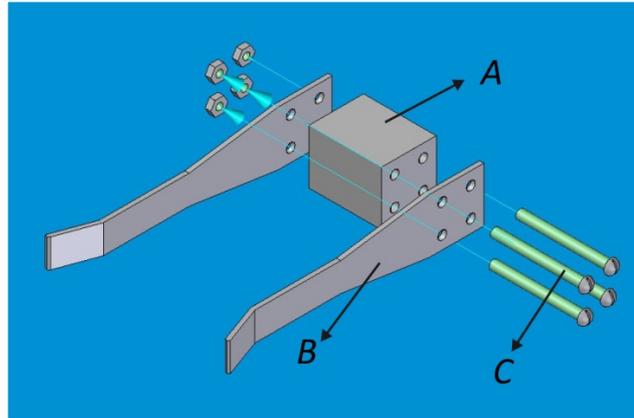


Figura 3.7: A) Barra de aluminio 1100. B) Placas laterales en acero AISI M2. C) Tornillos de acero galvanizado de ϕ 1/8" x 1 1/4" de longitud UNC

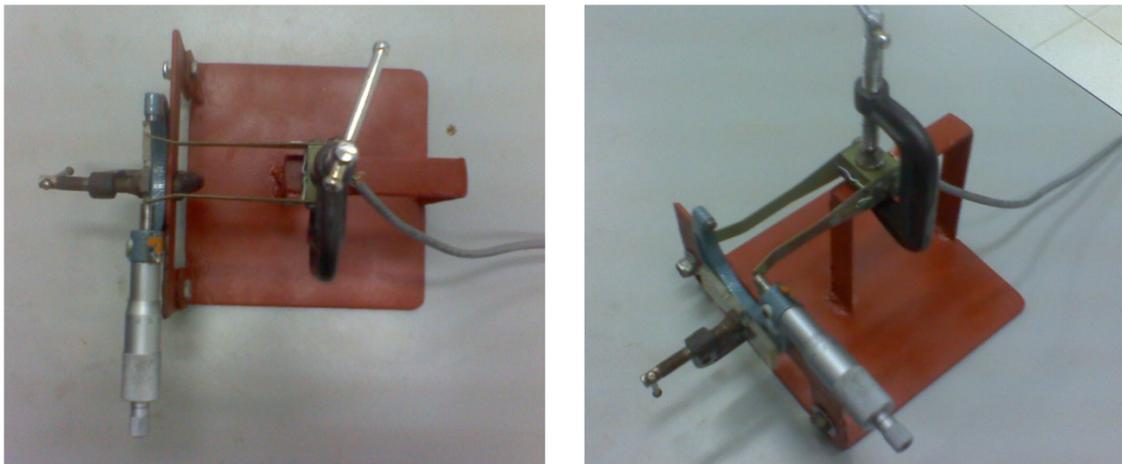


Figura 3.8: Montaje para caracterización del extensómetro



Figura 3.9: Sistema de adquisición de datos

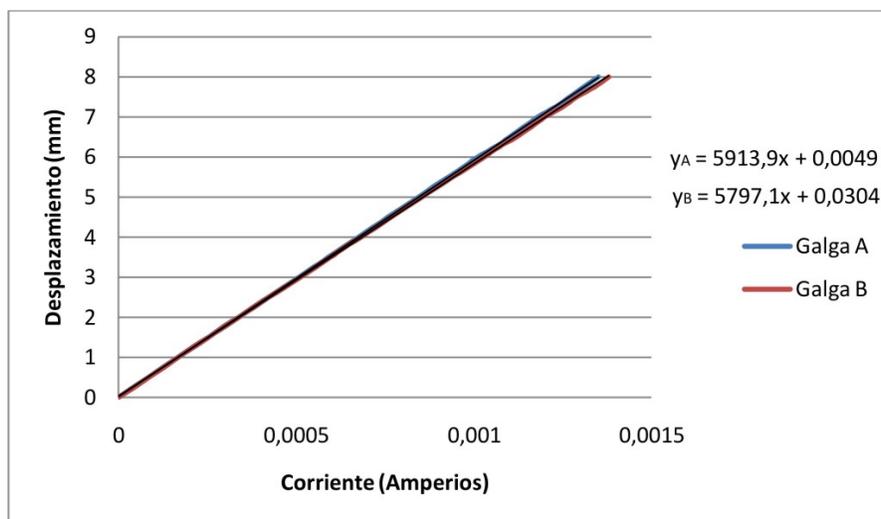


Figura 3.10: Curvas de desplazamiento Vs corriente para cada galga extensiométrica y ecuaciones obtenidas de la regresión lineal de cada conjunto de datos.



Figura 3.11: *Configuración de la prueba de dobléz para obtener la tenacidad de fractura*



Figura 3.12: *Probeta deformada por propagación de la grieta*

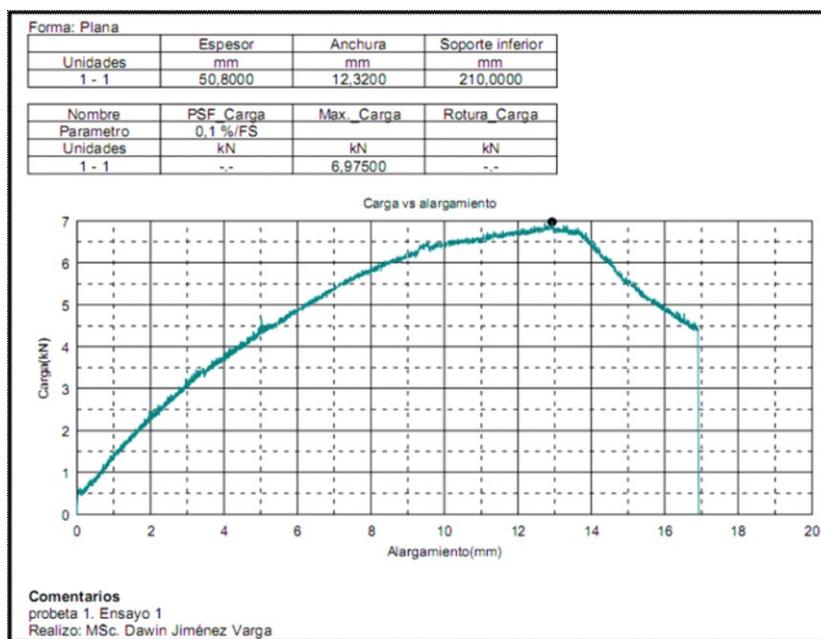


Figura 3.13: Gráfica de carga (KN) vs alargamiento vertical (mm) realizado por la máquina de pruebas universales Shimadzu UH-I



Figura 3.14: Probeta de dobléz después de realizado el ensayo en la máquina de pruebas universales

Capítulo 4

Análisis de los resultados

La prueba de doblez nos permitió generar la gráfica de carga vs desplazamiento ($P - v$) como se observa en la figura 4.1, en la cual se observa un comportamiento de la curva similar al caso II explicado en el capítulo (2.1.4), para la cual se traza la pendiente OP_5 (figura 4.1) a través del origen de la gráfica $(P/v)_5 = 0,95(P/v)_0$ donde $(P/v)_0$ es la pendiente de la tangente OA de la parte con comportamiento lineal de la gráfica. Dado que las cargas que preceden a P_5 son menores, entonces:

$$P_5 = P_Q \quad (4.1)$$

Al verificarse la relación entre la carga máxima (P_{max}) y la carga crítica condicional (P_Q), como se explicó en el capítulo (2.1.4), encontramos que esta relación sobrepasa el valor de 1,1 estipulado por la norma ASTM E 1820, por lo tanto los ensayos no son válidos para efectos de determinación de K_{IC} .

$$\frac{P_{max}}{P_Q} = \frac{6,8}{5,25} = 1,29 \quad (4.2)$$

Lo anterior puede obedecer principalmente al hecho que durante el desarrollo del procedimiento experimental no se aplicó a las probetas el preagrietamiento por fatiga tal como se explica en la sección 7.4 de la norma ASTM E 1820, el cual no pudo realizarse debido a que no contábamos con la máquina requerida para dicho propósito.

Por otro lado, dado que la norma no establece una metodología para la determinación de un valor válido para el espesor de las probetas previo a los

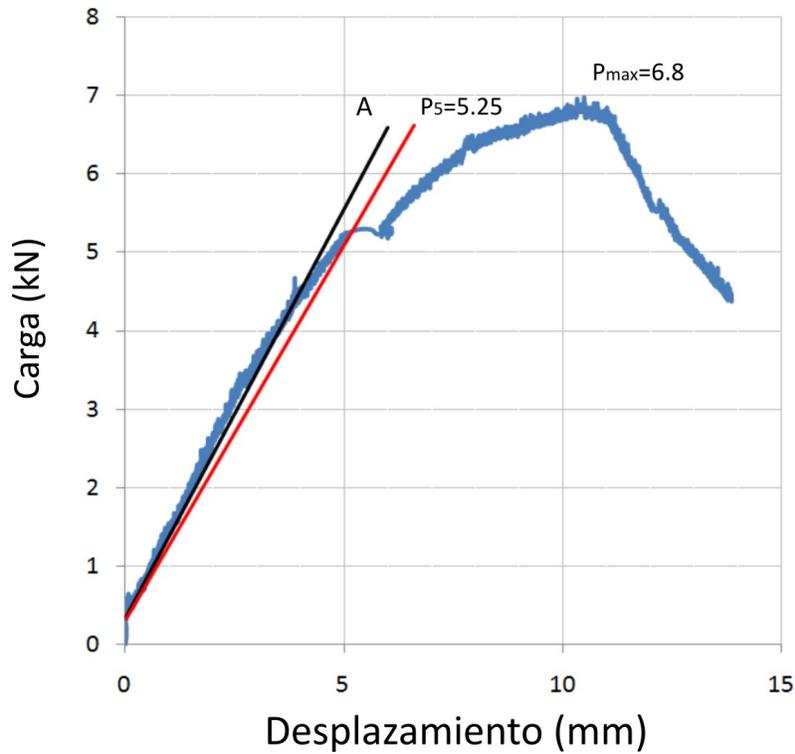


Figura 4.1: Gráfica P - v de prueba de flexión en tres puntos

ensayos, que garantice la condición de deformación plana, dicho valor fue seleccionado de tal forma que las probetas generadas fuesen de fácil maquinado y acordes con los accesorios de la máquina de ensayos universales del laboratorio de materiales de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Por lo cual sería necesario realizar una nueva serie de ensayos con probetas de al menos 1.5 veces el espesor seleccionado inicialmente.

Conclusiones

Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron pruebas para cumplir con los objetivos planteados, las cuales se basaron en estándares internacionales o apegadas a estas para obtener resultados confiables. Se fabricaron diferentes dispositivos con el fin de adaptar los equipos a los procedimientos establecidos. Así también se realizaron pruebas preliminares para ajustar los parámetros finales de prueba que permitieran obtener resultados satisfactorios.

De acuerdo a los objetivos planteados del trabajo, se tiene que:

- Se diseñó, fabricó e implementó las probetas y el extensómetro requeridas para la determinación de la tenacidad de fractura del acero ASTM A 36 según las especificaciones y procedimientos descritos en la norma ASTM E 1820.
- No se pueden obtener valores confiables de tenacidad de fractura para el acero ASTM A 36 sin realizar un preagrietamiento por fatiga que simule las condiciones de agrietamiento cotidianas.
- No es posible determinar si los ensayos cumplen las condiciones de esfuerzo plano si no se garantiza el cumplimiento de la totalidad de los requerimientos de la norma.

Recomendaciones para trabajo futuro

- Realizar los ensayos en una máquina de pruebas universales que posea como accesorio un extensómetro tipo CMOD configurado en el software

de adquisición de la máquina de tal manera que se genere de forma directa la curva de carga Vs desplazamiento.

- Seleccionar un espesor b de las probetas tan grande como sea posible técnica y comercialmente, de esta manera se reduce la probabilidad de repetir los ensayos por no garantizar las condiciones de esfuerzo plano.
- Los procesos de preagrietamiento por fatiga de las probetas es una metodología costosa y depende notablemente de la pericia del experimentador por lo tanto es muy importante implementar el procedimiento de preagrietamiento más viables (menos material, máquinas de ensayos de menor tonelaje, menos tiempo de ensayo) creándose procedimientos que permitan a cualquier experimentador llevar a cabo el proceso de preagrietamiento, una opción es utilizar los factores de intensidad de tensiones modificados propuestos en la literatura para estimar la tenacidad de fractura real del material a partir de resultados experimentales obtenidos con el método de la entalla en V (SEVNB) como lo explica Vincent Taillard ([20]).
- Utilizar un procedimiento para la determinación de la tenacidad a la fractura mediante elementos finitos como las metodologías propuestas por H. E. Jaramillo y L. A. Bacca [24].

Bibliografía

- [1] A. A. Griffith, The Phenomenon of Rupture and Flow in solids, Phil. Trans. Royal Society, London, A, Vol. 221, 1920.
- [2] C. E. Inglis, Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, Proc. Int, Naval Architects, N°60, 1913.
- [3] G.R Irwin, Fracture Dynamics in fracturing of metals, Cleveland: Am Soc. of Metals, 1948.
- [4] G.R Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Transactions ASME, J. Appl. Mech, 1956.
- [5] E. Orogan Fracture and strength of solids. Reports on Progress in Physics XII, 1948.
- [6] H.M. Westergaard, Bearing Pressures and Cracks, Journal of Applied Mechanics, G1, 1939.
- [7] ASTM E 1820-1, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2011.
- [8] David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff, 1984.
- [9] MJ Anglada, Fractura de Materiales, Edicion Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [10] Héctor Hernández Albañil, Édgar Espejo Mora, Mécanica de fractura y análisis de falla, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [11] Jorge Luis Gonzalez, Mecanica de fractura. Bases y aplicaciones. Limusa, Mexico, 1998.

- [12] José Luis Arana y Javier Jesús González, *Mecánica de fractura*, Servicio Editorial Universidad del País Vasco, 2002.
- [13] E. E. Gdoutos, *Fracture mechanics: an introduction*, Second Edition, Springer, 2005.
- [14] Nestor Perez, *Fracture mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.
- [15] Victor E. Saouma, Dept. of civil environmental and architectural engineering, University of Colorado, Boulder, 2000.
- [16] Francisco Javier Rojo Pérez, Tesis doctoral, *Aplicación de la mecánica de la fractura a la rotura frágil de fibras de sémola*, Universidad politécnica de madrid, Madrid, 2003.
- [17] G. E. Ávila Álvarez, Tesis doctoral, *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogota*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2004.
- [18] Tomás Fernando Castillo Bustos, Tesis doctoral, *Mecánica de la fractura aplicada a soldadura utilizando computadoras*, Escuela Superior Politécnica del litoral, Guayaquil, 1992.
- [19] Ignacio Villa, Tesis Doctoral, *Un método analítico para el estudio del comportamiento en fractura de materiales cuasifrágiles*, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2007.
- [20] Vincent Taillard, Tesis Doctoral, *Técnicas de prefisuración de materiales: análisis por elementos finitos e implementación experimental*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2006.
- [21] Jose Ygnacio Pastor Caño, Tesis Doctoral, *Fractura de materiales cerámicos estructurales avanzados*, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1993.
- [22] Jorge Terán Guillén, Tesis Doctoral, *Evaluación de la tenacidad a la fractura en la dirección corta en tuberías de conducción de hidrocarburos*, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., 2007.

- [23] Dally, James W. and Riley, William F. *Experimental Stress Analysis*. 2nd ed. McGraw-Hill, 1987. Especialmente, Chapter six 'Electrical-resistance strain gages'.pags. 153-203.

- [24] H. E. Jaramillo, L. A. Bacca, Una propuesta para la determinación de la tenacidad a la fractura mediante elementos finitos, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009.

Anexos

Anexo A

Medidas Extensometro

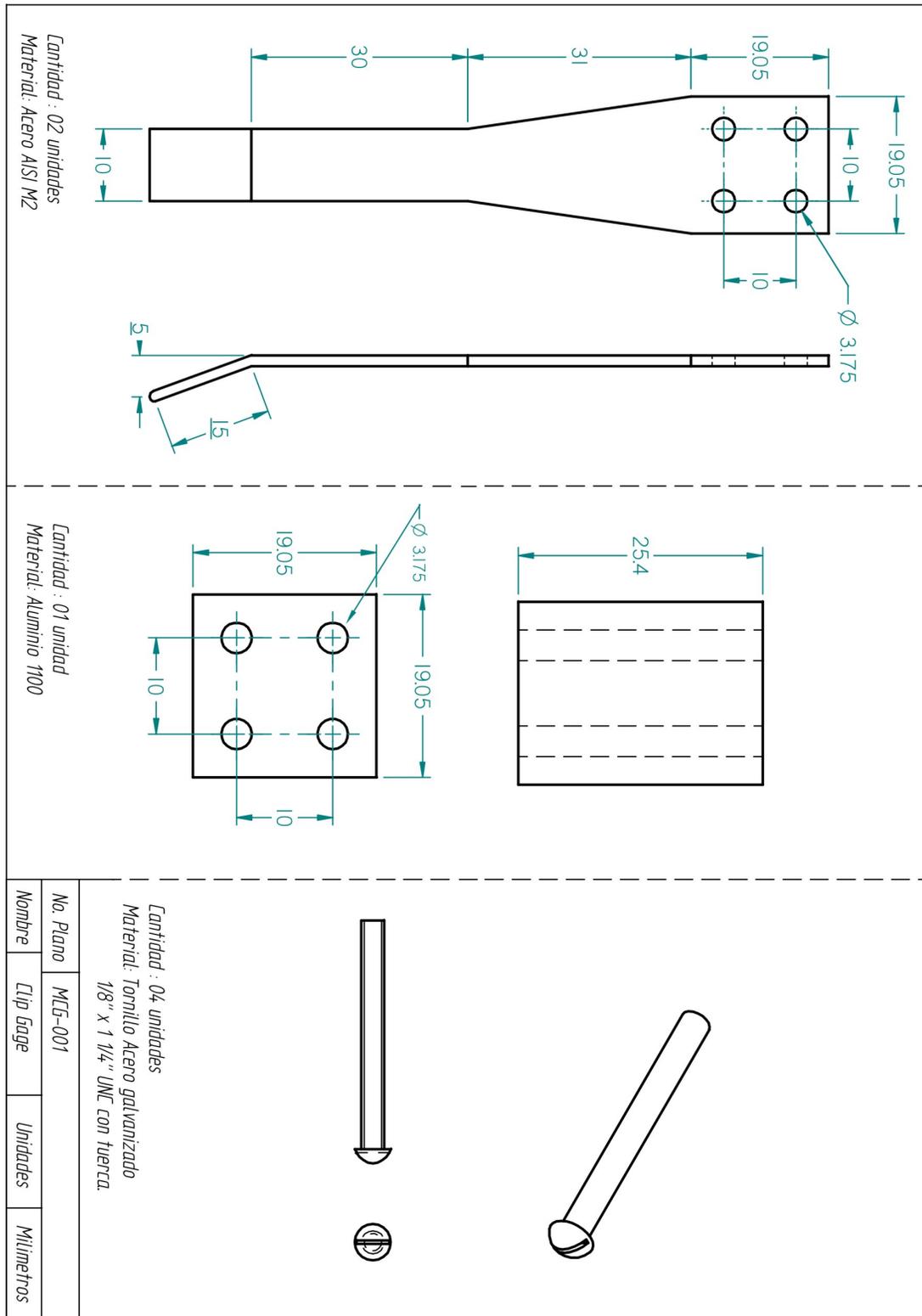


Figura A.1:

Anexo B

Instalación de galgas extensiométricas

B.1. Preparación de la superficie

El objetivo de la preparación del material es crear una superficie limpia, libre de imperfecciones físicas mayores y químicamente apropiada.

B.1.1. Limpieza burda

Se debe eliminar todo tipo de pintura, corrosión, oxidación o cualquier otro contaminante que pueda haber para el área de adhesión (más un área de tolerancia) de las galgas.

B.1.2. Suavizar la superficie

Cualquier tipo de protuberancia, canales, o imperfección mecánica debe ser eliminada por un proceso de pulido, limado, cepillado o lo que sea necesario para el caso.

B.1.3. Eliminar grasas

Este procedimiento se requiere para eliminar todo tipo de aceites, grasas, contaminantes orgánicos y residuos de productos químicos solubles. La elección del agente de limpieza depende de la naturaleza del contaminante y si la superficie puede ser deteriorada por el limpiador. Entre las opciones

más comunes están el tolueno, acetona, alcohol isopropílico, desengrasante en aerosol, baños líquidos agitados ultrasónicamente, métodos desengrasantes por vapor, tricloroetileno y otras sustancias químicas más especializadas. Para áreas grandes usar primero un polvo limpiador abrasivo como AJAX en polvo. Habiendo hecho esto, se debe enjuagar la superficie con agua de tal manera que al terminar se deje una capa continua de sólo agua sobre la superficie. Ésta se debe secar con papel o con calor. El procedimiento de limpieza consiste en empapar una gasa en el agente limpiador y lavar la superficie cubriendo inicialmente un área mayor a la deseada.

Notas importantes:

- El agente limpiador debe estar químicamente limpio y no debe dejar residuos.
- Nunca usar el agente limpiador directamente del recipiente donde se almacena. Una cantidad adecuada debe traspasarse a un recipiente limpio del cual se usará.
- Cada gasa usada debe ser desechada y nunca introducir una gasa usada en el recipiente con el agente limpiador.
- Porciones del agente limpiador sin usarse deben desecharse.
- El área a limpiar debe ser bien delimitada y avanzar progresivamente en esa zona hasta cubrirla completamente sin regresar a limpiar nuevamente para evitar introducir nuevas partículas sucias a la zona limpia.

B.1.4. Lijado

La adhesión entre dos superficies depende del área de las superficies que se cubre con el adhesivo. Un buen pulido fino de las superficies aumenta la adhesión porque aumenta el área de contacto efectiva. Para lijar la superficie se debe tomar en cuenta que sea un papel de lija apropiado para el material y de un grado adecuado. Para acero se usa un grado 80 a 180 y para aluminio un grado 220 a 360. Para evitar hacer canales en el material este procedimiento debe hacerse en movimientos circulares y de preferencia usando primero un papel de lija más grueso y después uno más fino.

B.1.5. Limpieza fina

Cualquier residuo de lija, material o polvo generado en el proceso anterior debe ser eliminado cuidadosamente. Se pueden usar los mismos métodos usados en el punto B.1.3. Tome cada gasa empapada con pinzas de punta finas o 'tweezers' y pásela por la superficie una sola vez. Este procedimiento debe ser repetido una y otra vez hasta que la gasa no muestre señas de decoloración al pasarla por la superficie. La superficie debe dejarse seca y libre de residuos de gasa. Debe cuidar no soplar o respirar cerca de la superficie y evitar tocarla.

B.1.6. Marcar la superficie

La superficie del espécimen donde se van a aplicar las galgas debe marcarse ligeramente para poder alinear las galgas según la deformación que se desea medir. Utilícese un lápiz 4H para aluminio y un bolígrafo para acero para hacer unas ligeras marcas en la periferia del lugar de aplicación de las galgas. Tenga presente que las galgas contienen también señales de alineación.

B.2. Adhesión de las galgas

B.2.1. Posicionamiento de la galga

Tome la galga con unas pinzas finas y colóquela en una superficie químicamente limpia con la superficie de adhesión hacia abajo. Si va a usar terminales para soldar se recomienda colocarlas a 1.6 mm del límite de la galga y alineadas en el centro. Tome un pedazo de cinta adhesiva de unos 10 ó 15 cm de largo y póngala sobre la galga y terminal de tal manera que queden centradas en la cinta. Levante la cinta cuidadosamente en un ángulo de aprox. 45° de la superficie, trayendo consigo la galga y terminal adheridas, como lo muestra la figura B.1.

B.2.2. Alineación de la galga

Posicione la cinta con la galga y terminal en el espécimen de tal manera que las marcas de alineación coincidan con las marcas del espécimen y pegue firmemente un extremo de la cinta como se muestra en la figura de la derecha. Si la alineación no coincidiera a satisfacción, levante la cinta de un extremo

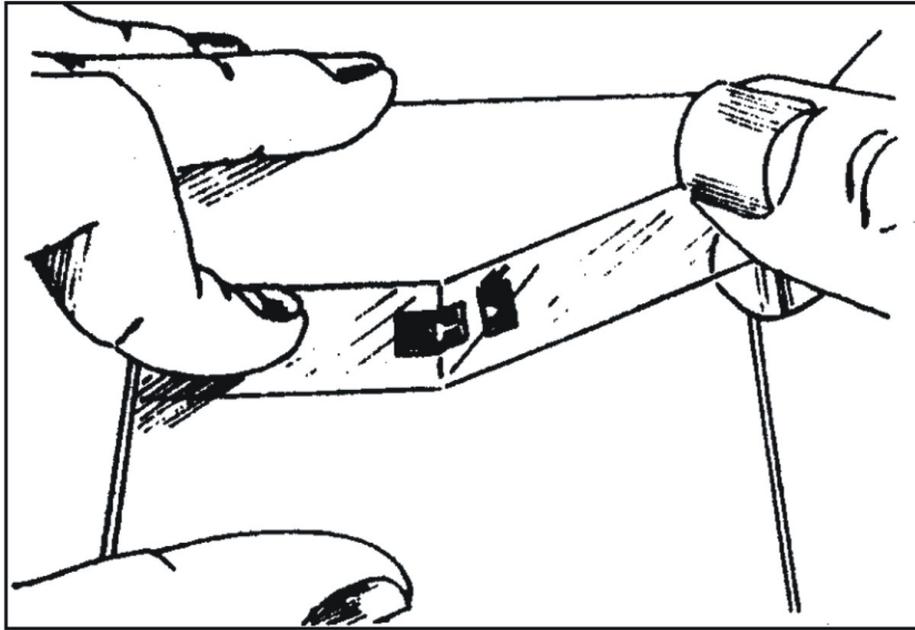


Figura B.1: Galga y terminal adheridos a la cinta

manteniendo un ángulo igual o menor a 45° hasta despegar la cinta completamente. Repita el procedimiento de alineación hasta quedar satisfecho. Para técnicos principiantes se recomienda usar cinta adhesiva especializada para estas aplicaciones ya que ésta no deja residuos de adhesivo cuando se despega.

B.2.3. Preparación final

Levante la cinta con la galga en un ángulo agudo (figura B.3) hasta que la terminal quede aproximadamente 1 cm libre. Doble la cinta sobre si misma y pegue el otro extremo sobre la superficie del espécimen de tal manera que la galga y terminal queden expuestas en una superficie plana con la parte a adherirse hacia arriba (ilustración 4).

Nota 1: Se deben revisar las especificaciones del fabricante para saber si la galga misma requiere de limpieza en la superficie de adhesión. Si la galga ha sido contaminada entonces debe ser limpiada con algodón y un neutralizador.

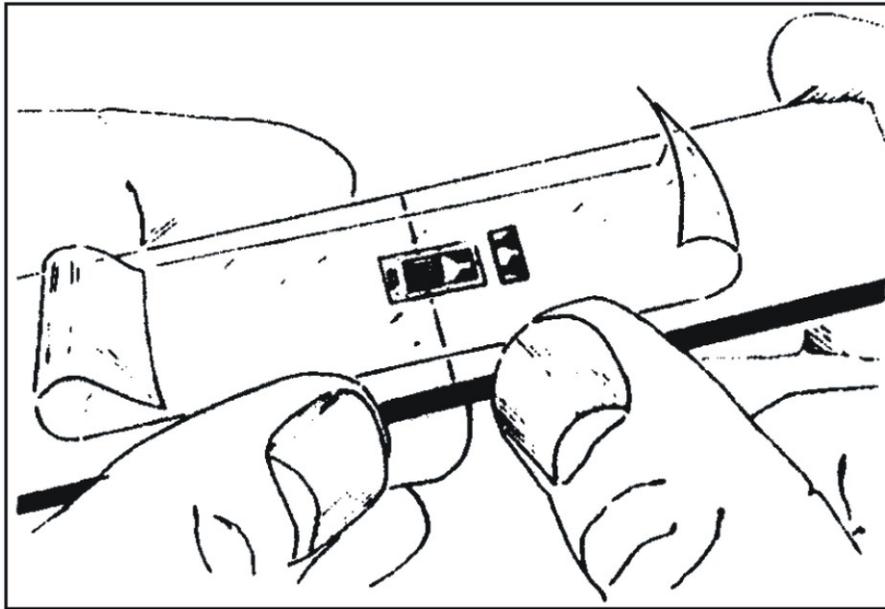


Figura B.2: Galga alineada en el espécimen

Nota 2: Algunos adhesivos requieren que se le aplique a la galga un catalizador para que el adhesivo tome mejor efecto. Si este es el caso, siga los procedimientos marcados por el fabricante.

B.2.4. Aplicación del adhesivo

Levante la cinta del lado que ha sido doblada sobre si misma. Tomando la cinta sin jalar ni doblar. Aplique una o dos gotas de adhesivo en la unión de la cinta con el espécimen a aproximadamente 1 cm. de la periferia de la galga con terminal (figura B.5). Esto permite que la polimerización instantánea del adhesivo al contacto con el espécimen no provoque imperfecciones en la homogeneidad y uniformidad de la película de adhesivo.

B.2.5. Adhesión

Inmediatamente desdoble la cinta para quedar a aproximadamente 30° de la superficie del espécimen con la galga y terminal haciendo un 'puente' sobre el lugar de instalación. Mientras se sostiene la cinta con una ligera tensión,

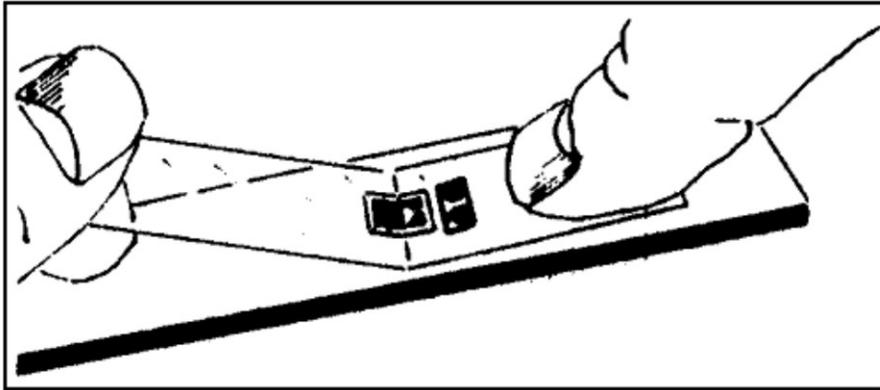


Figura B.3: *Levantar la cinta en un ángulo agudo*

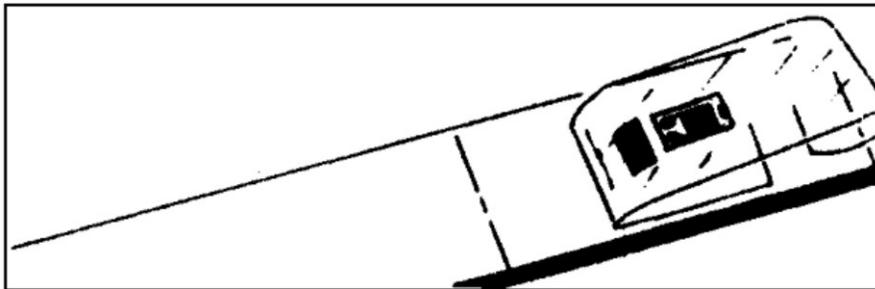


Figura B.4: *Posicionar la cinta para que la parte de debajo de la galga quede expuesta*

aplique una presión deslizante con sus dedos y un pedazo de gasa que vaya oprimiendo la galga y terminal sobre su posición y alineación deseadas (figura B.6). Use una presión firme al 'recostar' la galga sobre su posición ya que se requiere una película muy delgada y uniforme de adhesivo para resultados óptimos.

B.2.6. Aplicación de presión

Inmediatamente después de la acción deslizante y ya con la galga en su posición y alineación correctas, aplique una presión firme con el dedo pulgar sobre la galga y terminal (figura ??). Esta presión se debe ejercer por lo menos por espacio de un minuto. En condiciones de humedad baja (menos de 30 % de

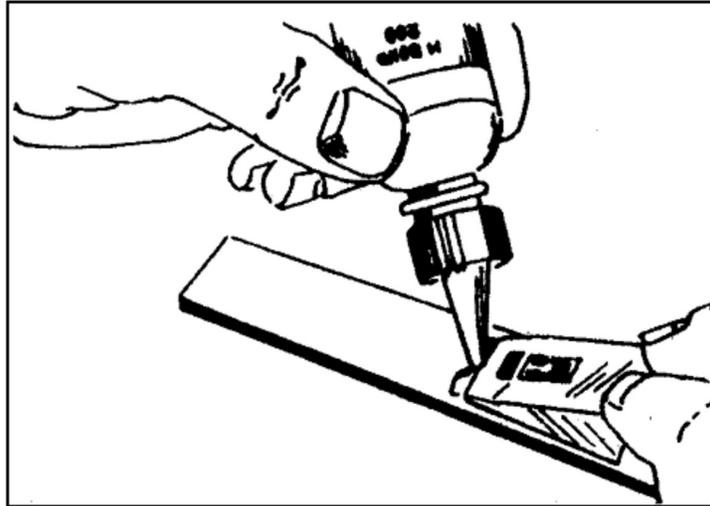


Figura B.5: *Aplicación del adhesivo*

HR) o en temperaturas menores a 20°C la presión debe extenderse a varios minutos, dependiendo de las condiciones. Cuando se tienen galgas de tamaño grande o superficies no uniformes puede requerirse de un dispositivo mecánico para aplicar la presión, por lo que también se requiere aplicar presión por más tiempo. El calor del dedo humano ayuda a una rápida polimerización del adhesivo. Espere por lo menos dos minutos para quitar la cinta después de retirar la aplicación de presión.

B.2.7. Retirar la cinta

La galga y terminal ya deben estar firmemente adheridas al espécimen. Para retirar la cinta, jálala directamente sobre sí misma de forma continua y lenta para evitar ejercer fuerzas innecesarias sobre la galga. Realmente no es necesario retirar la cinta inmediatamente después de la instalación y puede permanecer como protección mecánica hasta que se vaya a proceder a soldar.

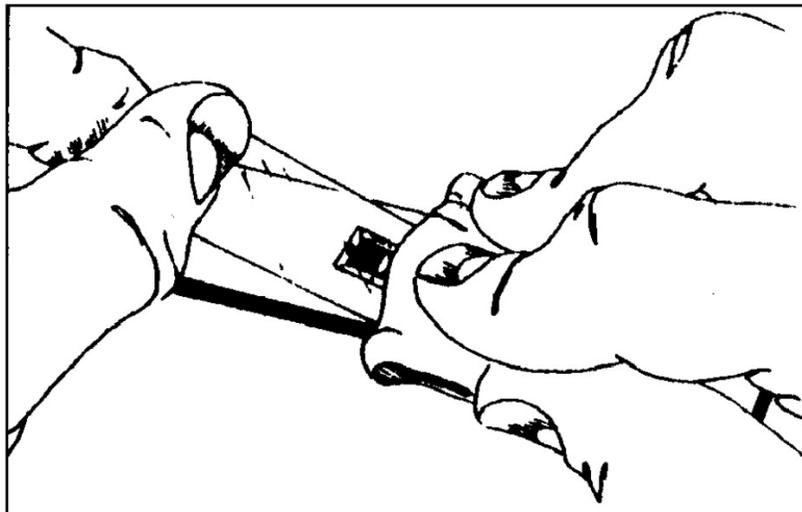


Figura B.6: *Adhesión*

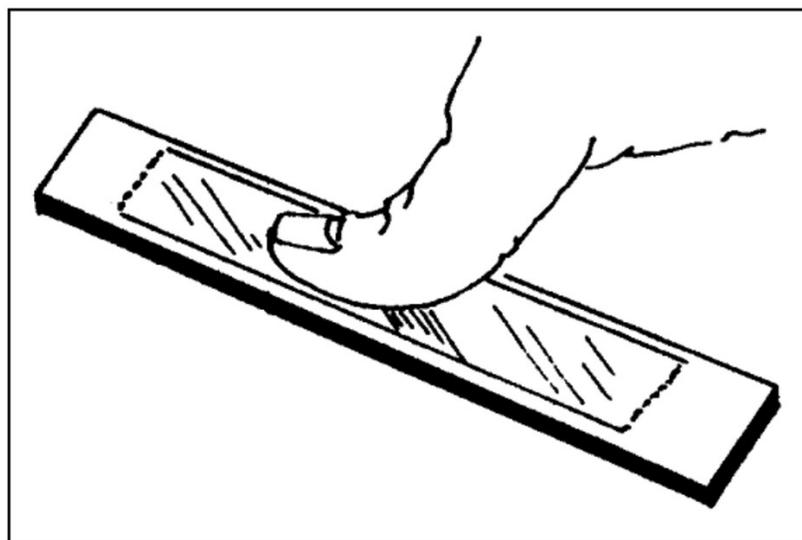


Figura B.7: *Aplicación de presión en la galga*

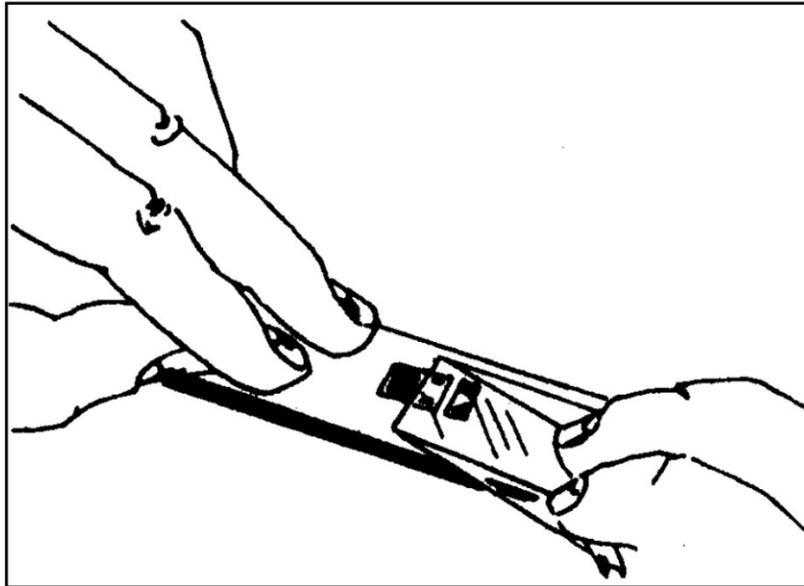


Figura B.8: *Cómo retirar la cinta*