



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

EQUIPO SERVOHIDRÁULICO PARA ESTUDIOS DE MICROMECAÁNICA: FRACTOGRAFÍA Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN PMMA POR FATIGA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
(CIENCIA DE MATERIALES)

P R E S E N T A

I. Q. ERÉNDIRA PEREYRA PEREA



DIRECTOR DE TESIS:
DR. GUILLERMO PULOS CÁRDENAS

México D.F.

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi mamá por su inmenso amor,
a mi papá, mis hermanas y mis sobrinas.

GRACIAS

A la UNAM y al Instituto de Investigaciones en Materiales por la oportunidad de aprender a lo largo de estos años.

Al Dr. Guillermo Pulos por TODO (que son muchas cosas y no acabaría de listarlas).

Al Dr. Guillermo Aguilar S. por su apoyo para obtener la beca de DGEP; al Dr. Luis Enrique Sansores C., Lic. Irma Vieyra O. y el Ing. Jesús Camacho S. quienes como autoridades del IIM me apoyaron siempre y además me brindaron su amistad.

Al Dr. Enrique Geffroy Aguilar por su tiempo, amistad, bondad, conocimientos compartidos y por los chocolates; además por haber revisado este trabajo.

A los Dres. Jack Soullard S., Jorge Montemayor A., Julio Juarez I., Juan Hernández C., y el M. en I. Armando Ortiz P. por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo y sus aportaciones.

A los chicos del taller y a Ismael López por todo lo que trabajaron con nosotros desde que comenzamos a construir la MHLD II y por su amistad.

Al Dr. Gabriel Torres V., A Marco Reyes H., Marco Rojas M., Adriana G., Araceli O., Sara G., Gladys Z., Carmen V. R., Gilberto B., Said R., Octavio O., Violeta M., Miguel Ángel J. y Francisco S. por su amistad apoyo y las risas compartidas.

A Angélica P. porque su computadora me rescató siempre que la tecnología se puso en mi contra.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado, al Proyecto de CONACyT G27837U y del Proyecto FIES-97-05-1 por los apoyos económicos recibidos.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Jaques Soullard Saintrais

Primer Vocal: Dr. Jorge Montemayor Aldrete

Segundo Vocal: Dr. Julio Alberto Juárez Islas

Tercer Vocal: Dr. Guillermo P. Pulos Cárdenas

Secretario: Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero

Suplente: Dr. Enrique Geffroy Aguilar

Suplente: M en Ing. Armando Ortiz Prado

Este trabajo se desarrolló en el Instituto de Investigaciones en Materiales,
UNAM.

Director de Tesis:

Dr. Guillermo Pulos Cárdenas

Sustentante

I. Q. Eréndira Pereyra Perea

Índice

Resumen	ix
Índice	xi
Prólogo	xv
1 Antecedentes	1
1.1 Fractura en materiales	1
1.1.1 Solución asintótica de Williams	4
1.1.2 El factor de intensidad de esfuerzos, K	6
1.1.2.A La Probeta	7
1.1.3 Zona de deformación plástica o <i>Craze</i>	10
1.2 Fatiga	14
1.2.1 Importancia de la geometría de la probeta en las pruebas de fatiga	18
191.2.2 Tipos de control en fatiga	19
211.2.3 Ley de Paris	21
1.2.4 Deformabilidad	24
1.3 Polímeros	25
1.3.1 Sensibilidad a la frecuencia	27
1.3.2 Modos de propagación:.....	28
1.3.2.A Formación de bandas y propagación discontinua	29
1.3.2.B Transiciones entre superficies fracturadas lisas y rugosa	30
1.3.3 Influencia del peso molecular y la temperatura	32
1.3.4 El Poli (metil metacrilato), PMMA	33
2 Descripción del equipo y desarrollo experimental	35
2.1 ¿Por qué construir una máquina en miniatura?.....	35
2.2 El Equipo	38
2.2.1 Módulo servohidráulico	41
2.2.1.A La Servoválvula	42
2.2.1.B El múltiple y el cilindro hidráulico	43
2.2.1.C Transformadores de desplazamiento	44
2.2.1.D Transformadores de fuerza	50
2.2.1.E Electrónica	53
2.2.1.E.a Controlador 407 y control.....	54
2.2.1.E.b Calibración del controlador PIDF	56
2.2.1.E.c Desempeño del módulo servohidráulico	59
2.2.2 Arreglo mecánico.....	60
2.2.2.A Marco de carga	61
2.2.2.B Conexiones hidráulicas	62
2.2.2.C Tren de carga	63
2.2.2.D Sistema de posicionamiento x, y, q	64
2.2.3 Óptica.....	65
2.2.3.A Microscopio	65
2.2.3.A.a Objetivos.....	68
2.2.3.A.b Iluminación	68
2.2.3.B Adquisición de imágenes	68
2.2.3.B.a Cámaras de video y fotográfica	68

2.2.3.B.b	Monitores	69
2.2.3.B.c	Resolución de la óptica del equipo	71
2.2.4	Operación remota del equipo	72
2.2.4.A	Hardware	72
2.2.4.A.a	El controlador 407	73
2.2.4.A.b	El controlador PMC 200	73
2.2.4.A.c	Tipos de comunicación	73
2.2.4.B	Software	74
2.2.4.C	Control combinado fuerza-desplazamiento	77
2.2.5	Comparación de la máquina servohidráulica en miniatura con una máquina comercial	82
2.3	Desarrollo experimental	84
2.3.1	El experimento	84
2.3.1.A	La probeta y las mordazas	84
2.3.1.B	Parámetros de la función de carga	87
2.3.1.C	El control remoto y el almacenamiento de datos	88
2.3.1.D	Seguimiento de la grieta	89
2.3.2	Manipulación y tratamiento de datos con PV-WAVE	89
2.3.3	Obtención de imágenes de la superficie fracturada	90
2.3.3.A	Construcción del mosaico de la superficie fracturada	90
3	Resultados	93
3.1	Comportamiento del Factor de Intensidad de Esfuerzos	94
3.2	Variación del factor de intensidad de esfuerzos con cambios en longitudes de grieta	95
3.2.1	Control de fuerza	96
3.2.2	Control de desplazamiento	98
3.2.3	Control combinado fuerza-desplazamiento	98
3.3	Velocidad de propagación de una grieta	100
3.3.1	Experimentos bajo control de fuerza	101
3.3.2	Experimentos bajo control de desplazamiento	102
3.3.3	Experimentos bajo control combinado fuerza-desplazamiento	102
3.3.4	Propagación de una grieta a altas velocidades	103
3.4	Ley de Paris	106
3.4.1	Ley de Paris para 3mm	106
3.4.2	Zonas de transición en las gráficas de la ley de Paris para 3mm	108
3.4.3	Ley de Paris para 6mm	111
3.4.4	Desaceleración de la propagación de una grieta en 6mm	113
3.5	Deformabilidad	117
3.5.1	Comportamiento de la deformabilidad con relación al tiempo	118
3.5.2	Comportamiento de la deformabilidad con relación a la carga	120
3.6	Fractografía	121
3.6.1	Condiciones para obtener superficies rugosas	122
3.6.2	Condiciones para obtener superficies lisas	123
3.6.3	Transiciones entre superficies lisas y rugosas	125
3.6.3.A	El perfil de la grieta	125
3.6.3.B	Formación de vértices (ángulos)	128
3.6.4	Formación de bandas en superficies lisas	133

3.6.5	Variaciones del frente de una grieta	137
4	Conclusiones y Trabajo a Futuro	139
4.1	Conclusiones	139
4.1.1	Probador servohidráulico	139
4.1.2	El experimento de fatiga	140
4.2	Trabajo a futuro	145
4.2.1	Probador servohidráulico	145
4.2.2	El experimento de fatiga	147
	Referencias	149
	Anexo I. Instrumentos virtuales para el control del experimento, adquisición de datos e imágenes	151
A.1	Comunicación entre la computadora y los controladores	152
A.2	El experimento de fatiga	154
A.2.1	Organización del instrumento virtual principal	157
A.2.2	Descripción de los subinstrumentos virtuales generales.	159
A.2.3	Ejecución del instrumento <i>data_acq_&_ctrl_v_6.vi</i>	163
A.3	Barrido de la superficie generada por fractura	171

Resumen

Los materiales de uso ingenieril son frecuentemente sometidos a condiciones de cargas cíclicas o intermitentes que favorecen la falla de los mismos sobre todo cuando existe algún defecto, por ejemplo, una grieta. La importancia de los estudios de fatiga radica en combinación de estos factores que afectan de manera directa el tiempo de vida útil de un componente mecánico o una estructura.

La caracterización del comportamiento macroscópico de la propagación de una grieta en un material bajo condiciones de fatiga se lleva a cabo utilizando la Ley de Paris la cual relaciona la velocidad de propagación de la grieta con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos (ΔK_I). Esta caracterización resulta adecuada para metales, pero no describe con precisión el comportamiento de los materiales poliméricos. En este caso no es claro si la respuesta del material se puede relacionar con ΔK_I o con el máximo del factor de intensidad de esfuerzos $K_{I_{max}}$. Además, otros factores como los fenómenos microscópicos alrededor de la punta de la grieta, la frecuencia de carga y la topografía de la superficie generada por la fractura hacen más complejo el estudio de estos materiales.

En esta investigación se parte de la hipótesis de que el nivel máximo del factor de intensidad de esfuerzos, $K_{I_{max}}$, es el parámetro determinante para el comportamiento de una grieta, lo cual se comprueba con el análisis de la topografía de la superficie generada por la fractura, así como la velocidad de crecimiento macroscópico de la misma. Ésta última se ve afectada por los diferentes tipos de superficie, tanto lisa como rugosa y las transiciones que se presentan debidas a un cambio en las condiciones de carga.

Para el desarrollo de este tipo de estudio es de gran importancia contar con equipos que tengan una gran precisión y resolución en las mediciones. Por esta razón, se construyó un probador servohidráulico en miniatura que está montado sobre un microscopio óptico; esto con el fin de adquirir imágenes durante el avance de la punta de la grieta que tengan una resolución de micras

Prólogo

El comportamiento de una grieta que se propaga en poli(metil metacrilato), PMMA, se ve afectado en mayor o menor grado por factores como la carga aplicada y el factor de intensidad de esfuerzos. Si la carga es cíclica la grieta se propaga bajo condiciones de fatiga y, por tanto, parámetros como la frecuencia, el valor promedio y la amplitud de la carga repercuten en su comportamiento haciendo más complejo el estudio de este problema. Por esta razón es importante realizar un estudio que relacione la velocidad de propagación de la grieta con el factor de intensidad de esfuerzos así como la topografía de la superficie generada por la fractura, con el fin de facilitar la descripción del comportamiento de la grieta.

Este tipo de estudio requiere una buena resolución para las mediciones de fuerzas y desplazamientos, además de contar con un sistema óptico adecuado para el seguimiento de la grieta durante el experimento. Con este fin se construyó una máquina en miniatura con dos módulos servohidráulicos en un arreglo simétrico, la cual está soportada bajo el tren óptico de un microscopio comercial.

Este trabajo está organizado en cuatro Capítulos y un Anexo. El primer Capítulo contiene los conceptos teóricos sobre mecánica de fractura como el factor de intensidad de esfuerzos, los tipos de control (fuerza y desplazamiento), los conceptos básicos de fatiga y la Ley de Paris. Además se presentan algunos antecedentes de estudios de fractura en termoplásticos como PMMA, PS y PE en los cuales existen algunos fenómenos similares

a los resultados obtenidos en este trabajo con respecto a la topografía de la superficie fracturada, la velocidad de propagación de la grieta y la Ley de Paris.

El segundo Capítulo está dirigido a la descripción de la máquina servohidráulica, su construcción, la importancia del tamaño de la misma y del arreglo simétrico de los módulos servohidráulicos. Las dimensiones de la máquina permiten acoplarla a un sistema óptico fijo como el microscopio que se utilizó. Otro factor importante de esta máquina en miniatura está relacionado con la resolución de los dispositivos de medición de fuerza y desplazamiento, de tal forma que se pueden realizar experimentos con probetas pequeñas y obtener resultados de gran resolución; lo anterior resulta importante en el caso de estudiar fenómenos microscópicos que se presentan en la punta de la grieta como el comportamiento de la zona de proceso. Se presentan además las curvas de calibración de los dispositivos de medición y del controlador, la descripción del sistema óptico y de visualización de imágenes que se utiliza para el seguimiento del crecimiento de una grieta y para la obtención de las imágenes de la superficie generada por la fractura. Por otro lado, se explica el experimento de fatiga que involucra aspectos como la operación del equipo de manera remota, el control combinado de fuerza y desplazamiento y la adquisición y análisis de datos. Este control combinado fuerza-desplazamiento es una herramienta extra en la operación de la máquina que busca simplificar los factores que afectan el comportamiento de una grieta al mantener constante el factor de intensidad de esfuerzos.

El tercer Capítulo presenta los resultados obtenidos de experimentos de fatiga bajo distintos tipos de control (fuerza, desplazamiento y su combinación). Estos resultados

comprenden el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos, la velocidad de propagación de la grieta y la relación de estos con la topografía de la superficie generada por fractura. Se presentan algunos mosaicos fotográficos de dichas superficies que muestran los diferentes tipos de transiciones entre las zonas lisas y rugosas, y viceversa; la formación de estrías generadas a altas velocidades de propagación de la grieta, la formación de bandas perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta y el análisis del perfil de la grieta. Se presenta la relación entre el factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de la grieta por medio de las gráficas de la Ley de Paris para las probetas de 3mm y 6mm de espesor que se utilizaron. Estas gráficas también se relacionan con el análisis de la superficie generada por la fractura. Finalmente, se presentan algunas observaciones del comportamiento de la pérdida de resistencia del material o deformabilidad con respecto a la magnitud de la carga y al tiempo que duran los experimentos. También se presenta un análisis del comportamiento del frente de la grieta durante los experimentos bajo distintos tipos de control.

En el cuarto Capítulo se presentan las conclusiones y se establecen las bases para el desarrollo de un gran número de proyectos relacionados con cada uno de los aspectos analizados en los resultados que se presentan en el Capítulo 3. Con relación al equipo, se propone llevar a cabo la automatización de las partes del experimento realizadas hasta hora manualmente, complementar el sistema óptico y de adquisición de imágenes aumentando así la resolución y precisión de los mismos para poder desarrollar estudios más detallados, por ejemplo, profundizar en el estudio del comportamiento de la zona de proceso.

La descripción de las funciones principales de los instrumentos virtuales para la operación remota de la máquina servohidráulica en miniatura y la adquisición de datos e imágenes se presenta en el Anexo A de este trabajo.

1 Antecedentes

1.1 *Fractura en materiales*

Los materiales utilizados en aplicaciones de ingeniería fallan cuando se ve comprometida su resistencia al esfuerzo por la presencia de defectos. En condiciones de carga intermitente o cíclica, esta falla se presenta a menores niveles de fuerza que en condiciones de carga estática. Por esta razón los estudios de fatiga son importantes para determinar el tiempo de vida remanente de un componente mecánico o una estructura (Gregory, 1991).

Los primeros estudios acerca de materiales que contienen defectos, se enfocaron en evaluar la estabilidad de una grieta en función de los conceptos de energía de deformación. Ese es el caso de los estudios de Inglis (1913), Griffith (1920) y Orowan (1948) quienes incluyen conceptos tales como: la energía de superficie de un sólido frágil, la energía de deformación plástica, el módulo elástico (E) y el cambio en la longitud de la grieta a (Hertzberg, 1980, sec. 3.2).

Debido a la complejidad del problema de la fractura de materiales, éste se ha dividido en diferentes etapas siendo una de éstas la propagación de grietas. Para el análisis de este problema considera un material isótropo e infinito que contiene una grieta de longitud $2a$, como se muestra en la Fig. 1.1. El crecimiento de la grieta ocurre cuando el esfuerzo total aplicado, σ , es superior a la energía de formación de dos superficies libres. El esfuerzo en términos de la energía superficial, γ_s , y la energía de deformación plástica, γ_p , está dado por

$$s = (2E(g_s + g_p)/pa)^{1/2} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

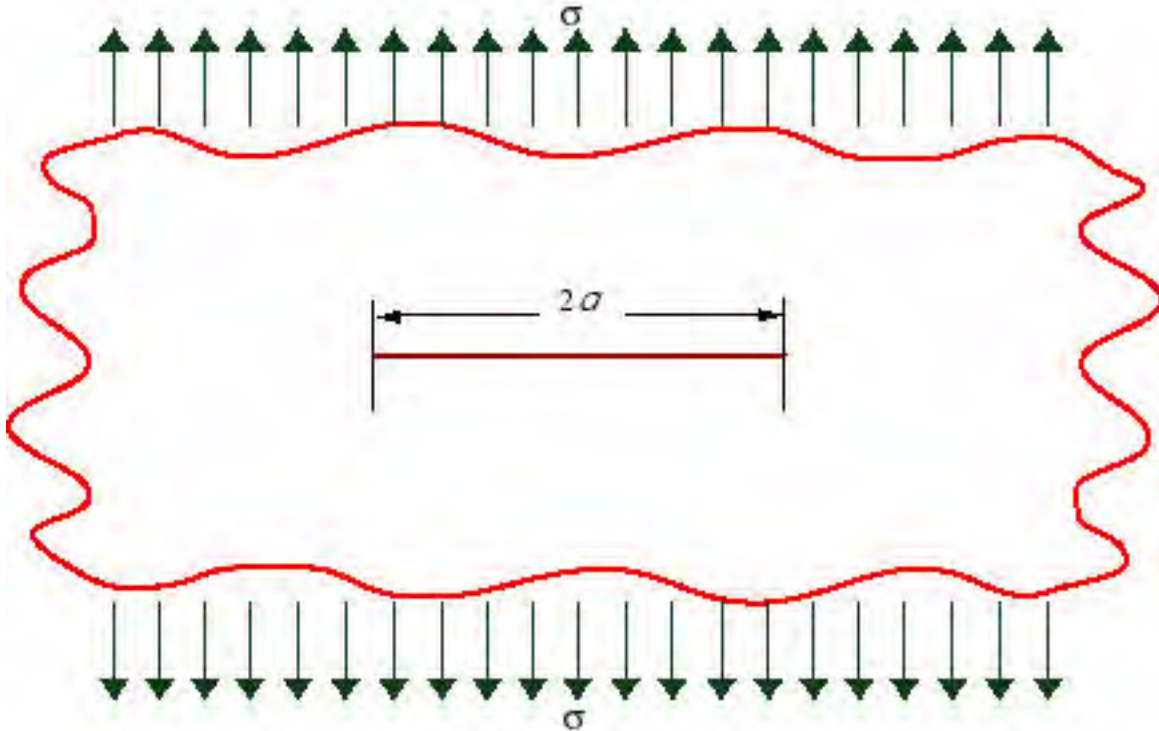


Figura 1.1. placa semi-infinita con una grieta de diámetro 2a.

Al considerar un concepto mas general de energía (Ashbi, 1998, Cap. 13), podemos definir G_c , como la velocidad crítica de liberación de energía conocida como tenacidad y convertir la ecuación 1.1 en

$$s\sqrt{pa} = \sqrt{EG_c} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Desde el punto de vista de la teoría de elasticidad (Hertzberg, 1980, Sec. 3.2), la mecánica de fractura se basa en el principio de la concentración de esfuerzos en la punta de una grieta como consecuencia de la aplicación de una carga. Ésta puede ser clasificada en tres modos ilustrados en la Fig. 1.2. La superposición de estos tres modos representan

el caso más general de carga, siendo el Modo I el más importante (Parker, 1981, Sec. 3.7).

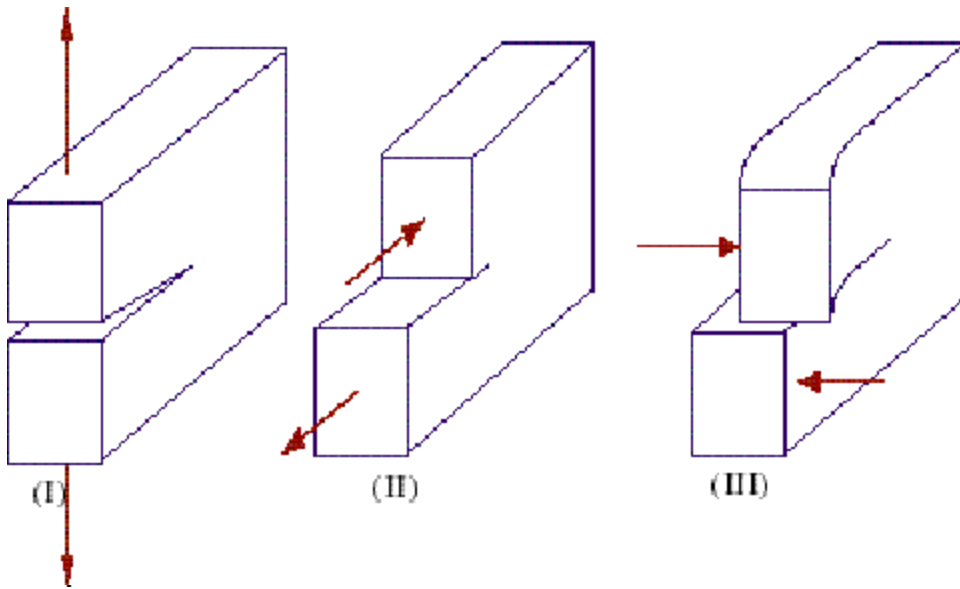


Figura 1.2. Modos de carga.

El Modo I se genera cuando la carga se aplica de manera simétrica. El desplazamiento de las superficies fracturadas es perpendicular a la dirección en la que la grieta se propaga. En este caso, no hay esfuerzos cortantes adelante de la punta de la grieta sobre el plano de simetría.

El Modo II o Modo de Deslizamiento se genera con cargas antisimétricas en el plano. El desplazamiento de las superficies fracturadas se da en la dirección de propagación de la grieta.

El Modo III o Cortante fuera del plano se genera cuando los desplazamientos de las superficies son perpendiculares a la fuerza aplicada y paralelos a las superficies fracturadas. Los esfuerzos son cortantes fuera del plano.

Para el estudio del comportamiento de una grieta bajo los diferentes modos de carga se han desarrollado diferentes aproximaciones, como la solución asintótica de Williams la cual se explica a continuación.

1.1.1 Solución asintótica de Williams

La grieta de la Fig. 1.1 corresponde al modo de carga I. En este caso, el comportamiento elástico del material está descrito por una distribución de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta (Williams 1957). Tales esfuerzos pueden representarse con base en el diagrama de la Fig. 1.3 y las Ecs. 1.3.

$$\begin{aligned} s_y &= \frac{K_I}{(2pr)^{1/2}} \cos \frac{q}{2} \left[1 + \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \\ s_x &= \frac{K_I}{(2pr)^{1/2}} \cos \frac{q}{2} \left[1 - \sin \frac{q}{2} \sin \frac{3q}{2} \right] \\ t_{xy} &= \frac{K_I}{(2pr)^{1/2}} \cos \frac{q}{2} \cos \frac{3q}{2} \sin \frac{q}{2} \end{aligned} , \quad \text{Ecuaciones 1.3}$$

donde K_I es el factor de intensidad de esfuerzos. Al considerar los casos de deformaciones planas o esfuerzos planos, los esfuerzos en esta tercera dirección σ describen por las Ecs. 1.4.

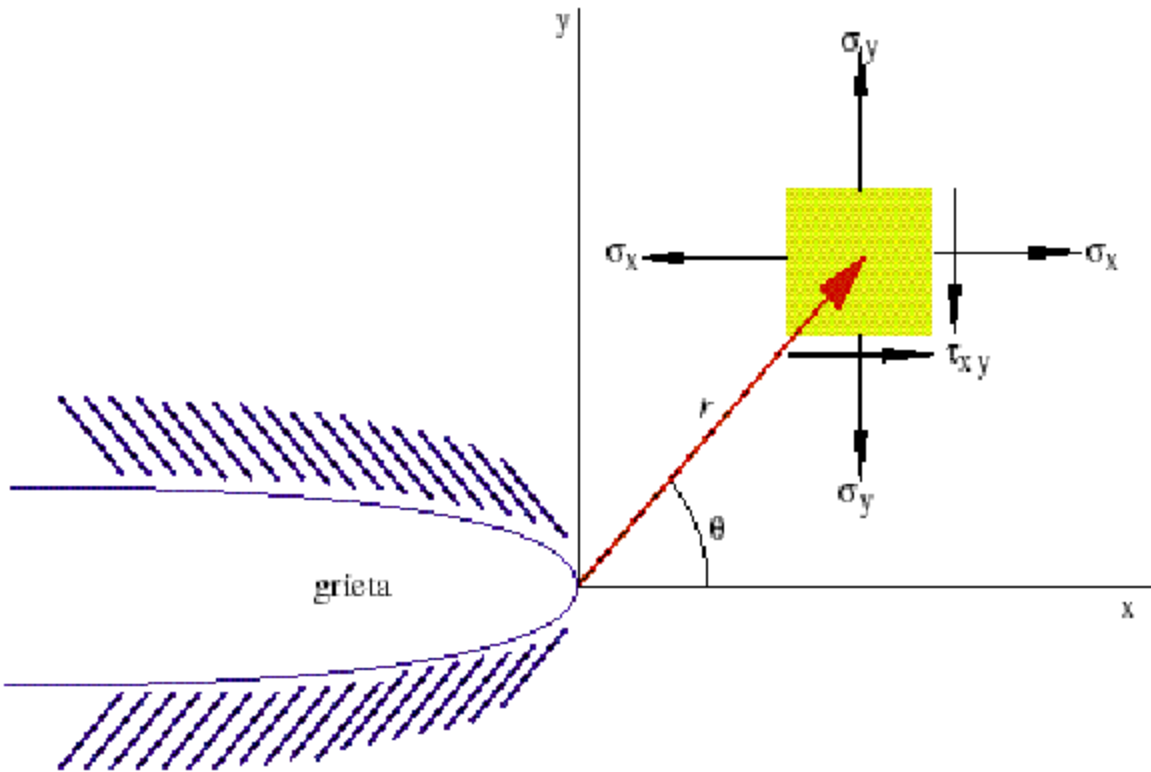


Figura 1.3. Campo asintótico de Williams. Distribución de esfuerzos en la punta de la grieta.

$$t_{xz} = t_{yz} = 0,$$

$$s_z \approx n(s_y + s_x) \quad \text{deformaciones planas, } \nu, \text{ Ecuaciones 1.4}$$

$$s_z \approx 0 \quad \text{esfuerzos planos,}$$

donde n es la relación de Poisson. Para diferenciar de qué caso se trata, es necesario evaluar el tamaño de la zona de proceso. Si se examina la geometría de una probeta para fractura, se podría pensar que el problema a resolver es uno de esfuerzos planos pues el espesor de la probeta es mucho más pequeño que las dimensiones en el plano. Sin embargo, cuando se piensa en utilizar el campo asintótico, éste sólo es válido muy cercano a la punta de la grieta. En este caso, las dimensiones en el plano son mucho más pequeñas que el espesor de la probeta y por tanto una descripción con deformaciones planas es más apropiada. Desde un punto de vista práctico, se puede considerar que si las

dimensiones de la zona de proceso son menores o iguales al 2% del espesor de la probeta o al tamaño de la grieta, entonces se habla de deformaciones planas (Hertzberg, 1980, Sección 3.2).

Williams introduce el concepto de intensidad de esfuerzos en el cálculo de los esfuerzos principales. El subíndice I, II o III que lo acompañan indica el modo de carga al que se refiere.

1.1.2 El factor de intensidad de esfuerzos, K

A partir de la ecuación 1.2 y considerando condiciones de esfuerzo y longitud de grieta críticos para que se lleve a cabo la fractura repentina de un material se define una constante, propiedad del material conocida como el factor de intensidad de esfuerzos crítico (K_c). Este valor crítico también es conocido como la resistencia a la fractura o “*fracture toughness*” y está definido en términos de la energía por la Ec. 1.5

$$K_c = \sqrt{EG_c} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

En términos de la solución asintótica de Williams, K define la amplitud del campo asintótico de esfuerzos (Ecs. 1.3), la cual desempeña un papel importante en cualquier problema de fractura o fatiga ya que depende del esfuerzo externo, la longitud de la grieta (a) y un factor de corrección geométrico. Debido a la importancia de K para explicar la fractura en los materiales, todos los fenómenos que ocurren en este proceso se analizan con respecto a este factor. Los detalles de su comportamiento bajo distintas condiciones de carga (control de fuerza o desplazamiento) se presentan más adelante cuando se habla de fatiga o en la sección correspondiente de resultados.

El estudio de la propagación de grietas bajo condiciones de fatiga, se puede llevar a cabo con probetas de distintas geometrías (ASTM,E 647-99); por ejemplo, si la probeta es del tipo de tensión-uniaxial, se puede estudiar el número de ciclos que dura una muestra antes de fallar; para el caso de las probetas del tipo de tensión compacta (CT) se puede estudiar la velocidad de propagación de una grieta bajo diferentes condiciones. El tamaño de estas probetas o las relaciones entre sus dimensiones principales están estandarizadas para facilitar la evaluación del factor de intensidad de esfuerzos K .

1.1.2.A La Probeta

Para cada geometría y modo de carga están establecidas las ecuaciones para el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos. Las probetas de tensión compacta (CT por sus siglas en inglés) facilitan el estudio del crecimiento de una grieta bajo cargas cíclicas pues ésta se propaga paralelamente a la dimensión más larga que tiene la probeta (Parker,1981,cap.4; Ramsteiner,2000). Por esta razón, esta geometría fue la seleccionada para el desarrollo de este trabajo.

Para esta configuración el factor de intensidad de esfuerzos está definido por la Ec. 1.6

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{W}} \frac{(2 + a/W)}{(1 - a/W)^{3/2}} 2F_2, \quad \text{Ecuación 1.6}$$

donde P es la fuerza, t el espesor de la probeta y F_2 es un factor geométrico. Srawley y Gross (Srawley, 1972) obtuvieron la evaluación de F_2 en función de la longitud relativa de la grieta (a/W) para distintos tamaños de probetas de tensión compacta. El comportamiento de este factor se muestra en la Fig. 1.5.

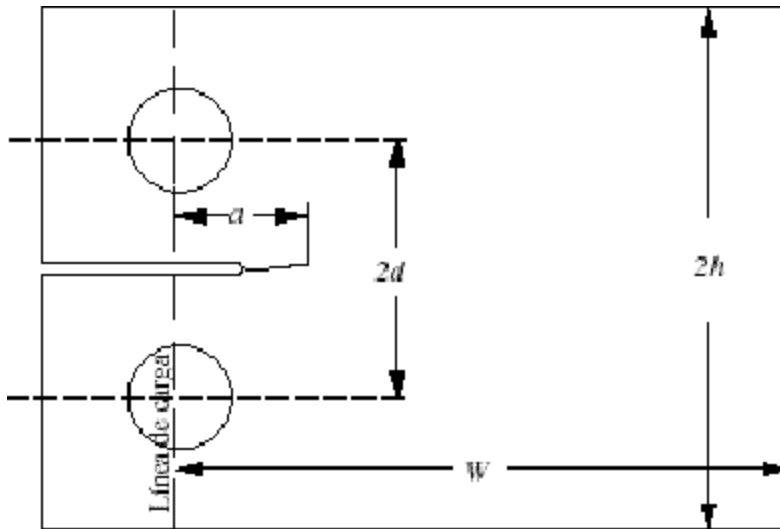


Figura 1.4. Probeta para tensión compacta (CT) y sus dimensiones características.

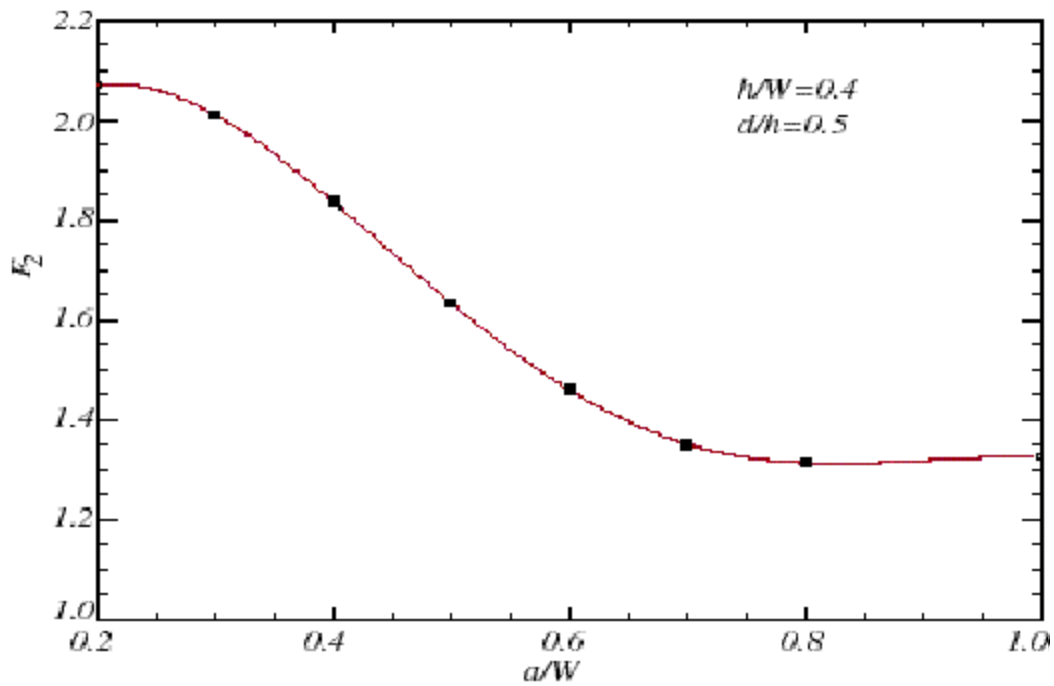


Figura 1.5. Factor geométrico como función de longitud de grieta relativa para la geometría CT.

A cada valor de longitud relativa de la grieta corresponde un valor de corrección por la geometría. A partir de esta aproximación, la influencia del factor geométrico no varía

considerablemente para una longitud de grieta relativa (a/W) mayor a 0.8; para longitudes relativas menores a 0.2 no se tienen datos. Cabe hacer notar que el factor de intensidad de esfuerzos tiende a infinito cuando a se aproxima a W , como se muestra en la Fig. 1.6, debido al factor de $(1 - a/W)^{3/2}$ en la Ec. 1.6.

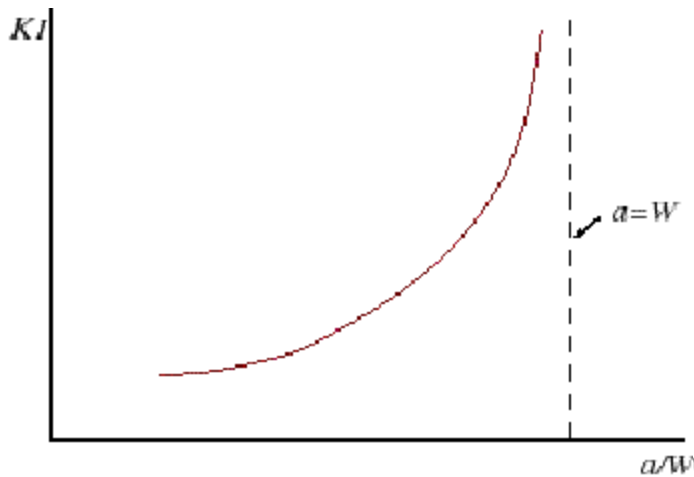


Figura 1.6. Respuesta del factor de intensidad de esfuerzos de acuerdo con la Ec. 1.6.

El comportamiento típico de los esfuerzos en la punta de una grieta obtenido de las Ec. 1.3 muestra que cuando el radio (r) se aproxima a cero, el esfuerzo (σ) tiende a infinito. Sin embargo, no hay material que resista esfuerzos infinitos y en la realidad esta condición no se presenta debido a la presencia de una zona de deformación plástica alrededor de la punta de la grieta conocida como zona de proceso, representada en la Fig. 1.7. Para el caso de los materiales termoplásticos esta zona se conoce como “*craze*”¹.

¹ Debido a que este trabajo se enfoca a estudios de fatiga en PMMA, se utilizará “*craze*” para hablar de la zona de proceso o zona plástica.

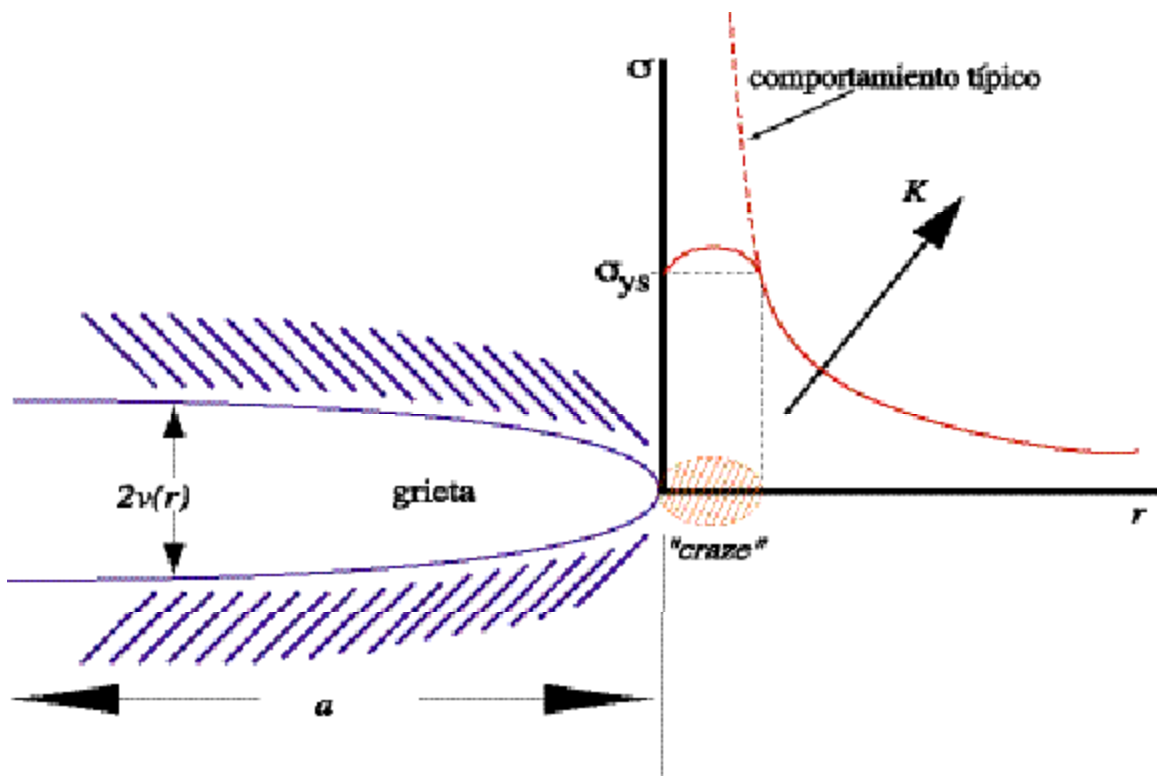


Figura 1.7. Comportamiento del esfuerzo en la punta de la grieta limitado por el esfuerzo de cedencia en el "craze".

1.1.3 Zona de deformación plástica o Craze

La formación de la zona de deformación plástica o zona de proceso se debe a la concentración de esfuerzos en la punta de la grieta. En esta región se presentan cambios de configuración del material (tales como la reorientación de cadenas o la formación de vacancias, etc., que producen cambios en el volumen local, en las propiedades mecánicas, ópticas (tal como índice de refracción), etcétera (Döll, 1990).

La formación de zonas de deformación plásticas es uno de los mecanismos de microdeformación en termoplásticos analizados por Sternstein (Hertzberg, 1980, Sección 1.5.1); en esta zona las fibras se orientan en dirección al máximo esfuerzo normal.

Además, la formación de la zona de deformación plástica se debe solamente a los

esfuerzos normales. La propagación de la grieta se produce en dirección de las trayectorias del mínimo esfuerzo principal que en este caso se da en la dirección $\mathbf{q} = 0$ cuando la carga es simétrica, rompiendo las cadenas formadas en la zona de deformación plástica o zona de proceso.

Para el análisis de las dimensiones características, longitud y ancho, de la zona de proceso existen modelos basados en la combinación del criterio de cedencia de Von Mises y los esfuerzos que se aplican y que presuponen una geometría para esta región dependiendo del tipo de material. Para metales se supone una geometría circular, cuyo radio (r_p) está definido por las Ec. 1.7.

$$r_p \approx \frac{1}{2p} \frac{K^2}{\sigma_{ys}^2},$$

$$r_p \approx \frac{1}{6p} \frac{K^2}{\sigma_{ys}^2} .$$

Ecuaciones 1.7

donde K es el factor de intensidad de esfuerzos y σ_{ys} es el esfuerzo de cedencia, para el caso de esfuerzos o deformaciones planas. Para el caso de materiales termoplásticos es más apropiado el modelo de Dugdale-Barenblatt (Hertzberg 1980 Sec. 3.8.1). Este modelo considera un agujero elíptico de longitud total $2c$ formado por una grieta de longitud $2a$ en cuyos extremos se presentan dos zonas de deformación plástica así como la presencia de esfuerzos cohesivos σ_c como lo muestra la Fig. 1.8. La geometría de dicha zona se asemeja más a una cuña como se muestra en la Fig. 1.9 y sus dimensiones, ancho $2v$ y longitud s , se obtienen por medio de las ecuaciones 1.8.

$$s = \frac{p}{8} \cdot \frac{K_I^2}{s_c^2},$$

$$2v(x_1) = \frac{2c \cdot s_c}{p \cdot E^*} \cdot \{f(f_1, f_2)\}, \quad \text{Ecuaciones 1.8}$$

$$f_1 = \arccos\left(\frac{x_1}{c}\right) \text{ y } f_2 = \arccos\left(\frac{a}{c}\right) = \frac{p}{2} \cdot \frac{s}{s_c}.$$

Estas Ecuaciones son válidas para los casos en que el esfuerzo de tensión remoto, σ , es mucho menor que el esfuerzo cohesivo σ_c ; es decir, para s pequeña.

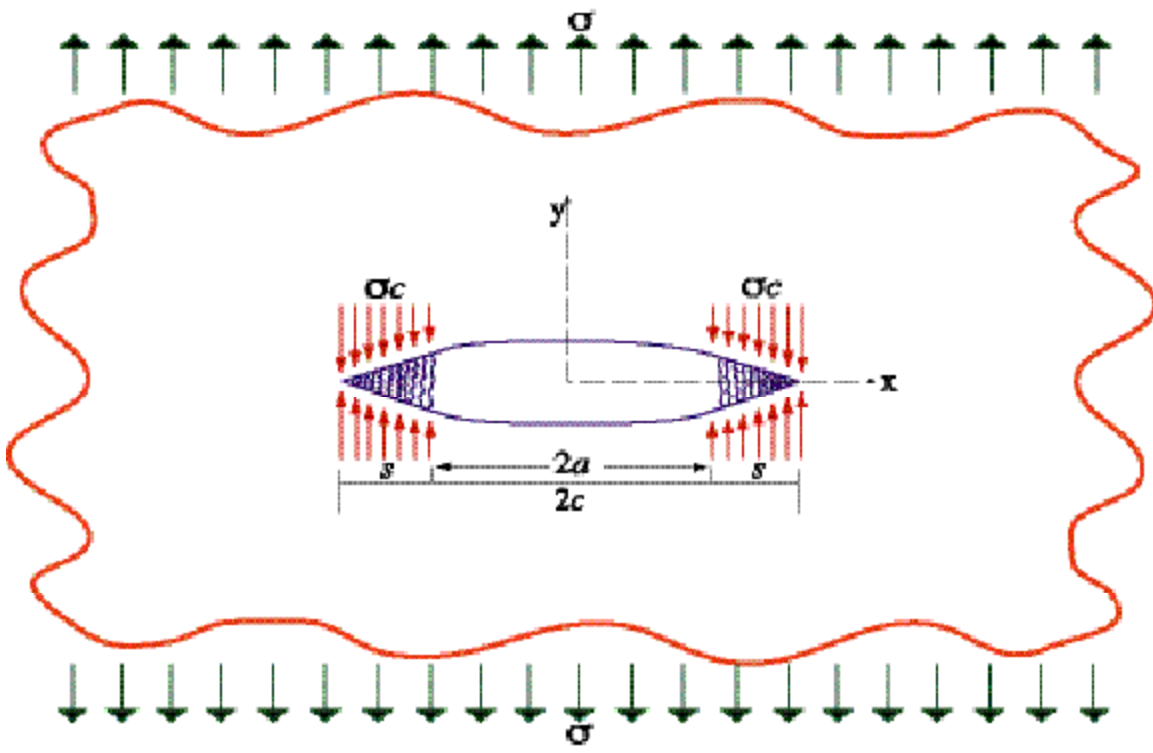


Figura 1.8. Agujero elíptico en una placa cargada en el infinito. Modelo de Dugdale-Barenblatt.

La importancia del modelo de Dugdale-Barenblatt, se debe a que la cedencia del material ocurre por los esfuerzos normales considerando una distribución homogénea de esfuerzos. Una aproximación más realista debe considerar el endurecimiento o

ablandamiento de la zona de proceso, los efectos de la temperatura, los efectos dependientes de la velocidad y principalmente una distribución no homogénea de esfuerzos. Ésta puede definirse por multisegmentos arbitrarios (Ungsuwarungsri y Knauss, 1988), distribuciones bi-lineales (Imai y Ward, 1985), multisegmentos homogéneos (G. Pulos, 1993) o por distribuciones de un orden mayor al lineal (P. Gómez, 1998).

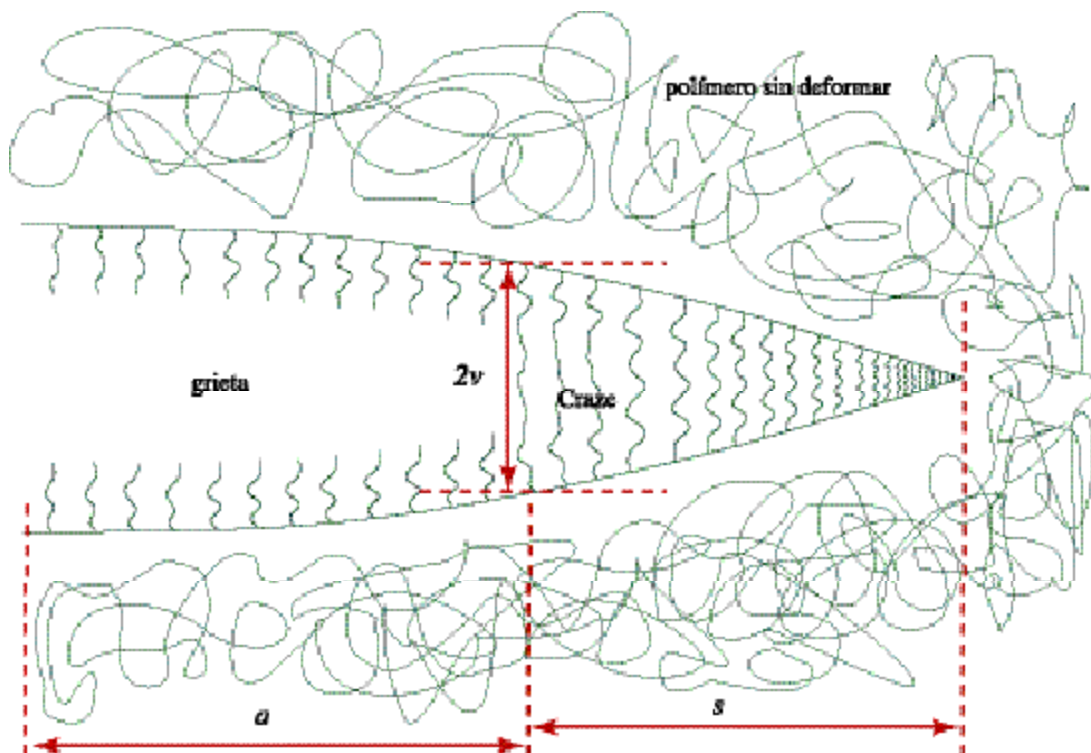


Figura 1.9. Dimensiones características de la zona de proceso.

Tanto el factor de intensidad de esfuerzos como las dimensiones de la zona de proceso pueden ser evaluadas en condiciones de carga estática y de fatiga. Debido a que la resistencia de los materiales disminuye bajo cargas cíclicas y los procesos de fatiga son, en muchas ocasiones, imperceptibles en condiciones de operación reales, es importante

considerar la respuesta de los materiales sometidos a estas situaciones de carga para el diseño de piezas de ingeniería.

1.2 Fatiga

De acuerdo con las normas de la ASTM (E1150-87), la fatiga es un proceso de cambio estructural permanente y localizado que ocurre en un material sometido bajo condiciones de esfuerzos y deformaciones fluctuantes. Estas fluctuaciones pueden ocurrir tanto en el esfuerzo o en la deformación, pudiendo variar también su frecuencia.

La Fatiga se caracteriza por producir deformaciones no lineales y junto con impacto son mecanismos de carga críticos que generan la información que se utiliza como criterio de diseño (Kallrath, 1999). También, está relacionada con la pérdida de la resistencia de un material que se lleva a cabo en diferentes estadios y diferentes escalas; como el desarrollo de cambios a nivel micro y subestructural del material; la creación, el crecimiento y la coalescencia de grietas microscópicas; la propagación estable de una grieta y finalmente la inestabilidad estructural o fractura total (Ellyn, 1997, Sección 1.3).

La variación periódica del sistema de esfuerzos está definida por 5 parámetros (Trotignon, 1994):

- a) La naturaleza de la función de carga que puede ser esencialmente de fuerza o desplazamiento y se va a identificar como el parámetro de control.
- b) La forma de la función de carga que comúnmente es una sinusoidal, pero puede ser también triangular, cuadrada o una función arbitraria, Fig. 1.10a.

c) La razón de esfuerzos o deformaciones, R , definida por el cociente de los mismos; es decir:

$$R = \frac{\mathbf{s}_{\min}}{\mathbf{s}_{\max}} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

d) La Frecuencia.

e) La naturaleza de la carga puede ser principalmente tensión, compresión, carga alternada, torsión y flexión, Fig. 1.10b.

Los valores característicos de la función de carga son el valor promedio (*Set point*), σ_m , la amplitud (*Span*), σ_a además del intervalo, $\Delta\sigma$ (Fig. 1.10c). Estos valores expresan las relaciones entre los niveles máximos y mínimos del esfuerzo aplicado y se definen por

$$\mathbf{s}_a = \frac{\mathbf{s}_{\max} - \mathbf{s}_{\min}}{2},$$
$$\mathbf{s}_m = \frac{\mathbf{s}_{\max} + \mathbf{s}_{\min}}{2}, \quad \text{Ecuaciones 1.10}$$

$$\Delta\mathbf{s} = \mathbf{s}_{\max} - \mathbf{s}_{\min}.$$

Estas relaciones se aplican a todas las variables que describen la función de carga como fuerza, desplazamiento, etcétera.

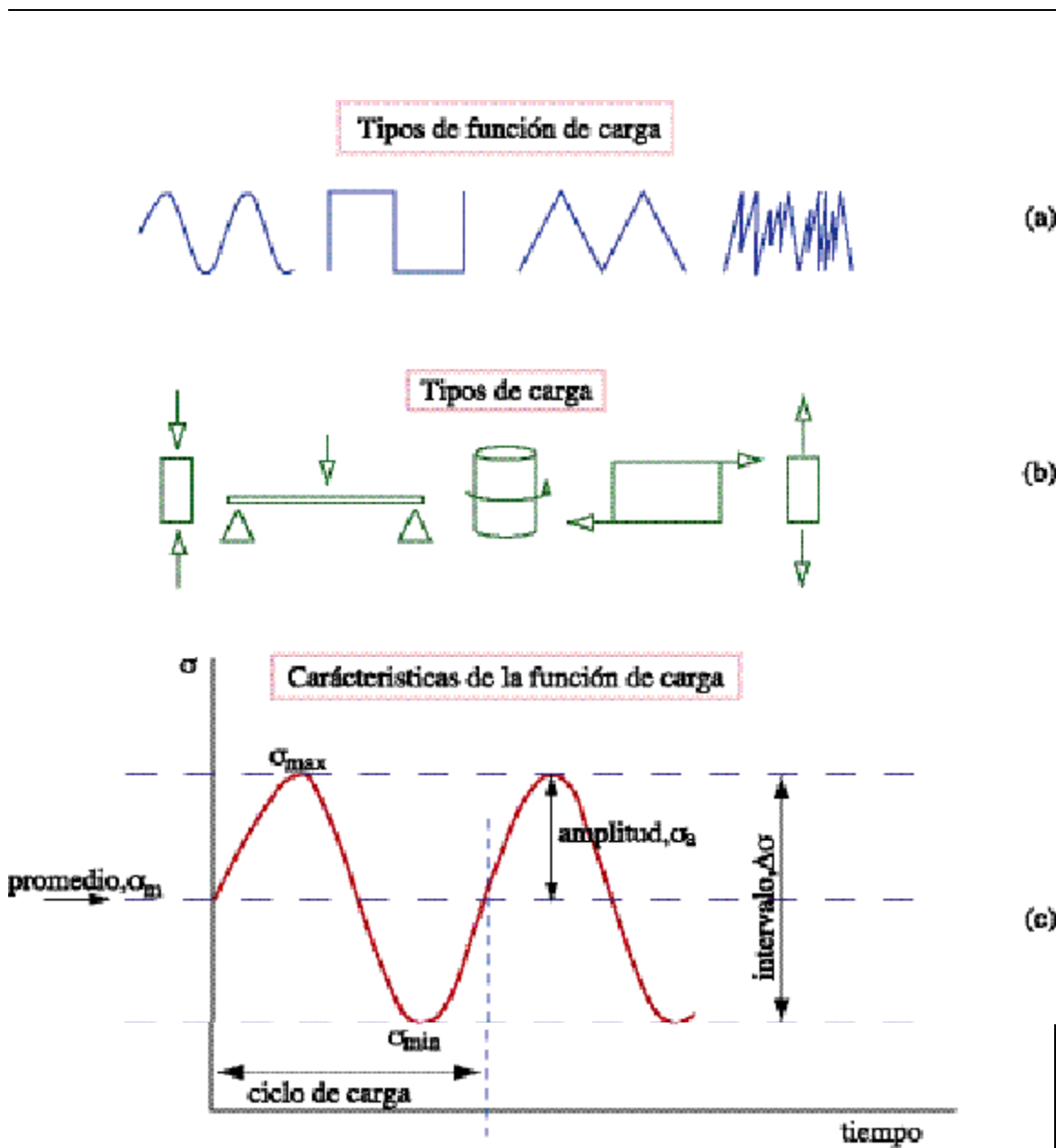


Figura 1.10. Principales características de un experimento de fatiga.

Para el Modo I de carga y de acuerdo con los valores de los límites del esfuerzo, las pruebas de fatiga se pueden llevar a cabo en compresión, tensión - compresión o sólo tensión como lo muestra la Fig. 1.11.

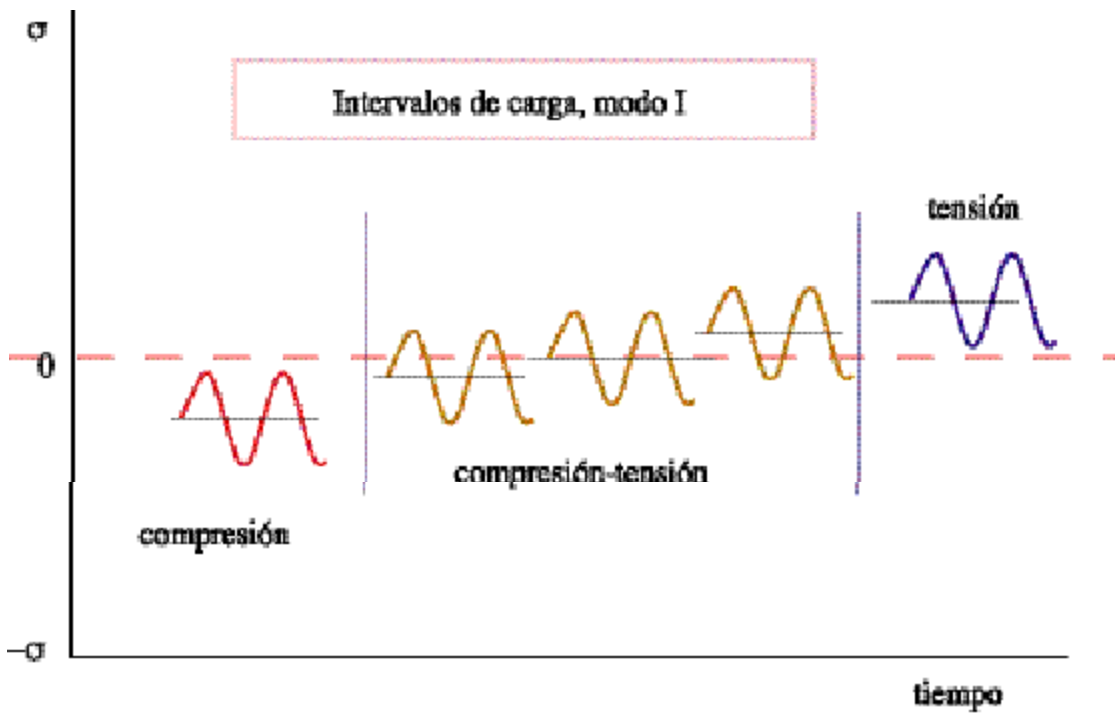


Figura 1.11. Intervalos de carga para el modo I.

Algunos de los conceptos involucrados en el diseño de piezas de ingeniería relacionados con la fatiga en materiales son la resistencia límite (*Endurance limit*) y el tiempo de vida bajo condiciones de fatiga (*Fatigue life*). Esta última indica el número de ciclos que sobrevivirá el componente sometido a determinados esfuerzos, desde la longitud inicial de la grieta hasta la longitud crítica (a_c) a la cual ocurre la fractura total súbitamente. Ésta se da para una carga dada cuando la combinación de carga y longitud de grieta hace que el factor de intensidad de esfuerzos alcance el valor crítico K_{Ic} . Cabe mencionar que el número de ciclos que se requieren para el inicio de una grieta es mucho mayor al necesario para que ésta se propague. Por esta razón se realizan estudios de fatiga que se enfocan a la propagación de una grieta sin importar la historia de carga; es decir, con una grieta inicial inducida. Otro concepto que se utiliza como criterio de diseño es la razón

que caracteriza la resistencia de un componente y está definida por la Ec. 1.11. Esta razón permite estimar las propiedades de un material bajo condiciones de fatiga a partir de una prueba de tensión.

$$razón = \frac{\text{límite de resistencia}}{\text{esfuerzo de fractura}} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

1.2.1 Importancia de la geometría de la probeta en las pruebas de fatiga.

Las diferentes etapas del proceso de fatiga se pueden estudiar por separado y con muestras de diferentes geometrías. Las probetas deben tener las dimensiones adecuadas para que generen información del material que pueda ser comparada con el comportamiento del mismo bajo las condiciones de ingeniería reales (Hertzberg, 1980, Secs. 2.3.1 y 3.2). El estudio con probetas de dimensiones grandes disminuye el error relativo en las mediciones durante los experimentos. Sin embargo, limita el uso de técnicas ópticas para el estudio de la zona de proceso y requiere de equipos con espacios de trabajo y capacidades de carga adecuados a sus dimensiones. Por otro lado, el uso de probetas pequeñas aumenta el error relativo en las mediciones² pero facilita el estudio de los fenómenos microscópicos que suceden en el material.

La influencia del factor geométrico en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos esta definida por una función diferente para cada geometría. Esta afirmación descarta la posibilidad de obtener el mismo factor de intensidad de esfuerzos para probetas de distintas geometrías bajo las mismas condiciones de carga. Esta situación es importante

² Para disminuir estos errores se requiere de máquinas con alta resolución como la construida en este trabajo.

cuando se desea mantener constante K_I para simplificar el estudio del comportamiento de una grieta.

1.2.2 Tipos de control en fatiga

A continuación se muestran las diferentes respuestas que se obtienen de la variación del estado de esfuerzos representado por K_I y del comportamiento del crecimiento de la grieta debido al parámetro de control que se elige en un experimento de fatiga. En condiciones de control “de desplazamiento”, es decir que el valor promedio y la amplitud para el desplazamiento son constantes durante todo el experimento, los esfuerzos, el valor de K_I , así como la velocidad de propagación de la grieta (da/dN) decrecen conforme se aplican ciclos de carga o aumenta la longitud de la grieta (Fig. 1.12a). En condiciones de “control de fuerza” se presenta el caso contrario; esto es, la velocidad de crecimiento de la grieta y K_I aumentan conforme aumenta la longitud de grieta, debido a que se mantiene la fuerza constante (Fig. 1.12b). Bajo estas condiciones, si el experimento continúa hasta que K_I alcanza un valor crítico, K_{Ic} , la grieta se propaga a grandes velocidades.

La evaluación del factor de intensidad de esfuerzos se puede realizar en cualquier instante del ciclo de carga. Para el análisis macroscópico del comportamiento de una grieta se utilizan los valores en los límites de la función de carga, $K_{I_{max}}$ y $K_{I_{min}}$ respectivamente, o el intervalo, ΔK_I , definido por

$$\Delta K_I = K_{I_{max}} - K_{I_{min}} . \quad \text{Ecuación 1.12}$$

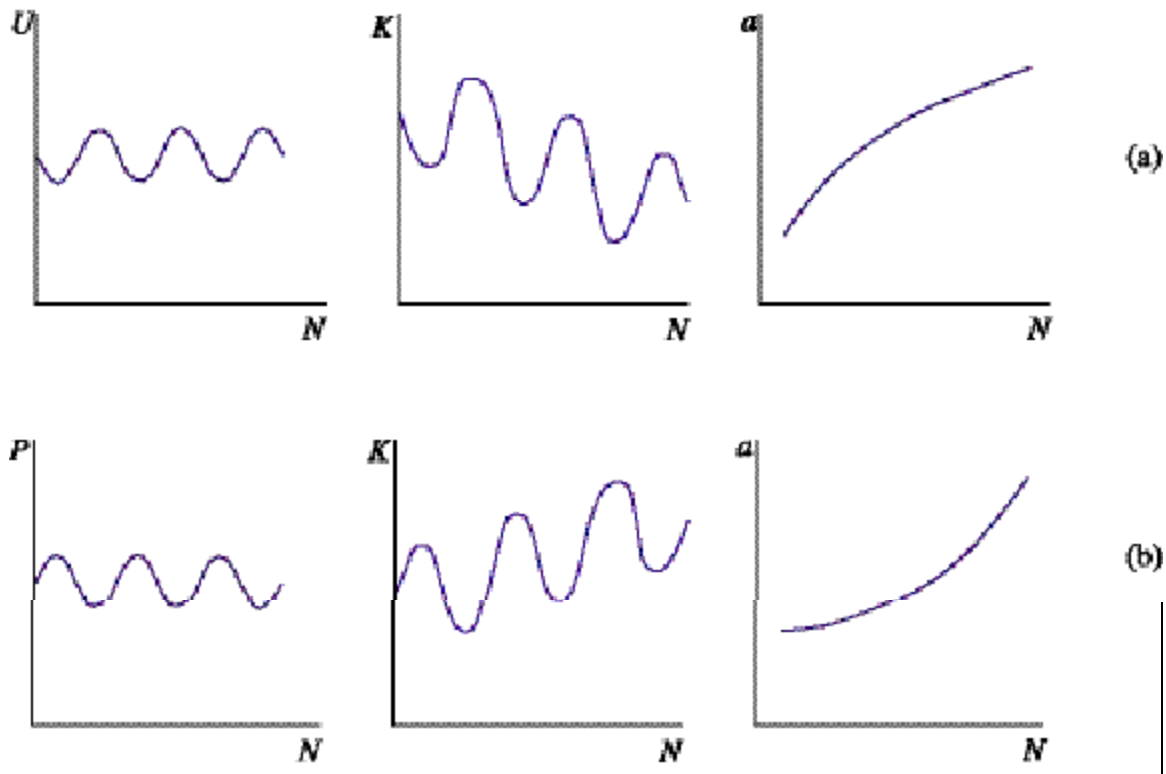


Figura 1.12. Respuestas típicas de un experimento de fatiga bajo a) control de desplazamiento y b) control de fuerza en función del Número de ciclos (N).

De estudios sobre fatiga en metales (Hertzberg, 1989 Sec. 13.1) se aceptó la influencia de ΔK_I como factor determinante en la velocidad de propagación de una grieta, además se demostró la poca influencia del esfuerzo promedio en este proceso (Ellyin, 1997, Sec. 3.4); solamente cuando se consideran los efectos de termofluencia (*creep*) el nivel del esfuerzo promedio se vuelve importante. Por estas razones se utiliza ΔK como la variable independiente para modelar la velocidad de propagación de la grieta en los diferentes tipos de materiales incluyendo a los termoplásticos (Bretz, 1981; Ramsteiner, 2000).

Algunos estudios en termoplásticos muestran que el valor del esfuerzo promedio tiene una mayor influencia en la propagación de una grieta y en algunas situaciones se ha cuestionado si debería ser $K_{I\max}$ la variable determinante. Tal es el caso de Gregory y Botsis (1991) y Lang, Manson y Hertzberg (1984). Los primeros realizaron estudios sobre el nivel de esfuerzos promedio y la propagación de grietas por fatiga en poliestireno (PS), concluyendo que los datos de fractura se relacionan mejor con el nivel máximo de esfuerzos que con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos. Lang et al. definen que las dimensiones de la zona de proceso, la cual rige la propagación de la grieta, son esencialmente independientes de la razón de carga pero dependen del máximo valor del factor de intensidad de esfuerzos.

Finalmente, tanto el valor máximo o la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos se relacionan con la velocidad de propagación de una grieta utilizando la “Ley de Paris”.

1.2.3 Ley de Paris

La relación existente entre la velocidad de propagación de una grieta (da/dN) y el factor de intensidad de esfuerzos se representa en un diagrama de $\log(K_I)$ versus $\log(da/dN)$, o gráfica de Paris (Fig. 1.13), en el cual se pueden identificar tres regiones (Hertzberg, 1980, Sec. 3.3; Parker, 1981, Sec. 7.3).

Si la carga que se aplica es lo suficientemente grande para que K_I alcance un valor crítico (K_{Ic}), propiedad del material, entonces la grieta se propaga a velocidades cercanas a la velocidad de propagación de ondas elásticas en el material (cientos de m/s para PMMA). Este comportamiento corresponde a la Región III de la gráfica Paris. Este K_{Ic} se conoce también como resistencia a la fractura (*fracture toughness*) y es una propiedad del

material que, se presume, está en función del espesor de la muestra analizada (Hahn, 1981; Broek, 1991, Sec. 4.6).

Por el contrario, si las cargas son menores, la grieta se puede propagar o no, dependiendo del material. Como los termoplásticos son materiales con propiedades viscoelásticas puede existir propagación bajo cargas estáticas menores a la crítica (Young, 1986, Sec. 5.6.6). Más aún, en todo material puede haber propagación en una grieta a cargas menores que la crítica si estas son cíclicas. En este caso, si la carga es muy pequeña la grieta se propaga a imperceptibles (10^{-7} mm/ciclo). El menor nivel de esfuerzo que se tiene en este régimen de velocidad se conoce como el umbral del factor de intensidad de esfuerzos (K_{th}) y corresponde al límite que se encuentra en la Región I de la gráfica de Paris. Al aumentar la carga, la grieta se propaga de manera estable para un intervalo de K_I entre K_{th} y K_{Ic} . En estas condiciones la velocidad de propagación se evalúa como el cambio instantáneo en la longitud de grieta ponderado por el número de ciclos de carga aplicados; de ahí su definición como da/dN . En esta región (II) el comportamiento del material cumple con la Ley de Paris expresada como

$$\frac{da}{dN} = AK_I^m, \quad \text{Ecuación 1.13}$$

donde A y m son constantes del material, las cuales se determinan experimentalmente. Es importante notar que cualquier pequeña variación en el exponente, m , produce un cambio considerable en las gráficas de Paris, lo cual está relacionado con el comportamiento macroscópico del material.

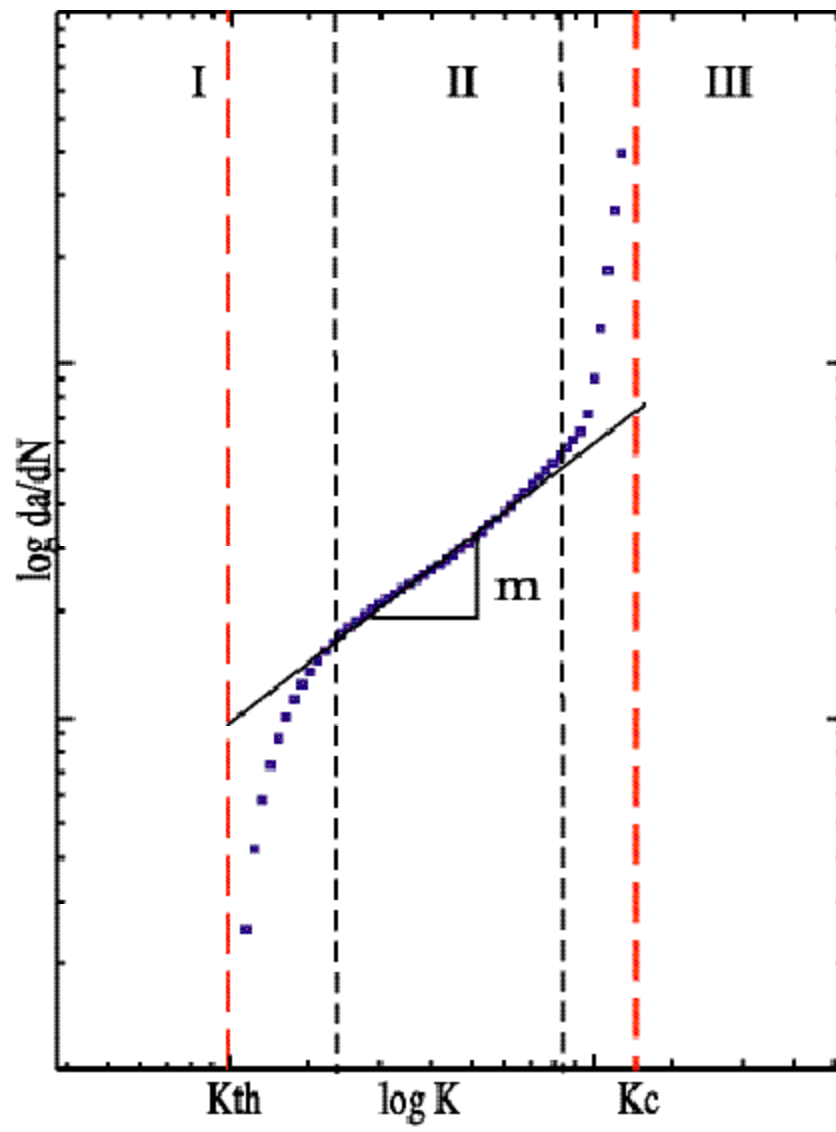


Figura 1.13. Ley de Paris.

En la caracterización del comportamiento de una grieta que se propaga bajo condiciones de fatiga se utilizan, además de la Ley de Paris, diferentes parámetros. Uno de ellos está relacionado con la pérdida de rigidez y se explica a continuación.

1.2.4 Deformabilidad

Una fuerza aplicada en un cuerpo fracturado está asociada al desplazamiento del punto de carga en dirección de la misma por la relación: *fuerza = rigidez x desplazamiento*; la forma más común de esta relación es

$$u = CP, \quad \text{Ecuación 1.14}$$

donde u es el desplazamiento, P es la fuerza y C es la deformabilidad o flexibilidad (*Compliance*) que se define como el valor inverso de la rigidez (Parker,1981; Sección 2.4). Además de considerarse constante para un cambio infinitesimal en la longitud de la grieta, para el caso de fatiga se obtiene a partir de la ecuación

$$C = \frac{u_1 - u_0}{P_1 - P_0}, \quad \text{Ecuación 1.15}$$

en la cual los subíndices 1 y 0 corresponden a los valores máximo y mínimo de cada parámetro en un ciclo aplicado. Bajo estas condiciones se genera información acerca del comportamiento del material así como de los cambios en los parámetros de la función de carga durante un experimento de fatiga.

En general, la deformabilidad es una función de la geometría de la probeta y la longitud de la grieta normalizada. Por esta razón, se han derivado relaciones analíticas, para probetas con diferentes geometrías estándar (ASTM 647-99, Apéndice A2), a partir de las cuales es posible calcular la longitud de la grieta en determinado ciclo cuando no se tenga la posibilidad de medirla durante un experimento de fatiga.

Debido a que en este trabajo se trabaja con termoplásticos, se mencionan a continuación algunos de los conceptos generales sobre polímeros así como el estudio de algunos fenómenos que se presentan en la fractura de termoplásticos.

1.3 Polímeros

Los polímeros consisten en largas cadenas formadas por la repetición de una unidad química llamada monómero, unidas entre sí por enlaces covalentes. La estructura, la longitud (o grado de polimerización) y el tipo de estas cadenas influyen en las propiedades químicas, físicas y mecánicas del polímero. Dos ejemplos de propiedades son la temperatura de transición vítrea o de reblandecimiento (T_g) y la rigidez.

Los polímeros se clasifican en termoplásticos o plásticos, elastómeros o hules y termofijos. Los termoplásticos están formados por cadenas simples (lineales o ramificadas). Estos polímeros se reblandecen y se moldean con un aumento de temperatura y tienen un comportamiento viscoelástico. Además se subdividen en polímeros cristalinos, los que tienden a cristalizar, y polímeros vítreos o amorfos. Algunos de los ejemplos de polímeros termoplásticos son el policarbonato o PC, el poli(cloruro de vinilo) o PVC, el poliestireno o PS, el polietileno o PE, el poli(metil metacrilato) o PMMA, y el poli(etilen tereftalato) o PET.

Los elastómeros o hules están comúnmente formados por cadenas con un bajo grado de entrecruzamiento; es decir, forman redes por enlaces químicos. Esta conformación evita que las moléculas del polímero fluyan, ya sea por esfuerzo o por aumento de temperatura.

Por esta razón los elastómeros soportan grandes deformaciones y recuperan su forma de manera elástica.

Los termofijos son polímeros con un alto grado de entrecruzamiento, formando estructuras reticuladas incluso en tres dimensiones. Esta característica los convierte en materiales que no pueden fundirse o moldearse en forma repetida; por lo anterior son muy rígidos y fuertes (Young, 1986, Sec. 1.3).

Los termoplásticos son el tipo de polímeros más utilizados sobre todo para formar materiales compuestos. Su comportamiento mecánico tiene una dependencia del tiempo por lo cual se dice que tienen un comportamiento viscoelástico. En pruebas de carga estática o dinámica, estos polímeros forman zonas de proceso con una geometría muy definida, lo que facilita su estudio en base a los conceptos de mecánica de fractura presentados en la Sección 1.1. Dentro de las pruebas dinámicas se tienen las pruebas de fatiga, que se realizan a “grandes amplitudes de vibración” y el análisis dinámico-mecánico (DMA), que se realiza a pequeñas amplitudes de vibración (Young, 1986, Sec. 5.2).

Los polímeros y sus materiales compuestos presentan para su aplicación en piezas de ingeniería ventajas tales como la baja densidad, la resistencia a la corrosión, la facilidad de fabricación y maquinado, su alta resistencia eléctrica y su estabilidad química.

La respuesta de los termoplásticos a las pruebas de fatiga se ve influenciada por muchos factores como la frecuencia, la razón de carga R , la temperatura, la humedad, la velocidad de deformación, los cambios de conformación, el desenmarañamiento de cadenas (*disentanglement*), la termofluencia (*creep*), rompimiento de enlaces y principalmente la

formación de zonas de proceso (*crazes*). Dependiendo del polímero que se trate, estos factores tienen una mayor o menor influencia en su respuesta mecánica.

1.3.1 Sensibilidad a la frecuencia

Los termoplásticos como el PMMA, PS y PE forman zonas de proceso con gran facilidad además de presentar una mayor sensibilidad a la frecuencia. En estos casos la velocidad de propagación de la grieta disminuye conforme aumenta la frecuencia, posiblemente por una variación en el módulo y el campo de esfuerzos. Para PMMA se han observado aumentos alrededor de un 8% por década (G. Pulos, 1998-I) en el valor del módulo relativo. Los estudios de Hertzberg (1979) muestran una tendencia similar, mientras que el análisis de Döll et al. (1983) muestra un incremento del 6% por década. Este cambio en el módulo elástico, puede cuantificarse como un aumento en la deformabilidad del material conforme avanza la grieta. Por otro lado en el PC y algunos polímeros cristalinos no se presenta tal sensibilidad.

En algunos termoplásticos como el PS, la velocidad de propagación total de la grieta depende de su crecimiento por ciclo de carga aplicado (da/dN) y por termofluencia (*creep*) (da/dt). La contribución de cada uno de estos factores es difícil de determinar; en algunos casos se utilizan diferentes tipos de función de carga y diferentes niveles de ΔK_I para identificar cual de ellos tiene mayor importancia (Skibo, 1976; Gregory, 1991).

Ramsteiner (2001) observó que, la velocidad de propagación de grietas en PMMA con una $\Delta K=0.6\text{MPavm}$ constante es ligeramente mayor en pruebas realizadas a 1 Hz que en pruebas realizadas a 10 Hz. Si además, estos experimentos se llevan a cabo a una frecuencia y temperatura cercana a la cual los procesos de relajación son fácilmente

observables las diferencias en la velocidad de propagación son mayores. Por otro lado, al estudiar el comportamiento del hule modificado con polipropileno (PP), Ramstainer detectó que los cambios en la frecuencia producen diferentes tipos de transiciones, de liso a rugoso, en la topografía de la superficie fracturada de PMMA. A 1Hz la transición es gradual o suave, a 10 Hz la transición es más marcada posiblemente porque la deformación plástica es más rápida y no hay tiempo para que las cadenas del polímero se reacomoden. Por otro lado, para Poli(butilen tereftalato), Morelli y Takemori (1984) observaron que las transiciones en la topografía de la superficie fracturada son más marcadas conforme aumenta la frecuencia.

1.3.2 Modos de propagación:

En termoplásticos, a temperaturas menores a la temperatura de transición vítrea (t_g), la propagación de una grieta siempre va precedida por la formación de una zona de proceso o *craze* (Hertzberg 1981, Secc. 1.5.5). La formación de uno o varios *crazes* en la punta de la grieta debido a las diferentes condiciones de carga afecta el comportamiento macroscópico del material, en especial la velocidad de propagación de la grieta y la topografía de la superficie generada por la fractura. Por esta razón, se identifican diferentes modos de propagación de grietas como son: la propagación discontinua, la formación de bandas, la formación de estrías y las transiciones de rugosidad de la topografía de la superficie generada, además de producirse diferencias en el perfil de la grieta que se propaga. Estas observaciones se han llevado a cabo en PS por Skibo et al. (1976), en polietileno de baja densidad por Bretz et al. (1981) y en PMMA por G. Pulos (1993).

1.3.2.A Formación de bandas y propagación discontinua

La formación de bandas perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta en la superficie generada por la fractura, tiene dos posibles explicaciones entre otras (Döll, 1990; Skibo, 1976). La primera corresponde a un crecimiento normal o continuo de la grieta es decir, en cada ciclo de carga, la segunda propone la formación de bandas por un crecimiento retardado o discontinuo. El primer caso se presenta frecuentemente en materiales como el PMMA y PC y el segundo en PS-PU y PVC, sin excluir el caso inverso, sobre todo cuando se habla de materiales de diferente peso molecular.

La bandas generadas en cada ciclo de carga aplicado se forman por la existencia de un equilibrio entre la velocidad de crecimiento de la grieta y la velocidad de crecimiento del *craze*, de tal forma que ambos están regidos por el mismo proceso molecular. Otra razón consiste en que la propagación de la grieta se lleva a cabo cuando las fibras del material están totalmente elongadas cerca del nivel máximo de la fuerza durante cada ciclo de carga.

Durante la propagación discontinua de una grieta, la formación de bandas depende del peso molecular del polímero y de las condiciones de carga (Döll, 1990; Hertzberg, 1981 Sec. 4.2.3). En este caso, el *craze* aumenta su longitud durante los ciclos de carga hasta alcanzar una longitud crítica; sólo en ese momento, la grieta se propaga.

Un estudio sobre la generación de bandas en una superficie fracturada de PS con una topografía muy suave muestra que estas bandas se producen por efecto de varios ciclos de carga (Skibo, 1976). Así mismo, la presencia de vacancias dentro de estas bandas sugiere

una disminución en la velocidad de avance de la grieta, es decir una propagación discontinua.

Otro tipo de propagación discontinua se presenta en algunos termoplásticos como el polietileno de baja densidad (*LDPE*) (Andrews y Walker, 1971). En un diagrama de Paris se observa que a una frecuencia de 10Hz, da/dN tiene un valor de 10^{-3} mm/ciclo, el cual disminuye mientras aumenta ΔK de 0.4 a 0.6 MPavm; a partir de este nivel de ΔK , da/dN aumenta como es esperado. Este comportamiento está relacionado con un cambio en la topografía de la superficie fracturada (Bretz, 1981). Por debajo de $\Delta K=0.6$ MPavm, la superficie presenta rugosidades muy pequeñas y regulares; éstas aumentan su tamaño y forma conforme ΔK es mayor a 0.6MPavm. Este comportamiento no se presenta en PE de alta densidad.

1.3.2.B Transiciones entre superficies fracturadas lisas y rugosas

Las superficies que se denominan suaves o tipo espejo, son áreas translúcidas a la luz visible; las superficies rugosas generalmente son opacas. En los termoplásticos se presentan ambos tipos de superficie, además de transiciones entre ellas, dependiendo de las condiciones de carga. Algunos estudios relacionan la formación de superficies lisas y rugosas con la formación de una o varias zonas de deformación plástica respectivamente. En este último caso, la punta de la grieta avanza pasando de una zona de proceso a otra. El mecanismo de formación de varios *crazes* es incierto (Bokoi, 1997) posibles explicaciones son la presencia de imperfecciones y ralladuras en la superficie que actúen como sitios de iniciación de estas o la presencia de esfuerzos residuales en la superficie

de la muestra. Otros estudios establecen que este tipo de transiciones son sensibles a \sqrt{K} y a la frecuencia (Skibo, 1976; Hertzberg 1980, Sección. 3.4).

Una manera sencilla de identificar si una superficie es lisa o rugosa fue identificada por Skibo, Hertzberg y Manson (1976). Al observar el perfil de una grieta en PS se observa una diferencia muy definida en el espesor entre la zona lisa y la rugosa por la supuesta propagación a través de uno y varios *crazes* respectivamente. Por otro lado, Skibo et al. observaron que a altas frecuencias (100 Hz) la transición de la topografía de la superficie es repentina cuando $\sqrt{K}=0.53\text{MPavm}$ mientras que a bajas frecuencias (10 y 1 Hz) la transición es gradual a lo largo de un intervalo de \sqrt{K} de 0.20 a 0.42MPavm.

Estas transiciones influyen sobre la velocidad de propagación de la grieta provocando un cambio en la pendiente de la curva de Paris (\sqrt{K} vs da/dN) (Skibo, 1976). Una posible explicación de este comportamiento se debe a que el crecimiento de múltiples *crazes* en la punta de la grieta requiere de más energía que el crecimiento de uno sólo, por consiguiente se tiene una menor cantidad de energía para dirigir el crecimiento de la grieta.

Por otro lado, al suponer que la velocidad promedio de crecimiento de una grieta en PMMA es constante, la desviación de los datos experimentales se relaciona con la transición de rugosidad de la superficie fracturada (G. Pulos, 1993). Para experimentos de factor de intensidad de esfuerzos variable, dicha desviación se encuentra en un intervalo de $\pm 10 \mu\text{m}$ cuando las superficies son suaves o lisas y en un intervalo de $\pm 20 \mu\text{m}$ cuando se tienen superficies rugosas.

1.3.3 Influencia del peso molecular y la temperatura

Debido a los procesos de fabricación de los polímeros, estos tienen siempre una distribución de pesos moleculares y dependiendo del promedio de esta distribución, se define si el polímero es de alto o bajo peso molecular, (HMW o LMW por sus siglas en inglés). El ancho de la zona de proceso, $2v$ (Fig. 9), se ve influenciado por el peso molecular. Si se tienen cadenas más largas, es decir que se tiene un alto peso molecular, las secciones en la zona de proceso que se estiran son mayores y en consecuencia existe una mayor resistencia a la propagación de una grieta (Döll, 1990). En contraparte, bajas resistencias a las fracturas están relacionados con bajos pesos moleculares de los polímeros. Tal es el caso del PC y el PMMA cuyas zonas de proceso tienen un menor ancho ($2v$) cuando se habla de bajos pesos moleculares.

La presencia de un aumento en la temperatura produce también cambios en las dimensiones de la zona de proceso. Marshall et al. (1974) observaron para PMMA que, en un diagrama de Paris, las curvas de velocidades de propagación se desplazan a un menor valor de K_I además de disminuir también el valor de K_{Ic} en un intervalo de temperatura de -60 a $+80$ C.

Una transición de bajas velocidades de propagación de grietas (0.1m/s) a altas velocidades (10^2m/s) se lleva a cabo acompañado de un cambio de la morfología de la superficie (Döll, 1990). Para el PMMA, esta situación se presenta cerca de K_{Ic} . Williams explica esta transición en velocidades como resultado de un reblandecimiento del material por un aumento de la temperatura, lo cual provoca la disminución de la

resistencia del material; bajo estas condiciones, la energía sobrante se invierte en acelerar el crecimiento de la grieta.

Otro factor que es interesante mencionar, es la influencia de ambientes de humedad controlada. Para PMMA se observa un aumento en las pendientes de la curva de Paris a partir de un 50% de humedad relativa (Bokoi 1997).

1.3.4 El Poli (metil metacrilato), PMMA

El PMMA o acrílico es un termoplástico amorfo ópticamente translúcido que ofrece una alta relación entre resistencia y peso molecular. Algunos de los nombre comerciales con los que se conoce son Plexiglass®, Lucite® y Acrilite®. Puede ser fácilmente moldeado sin perder claridad óptica. Sus propiedades mecánicas no se ven seriamente afectadas por la exposición prolongada a la humedad, además la mayoría de los acrílicos comerciales son estabilizados con luz UV para disminuir su degradación por efectos de la luz solar. Los acrílicos son químicamente estables ante la presencia de detergentes, ácidos inorgánicos diluídos, hidrocarburos alifáticos (de cadenas lineales); sin embargo, no son recomendados para almacenar hidrocarburos aromáticos como la acetona.

El PMMA se puede maquinar y pulir fácilmente así como termoformar a bajas temperaturas. La formación de uniones entre piezas utilizando solventes, garantiza una gran resistencia de las mismas

El PMMA es un material adecuado para múltiples aplicaciones como la fabricación de accesorios fijos como pantallas para tragaluces, ventanas; contenedores transparentes, lentes, accesorios para luces, muebles e incluso esculturas. Algunas de sus propiedades mecánicas se listan en la siguiente tabla.

Propiedades	PMMA
Color	Ópticamente incoloro
Densidad	1.18 g/cm ³
Absorción de agua en 24 h	0.3%
Esfuerzo máximo de tensión	55 a 98 MPa
Módulo de tensión	2.4 GPa a 3.4 GPa
Resistencia a la fractura (o factor de intensidad de esfuerzos crítico, K_c)	1.3 MPavm
Esfuerzo máximo de compresión	98 a 131 GPa
Coefficiente de expansión térmica lineal	5-9 x10 ⁻⁵ in/in/°F
Conductividad térmica	1.2x10 ⁻⁴ cal/cms°C
Constante dieléctrica a 60 Hz	4.0

Tabla 1.1. Propiedades del PMMA.

2 Descripción del equipo y desarrollo experimental

2.1 *¿Por qué construir una máquina en miniatura?*

En la caracterización del comportamiento mecánico de los polímeros es importante entender la relación que existe entre el desempeño de los mismos y su microestructura. Por lo cual es importante el análisis detallado de los fenómenos relacionados con la pérdida de resistencia del material como la formación y crecimiento de grietas. Debido a que, en termoplásticos, la creación de zonas de deformación plástica en la punta de una grieta es el mecanismo dominante en la propagación de las mismas, el análisis detallado de la propagación de una grieta se debe hacer en una escala similar a la que se utiliza para la observación de los procesos microscópicos. En el caso de PMMA, la zona de deformación plástica puede tener una longitud entre 10 y 50 μm , lo cual crea la necesidad de contar con equipos capaces de medir los parámetros propios de una prueba de fatiga con gran resolución.

Además, convencionalmente se utiliza el diagrama de Paris para caracterizar el comportamiento de los materiales utilizando la relación entre la velocidad de propagación de una grieta y el factor de intensidad de esfuerzos. El principal problema que se presenta experimentalmente es la obtención de medidas de la longitud de la grieta (a), desde el inicio hasta el final del experimento, con suficiente precisión de manera que se no alteren los resultados en el diagrama de Paris; cabe recordar que K_I está directamente relacionado con la longitud relativa de la grieta (a/W). En algunos estudios se obtiene el valor de a

como una función del cambio en la deformabilidad (*compliance*) en probetas de dimensiones estándar de PMMA (Ramsteiner, 2001; ASTM E647, A2).

En los termoplásticos las fuerzas que producen la propagación de una grieta son pequeñas comparadas con las fuerzas necesarias para propagar una grieta en metales. Por esta razón la manipulación de la probeta, en el momento que se monta en un equipo de pruebas mecánicas, generalmente produce un cambio en el sistema de esfuerzos y éste puede modificar la longitud inicial de la grieta lo suficiente para alterar los resultados, ya que el valor inicial de la deformabilidad no corresponde a la longitud de grieta que se tomó como referencia (Kallrath, 1999).

Recientemente se han desarrollado máquinas comerciales con bajas capacidades de carga¹, lo cual aumenta la resolución de las mediciones. Sin embargo, aunque se pueden obtener mediciones de gran precisión no cuentan con sistemas ópticos que puedan evaluar en tiempo real el cambio en la longitud de la grieta que se propaga durante un experimento de fatiga.

Por las razones anteriores en este trabajo se ha diseñado y construido una máquina servohidráulica que opera a bajos niveles de fuerza y es físicamente pequeña lo que permite acoplarla a un sistema óptico. De esta manera la información sobre esfuerzos, desplazamientos y longitud de grieta adquirida durante el experimento es muy precisa,

¹ Modelos Mini-bionix II de la compañía MTS, comercializados en los últimos 3 años aproximadamente, con capacidades de carga máximas de 500N para la más pequeña.

además de facilitar la observación de los fenómenos microscópicos en la punta de la grieta en tiempo real utilizando, por ejemplo, métodos interferométricos.

2.2 El Equipo

Una máquina servohidráulica de carga en miniatura² con desplazamiento simétrico fue desarrollada por G. Pulos (1993). El mecanismo de desplazamiento simétrico mantiene localizada a la grieta en una misma región del campo visual durante la deformación facilitando así la observación del corrimiento de la punta y de la zona de proceso de manera independiente al momento del ciclo en el que se efectúa la medición.

El mecanismo de desplazamiento simétrico de esta máquina está compuesto por dos cilindros hidráulicos conectados a un transformador de desplazamiento con el cual se efectúa el control. El funcionamiento de estos cilindros se lleva a cabo por una sola servoválvula. La capacidad del marco de carga es de 1100 N y del desplazamiento es ± 1.3 mm; ambos sensores pueden cambiarse para tener una mayor capacidad. Esta máquina tiene acoplados dos sistemas ópticos, cada uno cuenta con una cámara de video (CCD) que adquieren imágenes con una precisión de $2\mu\text{m}$; el primer sistema óptico se utiliza para el seguimiento de la punta de la grieta y el segundo, para el análisis de la zona de proceso por medio de técnicas interferométricas.

Con este antecedente, en este trabajo se desarrolló una nueva versión de la máquina servohidráulica en miniatura, la cual se muestra con todos sus elementos en la Fig. 2.1.

² Se refiere a ella en miniatura por los niveles de carga que maneja y el tamaño físico del marco de carga.

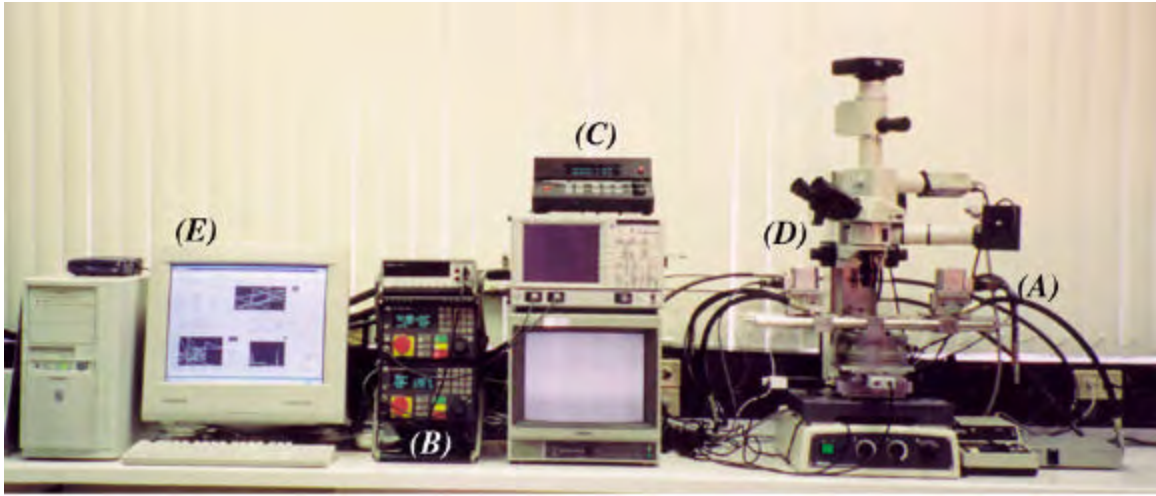


Figura 2.1. Los elementos del equipo son: A) la máquina servohidráulica en miniatura, B) los controladores 407, C) el controlador PMC200 y sus motores, D) el sistema óptico y de adquisición de imágenes y E) la computadora.

El equipo completo consta del marco de carga que incluye dos módulos servohidráulicos en un arreglo simétrico. Para operar cada módulo servohidráulico se requiere de un controlador 407 de MTS; estos a su vez están en constante comunicación con la computadora que efectúa el control. El posicionamiento de la máquina dentro del área de trabajo del sistema óptico se realiza manualmente con el controlador PMC 200. Este controlador está en comunicación con la computadora exclusivamente para la lectura de datos. La observación de la posición de la punta de la grieta se lleva a cabo en el monitor conectado al sistema óptico y la adquisición de imágenes se lleva a cabo con una segunda computadora.

La máquina servohidráulica en miniatura tiene una capacidad de carga de 445 N y un desplazamiento de ± 1.25 mm en cada módulo. El sistema de posicionamiento sobre el cual está soportada la máquina puede desplazarla en un área de 50×50 mm² sobre el plano perpendicular al eje del sistema óptico. Con esta configuración, se busca aumentar

la resolución en los dispositivos de medición de fuerza y desplazamiento, además de solucionar el problema relacionado con la medición de la longitud de grieta en tiempo real que presentan las máquinas comerciales. El diagrama de la Fig. 2.2 muestra como estos elementos están relacionados entre sí.

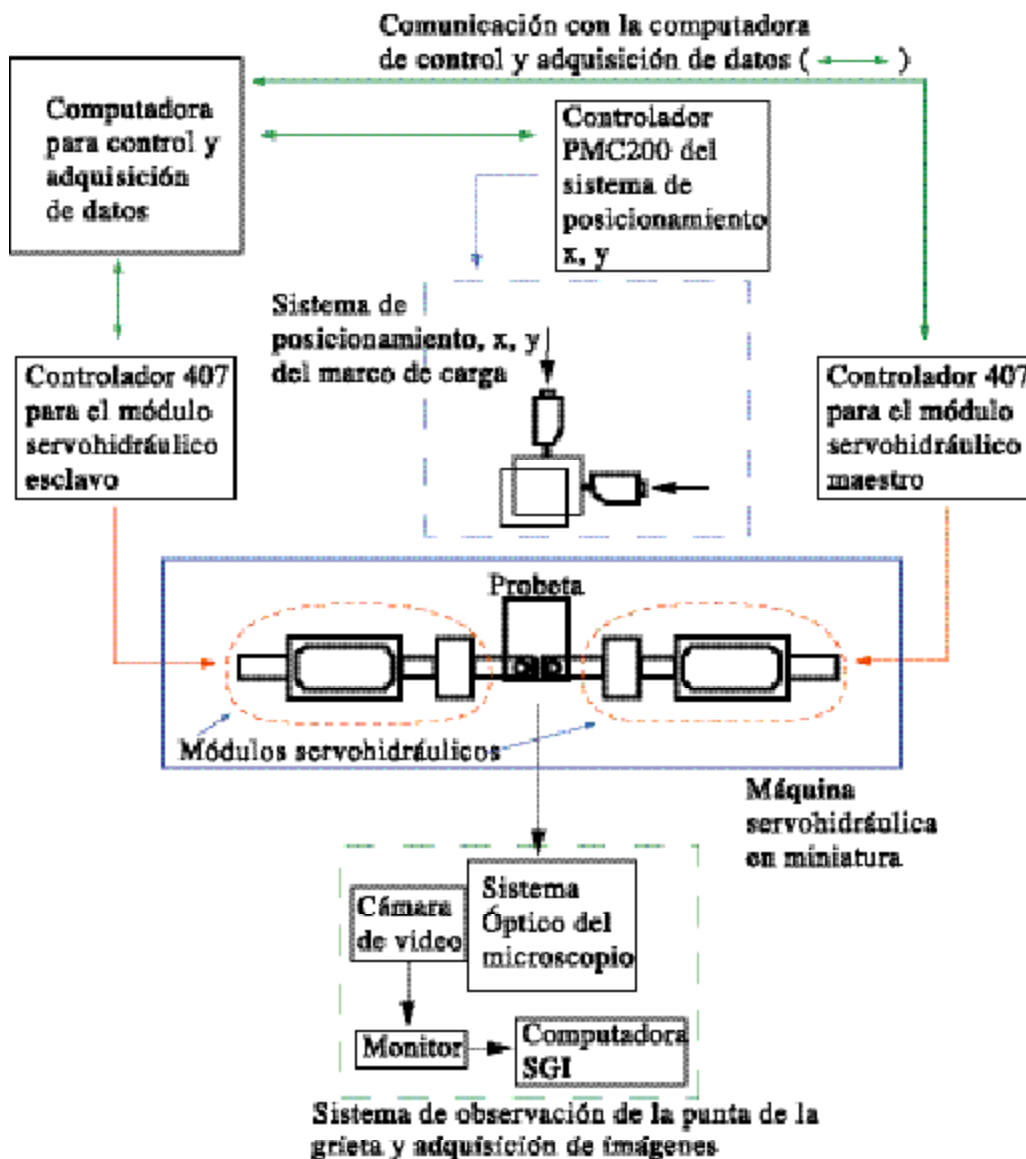


Figura 2.2. Diagrama de los elementos que conforman el equipo para el experimento de fatiga.

2.2.1 Módulo servohidráulico

Cada módulo está constituido por un lazo de componentes hidráulicos y electrónicos que actúan como parte de un mecanismo de control de lazo cerrado. Éste consta de una servoválvula, un múltiple o interfaz entre la servoválvula y el actuador, un cilindro hidráulico o actuador, un transformador de desplazamiento (LVDT por sus siglas en inglés) y un transformador de fuerza o celda de carga. Uno de los módulos se muestra en la Fig. 2.3.

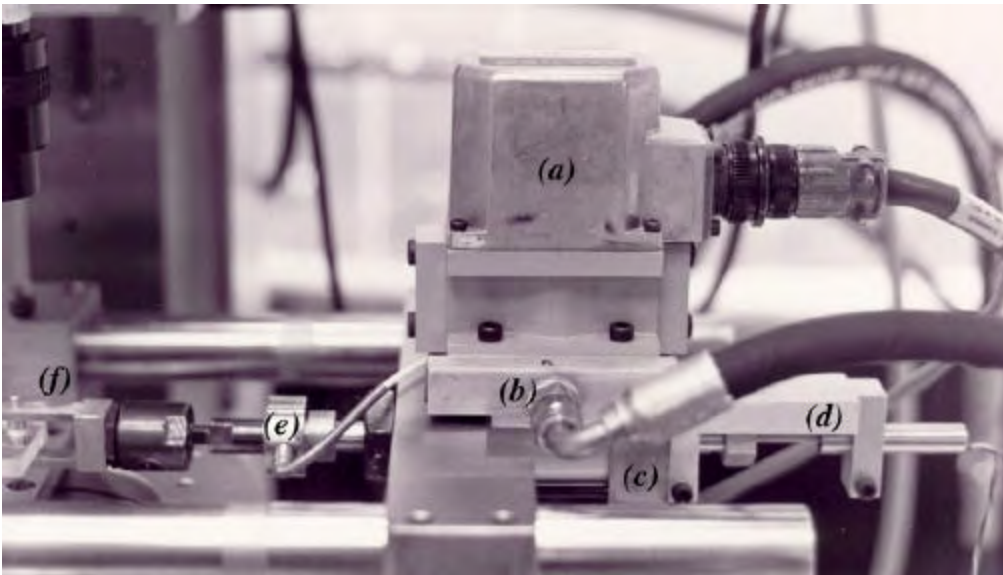


Figura 2.3. Elementos de un módulo servohidráulico. a) Servoválvula, b) Múltiple, c) Actuador, d) LVDT, e) Celda de carga, f) Mordaza.

Tanto la servoválvula, como el LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) y la celda de carga (*Load Cell*), traducen una corriente o voltaje a una señal proporcional de flujo, movimiento o fuerza aplicada, según corresponda a cada caso. Para que las mediciones sean correctas, la celda de carga y el LVDT deben calibrarse conectados en el controlador 407.

2.2.1.A La Servoválvula

La Servoválvula que se utiliza es de la marca MOOG modelo 61-601C; la presión de operación es de 1000 psi y la corriente de alimentación es de 50mA. Cabe hacer notar que se alambraron las bobinas de la servoválvula en serie para que la corriente máxima fuera la misma que en el sistema comercial y de esta manera evitar ajustar (a través de una resistencia) este parámetro en el controlador 407. Está válvula es de una etapa y su velocidad de respuesta es mayor que en válvulas de dos etapas. Cada etapa en una servoválvula puede considerarse como un amplificador en donde la primera etapa traduce una corriente a un flujo y los subsecuentes etapas amplifican el flujo inicial. La válvula 61-601C tiene una constante de amplificación de $0.25\text{cm}^3/\text{s}/\text{mA}$.

La ventaja principal de una válvula de una etapa es la rapidez de su respuesta; la cual se representa a través de la frecuencia la que existe un desfase de 90° entre la corriente de entrada y el flujo de salida. Para la servoválvula 61-601C la frecuencia es de 400 Hz mientras que para la mayoría de las servoválvulas de dos o tres etapas la frecuencia varía entre 30 y 90 Hz. La desventaja de las válvulas de una etapa es que el flujo útil que va al cilindro es tan sólo el 25 al 50% del flujo total de la válvula mientras que en las otras válvulas puede alcanzar el 99%. Para el caso de la válvula 61-601C el flujo útil es de $12\text{ cm}^3/\text{s}$ mientras que se requiere de $44\text{cm}^3/\text{s}$ para su operación.

El desempeño de una servoválvula se aprecia de la resolución en los desplazamientos. Para cualquier módulo servohidráulico hay un límite en el cociente de la resolución y la velocidad de carga; a mayor velocidad de carga mayor es la incertidumbre de la posición.

De acuerdo con el boletín técnico número 26 de la compañía MOOG (Neal,1974), tal incertidumbre puede ser calculada de la Ec. 2.1.

$$x_i = \frac{Q/A}{10pw} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde x_I es la incertidumbre, Q/A es la velocidad del sistema y ω es la frecuencia de respuesta de la servoválvula. Para una válvula con flujo nominal de 0.19 GPM (12.0 cm³/s) que trabaja con un cilindro de diámetro interno de 1 in (2.54 cm) con un pistón de 3/8 in (0.95 cm) de diámetro, que corresponde a un área efectiva de 4.35 cm² se espera una velocidad máxima de 27.5 mm/s. Como se mostrará más adelante, para este módulo servohidráulico se logró obtener una resolución de 1 micra con velocidades de 27.6mm/s.

La función de la servoválvula es traducir la corriente a un movimiento físico que va a transmitir al actuador al regular el fluido hidráulico (aceite Mobil DTE 25, ISO VG 46).

2.2.1.B El múltiple y el cilindro hidráulico

La interfaz entre la servoválvula y el actuador o cilindro hidráulico es el múltiple que tiene las conexiones de alimentación y retorno del fluido hidráulico. El múltiple se diseñó de tal forma que la distancia entre la servoválvula y el cilindro fuera la mínima.

El cilindro hidráulico o actuador tiene un pistón de diámetro 9.5mm con un desplazamiento total de 12.2mm. El área efectiva interna es de 4.35cm². De acuerdo con la geometría de la máquina, el actuador está unido en el extremo exterior al transformador de desplazamiento (*LVDT*) y en su extremo interior, está unido a la celda de carga (*LC*).

2.2.1.C Transformadores de desplazamiento

Los transformadores de desplazamiento o LVDT son un conjunto de dos bobinas secundarias y una primaria. El voltaje alterno de la bobina primaria se acopla a las bobinas secundarias por medio del núcleo; la señal generada por estas últimas es proporcional a la posición del núcleo. Por su configuración el intervalo de medición varía de negativo a positivo, suponiendo que el cero se encuentra en la mitad del desplazamiento total del núcleo dentro de la coraza. La fase del LVDT indica la dirección y éste requiere de un acondicionador de corriente alterna para el procesamiento de la señal que genera. Todos los LVDT que se utilizan son de la marca Lucas Shaevitz de la serie MHR. Una de las cualidades de esta serie es que los modelos tienen una alta precisión a pesar de estar contruidos en miniatura y una resolución infinita; es decir que su resolución está limitada por el instrumento con el cual se adquiere la lectura; el controlador 407 tiene una resolución de 0.03052 mV. El diámetro exterior de todos los LVDT es de 9.5mm, característica que permite cambiar de un LVDT a otro modificando así el intervalo de desplazamientos del módulo servohidráulico.

Los modelos que se utilizaron son el 250MHR y el 050MHR. El primero tiene un intervalo de desplazamiento de ± 0.25 in (± 6.35 mm) y una sensibilidad de 72 mV/ μ m; el segundo tiene un desplazamiento de ± 0.05 in (± 1.25 mm) y una sensibilidad de 8mV/ μ m. El voltaje de alimentación es de 3V y la señal de salida tiene un intervalo de ± 10 V.

La calibración de estos transformadores se realizó con el procedimiento sugerido en el manual del controlador 407. A partir del cálculo de la sensibilidad de cada LVDT, se

obtiene la respuesta teórica del transformador la cual se compara con la respuesta experimental, además de comparar con un estándar de desplazamiento. Las gráficas obtenidas para los LVDT 250MHR-0031, 250MHR-0042, 050MHR-48916 y 050MHR-49867 se muestran en las Figs. 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 respectivamente.

En la parte superior de cada Figura se muestra la curva de voltaje contra desplazamiento; en todos los casos se puede ver que la calibración de los LVDT se puede considerar como una recta que pasa por el origen. La pendiente de la recta corresponde a la sensibilidad de los LVDT, $1.6 \text{ mV}/\mu\text{m}$ para los modelos 250MHR y $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$ para los modelos 050MHR. La segunda gráfica que se presenta en cada figura muestra la desviación entre el desplazamiento obtenido y el desplazamiento esperado. Estas últimas gráficas sirven para medir la resolución y el desempeño de los transformadores de desplazamiento. La desviación estándar de los LVDT de mayor capacidad de desplazamiento (12.7 mm) es de 7.0 a 15.0 micras mientras que para los LVDT de menor capacidad de desplazamiento (2.5mm) es de 0.75 a 1.0 micra. Además, el promedio no es cero pues la calibración no se hizo a través de mínimos cuadrados; esto es, para la calibración de los LVDT se utilizó el cero, la ganancia bipolar y la ganancia unipolar³. Para aumentar la resolución sería necesario hacer mediciones de repetibilidad y utilizar un procedimiento de interpolación. En este caso no fue necesario pues se trabajó con desplazamientos pequeños; en ningún experimento se superan las $300\mu\text{m}$ con una posición del núcleo muy cercana a cero que es el intervalo en el cual el LVDT actúa con mayor precisión.

³ Ganancia que afecta sólo a los valores positivos. Se puede utilizar para calibrar diferencias en transformadores que muestran un comportamiento diferente para valores positivos y negativos. En este caso el valor que se utilizó es muy cercano a 1.

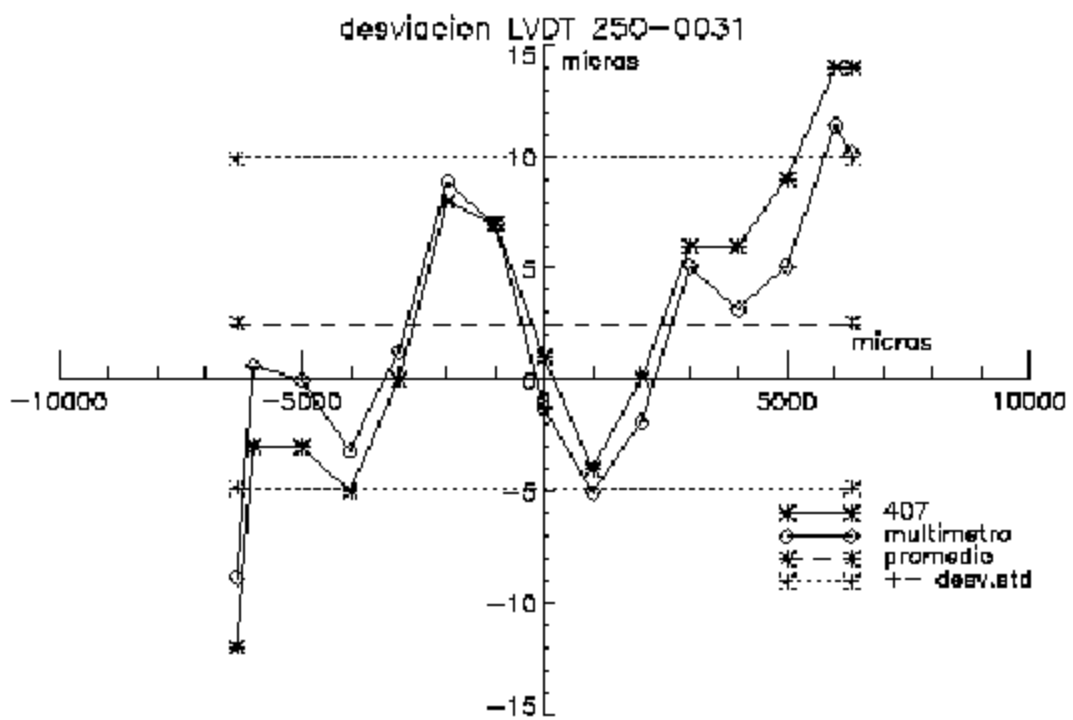
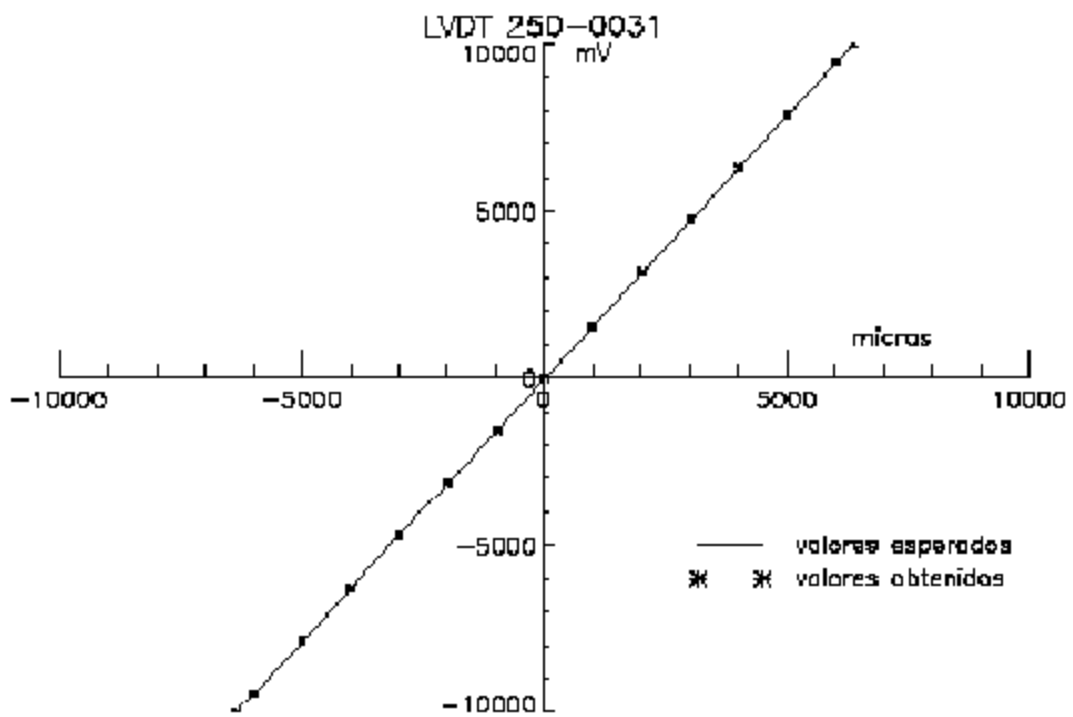


Figura 2.4. Curvas de calibración del LVDT 250 MHR 0031.

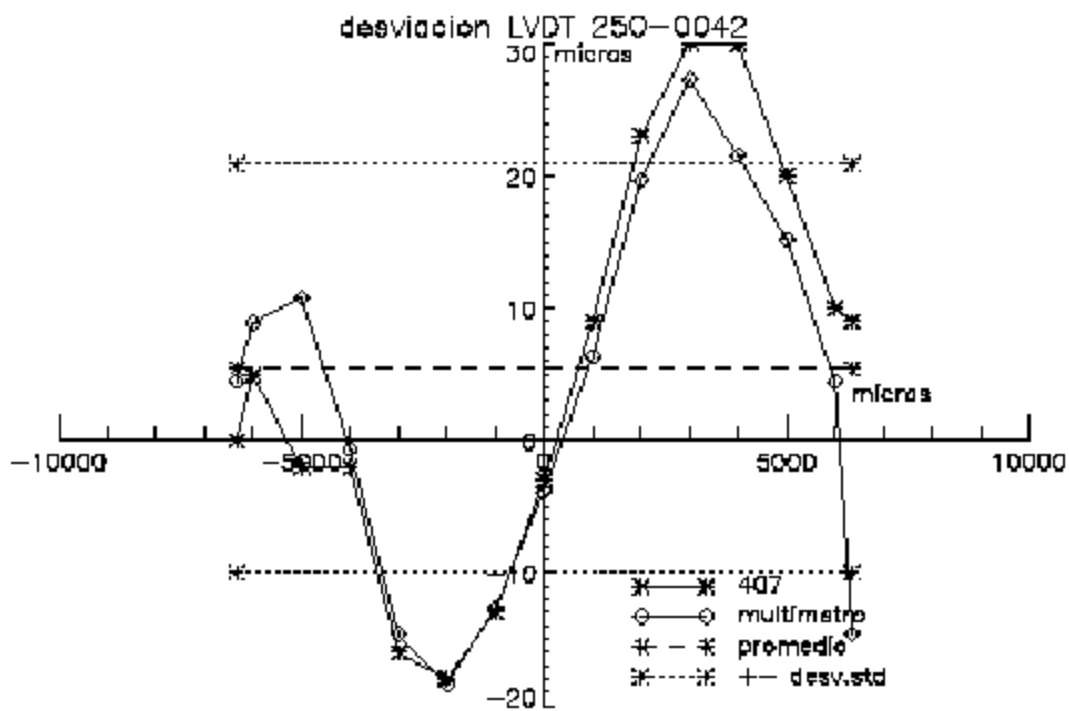
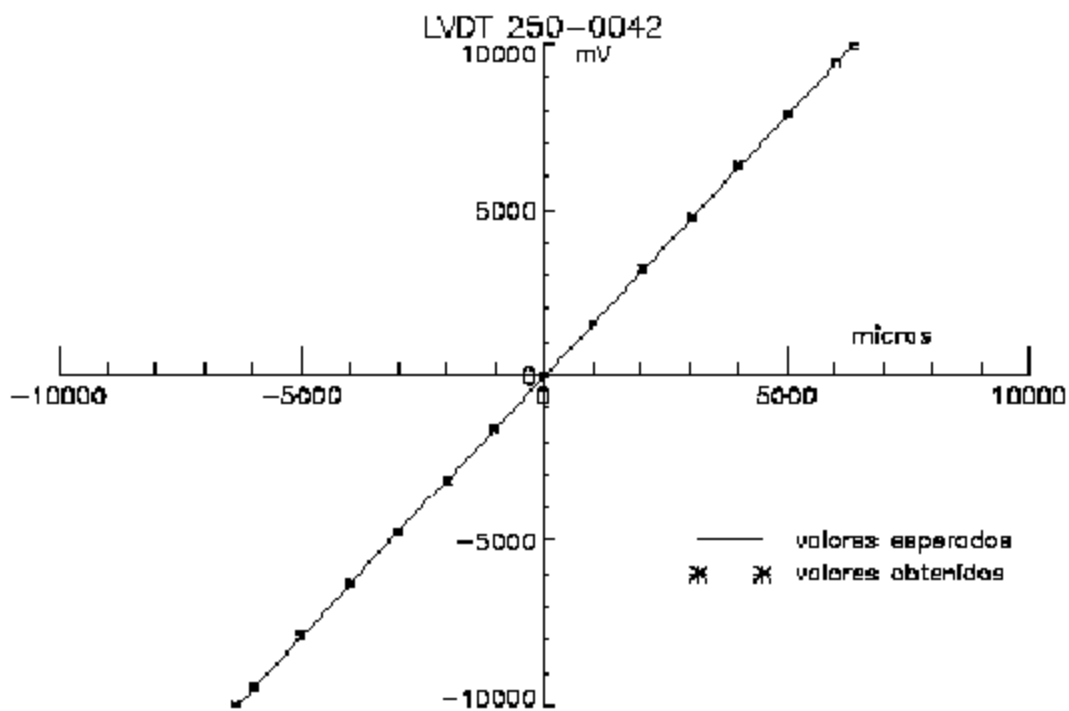


Figura 2.5. Curvas de calibración del LVDT 250 MHR 0042.

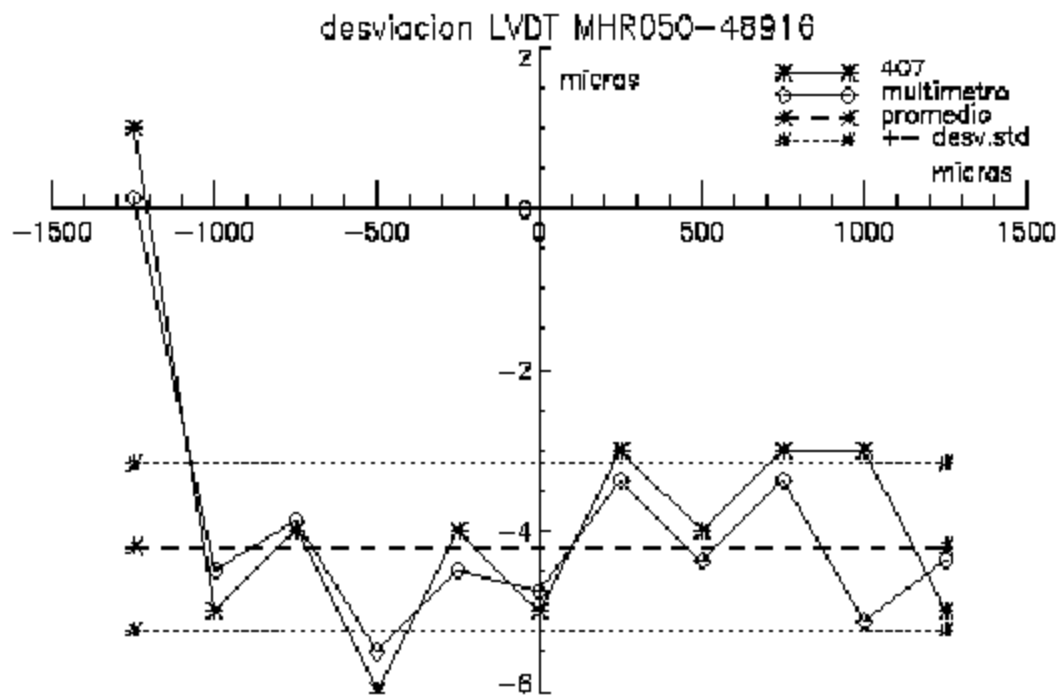
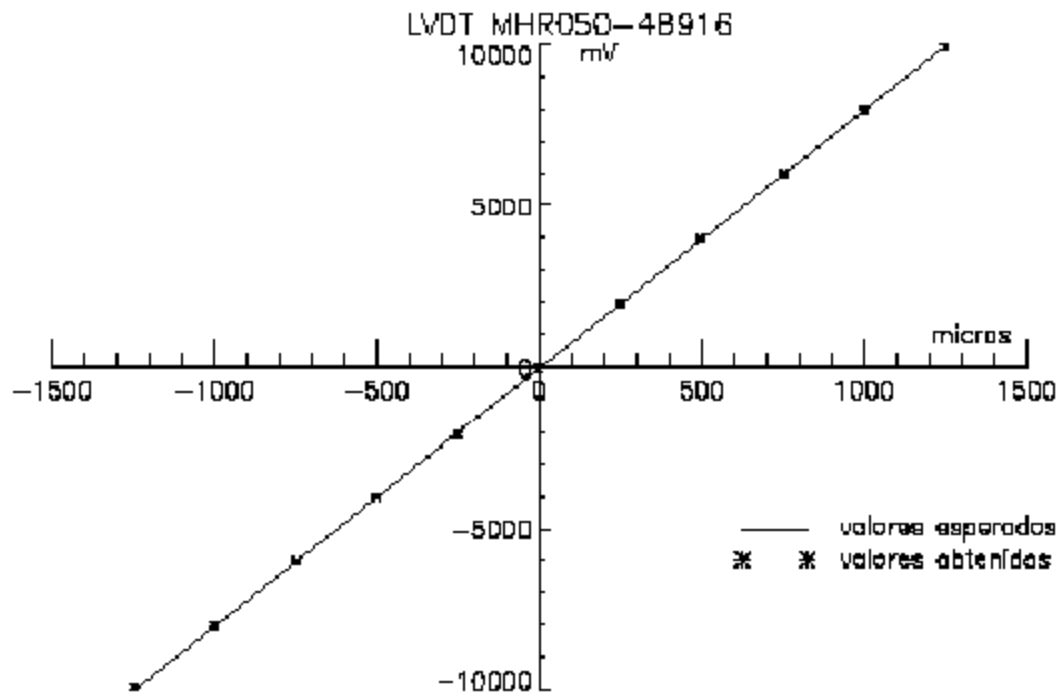


Figura 2.6. Curvas de calibración del LVDT 050 MHR 48916.

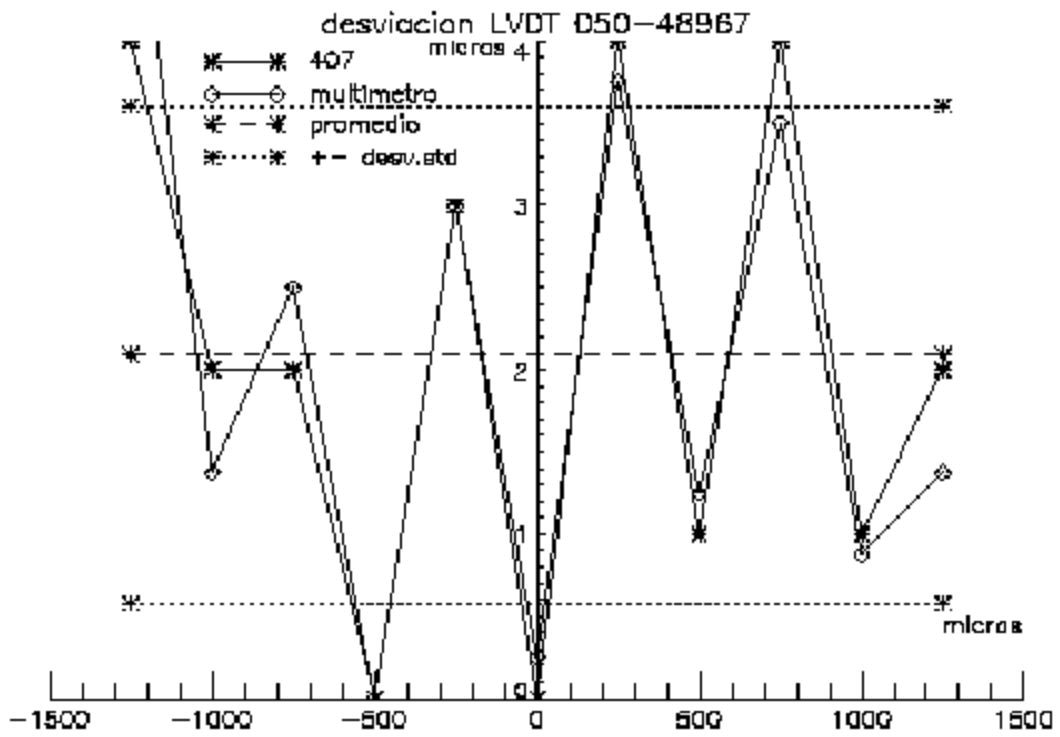
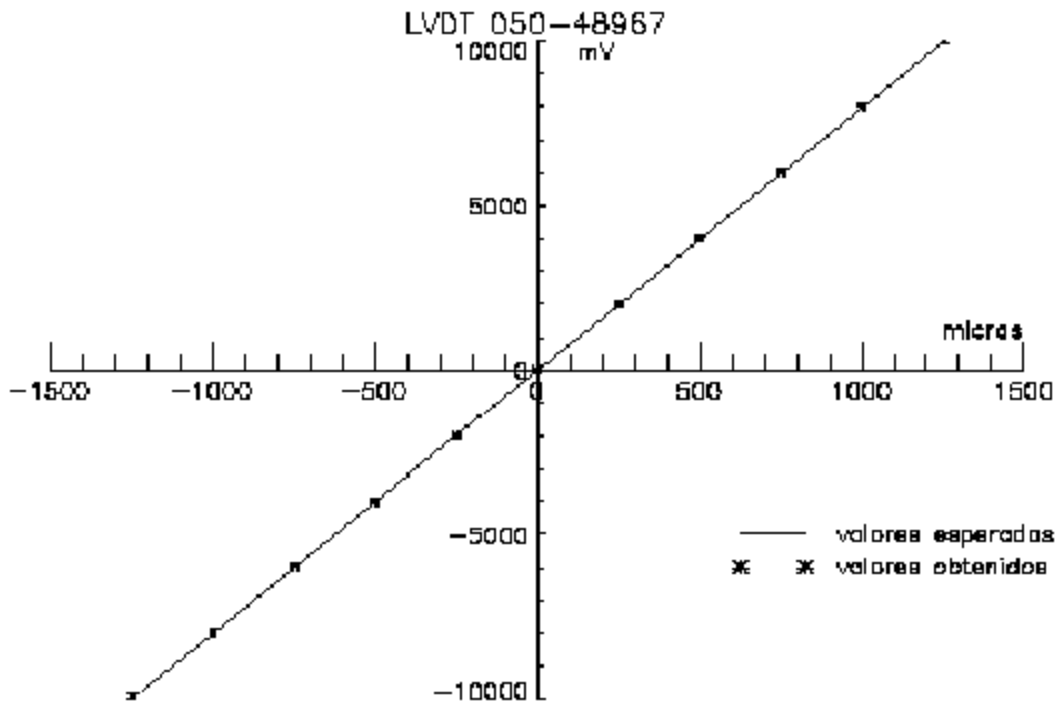


Figura 2.7. Curvas de calibración del LVDT 050 MHR 48967.

2.2.1.D Transformadores de fuerza

El transformador de fuerza que se utiliza en cada módulo es una celda de carga, LC por sus siglas en inglés, de la marca Sensotec modelo 34. Al igual que en el caso de los LVDT, se utilizan modelos que tienen una gran precisión y ocupan el menor tamaño posible. Cada celda tiene una capacidad de 100 lb (445N) de carga máxima y una sensibilidad de 22.5 mV/N. La celda de carga mide la magnitud de la tensión o compresión aplicada sobre sí misma por medio de 4 galgas extensométricas que forman un puente de Wheatstone. La señal eléctrica cuando el puente sufre un desequilibrio es proporcional a la fuerza aplicada. El voltaje de excitación para la celda de carga es de 10V y la señal de salida de $\pm 10V$. La calibración de la celda de carga se realizó de acuerdo con el procedimiento del controlador 407 y solamente en tensión. Las curvas de calibración para las dos celdas de carga se muestran en las Figs. 2.8 y 2.9.

Al igual que en el caso de los LVDT, se muestran dos gráficas para cada celda. En la gráfica superior se muestra el voltaje en función de la carga. De nuevo, la calibración considera una recta que pasa por el origen y tiene una pendiente que corresponde a la sensibilidad de la celda de carga. La gráfica inferior muestra la diferencia entre los valores medidos y los esperados en función de la fuerza. La desviación estándar es de 0.2 a 0.35N. Además debido a que el procedimiento de calibración no fue por mínimos cuadrados, el promedio de la desviación es de -0.4 y $-0.5N$. En estos casos tampoco se hicieron mediciones de repetibilidad ni se utilizó un procedimiento de interpolación para aumentar la resolución de las mediciones de fuerza. Se consideró que para las fuerzas utilizadas de 100 a 200N la resolución obtenida es la apropiada.

La mínima señal que se puede diferenciar del ruido para la celda de carga es de 0.9 N; este valor corresponde como máximo al 1% de la señal generada en la celda de carga durante el experimento.

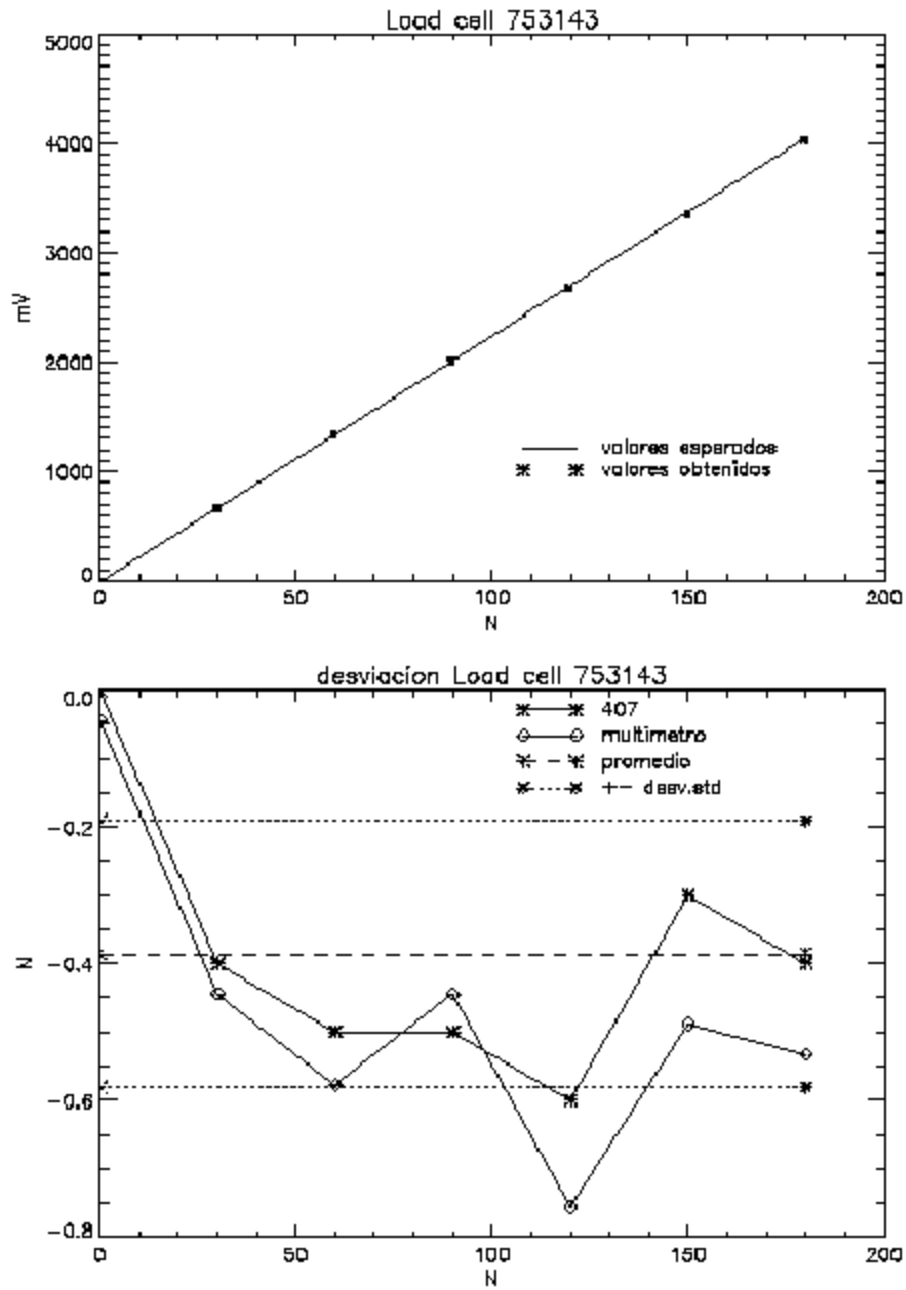


Figura 2.8. Curvas de calibración de la celda de carga 753143.

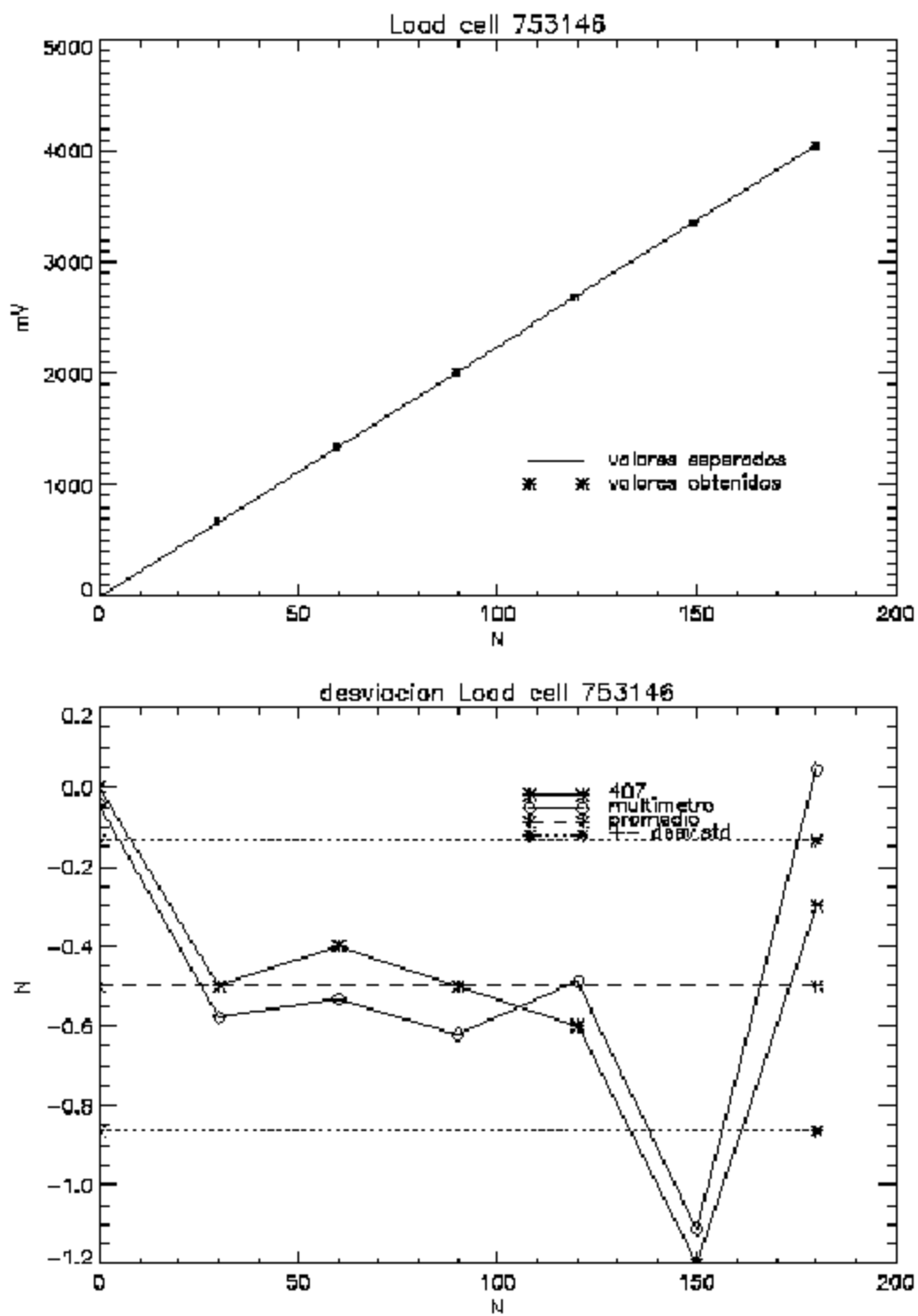


Figura 2.9. Curvas de calibración de la celda de carga 753146.

2.2.1.E Electrónica

Como ya se ha mencionado, el probador servohidráulico opera por medio de una unidad de control. Es decir, habiéndose predeterminando los parámetros característicos de una función de carga que se desea conservar durante un experimento, ésta se mantiene por retroalimentación. El mecanismo de control se denomina de lazo cerrado por ser independiente del operador y se ve representado en el esquema de la Fig. 2.10.

Los componentes de este mecanismo son:

- El comando: es la señal compuesta por la función de carga y sus características como son la posición o carga inicial, amplitud y frecuencia para funciones cíclicas así como velocidad y posición o carga final para rampas.
- La señal de respuesta seleccionada para el control (retroalimentación): puede ser la señal de fuerza o desplazamiento. El controlador 407 procesa continuamente la respuesta generada por este dispositivo.
- El error.
- El acondicionador de señal de la servoválvula: es la función del error con base en los parámetros PIDF⁴ y convirtiéndola en la señal eléctrica que mantiene operando a la servoválvula. El propósito de ejecutar este mecanismo es minimizar el error ajustando continuamente el comando de la misma.

⁴ PIDF se refiere a cuatro ajustes, : proporcional (P), integral (I), diferencial o derivada (D) y *feedforward* (F).

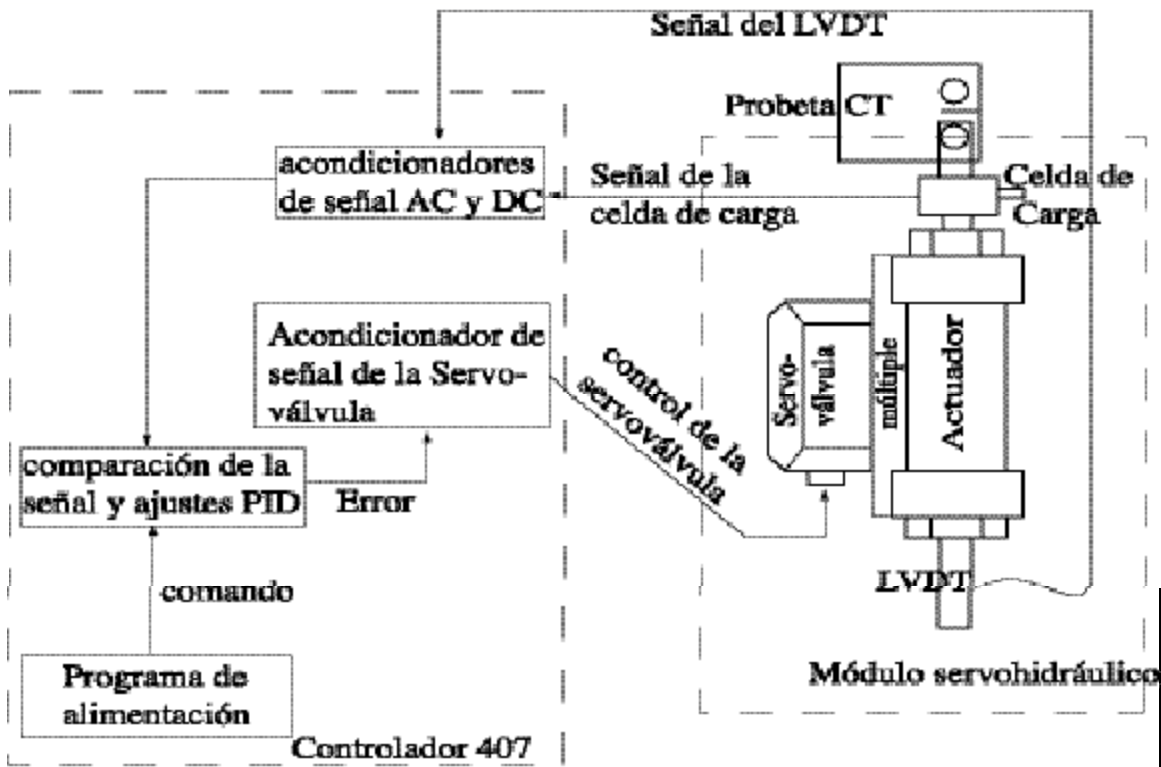


Figura 2.10. Elementos del control de lazo cerrado.

2.2.1.E.a Controlador 407 y control

El controlador analógico con supervisión digital modelo 407 de la marca MTS se utiliza para el control de los módulos servohidráulicos. Una de las ventajas que presenta este modelo es la facilidad de configuración para operar con distintos equipos y distintos dispositivos de medición de fuerza y desplazamiento⁵. En el controlador se definen las características del experimento que se va a realizar por medio del menú del generador de funciones. Cuenta además con otros menús en los cuales se configura y selecciona el tipo

⁵ Cabe mencionar que uno de los controladores está conectado a una máquina servohidráulica comercial de 2.5 ton y un módulo MHLD; el otro controlador está conectado al segundo módulo MHLD y a una máquina que opera, ya sea manualmente o con un motor 850F-LS, que mide fuerza y desplazamiento.

de control y la configuración de la alimentación hidráulica. Para cada LVDT y celda de carga se establecen los parámetros de la calibración y los límites de operación.

El procesador del controlador 407 tiene la capacidad de calcular las características experimentales de la función de carga con la información que recibe de los dispositivos de medición y de la servoválvula.

Debido a que se tienen dos dispositivos de medición (celda de carga y LVDT), cualquiera de ellos puede seleccionarse como dispositivo de control; para desarrollar experimentos bajo condiciones de fuerza o desplazamiento constantes, dependiendo de la prueba que se requiere llevar a cabo. Como se verá más adelante, por medio de una computadora y el software LabVIEW, se implementó un control combinado de fuerza y desplazamiento.

El controlador 407 proporciona además un mecanismo de control extra: “El Control de Amplitud” para funciones cíclicas, que tiene por objetivo controlar, con una mayor eficiencia, el valor de la amplitud del comando original a lo largo del experimento. Este tipo de control lo lleva a cabo el procesador del controlador 407 modificando automáticamente la carga o desplazamiento inicial (Set point) y la amplitud (Span) en la función de carga.

El control de amplitud puede ser de dos tipos, el control sencillo que consiste seleccionar la misma señal de retroalimentación para ambos mecanismos de control, el PIDF y de amplitud y el control dual que corresponde al caso en el cual las señales seleccionadas son diferentes para cada controlador por ejemplo: la señal de desplazamiento, LVDT, corresponde a la señal de retroalimentación del controlador PIDF y la señal de la fuerza, celda de carga, corresponde al control de amplitud.

2.2.1.E.b Calibración del controlador PIDF

El procedimiento de ajuste de las ganancias del controlador PIDF, no lleva a valores específicos; es decir, no existe un valor único para cada ganancia con la cual el control es perfecto, sino que cada ganancia se ajusta para que la señal de respuesta del dispositivo de control sea lo más parecido al comando. Generalmente, el ajuste de estas ganancias se lleva a cabo definiendo una función cíclica cuadrada⁶.

El ajuste de la ganancia proporcional (P) se lleva a cabo en primer lugar y siempre produce oscilaciones en la señal de respuesta del dispositivo de control. La segunda ganancia que se ajusta es la derivativa (D), la cual disminuye la amplitud de las oscilaciones. La ganancia integral (I) ajusta la amplitud de la señal de respuesta con el comando. Estas últimas producen menores cambios en la señal de respuesta. Cuando la ganancia integral no es suficiente para que la respuesta del dispositivo sea aceptable, se utiliza el “*feedforward*” (F) que introduce un valor de corrección por anticipación a la ganancia integral. La diferencia entre tener los valores de las ganancias bajos o altos con una señal correcta se muestran en las figuras 2.11, 2.12 y 2.13 en las cuales la función cuadrada corresponde al comando que se compara con la respuesta del módulo servohidráulico bajo control de desplazamiento. La Figura 2.11 muestra una respuesta del controlador sin ganancias PID apropiadas; una vez ajustada la ganancia proporcional, la respuesta del módulo presenta unas oscilaciones como lo muestra la Fig. 2.12; finalmente al ajustar las ganancias derivativa e integral, la respuesta del módulo se parece más al comando como lo muestra la Fig. 2.13.

⁶ En el caso de control de fuerza, los parámetros PIDF dependen del material que se va a analizar.

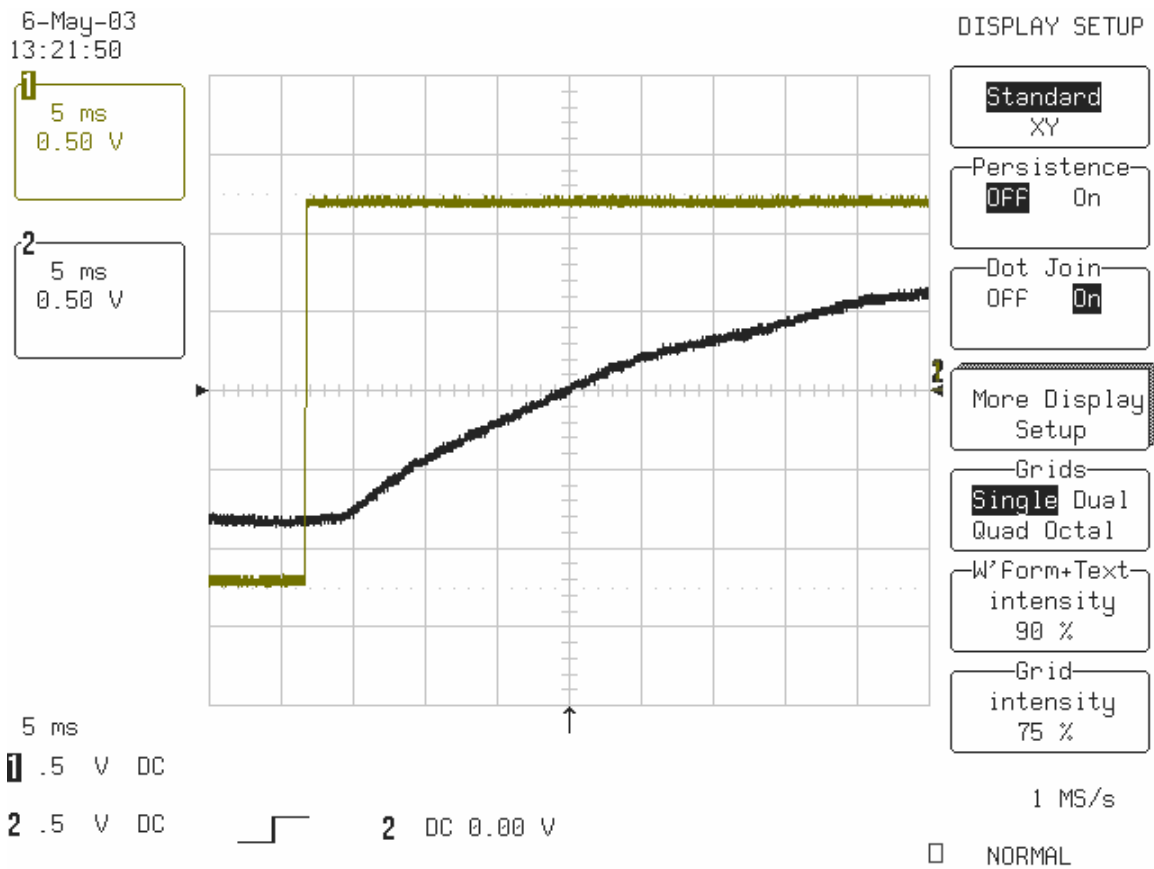


Figura 2.11. Diferencia entre el comando y la respuesta del módulo servohidráulico sin el ajuste correcto de las ganancias PID.

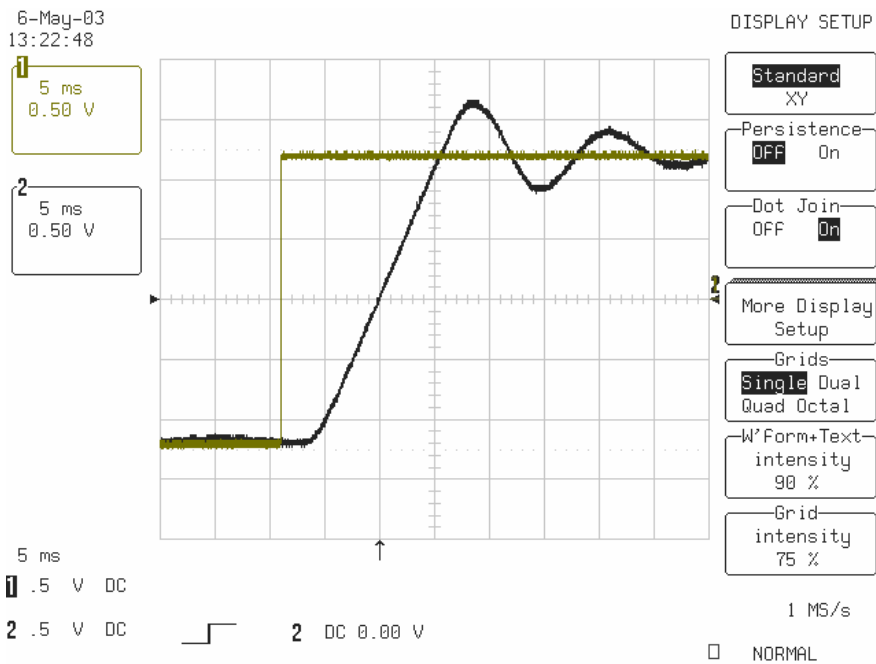


Figura 2.12. Diferencia entre el comando y la respuesta del módulo servohidráulico una vez que se realizó el ajuste de la ganancia proporcional.

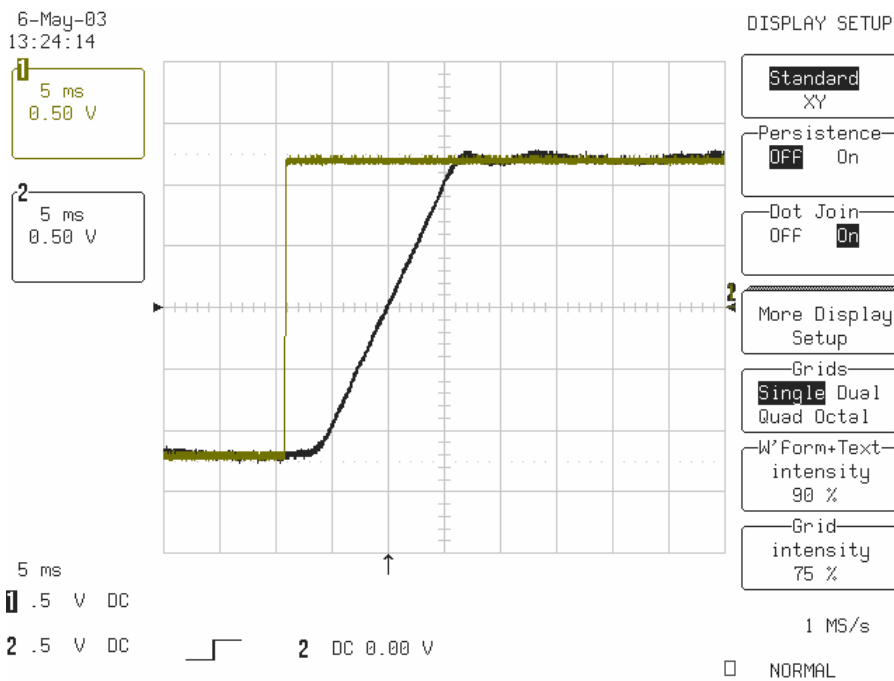


Figura 2.13. Diferencia entre el comando y la respuesta del módulo servohidráulico una vez que se realizó el ajuste de las ganancias restantes; derivativa e integral.

2.2.1.E.c Desempeño del módulo servohidráulico

Una vez calibrados los componentes del módulo servohidráulico y ajustadas las ganancias, se puede caracterizar su desempeño. Como se aprecia de las Figuras 2.12 y 2.13 la respuesta del módulo nunca puede ser igual al comando aún con los parámetros óptimos del controlador. El hecho de que existe una diferencia entre el comando y la respuesta se debe a que un servomecanismo sólo responde si hay error. Además se puede ver que la velocidad de respuesta es proporcional al error; por otro lado, ningún servomecanismo responde inmediatamente.

Considerando el caso cuando el comando es una señal cuadrada de desplazamiento, se puede ver que la respuesta tiene un retraso de aproximadamente 2.5 ms. Además el sistema se mueve a una velocidad finita, determinada por la capacidad de flujo de la servoválvula y el área del cilindro. En este diseño, la velocidad máxima de respuesta es de 27.6 mm/s como se puede observar en la Fig. 2.14. La velocidad máxima limita la frecuencia máxima de prueba a 138 Hz para una amplitud de 100 μm . El tiempo de retraso y la velocidad máxima también causan un desfase entre el comando y la respuesta.

Para medir la resolución se realizaron pruebas con señales cuadradas de desplazamiento cuya amplitud se redujo hasta que no se detectó una respuesta. De las mediciones se deduce que si la amplitud es menor a 1 micra, es decir que el intervalo es 2 μm , no se detecta respuesta.

Debido a la presión a la que trabaja la servoválvula y del área del cilindro se puede estimar que la carga máxima del actuador es de aproximadamente 2500 N si la servoválvula es capaz de transferir el 80% de la presión nominal a los puertos

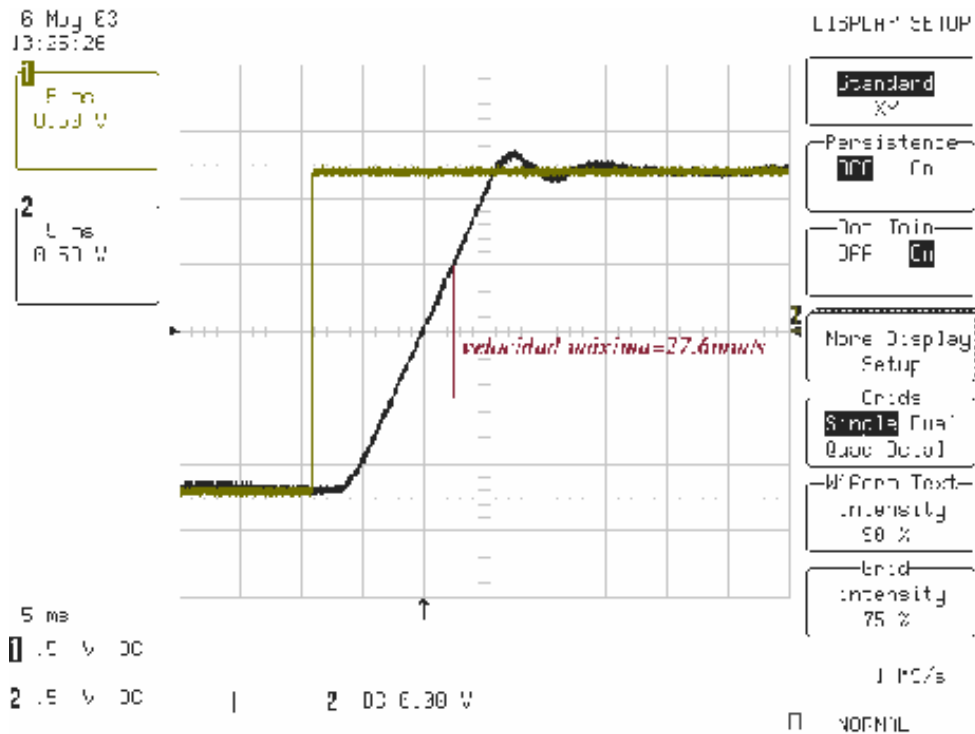


Figura 2.14. velocidad de respuesta del módulo servohidráulico.

2.2.2 Arreglo mecánico

La necesidad de tener una máquina servohidráulica con un sistema óptico acoplado para medir, en tiempo real, el crecimiento de una grieta define el tamaño de la misma. En este proyecto, el sistema óptico que se utiliza forma parte de un microscopio con una distancia y un área de trabajo suficientemente grandes para que tenga cabida la máquina junto con el sistema de movimiento x , y , q que la soporta. Los elementos que conforman el arreglo

mecánico son el marco de carga, las conexiones hidráulicas, el tren de carga y el sistema de posicionamiento x, y, \mathbf{q} .

2.2.2.A Marco de carga

La máquina en miniatura tiene en cada extremo del marco de carga un cabezal formado por un módulo servohidráulico y su soporte. Cada cabezal ocupa un área de 23 cm por 23 cm y puede deslizarse a lo largo de los ejes del marco de carga, lo que permite hacer pruebas a muestras de tensión compacta con una longitud efectiva de hasta 80 mm; el ancho y espesor de la probeta van en proporción a esta dimensión, pero con las mismas mordazas se pueden analizar probetas con espesores de 12 mm. Dichos ejes tienen un diámetro de 2.54 cm y una longitud de 50 cm. El módulo está sujeto al soporte en el extremo interior del cilindro por lo cual el área máxima libre que puede haber entre los módulos es de 20 cm por 15.2 cm. Como los módulos están centrados en su soporte, la mayor longitud efectiva (W) que puede tener una probeta de geometría CT es de 7.6 cm.

Contar con módulos independientes proporciona versatilidad a la máquina para aplicar carga asimétrica, simétrica o simplemente poder utilizar ambos módulos como máquinas independientes sustituyendo un cabezal por un soporte fijo en el extremo correspondiente. Un acercamiento del marco de carga completo soportado sobre el sistema de posicionamiento x, y, \mathbf{q} se presenta en la Fig. 2.15.

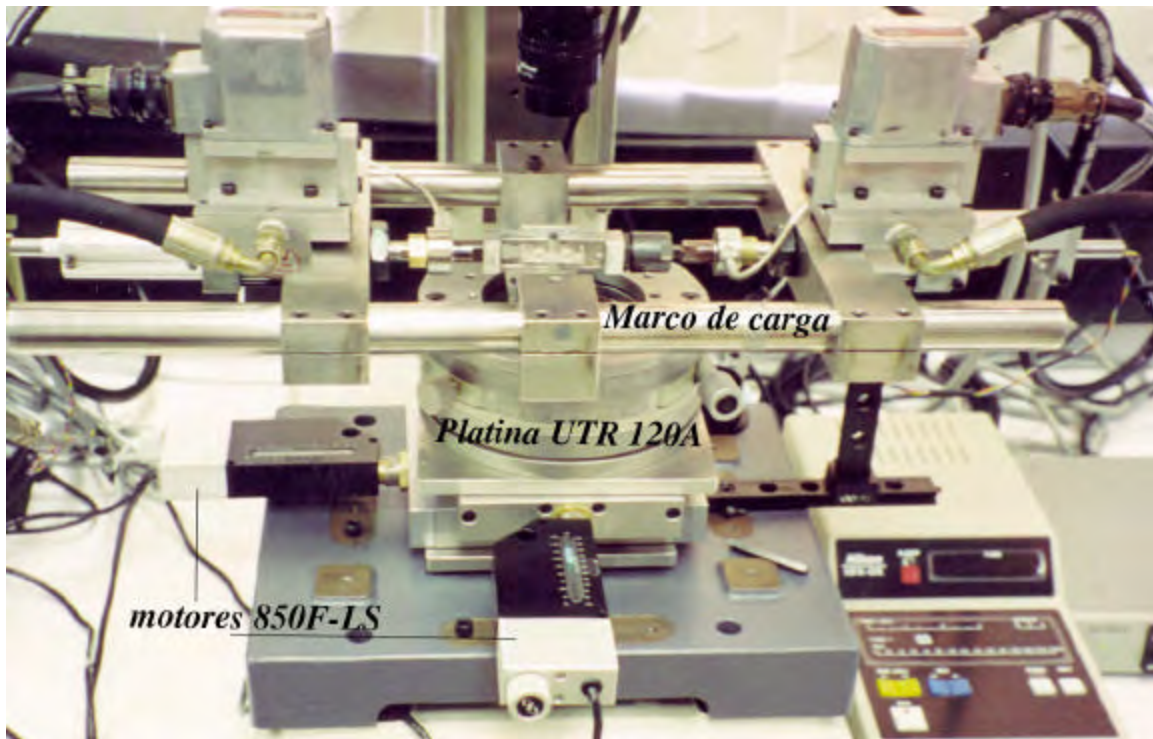


Figura 2.15. Marco de carga o máquina servohidráulica.

2.2.2.B Conexiones hidráulicas

La presión de operación de la máquina está limitada por la servoválvula que opera a una presión de 1000 Psi, aunque podría soportar en un caso extremo una presión de 3000 Psi. Para el conjunto de las servoválvulas se requiere de un flujo de aceite de $88 \text{ cm}^3/\text{s}$. La presión de operación de la bomba hidráulica (HPS) puede variar desde 300 hasta 3000 Psi. Cabe mencionar que la misma bomba alimenta los dos módulos servohidráulicos y una máquina comercial de 25 KN con requerimiento de $315 \text{ cm}^3/\text{s}$; por lo anterior, se decidió adquirir una bomba con capacidad de $631 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Todas las conexiones soportan una presión de operación de 3000 Psi con un diámetro interno de 6.35mm son de acero inoxidable. La mayoría de los conectores son Swagelock.

2.2.2.C Tren de carga

Se identifica como tren de carga al conjunto de la probeta, las mordazas y los módulos servohidráulicos. Este se muestra en la Fig. 2.16. El eje sobre el cual se alinea el tren de carga se denomina “línea de carga”. El sistema de coordenadas del experimento se define en relación a la línea de carga y al punto medio de la distancia entre los dos puntos de carga. Para este sistema una de las coordenadas es paralela a la línea de carga y la otra es perpendicular a ésta; es decir, en la dirección del corrimiento de la grieta (a).

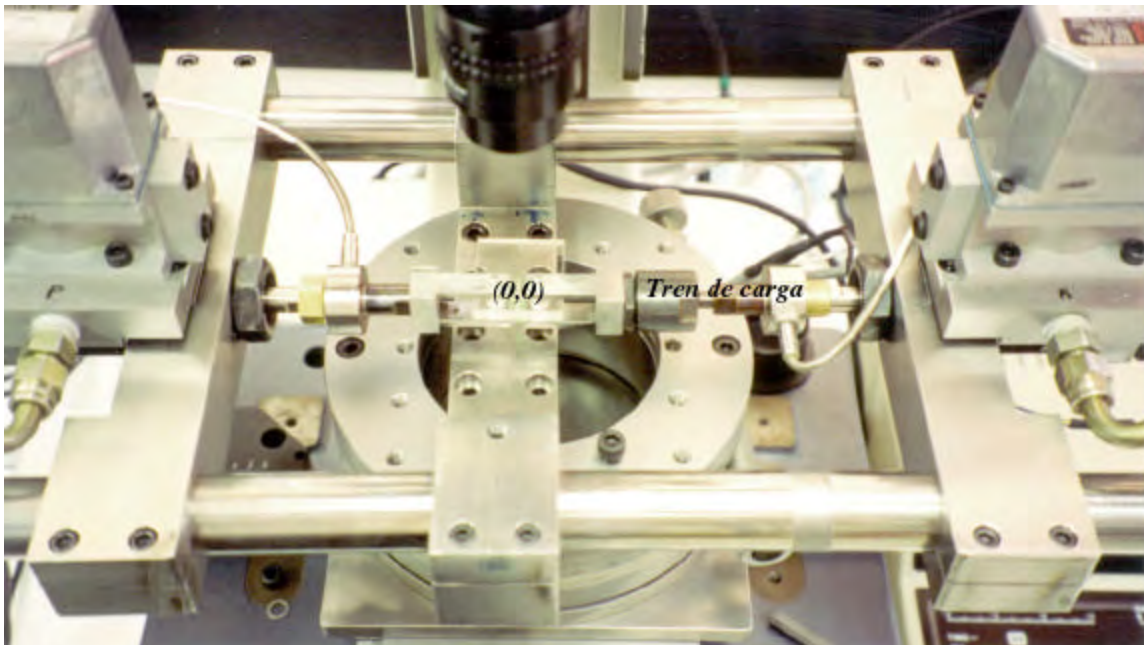


Figura 2.16. Tren de carga.

La alineación del tren de carga minimiza los errores que pueden presentarse por giros de la probeta durante el experimento y evita que la grieta se propague de manera antisimétrica (se desvíe). El máximo error en la alineación corresponde a 1.14° de desviación. La alineación de la probeta antes de cada experimento se explica en la sección 2.3.1.A. Estas actividades se llevan a cabo en el modo de operación local del 407.

2.2.2.D Sistema de posicionamiento x, y, q.

El marco de carga está soportado sobre un conjunto de platinas de movimiento lineal y de rotación mostradas en la Fig. 2.14. La platina modelo M-UTR120A proporciona un movimiento de rotación con una sensibilidad de $1/360^\circ$ y se ajusta manualmente. Su función es alinear a la máquina completa con el eje de corrimiento de la grieta y el sistema de adquisición de imágenes. Esta platina, solamente se vuelve a ajustar en caso de desmontar la máquina o cambiar la alineación del sistema óptico. Las platinas de traslación modelo M-UMR-12.63 tienen un desplazamiento total de 63.0 mm y están alineadas perpendicularmente entre sí para poder desplazar la máquina en las direcciones del corrimiento de la grieta (a) y paralelamente a la línea de carga. El origen de estas coordenadas, se define para cada experimento en el momento de alinear el tren de carga. De esta manera, la punta de la grieta siempre se localiza en una coordenada de referencia visual⁷.

Las características del movimiento de traslación (velocidad y sentido) de estas platinas están determinadas por los motores modelo 850F-LS, mostrados en la Figura 2.15, que tienen un intervalo de desplazamiento de 54 mm. Esta distancia es suficiente para

⁷ Esta coordenada visual está señalada en el monitor donde se despliega la imagen.

detectar imágenes de la probeta de extremo a extremo y seguir el corrimiento de la grieta por una distancia entre 10 y 15mm. Estos motores son dirigidos por un controlador de movimiento PMC 200. En conjunto, el sistema de movimiento x, y tiene una resolución de $0.1 \mu\text{m}$. Todos estos dispositivos, son fabricados por Newport.

2.2.3 Óptica

Los elementos que componen el sistema óptico del equipo son el microscopio óptico, la cámara de video, el monitor donde se observa el corrimiento de la grieta y la computadora en la que se adquieren las imágenes y/o videos.

2.2.3.A Microscopio

El sistema óptico utilizado es un microscopio marca Nikon, modelo MM-22, con objetivos cuya distancia de trabajo es de aproximadamente 7.0 cm. El diagrama del sistema óptico se muestra en la Fig. 2.17 y una fotografía de la máquina servohidráulica, montada sobre el sistema de posicionamiento x, y, \mathbf{q} y todo montado en el microscopio se muestra en la Fig. 2.18.

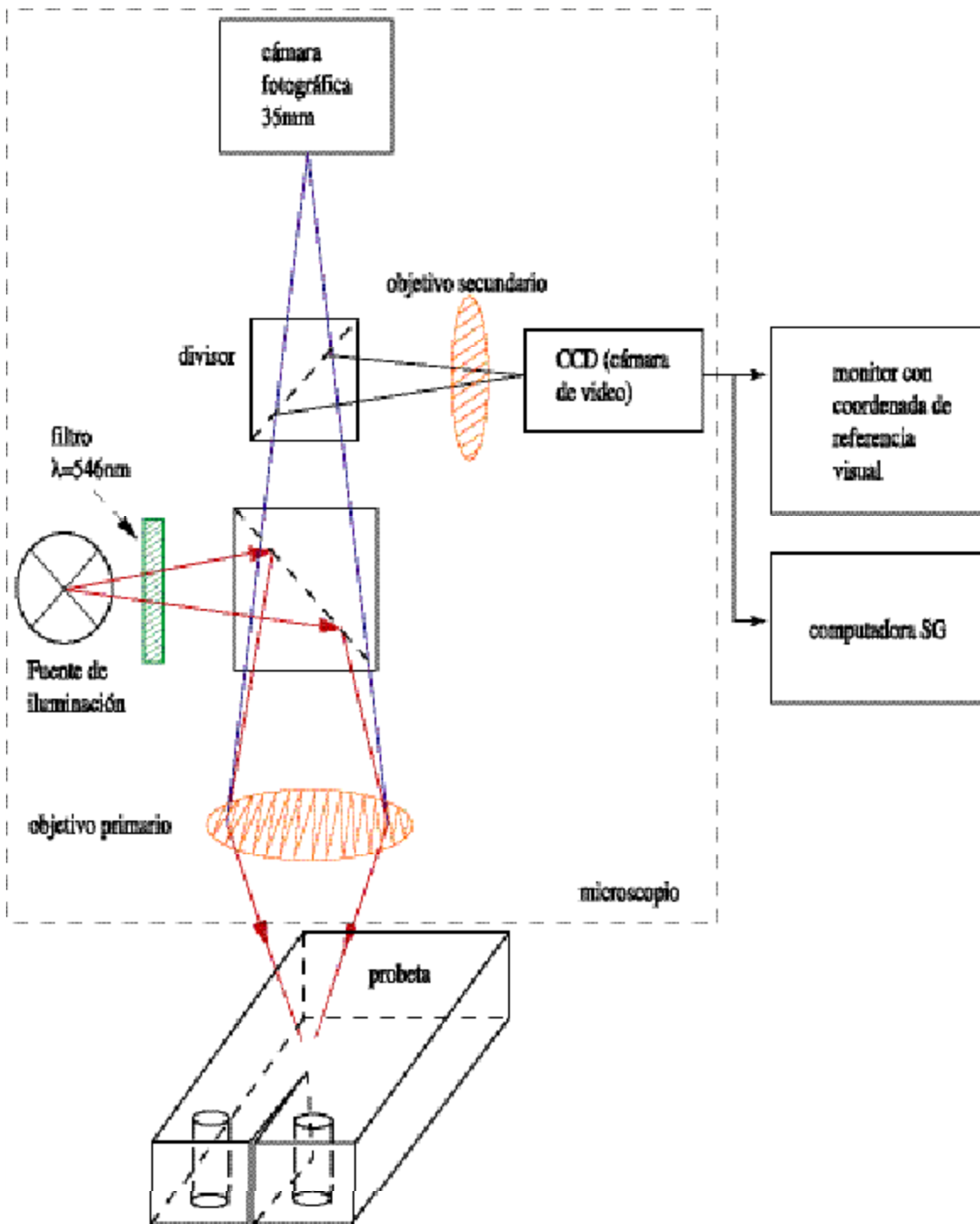


Figura 2.17. Diagrama óptico.

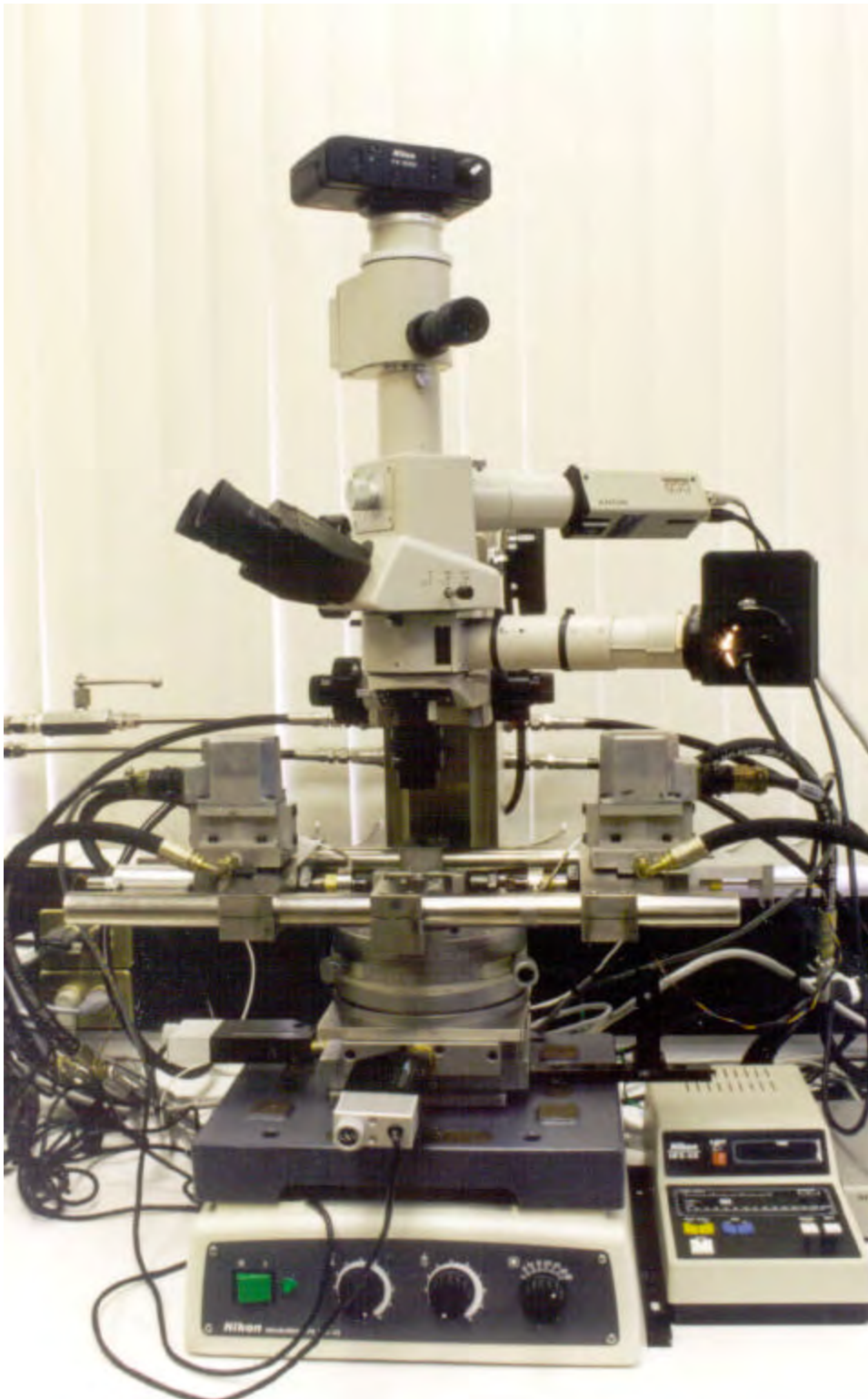


Figura 2.18. Microscopio óptico con máquina servohidráulica.

2.2.3.A.a *Objetivos*

Se pueden utilizar diferentes objetivos primarios en el microscopio. Los objetivos primarios que se utilizan proporcionan una amplificación de 3x y 5x. Los objetivos secundarios son PL2.5x y PL5x; este último se encuentra justo antes de la cámara de vídeo.

2.2.3.A.b *Iluminación*

El microscopio cuenta con dos fuentes de iluminación, en este caso se utilizó la fuente de iluminación superior que tiene una lámpara de 50W y 15mA y un filtro que proporciona una luz monocromática de $\lambda = 546 \pm 5 \text{ nm}^8$. Esta luz viaja por el tubo del microscopio e ilumina la superficie de la probeta. Las imágenes que se obtienen son de campo claro debido a que toda la superficie de la probeta refleja la luz incidente por estar pulida con un acabado tipo espejo, mientras que la grieta representa una discontinuidad de la superficie que no refleja la luz sino que atraviesa la probeta; ésta se observa como un área oscura.

2.2.3.B *Adquisición de imágenes*

2.2.3.B.a *Cámaras de video y fotográfica*

Al final del tren óptico, están conectadas dos cámaras. Una cámara de video Sony CCD (*charge-coupled-device*) modelo AVC-D7 blanco y negro y una cámara fotográfica de 35mm.

La imagen capturada por la cámara CCD de vídeo se despliega en el monitor Sony y esta misma señal se envía a la computadora (SG).

⁸ Tener luz monocromática es importante en el caso de trabajar con técnicas de interferometría.

La cámara fotográfica registra la amplificación del objetivo primario y un objetivo secundario PL2.5x y se utiliza en caso de que se desee obtener fotografías tradicionales, en película de 35mm, para alguna aplicación especial. Esta cámara puede ser sustituida por una cámara digital.

2.2.3.B.b Monitores

Se cuenta con dos monitores; un monitor Sony RGB y el de una computadora Silicon Graphics. La computadora SG cuenta con una unidad de vídeo con el software Galileo con el cual se graban fotografías y/o videos. Este software permite adquirir imágenes en distintos formatos como GIFF, JPEG, TIFF, RGB-SGI (propio de la computadora) y diversos tamaños, siendo el más grande el de 640 x 486 pixeles. Para obtener la mayor cantidad de información y calidad de las fotografías se escogió el formato TIFF para todas las imágenes que se capturaron y que aquí se reportan.

La imagen que se despliega en la computadora cubre un área mayor que la imagen que se despliega en el monitor Sony. En la Figura 2.19 se muestra una imagen digitalizada de la punta de la grieta.

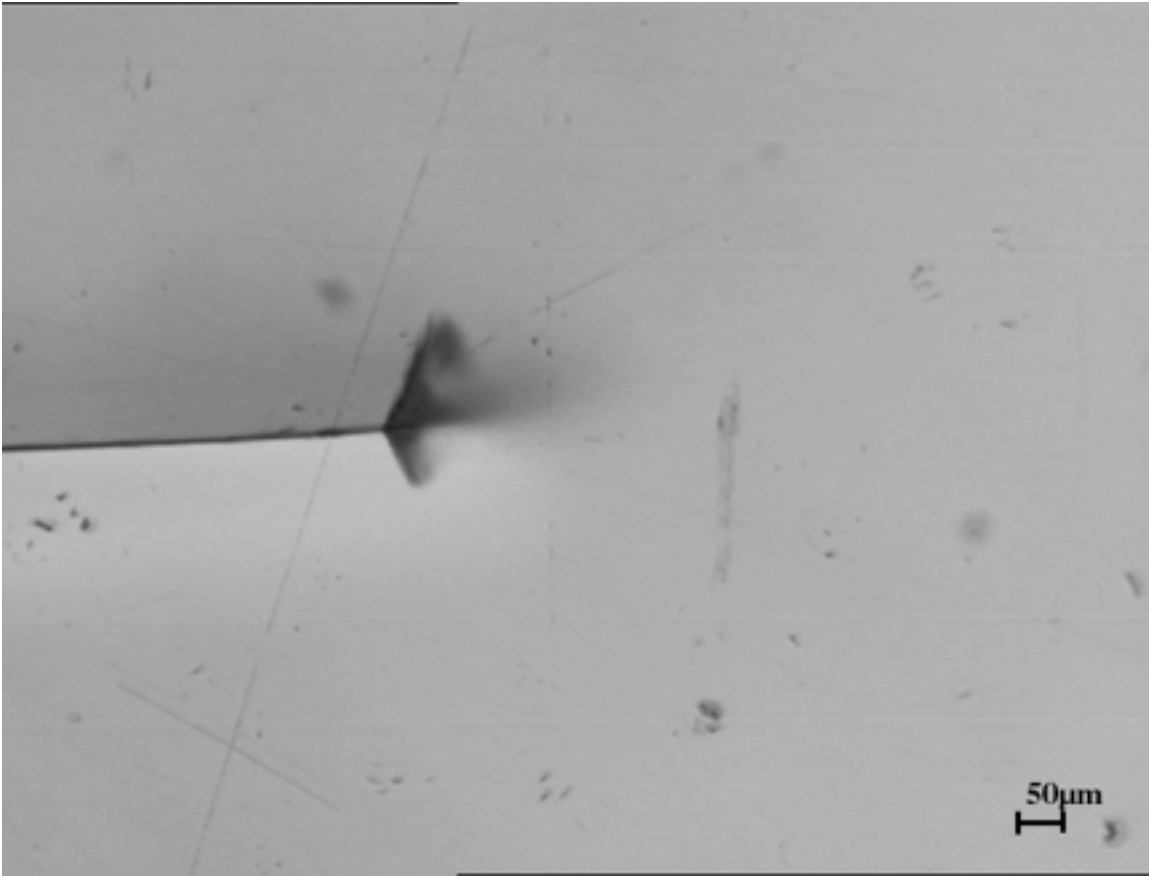


Figura 2.19. Imagen de la punta de una grieta capturada con la computadora SG.

La pantalla del monitor Sony despliega una imagen de 27 x 20 cm² sobre la cual se calibró una retícula de 50µm, una para cada objetivo que se utilizó. Sobre cada retícula se encuentra la coordenada de referencia visual en base a las cual se realizan las mediciones del cambio de la longitud de la grieta conforme se desarrolla el experimento. En la Figura 2.20 se muestra el monitor Sony, con una de las retículas de 50µm.

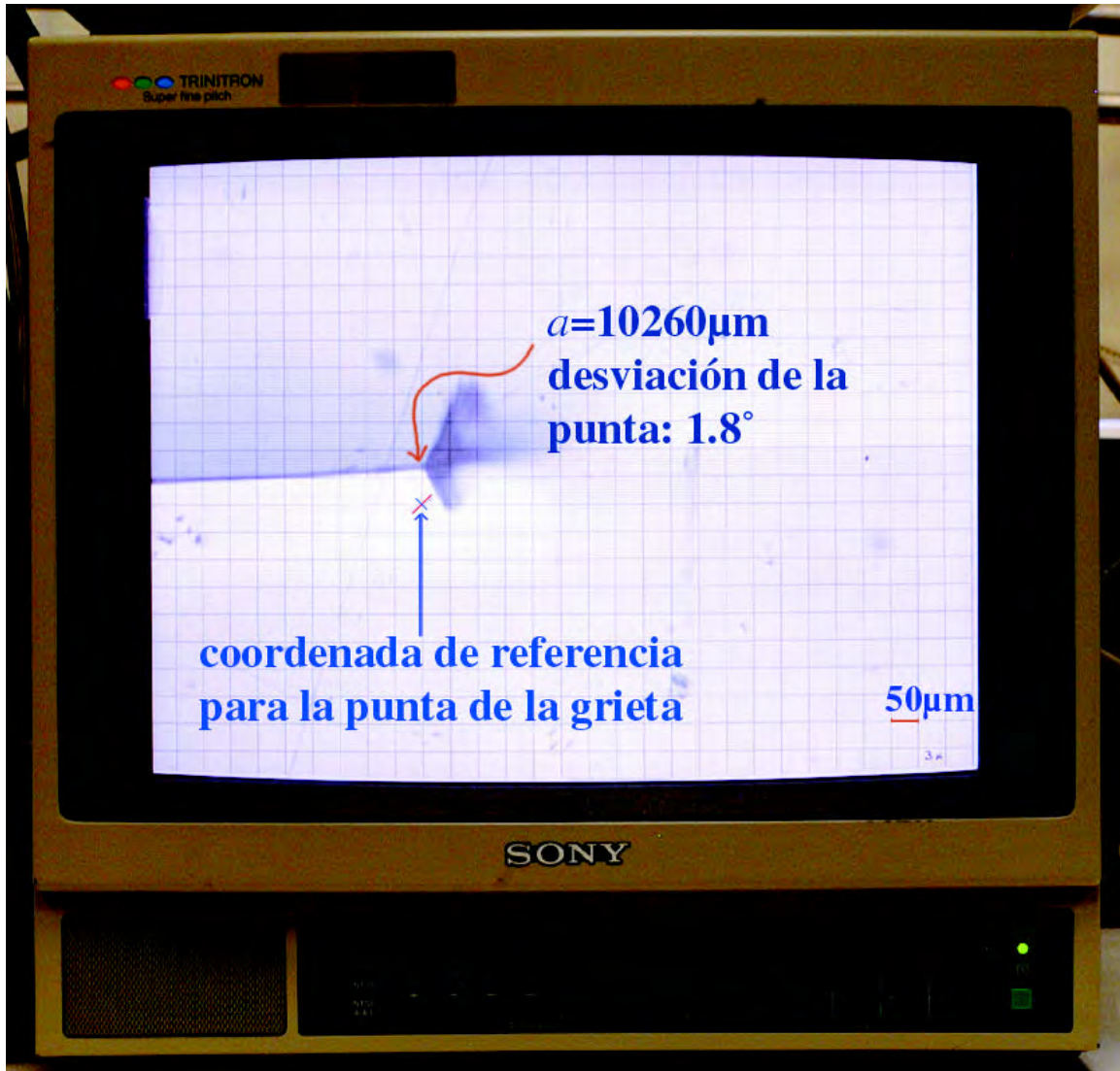


Figura 2.20. Imagen de la Fig. 2.18 desplegada en el monitor Sony con una retícula para el lente 3x.

2.2.3.B.c Resolución de la óptica del equipo

El área comprendida en las imágenes obtenidas y la resolución de las mismas se presenta en la tabla siguiente.

Monitor	Objetivo	dimensiones de la imagen en pixeles	dimensiones de la imagen en micras	Equivalencia pix \Leftrightarrow micras
Sony RGB	3x	---	1500*1200	---
	5x	---	900*650	---
Computadora SG	3x	640* 486	1612* 1221	1pix=2.52 μ m 1pix=2.51 μ m
	5x	640* 486	965* 731	1pix=1.51 μ m 1pix=1.50 μ m

Tabla 2.1 Resolución de los monitores

Como se puede observar, el área capturada por la computadora es más de 100 μ m mayor en ambas dimensiones que la observada en el monitor.

Con el objetivo 3x se detectan visualmente cambios en la longitud de la grieta de 10 μ m. Con el objetivo 5x, el cambio que se puede detectar es de 5 μ m. Si se tuviera un sistema automatizado de adquisición de imágenes el cambio en la longitud de grieta detectable, se reduciría fácilmente a la mitad o menos en ambos casos. Es importante que la probeta tenga una superficie bien pulida o bien, un recubrimiento metálico (e.g. de Al) que genere una superficie reflejante como espejo, para facilitar el seguimiento de la grieta y evitar que la punta se confunda con algún defecto presente en la cara de la probeta, que también se observe como un área oscura.

2.2.4 Operación remota del equipo

El nivel de automatización del equipo, hasta este momento, se limita a la operación remota del controlador 407 y la lectura de datos en ambos controladores.

2.2.4.A Hardware

Para llevar a cabo las acciones de control del experimento y la adquisición de datos, se requiere de una computadora a la cual están conectados ambos controladores. La

comunicación con los controladores se realiza por medio del puerto serial y las herramientas que se utilizan desde la computadora son instrumentos virtuales programados en LabVIEW.

2.2.4.A.a El controlador 407

El controlador 407 cuenta con tres formas de operación. La operación local o manual es realizada por el operador directamente en el panel del controlador; la operación POD se lleva a cabo por un dispositivo extra, específico de control y la operación remota que se lleva a cabo desde una computadora. Las dos últimas bloquean toda posibilidad de cambiar parámetros en el controlador a excepción del encendido y apagado de la bomba y el paro de emergencia del equipo.

2.2.4.A.b El controlador PMC 200

El PMC 200 es un controlador digital que puede ser operado de manera local o remota. El movimiento de los motores 850F-LS puede ser continuo o escalonado con una velocidad de movimiento que puede definirse entre (0.10, 1.0) mm/s. Para el seguimiento de la grieta, el tipo de movimiento utilizado aquí es continuo. La velocidad de movimiento varía de experimento a experimento dentro del intervalo de (0.4, 0.6) mm/s.

2.2.4.A.c Tipos de comunicación

El controlador 407 cuenta con un módulo de comunicaciones con una interfaz RS-232. Por medio de esta interfaz bidireccional se conecta a la computadora que realiza la operación remota, la lectura de datos y modificación de parámetros de la función de carga en el controlador.

El controlador PMC 200 cuenta con dos tipos de interfaces una IEEE-488 y otra RS-232. La comunicación con la computadora es por medio del puerto RS-232. Dado que durante el experimento solamente se realizan lecturas de la posición de la punta de la grieta, la interfaz RS-232 es suficientemente flexible y rápida para la velocidad de adquisición de datos. El protocolo RS-232 requiere de los siguientes parámetros:

Velocidad de comunicación: 19200 bits/s

Paridad: no

Bits por dato: 8

Bits de paro: 1 para el 407

2 para el PMC 200

Es importante confirmar la comunicación entre la computadora y los controladores por medio de las hiperterminales y algún comando de lectura o escritura para cada controlador.

Para leer datos de ambos controladores, es indistinto si la comunicación se encuentra en modo de operación local o remoto; pero para dar instrucciones a los controladores, solamente se puede hacer en modo de operación remoto.

2.2.4.B Software

El operador se comunica con los controladores desde de la computadora mediante instrumentos virtuales programados en LabVIEW, los cuales sirven para trabajar con cualquiera de las máquinas servohidráulicas con las que se cuenta (incluso una manual).

El instrumento *virtual "init & load 1.1.vi"*; se utiliza para iniciar la comunicación con el 407 y el PMC 200 así como configurar el dispositivo de control y los LVDTs y las celdas de carga. El panel de control de dicho instrumento se muestra en la Fig. 2.21.

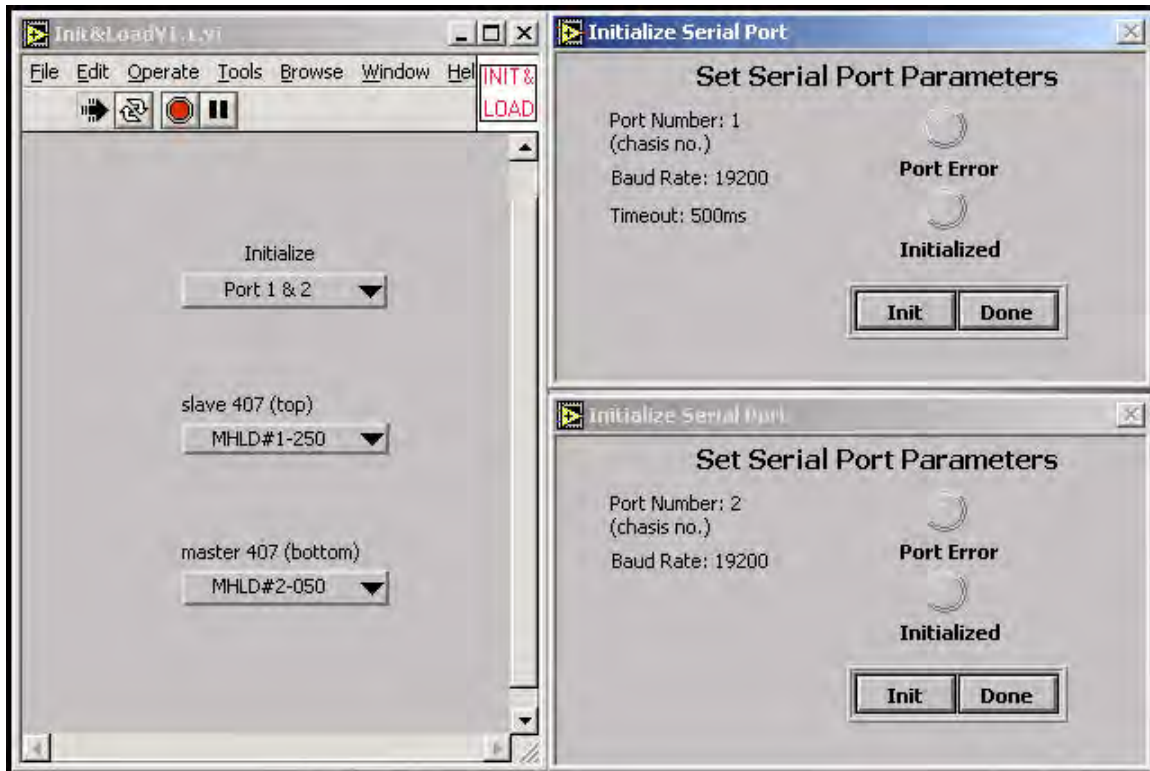


Figura 2.21 Panel de control del instrumento "init & load 1.1.vi".

El instrumento virtual "*data_acq_&_control v_6.vi*", contiene todas las operaciones propias de un experimento de fatiga, las escalas de los LVDTs y celdas de carga y la función del control externo \mathfrak{R} que será explicada en la siguiente Sección. El panel de control de este instrumento se muestra en la Fig. 2.22.

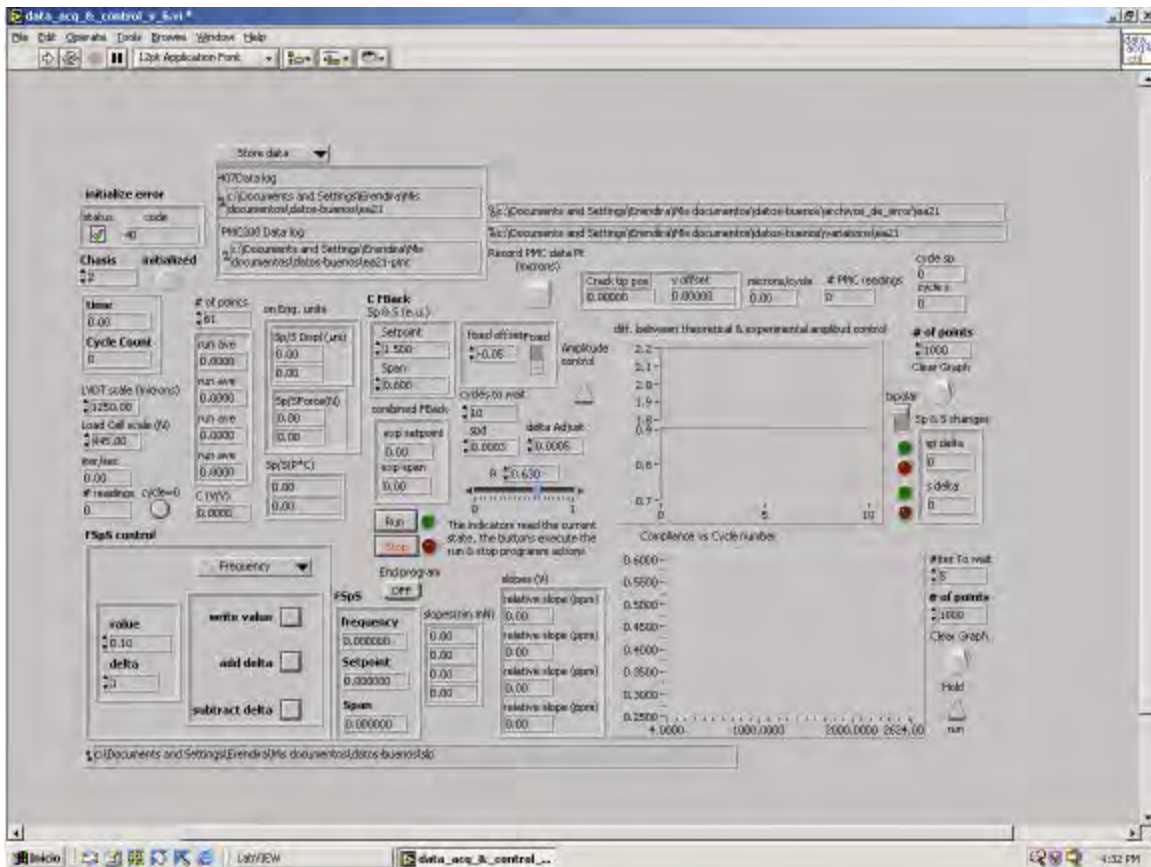


Figura 2.22. Panel de control del instrumento "data_acq_&_control v_6.vi".

Los módulos que conforman este instrumento virtual son:

- i. La escritura de las características de la función de carga como frecuencia, promedio (set point) y amplitud (span); el tipo de función se define en el controlador y siempre es una señal sinusoidal. Sus valores se pueden escribir directamente o ajustar por pequeños incrementos (δ^9).

⁹ La delta es el incremento (paso) mínimo que los componentes electrónicos del controlador aceptan y "n" es un número entero, cuantificado por el instrumento virtual.

-
- ii. Lectura del número de ciclos (N), valores máximos y mínimos de la variación de la fuerza y el desplazamiento.
 - iii. Definición de los parámetros del control externo; es decir, \mathfrak{R} , valor promedio combinado y amplitud combinada.
 - iv. Las operaciones que se ejecutan para mantener el control como el cálculo de los valores promedio, las diferencias y el número de deltas de ajuste (n), para modificar los parámetros del inciso (i). Estas operaciones también incluyen el cálculo de la deformabilidad en cada ciclo de carga.
 - v. La lectura de la posición de la punta de la grieta y el cálculo de la velocidad de propagación por ciclo.
 - vi. Se generan dos archivos diferentes; en uno se conservan los datos ciclo a ciclo del inciso (ii) y en el segundo se guardan los valores promedio junto con la posición de la punta de la grieta.
 - vii. Las gráficas desplegadas muestran las diferencias de los valores experimentales del promedio y la amplitud con los parámetros del control \mathfrak{R} , así como la deformabilidad. Ésta última como función del número de ciclo.

Los detalles y la organización de estos instrumentos virtuales se explican en el anexo sobre LabVIEW de este trabajo.

2.2.4.C Control combinado fuerza-desplazamiento

Como se menciona en la Sección de fatiga (1.2), son muchos los parámetros que intervienen en el comportamiento del material. Para poder analizar el efecto del cambio

en alguno de los parámetros de interés por separado es importante mantener controlados o constantes el mayor número de los parámetros restantes. Mantener constante el valor de $\sqrt{K_I}$ (Ramsteiner, 2001) es una de las opciones más comunes debido a que la variación de la pendiente de $\sqrt{K_I}$ en relación a la longitud de grieta es menor que la variación de los límites máximo y mínimo, $K_{I\max}$, $K_{I\min}$ respectivamente, tanto en control de fuerza como en control de desplazamiento. Además algunas geometrías como “doble viga angular” (DTC) facilitan la obtención de $\sqrt{K_I}$ constante. Algunos estudios han buscado mantener constante la razón de carga (Morelli, 1984), un valor común es $R=0.1$, y la amplitud del esfuerzo (Gregory, 1991), Δs . Esta última opción se ha utilizado para estudiar el efecto de la velocidad y el nivel de carga en la fractura en poliestireno. De hecho, la velocidad de carga definida en este trabajo como $\dot{s} = 2n(s_{\max} - s_{\min})$, donde v es la frecuencia, puede mantenerse constante cuando la amplitud del esfuerzo y la frecuencia se mantienen constantes o cuando se modifican ambos parámetros de manera inversa.

Para mantener constante el factor de intensidad de esfuerzos se hicieron pruebas con geometrías DTC para modificar la influencia del factor geométrico en K_I y se ha propuesto un control combinado entre la fuerza y el desplazamiento (G. Pulos, 1993 y 1993b). Esta condición ocurre en probetas de tensión compacta, pues el factor de intensidad de esfuerzos aumenta conforme se propaga la grieta si se mantiene una carga constante. Por otro lado, K_I disminuye con el aumento de la longitud de la grieta cuando se mantiene constante el desplazamiento. Por lo anterior, un factor de intensidad de esfuerzos constante resulta de mantener una combinación de fuerza y desplazamiento

constante. Una representación sencilla del tipo de control y el comportamiento de K_I y la propagación de la grieta se muestra en la Fig. 2.23.

La función propuesta para el control combinado es la siguiente:

$$(1 - \mathfrak{R})u^* + \mathfrak{R}P^* = V_{FB} = V_c, \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde \mathfrak{R} es el parámetro de combinación, u^* el desplazamiento y P^* la fuerza; estos últimos normalizados por la sensibilidad de los transformadores; V_{FB} es la respuesta combinada de la máquina servohidráulica en Volts que, por definición para un servomecanismo, es igual al comando V_c (también en Volts). El valor de \mathfrak{R} varía de 0 a 1 siendo estos extremos los controles: de desplazamiento con $\mathfrak{R}=0$ y de fuerza con $\mathfrak{R}=1$.

La Ecuación 2.1 implica que para geometrías en las cuales K_I aumenta, existe un valor de \mathfrak{R} tal que K_I permanece constante. Además este control garantiza que la máquina operará de manera estable bajo condiciones de control combinado si trabaja de manera estable bajo control de fuerza y desplazamiento.

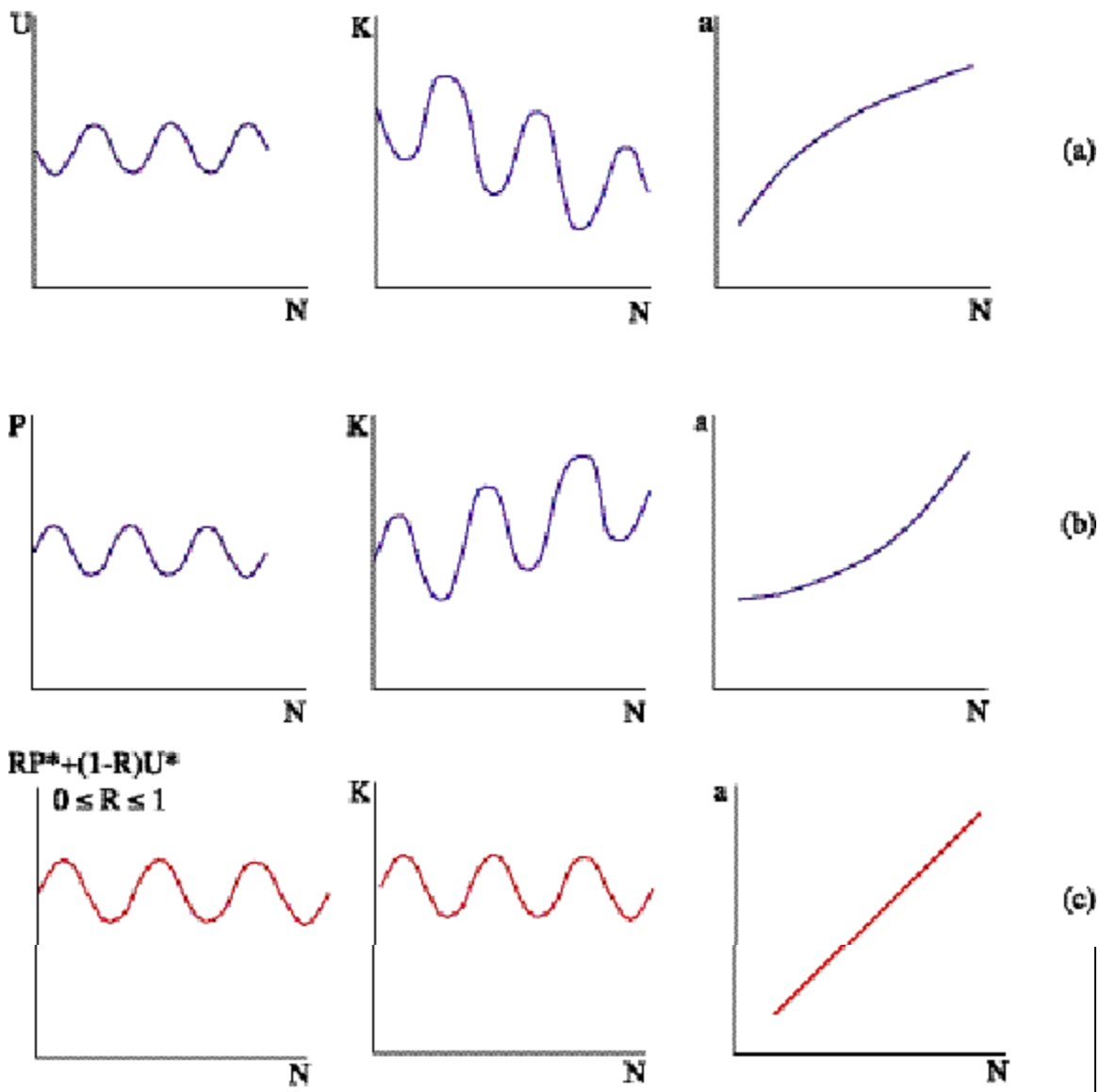


Figura 2.23. Respuesta típica de K_{max} para un material (a) bajo control de fuerza, (b) bajo control de desplazamiento y (c) bajo control combinado.

Debido a que la operación y adquisición de datos del experimento de fatiga se realiza mediante LabVIEW, el control \mathfrak{R} se lleva a cabo desde el mismo instrumento virtual. Este control se aplica tanto al valor promedio (Set point), como a la amplitud (span) de la función de carga y, al igual que en el trabajo de G. Pulos (1993 y 1993b), se utilizan las

respuestas de la celda de carga y el LVDT normalizadas por la sensibilidad propia de cada transductor. Los parámetros de este control pueden modificarse, también, en cualquier instante durante el experimento siempre y cuando los cambios no sean demasiado grandes, por ejemplo, producir un aumento en el valor máximo de la fuerza que alcance el límite de resistencia del material.

Al analizar el comportamiento de $K_{I_{max}}$ bajo control de fuerza, se observa que su variación es mayor a partir de $a/W = 0.5$ (Fig.2.24), por lo cual los mejores resultados de este control, se obtienen con longitudes relativas de grieta menores o alrededor de 0.5. Con base en lo anterior, la mayoría de los experimentos de este trabajo se realizan en un intervalo de $a/W = (0.2, 0.6)$. La gráfica 2.24 muestra el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos bajo control de fuerza con una fuerza máxima de 60 N.

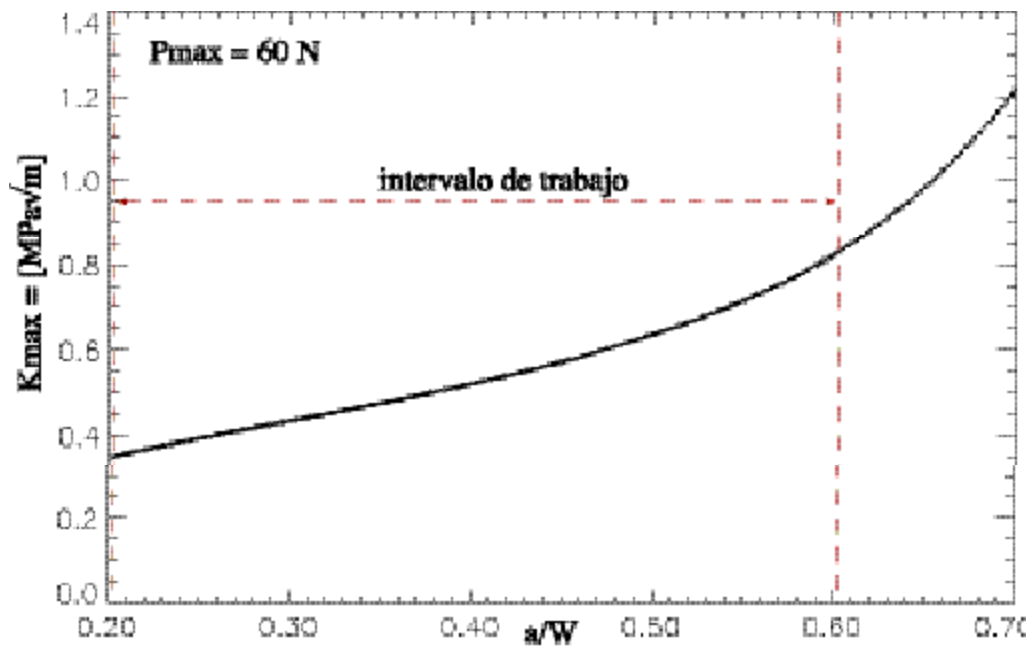


Figura 2.24. Variación del factor de intensidad de esfuerzos bajo control de fuerza para una probeta de 6mm de espesor.

2.2.5 Comparación de la máquina servohidráulica en miniatura con una máquina comercial.

Cuando se comenzó a construir ésta máquina servohidráulica en miniatura, el modelo comercial más pequeño era el Mini Bionix de la marca MTS, el cual utiliza un controlador 407, que es el que se acopló a la máquina en miniatura. Algunas de las características que se pueden comparar de ambas máquinas, se presentan en la tabla 2.2.

Debido a que los principios bajo los que fue diseñada esta máquina provienen de la construida por G. Pulos (1993) también nos referimos a ella como MHLD II por el nombre que le fue dado a la primera máquina, el cual era *Miniature Hydraulic Loading Device*.

Modelo	Mini Bionix (MTS)	MHLD II
Características		
Capacidad máxima de carga	± 25000 N	Hasta ± 2500 N Actualmente es 445 N
Desplazamiento	± 50.0 mm	± 1.25 mm con el LVDT 050MHR ± 6.35 mm con el LVDT 250MHR
Velocidad máxima	230 mm/s	27.6 mm/s
Retraso	7 ms	2.5 ms
Velocidad mínima	0.804 mm/día	0.01 mm/día
Resolución de la celda de carga	0.0863 N	0.0015 N
Resolución del LVDT	0.1526 μm	0.0038 μm
Tipos de control	Control de fuerza Control de desplazamiento	Fuerza, desplazamiento y Control combinado fuerza- desplazamiento
Mínima amplitud en pruebas de fatiga	207 μm	3 μm
Sistema de adquisición de imágenes	NO	SI

Tabla 2.2. Comparación entre el modelo Mini Bionix y la máquina servohidráulica en miniatura MHLD II.

2.3 Desarrollo experimental

2.3.1 El experimento

Para llevar a cabo de manera correcta un experimento de fatiga en la máquina servohidráulica en miniatura descrita en la sección 2.2, es importante la manipulación de la probeta, puesto que una mala alineación de la misma con el tren de carga incorpora un modo de carga diferente al Modo I, que es el que se desea analizar, además de tomar en cuenta los detalles mencionados en la sección 2.2.2.C.

2.3.1.A La probeta y las mordazas

Para una probeta que tiene una geometría CT, las mordazas que se utilizan son tipo *clevis*. Las dimensiones de éstas también se definen en términos de la longitud efectiva de la probeta y deben estar hechas de un material lo suficientemente resistente, por ejemplo acero inoxidable, para no sufrir deformaciones plásticas con los niveles de fuerza que se manejan. El montaje de una probeta de esta geometría con un espesor de 6mm y sus mordazas se muestran en la Fig. 2.25.

Las dimensiones características de la probeta se muestran en la Fig. 1.4. Para las probetas que se utilizaron en estos experimentos los valores para esas dimensiones son:

Longitud efectiva: $W = 40 \text{ mm}$,

Ancho de la probeta: $2h = 32 \text{ mm}$,

Espesor de la probeta: $t = 6 \text{ mm y } 3 \text{ mm}$,

Distancia entre los puntos de carga: $2d = 16 \text{ mm}$,

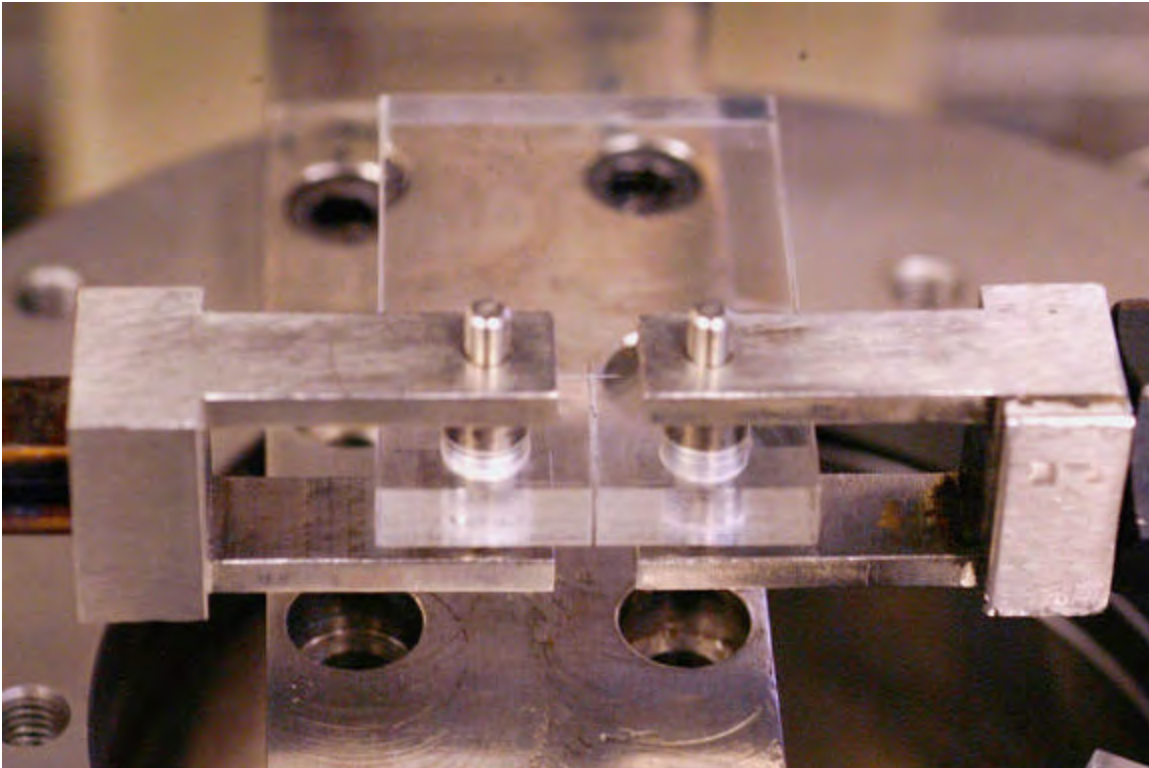


Figura 2.25. Probeta de PMMA con geometría CT y mordazas tipo clevis.

Longitud inicial de la grieta: $a = 8.0 \text{ mm (8000 } \mu\text{m)}$ o $10 \text{ mm (10000} \mu\text{m)}$.

Debido a que el punto de interés es la propagación de una grieta bajo condiciones de fatiga, y no un estudio de acumulación de daño, no es importante la historia previa de carga por lo cual es posible inducir una grieta inicial. Tal longitud está compuesta por una sección maquinada con 0.25mm de ancho además de una grieta que se induce por el impacto de una navaja en el vértice que se forma al final de la sección maquinada. Para utilizar una probeta en los experimentos de fatiga, la grieta que se indujo no debe mostrar torceduras, ramificaciones o desviaciones.

Estos detalles se muestran en la Fig. 2.26. Para los experimentos que se analizaron la longitud inicial fue de 10 mm, por lo cual se aplicó fatiga hasta que la grieta alcanzara la longitud deseada.



Figura 2.26. Probeta de PMMA de 6mm mostrando los detalles del maquinado y la grieta inducida.

El material utilizado son placas de PMMA, poli(metil metacrilato), comercial de 3mm y 6mm de espesor nominal. Parte del maquinado de esta probeta y la grieta inicial se observan en la Fig. 2.29.

Para cada probeta se aplica una carga inicial de 40N, se ajusta manualmente de tal forma que las mordazas estén alineadas entre sí y se hace un barrido a lo largo de su perímetro para medir las desviaciones que presenta; todo esto con ayuda del sistema óptico del microscopio. Esta carga representa entre el 40 y 50% de la carga promedio al inicio de los experimentos, con una longitud de grieta de $10000\mu\text{m}$.

2.3.1.B Parámetros de la función de carga

Los módulos del marco de carga son independientes; requiriendo que los ajustes por alineación del tren de carga se lleven a cabo con uno de los controladores. Dicho controlador permanece fijo durante el experimento y el otro controlador, es el que ejecuta la función de carga y del cual se adquieren los datos durante el experimento.

En ambos controladores, la variable que se tiene seleccionada como parámetro de control es el desplazamiento; por esta razón, los parámetros de la función de carga están definidos en relación a los *LVDT*'s de manera independiente al valor del parámetro \mathfrak{R} . Sin embargo, para tener una misma referencia en todos los experimentos el valor promedio y la amplitud del desplazamiento se modifican de manera tal que al inicio del experimento, el valor promedio de la fuerza es 80 N o 100 N y el valor de la amplitud no es mayor a 30 N.

El tipo de función de carga para todos los experimentos es sinusoidal y todos los resultados que se presentan en este trabajo a excepción de un experimento, se realizaron a una frecuencia de 1Hz. Para uno de los módulos servohidráulicos, las gráficas de las respuestas de la celda de carga y del LVDT se muestran en la Fig. 2.27

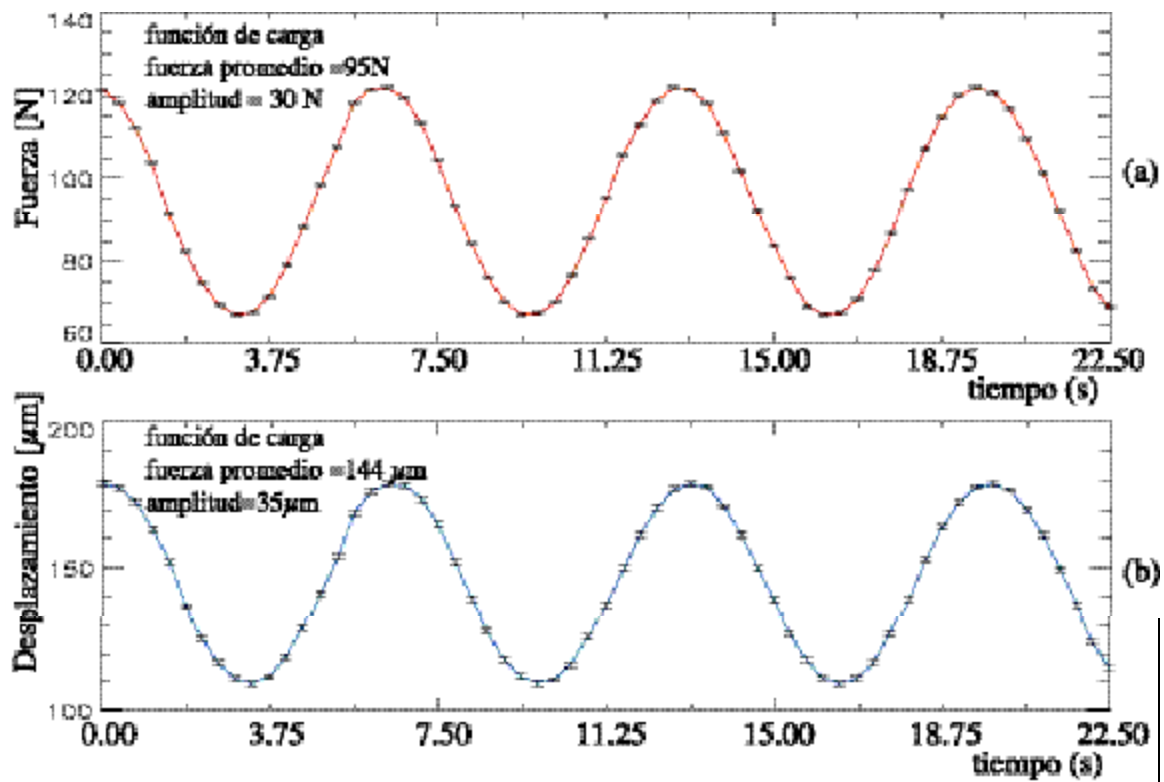


Figura 2.27. Respuesta de la celda de carga (a) y respuesta del LVDT (b) de la máquina servohidráulica en miniatura.

2.3.1.C El control remoto y el almacenamiento de datos

Una vez alineado el tren de carga y establecidas las condiciones iniciales, el instrumento virtual (*vi*) comienza a operar. Desde el panel de control del *vi* se realizan, en caso de ser necesario, los ajustes a los parámetros de la función de carga. Además se pone en operación en control combinado de fuerza-desplazamiento, así como el almacenamiento de datos en los diferentes archivos que genera el instrumento virtual. En el primer archivo captura un conjunto de datos por ciclo; en el segundo archivo almacena un conjunto de datos que incluye las lecturas de la posición de la punta de la grieta cada vez que se lee la posición de la punta de la grieta.

2.3.1.D Seguimiento de la grieta

Para la medición del crecimiento de la grieta se utilizan el sistema óptico del microscopio con el monitor Sony y el sistema de movimiento x, y controlado por el PMC 200. La coordenada de referencia y la posición de la punta de la grieta deben sobreponerse para poder tomar la lectura de esta última desde el panel de control en la computadora. Estos datos se almacenan en el segundo archivo que genera el instrumento virtual. Para tener una referencia sobre el incremento de la longitud de grieta se tienen las retículas de 50 x 50 micras; con esta referencia los datos del crecimiento de la grieta registran incrementos regulares.

2.3.2 Manipulación y tratamiento de datos con PV-WAVE

PV-WAVE es un lenguaje de programación que sirve para la manipulación y visualización de datos gracias a que tienen sofisticadas herramientas matemáticas. Los comandos de PV-WAVE pueden interactuar en pequeñas funciones o complejos programas que generan los resultados que se desean.

El análisis de resultados se lleva a cabo en las siguientes etapas:

I El análisis del crecimiento de la grieta se lleva a cabo con un ajuste por polinomios suaves a trozos (splines) entre la posición de la punta de la grieta y el número de ciclo.

II Este ajuste se evalúa con los números de ciclo almacenados en el segundo archivo para obtener la posición de la punta de la grieta (o longitud de la misma) en cada ciclo de carga que se aplicó durante el experimento. De estos datos se obtiene la velocidad de propagación de la grieta por ciclo (da/dN).

III De todo el conjunto de datos de los máximos y mínimos de la fuerza y desplazamiento, se obtienen también los ajustes en función a los ciclos aplicados que se utilizan para el cálculo de la deformabilidad, factor de intensidad de esfuerzos, valores promedio y amplitudes durante todo el experimento.

IV Los resultados de la velocidad de propagación de la grieta y del comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos se integran al mosaico de la topografía de la superficie para el análisis en conjunto de estos resultados.

2.3.3 Obtención de imágenes de la superficie fracturada

Es importante relacionar la interpretación de los resultados mecánicos con las características básicas de la topografía de la superficie generada por la fractura. Con este propósito se construyen y analizan los mosaicos fotográficos de dichas superficies.

2.3.3.A Construcción del mosaico de la superficie fracturada

Una vez terminados los experimentos que se realizan en una misma probeta, ésta se fractura totalmente aplicando una rampa como función de carga y se selecciona una de las partes para fotografiar la superficie generada por la fractura. Para obtener las fotografías digitales de esta superficie se utiliza el mismo sistema óptico del microscopio y la computadora SG. Para ello, se monta la probeta sobre un pequeño soporte que alinea la superficie fracturada perpendicular al eje óptico. Se lleva a cabo un barrido sobre la superficie con otro instrumento virtual llamado “*pmc_move.vi*” que opera automáticamente el controlador PMC200; el panel de control de este instrumento se presenta en la Fig. 2.28. Este instrumento permite definir el intervalo de movimiento del controlador en ambas direcciones pero garantizando también que las imágenes puedan

sobreponerse. En la sección de la grieta propagada por fatiga se fotografía a todo lo ancho de la probeta.

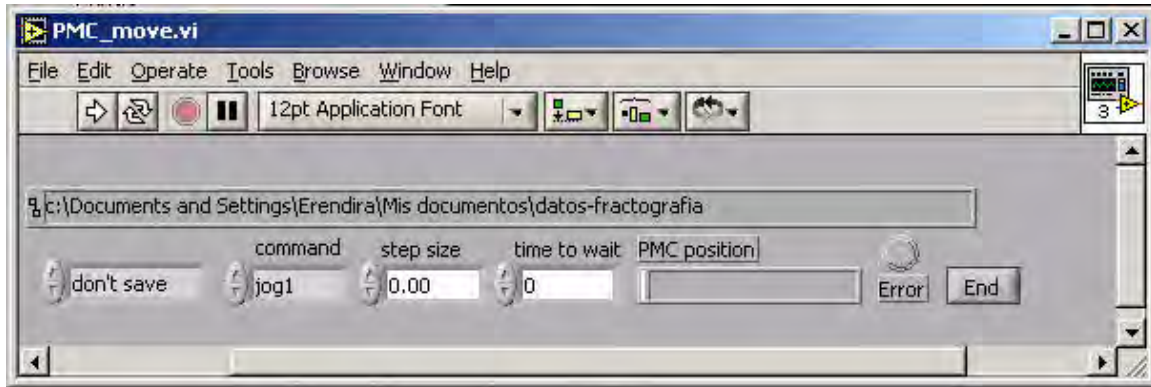


Figura 2.28. Panel de control del instrumento “*pmc_move.vi*”.

Cada mosaico de una superficie se conforma de alrededor de 110 fotografías, cada una con una ampliación de 100x y una escala en micras que indica el segmento fotografiado de la probeta.

A esta imagen (o mosaico) se integran las gráficas con los resultados del factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de las grietas (da/dN) que se obtienen de cada experimento, ello con el propósito de facilitar el análisis de los resultados presentados en el siguiente Capítulo.

El mosaico de la Fig. 2.29 incluye una sección del área maquinada de la probeta. Esta región se fotografía para todas las probetas analizadas y se utiliza como una referencia para relacionar las fotografías y la escala con una misma ampliación.

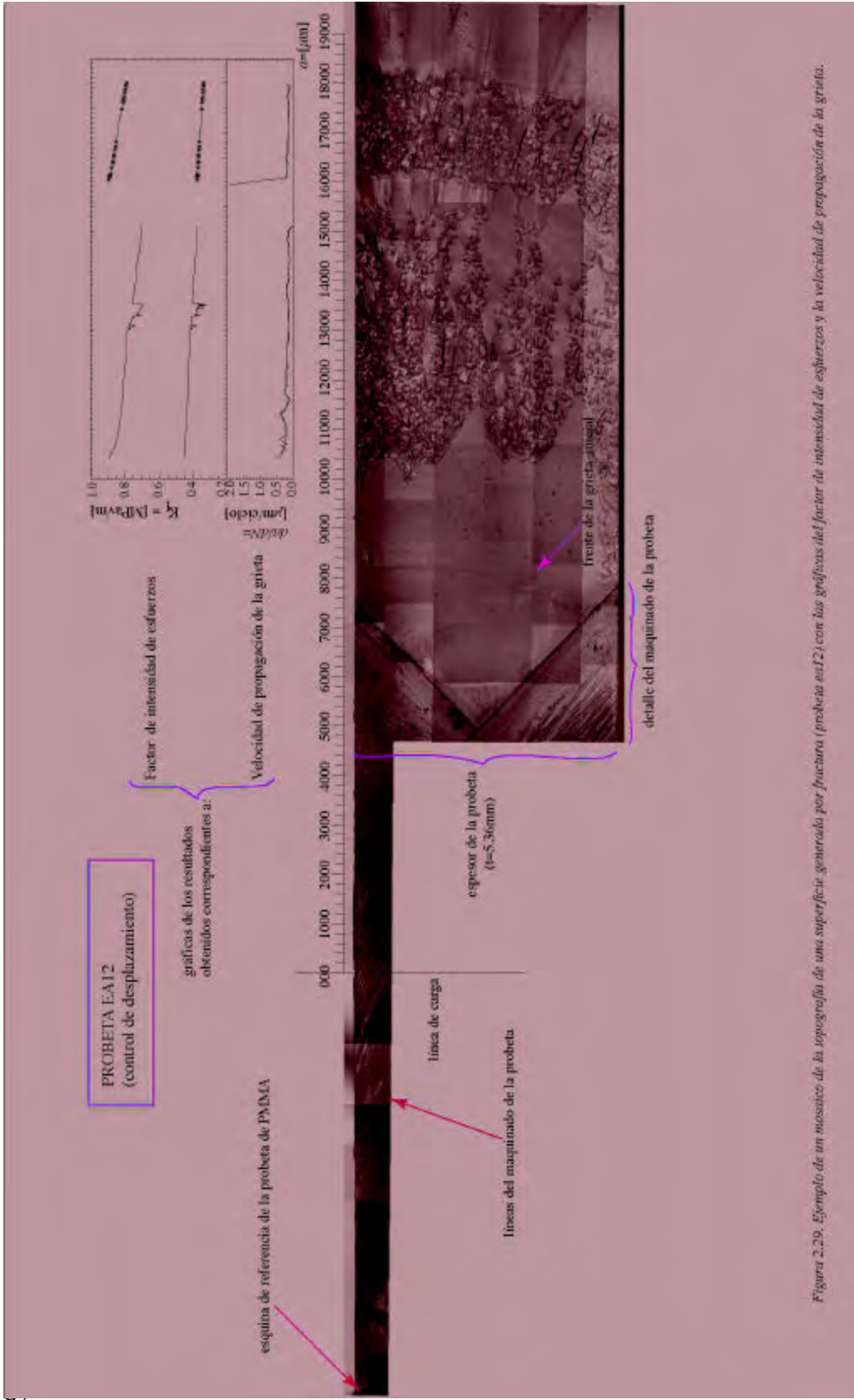


Figura 2.29. Ejemplo de un masisco de la topografía de una superficie generada por fractura (probeta en12) con las gráficas del factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de la grieta.

3 Resultados

Las probetas que se utilizaron en los experimentos se fabricaron a partir de placas de PMMA comercial, marca Rohm and Hass. Éstas se produjeron en un centro de maquinado asistido por computadora (control numérico CNC). De acuerdo a las dimensiones de la probeta, el maquinado no afecta el comportamiento de la grieta que se propaga o de la zona de deformación plástica en la punta de la misma a menos que se presenten desviaciones en la ranura a partir de la cual se induce la grieta; en este caso la probeta se descarta.

La respuesta de un polímero sometido a condiciones de fatiga es influenciada por el tipo de control de carga que se aplica. Los resultados que se presentan en este capítulo comparan la respuesta del material, representada por el factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de la grieta, bajo condiciones de control de fuerza, desplazamiento y control combinado fuerza-desplazamiento (\mathfrak{R}).

Los resultados que se presentan a continuación resumen el comportamiento de un gran número de experimentos. La mayoría de estos experimentos se llevó a cabo con control de desplazamiento (ver Sección 1.2.2); otros se realizaron con control de fuerza desde el controlador 407 o con control de fuerza desde el control externo, con $\mathfrak{R} = 1$, y otros se llevaron a cabo con control combinado, $0 \leq \mathfrak{R} \leq 1$ con el propósito de encontrar el valor de \mathfrak{R} que genera un factor de intensidad de esfuerzos constante (ver sección 2.2.4.C).

El comportamiento de las gráficas de la Ley de Paris para las probetas de 3 y 6 mm de espesor se relaciona con las transiciones en la topografía de las superficies generadas por fractura.

Algunos fenómenos especiales tales como los cambios en la rugosidad de las superficies, la generación de bandas, la desaceleración del crecimiento de la grieta y el análisis del perfil de la grieta se relacionan con estudios anteriores que presentaron casos similares en PMMA o en algún otro termoplástico; se definen las condiciones que dan lugar a la presencia de superficies lisas y rugosas. También se analiza el crecimiento de la grieta a altas velocidades y el comportamiento de la deformabilidad con respecto al tiempo y a la carga.

3.1 Comportamiento del Factor de Intensidad de Esfuerzos

Aunque históricamente se consideró a $\sqrt{K_I}$ como el parámetro dominante en el comportamiento de una grieta tanto para metales como para termoplásticos, Gregory y Botsis (1991) proponen que el factor dominante en el comportamiento de la propagación de una grieta en PS es $K_{I_{max}}$; Lang et al.(1984) determinan que $K_{I_{max}}$ tiene mayor influencia que K_{Im} o $\sqrt{K_I}$ en el crecimiento de la zona de proceso y por ende, en la propagación de una grieta en PMMA.

Con base en lo anterior, en este trabajo se considera que el nivel máximo del factor de intensidad de esfuerzos ($K_{I_{max}}$) es el parámetro dominante en el comportamiento de una grieta en un termoplástico, como el PMMA. Esta afirmación se comprueba con el análisis de la Fig. 2.29; en la primera gráfica se observa que $\sqrt{K_I}$ varía en un intervalo muy

pequeño entre el final del primer experimento y el principio del segundo, aproximadamente en $a = 15000$ y $a = 16000$ μm . El cambio de condiciones entre el primer y segundo experimentos produce que la grieta se propague aproximadamente 1000 μm con una topografía diferente al primer experimento, se forman pequeñas estrías en dirección de la propagación de la grieta. Una vez comenzado el segundo experimento la superficie es nuevamente rugosa; esto se asocia al cambio en el nivel de $K_{I\text{max}}$, que es el único parámetro que cambia notablemente entre un experimento y otro.

En general el intervalo de valores de $K_{I\text{max}}$, para todos los experimentos varía entre 0.6 a 1.15 MPavm, además de ser mayor al intervalo de K_I , el cual es de 0.4 a 0.6 MPavm.

3.2 Variación del factor de intensidad de esfuerzos con cambios en longitudes de grieta

Para una geometría determinada, el factor de intensidad de esfuerzos está dado por el producto de la fuerza y una función de la geometría. Por lo general, K_I crece conforme la longitud de grieta aumenta. Se han realizado investigaciones para encontrar geometrías para las cuales K_I permanece constante aunque la grieta se propague; e.g., véase el trabajo de Mostovoy y Ripling (1967). También se ha utilizado una retroalimentación combinada para mantener K_I constante (G. Pulos 1993 y 1993b) como la que se utilizó en este trabajo y se desarrolló el análisis de la variación en las pendientes de estos parámetros.

3.2.1 Control de fuerza

Para experimentos bajo control de fuerza donde P_{max} es el valor de la fuerza en el máximo de la función de carga, la evolución de $K_{I\text{max}}/P_{\text{max}}$ en función de a se presenta para probetas de dos espesores distintos, 6 mm y 3 mm (Fig.3.1). De acuerdo con el nivel de

fuerza aplicado en cada experimento, la curva se desplaza hacia un mayor o menor nivel de esta relación. Para sobreponer ambas curvas el valor de la fuerza es el doble para las probetas de 6 mm de espesor, que para las de 3 mm de espesor.

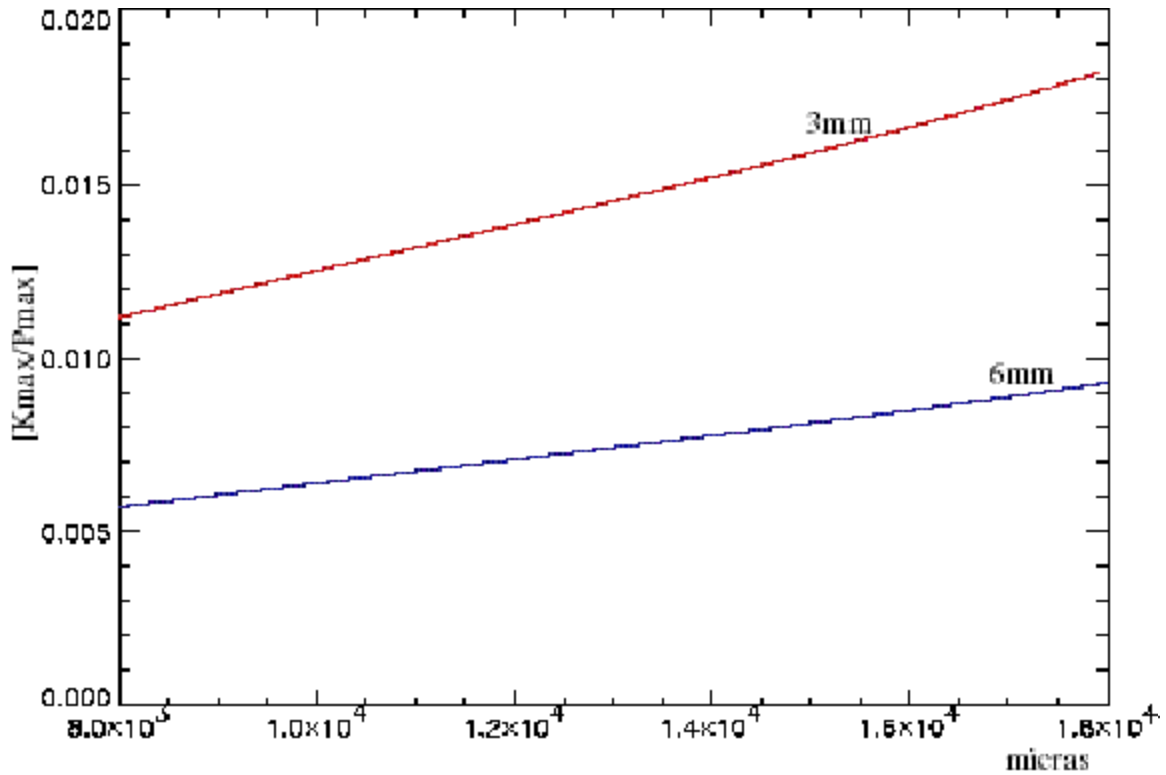


Figura 3.1. Comportamiento de K_{Imax}/P_{max} en función de la longitud de la grieta para 3mm y 6mm.

En los experimentos bajo control de fuerza, el comportamiento de K_I es el mismo, ya sea que el control de fuerza se haya definido previamente en el controlador 407 o que se lleve a cabo con el controlador externo (desde la computadora con LabVIEW) con $\mathfrak{R} = 1$.

Algunos resultados de experimentos con $\mathfrak{R} = 1$ y $\mathfrak{R} = 0$ que corresponden respectivamente a control de fuerza y desplazamiento para un intervalo de longitud de

grieta similar se muestran en la Fig. 3.2. El Caso (a) corresponde a una fuerza constante y por tanto K_I aumenta.

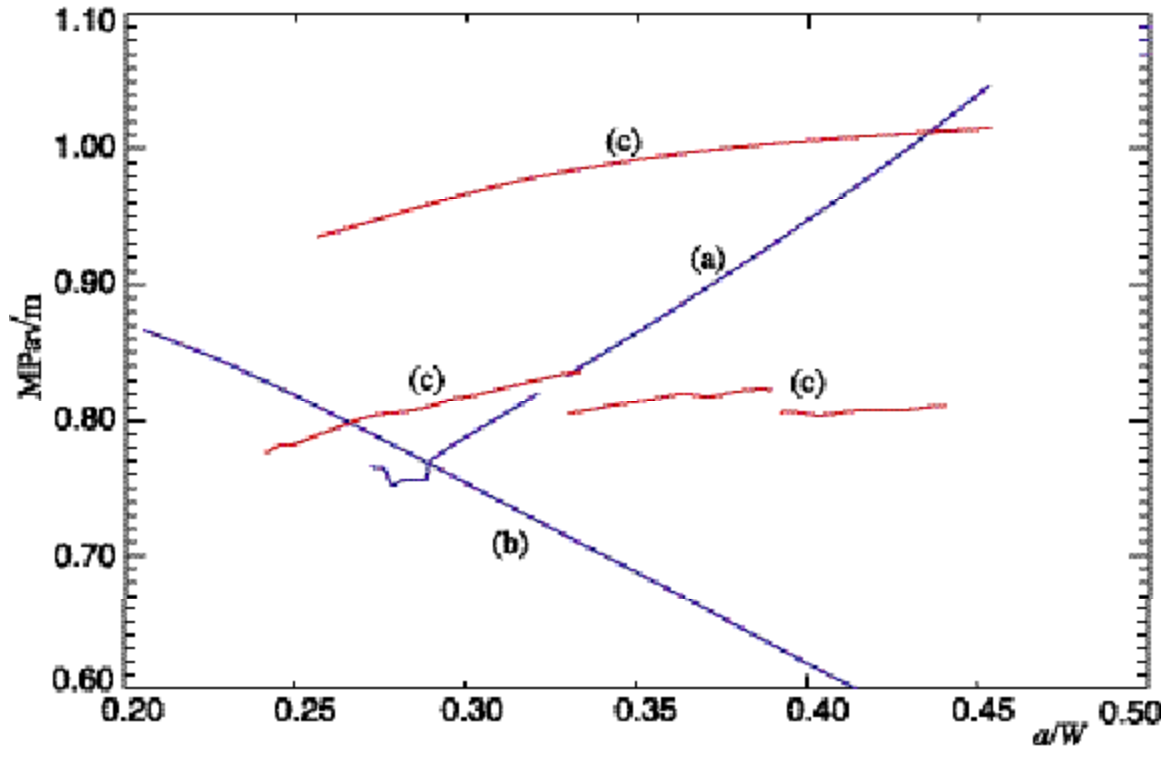


Figura 3.2. Comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos K_I bajo condiciones de (a) control de fuerza (probeta ea13), (b) control de desplazamiento (probetas ea8 y ea12) y (c) control combinado (probetas ea22 y ea23 y ea24) como función de la longitud relativa de la grieta.

3.2.2 Control de desplazamiento

Bajo control de desplazamiento, K_I disminuye conforme la longitud de grieta aumenta por el aumento de la deformabilidad. Este caso se observa en la Curva (b) de la Fig. 3.2.

3.2.3 Control combinado fuerza-desplazamiento

Si, en vez de controlar la fuerza o el desplazamiento, se controla una combinación lineal de ambos ($0 < \mathfrak{R} < 1$), se logra que la variación de K_I sea menor conforme aumenta la longitud de grieta. Este caso se muestra en la Fig. 3.2 con el Caso (c).

Para cuantificar la variación en el factor de intensidad de esfuerzos como función de la longitud de grieta, se puede calcular la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de K_I (o ΔK) para un aumento dado de la longitud de grieta. De un estudio teórico previo desarrollado por G. Pulos (1993) se obtiene la gráfica de la Fig. 3.3 donde se muestra que tanto para experimentos bajo control de fuerza como desplazamiento, al evaluar el cambio en el factor de intensidad de esfuerzos para avances en la grieta de un 5% de la longitud equivalente de la probeta, se tiene una variación aproximada de 10%. También puede evaluarse la variación bajo un control combinado de fuerza y desplazamiento con distintos valores de \mathfrak{R} . De acuerdo a este análisis, esta variación puede disminuir hasta dos órdenes de magnitud (ser menor a 0.1%). Ello confirma las ventajas de obtener el factor de intensidad de esfuerzos constante a partir de un control que mantenga una combinación de fuerza y desplazamiento.

El análisis de la variación de $K_{I_{max}}$ en los experimentos realizados bajo los distintos tipos de control se presentan en la Fig. 3.4. Los valores con los cuales se ha obtenido un resultado casi idéntico en distintas probetas y la mejor aproximación para $K_{I_{max}}$ constante es $\mathfrak{R} = 0.62$ y 0.63 .

Es importante notar que con el mismo valor de \mathfrak{R} , la variación de $K_{I_{max}}$ disminuye conforme aumenta la longitud de la grieta. Este comportamiento se observa también para

diferentes niveles de $K_{I\max}$ como es el caso de los 3 experimentos de las Probetas ea22 y ea23 con $K_{I\max}$ alrededor de 0.82 MPavm, que puede compararse con el experimento de $K_{I\max}$ mayor a 1.0 MPavm de la Probeta ea24. En ambos casos, $K_{I\max}$ se vuelve más fácil de controlar conforme aumenta la longitud de grieta de tal forma que la variación de $K_{I\max}$ disminuye en estos experimentos hasta en un orden de magnitud con respecto a la variación que se tiene bajo control de fuerza o bajo control de desplazamiento.

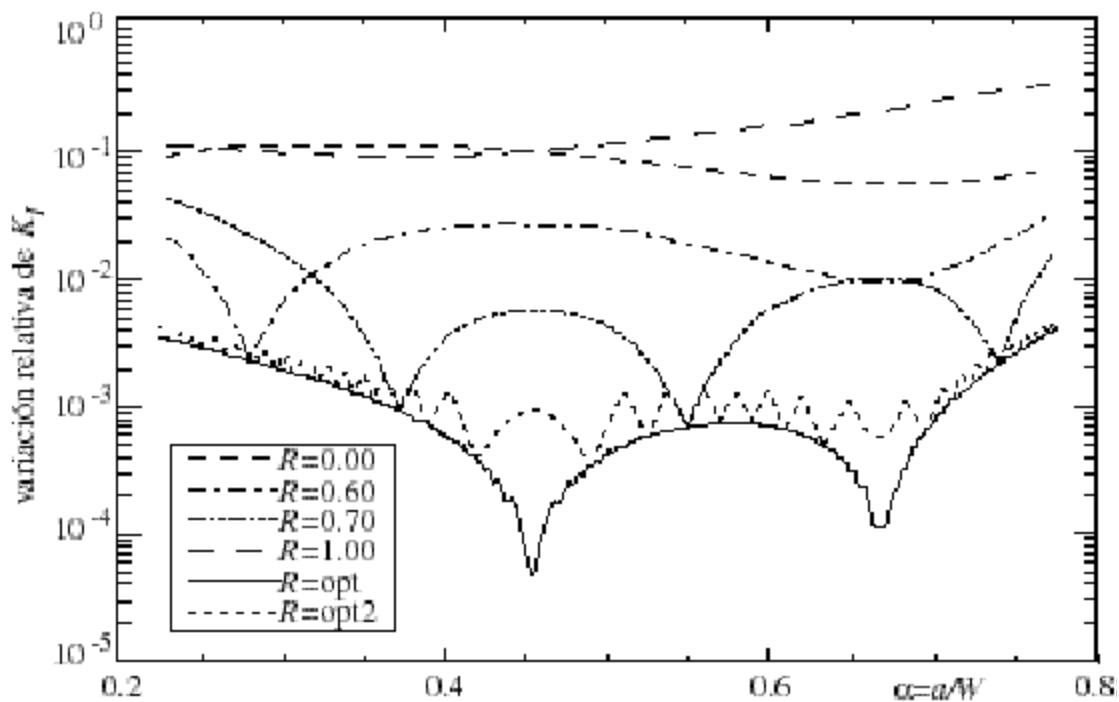


Figura 3.3. Aproximación teórica de la variación del factor de intensidad de esfuerzos en función de la longitud relativa de la grieta (G. Pulos, 1993b).

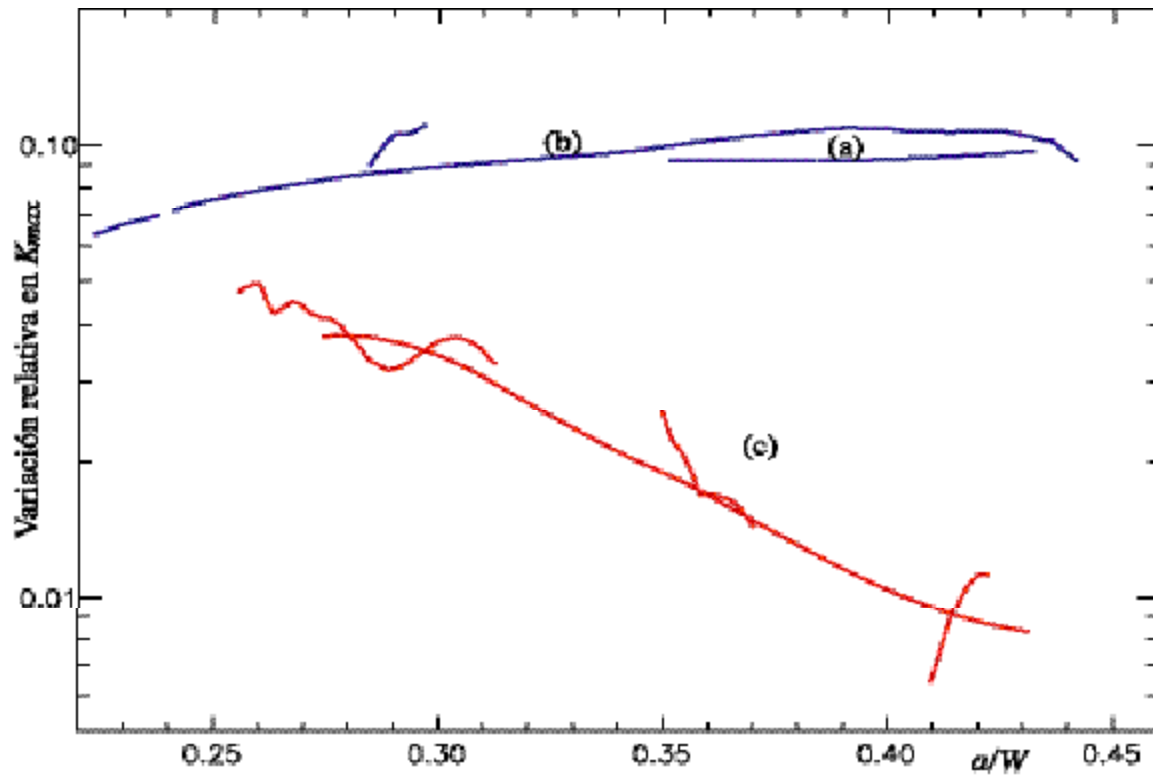


Figura 3.4. Variación relativa del factor de intensidad de esfuerzos en función de la longitud relativa de la grieta para las probetas bajo (a) control de fuerza (ea13); (b) control de desplazamiento (ea12, ea8); (c) control combinado con $\mathfrak{R} = 0.62, 0.63$ (ea24, ea23, ea22).

3.3 Velocidad de propagación de una grieta

Durante la ejecución de un experimento se obtiene un estimado de la velocidad de propagación de la grieta mediante las mediciones de la posición la punta de la grieta y el correspondiente número de ciclos. Posterior al experimento, la velocidad se calcula del ajuste entre la longitud de la grieta y el número de ciclos. En general, las velocidades de propagación de todos los experimentos se encuentran en un intervalo entre $0.2 \mu\text{m/s}$ y $2 \mu\text{m/ciclo}$.

3.3.1 Experimentos bajo control de fuerza

El crecimiento de una grieta se acelera a medida que avanza la punta de la grieta bajo control de fuerza debido a que para la geometría utilizada, el factor de intensidad de esfuerzos aumenta conforme aumenta la longitud de grieta y el material es menos resistente por el aumento de su deformabilidad. Una gráfica de la longitud de la grieta en relación con el número de ciclos aplicados muestra que se requieren de menos ciclos para que la longitud de la grieta aumente “visiblemente”. Tal es el caso de la Curva (b) en la Fig. 3.5.

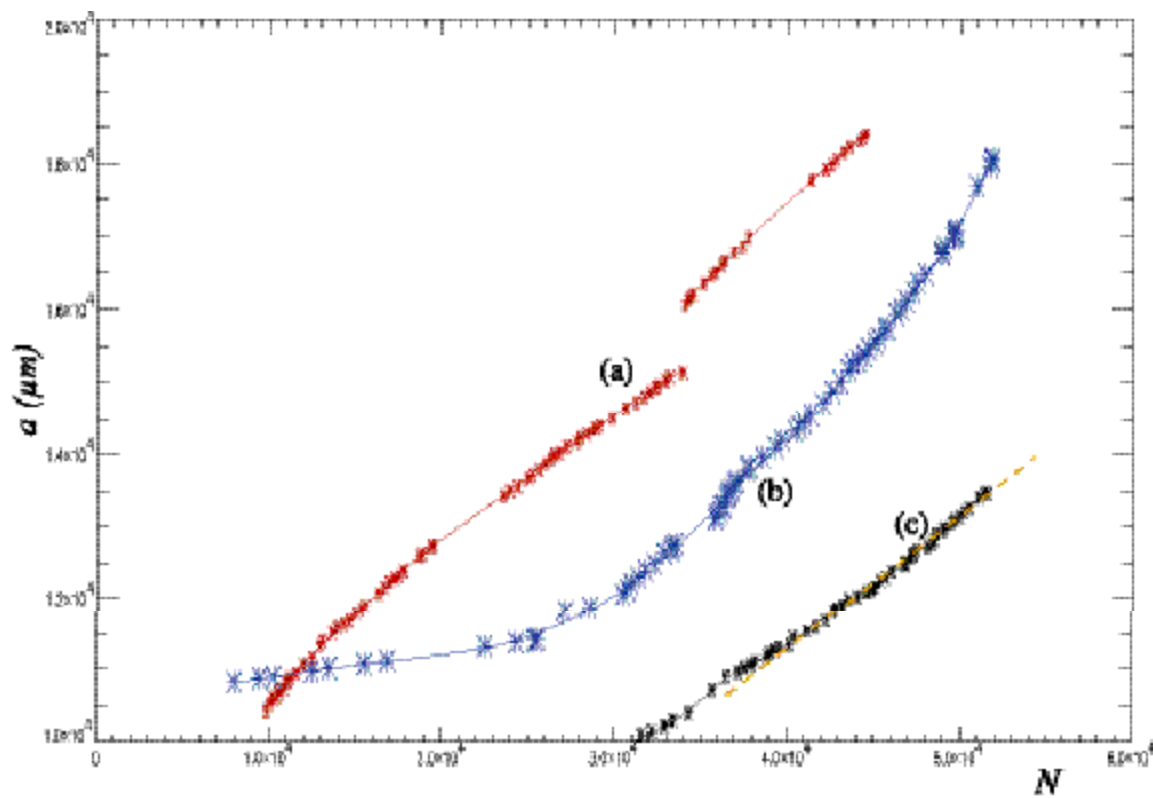


Figura 3.5. Longitud de una grieta, a (en micras), en función del número de ciclos aplicados (N) bajo condiciones de: (a) control de desplazamiento (Probeta ea8); (b) control de fuerza (Probeta ea13); y (c) control combinado (Probeta ea23).

Nótese que en la Curva (a) se observa un salto en la longitud de la grieta debido a la propagación de ésta durante el cambio de condiciones para ejecutar el segundo experimento mientras no se aplicaba ningún ciclo de carga (ver Fig. 2.29 en el intervalo de $a = (15000, 16000) \mu\text{m}$).

3.3.2 Experimentos bajo control de desplazamiento

Bajo este tipo de control se presenta el comportamiento opuesto al caso anterior; el crecimiento de la grieta se desacelera debido a que el factor de intensidad de esfuerzos disminuye conforme se aplican más ciclos de carga por el aumento en la longitud de la grieta como se observa en la Curva (a) de la Fig. 3.5.

La menor velocidad de propagación de la grieta que se puede registrar sin que el avance de la grieta se detenga es de $0.06\mu\text{m}/\text{ciclo}$ con un factor de intensidad de esfuerzos $K_{\text{Imax}} = 0.58 \text{ MPavm}$ para probetas de 6mm de espesor.

3.3.3 Experimentos bajo control combinado fuerza-desplazamiento

Bajo un control combinado se espera que la velocidad de propagación de la grieta se mantenga constante o que está varíe muy poco. La evolución de la longitud de grieta con relación al número de ciclos, que corresponde a la Curva (c) de la Fig. 3.5, se asemeja más a una recta sobre todo a partir de una longitud, a , mayor a $11000\mu\text{m}$. Esta afirmación se relaciona con el análisis del comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos con el control combinado. En este caso se utilizó una $\mathfrak{R} = 0.63$.

3.3.4 Propagación de una grieta a altas velocidades

En algunos casos, cuando el factor de intensidad de esfuerzos máximo es cercano al valor crítico, K_{Ic} (1.3 MPavm para el PMMA), la grieta avanza a velocidades cercanas a 40

$\mu\text{m}/\text{ciclo}$; este caso se presentó para experimentos con $K_{I\text{max}} = 1.15 \text{ MPavm}$. Bajo estas condiciones se pueden tomar algunas lecturas de la posición de la longitud de grieta, pero se tiene la limitación de la velocidad máxima del sistema de movimiento x - y para alcanzar la posición de la punta de la grieta.

Cuando una grieta se propaga a altas velocidades, la topografía de la superficie generada se altera drásticamente. De una superficie total o parcialmente rugosa, cambia a una muy suave en la cual se nota la formación de estrías en dirección de la propagación de la grieta. Esta situación se observa en el caso de la Probeta ea19 (Fig. 3.6). En la última sección del primer experimento correspondiente a la región donde $a = (16000 \text{ a } 17300 \mu\text{m})$, se aplicó un control combinado con $\mathfrak{R} = 0.63$. Bajo estas condiciones y conforme se propaga la grieta, $K_{I\text{max}}$ y $K_{I\text{min}}$ aumentan en menor proporción que bajo control de fuerza, y se genera además una superficie rugosa. Para el segundo experimento, que inicia en $a = 17300 \mu\text{m}$, se tiene un aumento en $K_{I\text{max}}$ hasta un valor cercano a 1.15 MPavm que resulta de un cambio en la carga promedio; como consecuencia de este aumento, la grieta se propaga demasiado rápido generando la superficie estriada. Para evitar que $K_{I\text{max}}$ aumente hasta K_{Ic} se apaga el control \mathfrak{R} y se continúa bajo control de desplazamiento; este cambio produce que disminuyan el factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de la grieta como lo muestran las gráficas acopladas a una sección del mosaico fotográfico de la superficie generada por la fractura.

Cabe hacer notar que el cambio gradual de la topografía de la superficie cuando $a = 22000 \mu\text{m}$ se produce sin modificaciones en las condiciones externas (de carga); además,

la velocidad de propagación se reduce a menos de 5 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ y después a valores comunes para estos experimentos (por debajo de 1 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$).

El valor máximo del factor de intensidad de esfuerzos se modifica inmediatamente por el cambio de condiciones en la función de carga como se observa al principio del segundo experimento. Sin embargo, la velocidad de propagación de la grieta y la topografía de la superficie generada por la fractura no reflejan estos cambios al mismo tiempo, sino con un retraso de aproximadamente 500 μm . Esta situación puede interpretarse como efectos de memoria del PMMA.

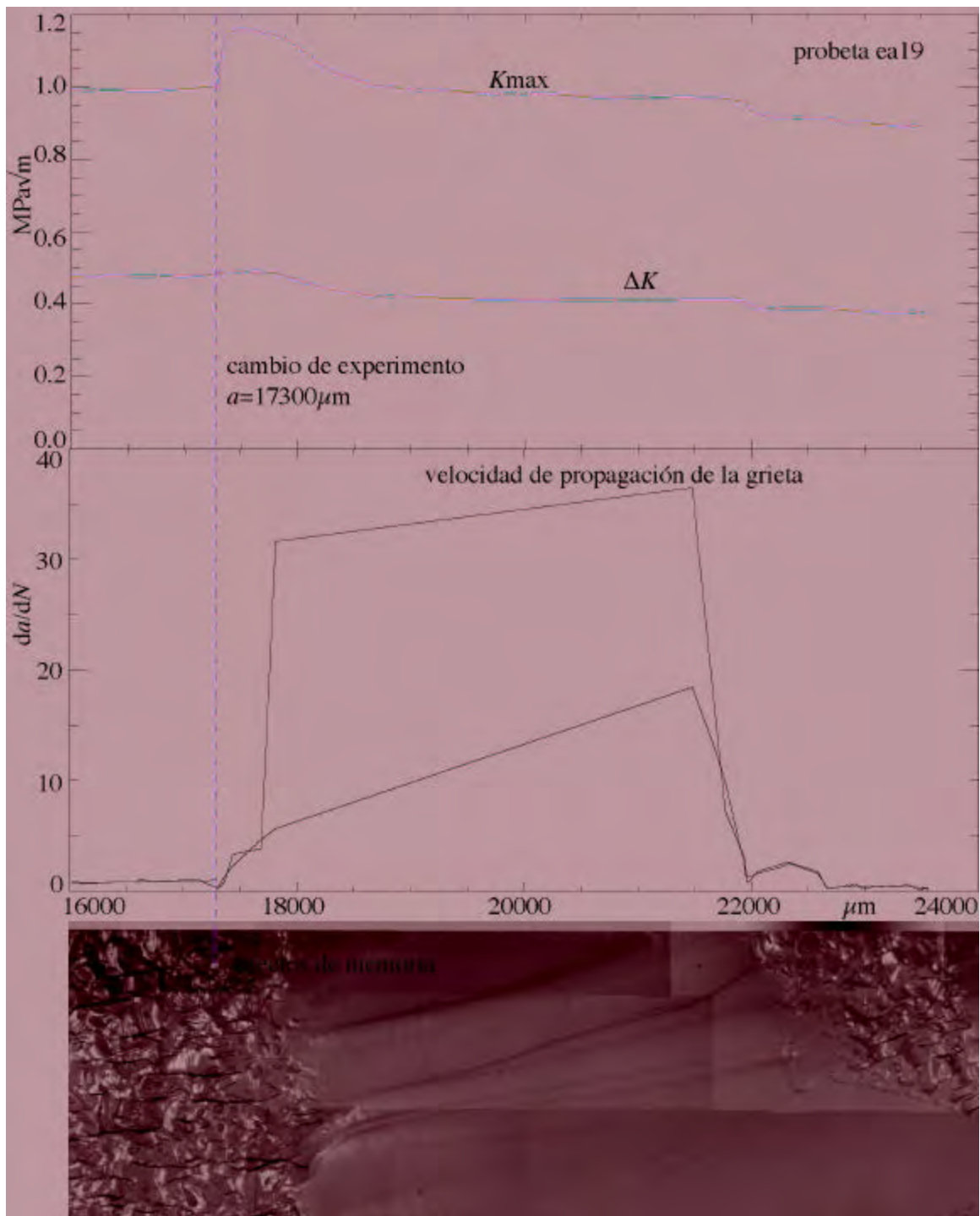


Figura 3.6. Probeta ea19. Variación del factor de intensidad de esfuerzos y la velocidad de propagación de la grieta relacionados con la topografía de la superficie fracturada.

3.4 Ley de Paris

Como se menciona en la sección 1.2.3, para la construcción de la Ley de Paris se utilizan generalmente el intervalo del factor de intensidad de esfuerzos o el máximo, \sqrt{K} o K_{Imax} respectivamente. Como en este trabajo se identifica a K_{Imax} como factor principal, las gráficas de Paris para las probetas de los dos diferentes espesores que se analizaron se presentan en función de este parámetro.

3.4.1 Ley de Paris para 3mm

En una curva de $\text{Log}(da/dN)$ en función de $\text{Log}K_{\text{Imax}}$, como se muestra en la Fig. 3.7, los experimentos que se llevaron a cabo con probetas de 3mm presentan un comportamiento diferente del esperado para una segunda región del diagrama de Paris, a lo largo de la cual los datos pueden ajustarse a una recta. Por esta razón los resultados se separan en dos regiones y se realizan diferentes ajustes; estas regiones se relacionan claramente con la topografía de la superficie generada por la fractura. La región en la cual la velocidad de propagación varía muy poco se analiza en la siguiente sección.

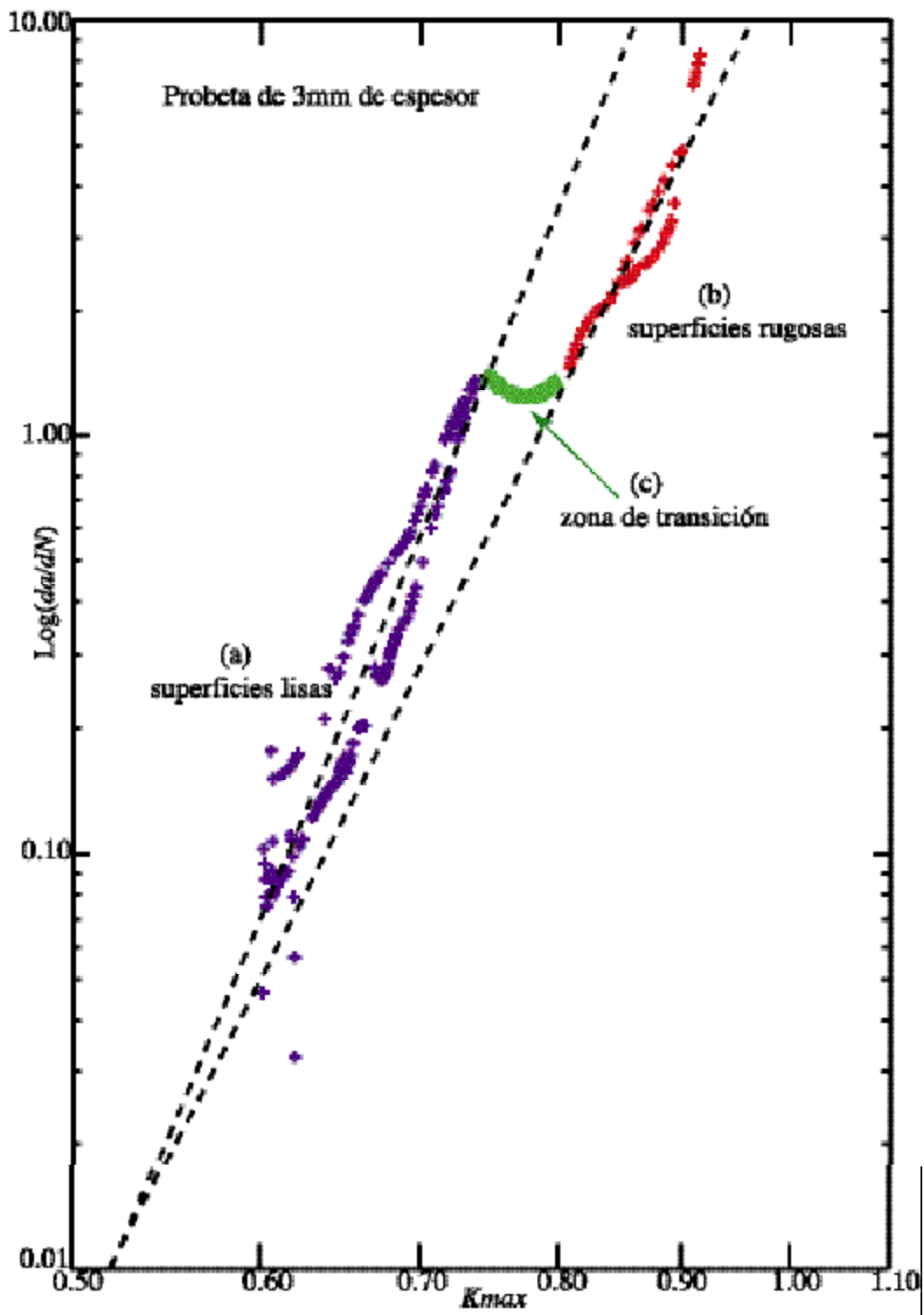


Figura 3.7. Gráfica de la Ley de Paris para probetas de PMMA de 3mm de espesor.

La primera región (a) del diagrama de Paris, corresponde a las condiciones cuando la grieta se propaga a velocidades menores a 1.5 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ y la superficie generada por la fractura es totalmente lisa y suave, como lo muestra la Zona (A) de la Fig. 3.8. Entre 11800 y 15800 μm , el ajuste sobre estos datos se define por la ecuación de Paris

$$\frac{da}{dN} = 76.1 \times (K_{\text{Imax}})^{13.7}. \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Para la otra región (b) en el diagrama de Paris, la velocidad de propagación de la grieta es mayor a 1.7 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ y K_{Imax} es mayor a 0.8 MPavm. En este caso la ecuación de Paris se expresa como

$$\frac{da}{dN} = 15.2 \times (K_{\text{Imax}})^{11.2}. \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Esta región corresponde a una superficie totalmente rugosa como la que se muestra en la Zona (B) de la Fig.3.8.

Cabe mencionar que el patrón de rugosidades entre 3 y 6mm es diferente. Para probetas de 3mm las rugosidades se presentan en combinación con la formación de estrías. Los datos presentados con las fotografías de las superficies fracturadas están graficados con respecto a la longitud de la grieta.

3.4.2 Zonas de transición en las gráficas de la ley de Paris para 3mm

La región del diagrama de Paris para 3mm en la cual la velocidad de propagación de la grieta varía muy poco (c) corresponde a una zona de transición de la topografía de la superficie fracturada. En esta zona aparecen las áreas rugosas comenzando por un pequeño vértice. Se considera que esta transición, para experimentos que se llevaron a

cabo a 1 Hz, se presenta cuando $K_{I_{\max}} = 0.72$ MPavm y la velocidad de propagación es aproximadamente $1.7\mu\text{m/ciclo}$. De estudios anteriores (G. Pulos, 1993) se encontró que a 3.2 Hz esta transición se presenta a 0.61 MPavm; el patrón de transición de la superficie es muy similar en ambos casos. Para los experimentos de 1Hz esta transición se presenta en la Zona (C) de la Fig. 3.8.

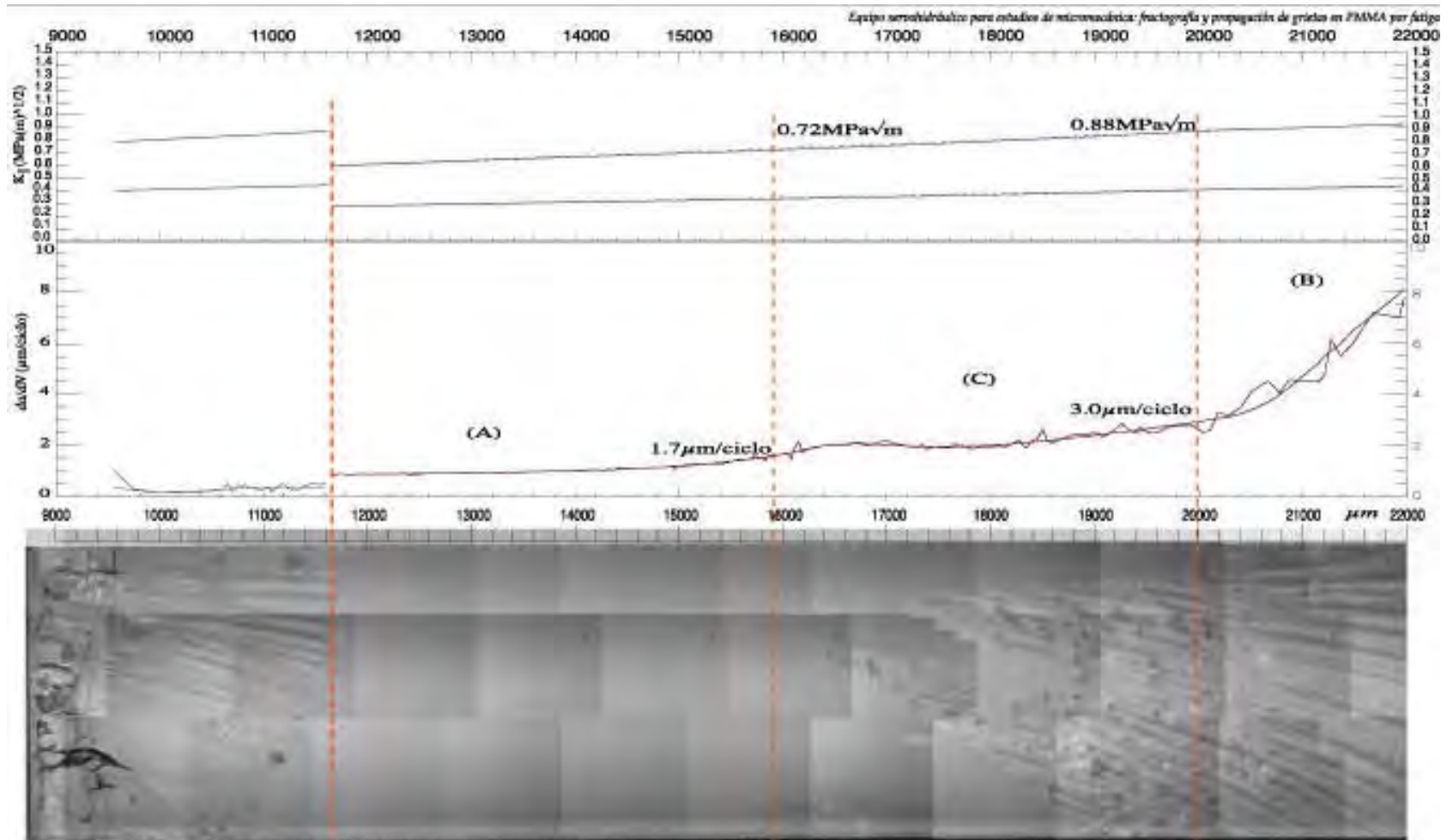


Figura 3.8 Topografía de una superficie generada por fractura para una probeta de 3mm de espesor (ga14) en la cual se muestran los tres tipos de superficie; en la sección (A) lisa, en la (B) rugosa y en la (C) zona de transición (escala aprox 30x).

Ley de Paris para 6mm

Para las probetas de 6mm el comportamiento de la mayoría de los experimentos puede ajustarse mediante una sola curva (Curva (a) de la Fig. 3.9). Aparentemente, el ajuste corresponde a un diagrama de Paris que incluye las tres regiones, desde una aproximación del valor del umbral, K_{Ith} , por las bajas velocidades de propagación, hasta una aproximación de K_{Ic} . Sin embargo, el máximo valor de $K_{I_{max}}$ que se alcanza sobre este ajuste (0.9 MPavm) es menor al máximo obtenido para 3mm (0.93 MPavm) y bastante menor al K_{Ic} del PMMA (1.3 MPavm). La ecuación de Paris para la región de la curva en la cual las pendientes no son infinitas es:

$$\frac{da}{dN} = 1.7 \times (K_{I_{max}})^{10^4}. \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Un aspecto importante es que todos los valores de este ajuste corresponden a condiciones que generan superficies rugosas o transiciones entre superficies lisas y rugosas en las cuales predomina la fracción rugosa.

Los datos de da/dN y $K_{I_{max}}$ que generan superficies lisas, podrían superponerse con algunos de los datos de 3mm. Sin embargo, no se tienen suficientes argumentos o datos para poder compararlos detalladamente.

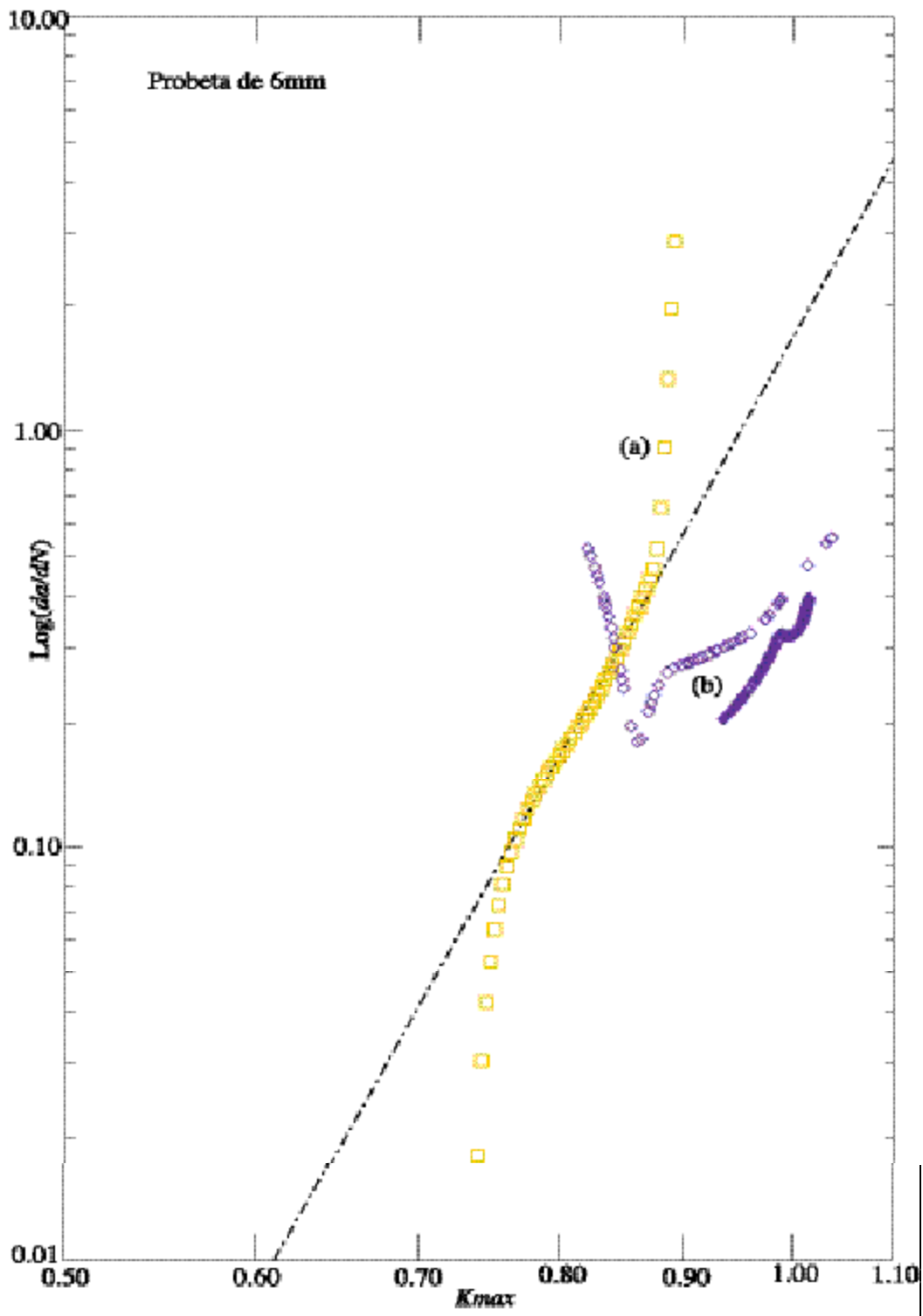


Figura 3.9. Gráfica de la Ley de Paris para probetas de PMMA de 6mm de espesor.

Algunos experimentos presentan un comportamiento menos común con respecto a la velocidad de propagación de la grieta conforme aumenta el factor de intensidad de esfuerzos. Este caso se presenta en la siguiente sección.

3.4.4 Desaceleración de la propagación de una grieta en 6mm

La aplicación de la Ley de Paris para describir el comportamiento de fatiga de termoplásticos supone que la velocidad de propagación aumenta monótonicamente con el aumento del factor de intensidad de esfuerzos. Sin embargo, como se verá de los siguientes resultados, es posible que la velocidad disminuya con un aumento en $K_{I_{max}}$ si ocurren cambios en la rugosidad o en la función que describe el frente de la grieta.

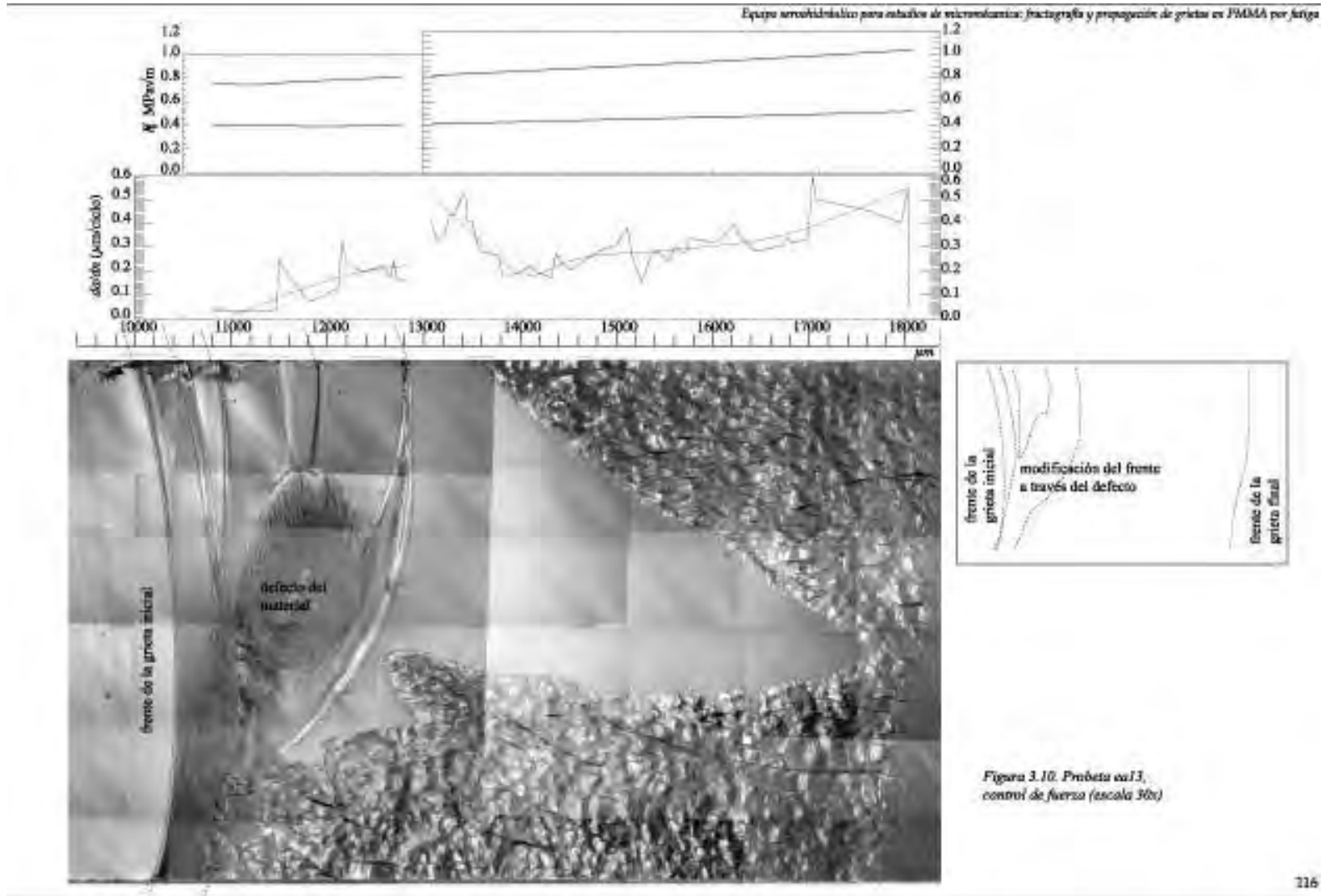
Como se mencionó en la Sección 1.3.2.A este tipo de desaceleración se presenta a velocidades menores que $1 \mu\text{m/ciclo}$. Al analizar este problema a 10 Hz, Andrews y Walker (1971) encontraron que la velocidad de propagación disminuye en un intervalo de $\Delta K_I = (0.4, 0.6) \text{ MPavm}$ y cuando ΔK_I está por encima de 0.6 MPavm la velocidad aumenta como es esperada. Este comportamiento produce un aumento en el tamaño de las rugosidades de la superficie fracturada. Curiosamente solamente el PE de baja densidad presenta este comportamiento (Bretz, 1981).

Un experimento que muestra claramente las complicaciones asociadas al cambio en la función que describe el frente de la grieta se muestra en la Fig. 3.10. En este caso se utilizó un control de fuerza lo cual implica que el factor de intensidad de esfuerzos aumenta monótonicamente con el aumento de la longitud de la grieta; el experimento se desarrolló a una frecuencia de 1Hz. En esta Figura se observa una pequeña curvatura en el frente que está ligeramente adelantada (adelanto menor a $100 \mu\text{m}$) en la parte inferior

(con respecto a la superficie sobre la cual se mide el crecimiento de la grieta) cuando la longitud de grieta era de aproximadamente 10000 μm . Conforme avanza la posición de la punta de la grieta, el frente se topa con un defecto que reduce la resistencia a la fractura; en consecuencia el frente progresa con una notable aceleración. Sin embargo, debido a que se empieza a generar una superficie rugosa en la parte inferior, el frente queda retrasado en esta región. Al iniciar el siguiente experimento, cuando la longitud de grieta era aproximadamente 13000 μm , ocurre un periodo de desaceleración hasta que la grieta alcanza una longitud de 14000 μm . Esta situación se debe a que el frente tiende a enderezarse y la superficie fracturada se convierte a rugosa. La evidencia de que el frente se modifica se observa al final del experimento (longitud de grieta de 18000 μm) en donde el frente está retrasado en la parte inferior pero sólo por 200 μm . También se puede apreciar que este efecto es superior al de la transición de liso a rugoso, pues la superficie lisa termina en 17500 μm y sin embargo hay aceleración a partir de las 14000 μm .

La relación K_I -velocidad para esta probeta está representada por la curva (b) en la Fig. 3.9. Se puede ver que el periodo de desaceleración corresponde a la parte de los puntos con pendiente negativa, mientras que la aceleración posterior (14000 $\mu\text{m} < a < 18000$ μm) es la parte con pendiente positiva. De cualquier manera, la curva está recorrida hacia la derecha en comparación con el resto de resultados (datos con ajuste, curva (a)). Al lado de esta curva en el diagrama de Paris, se presenta otro experimento con un pequeño periodo de desaceleración que está ligeramente desplazado hacia la derecha de la curva (b) antes señalada.

Con estos experimentos, es posible plantear lo necesario para comprender mejor los fenómenos relativos a la fatiga en termoplásticos. Por un lado, es necesario utilizar probadores mecánicos de alta precisión y resolución para lograr prescribir condiciones de carga con precisión. Además, es necesario controlar el factor de intensidad de esfuerzos, K_I , y/o su variación con precisión. También es conveniente automatizar la medición de la posición de la punta de la grieta, así como determinar su avance en ambos lados de la probeta.



3.5 Deformabilidad

Para el PMMA, como la para cualquier otro material, este parámetro va aumentando conforme se aplican más ciclos de carga y aumenta la longitud de la grieta. Un estimado de esta variación se observa en el panel de control durante el experimento. Posteriormente, al analizar los datos se obtienen las curvas correspondientes para los distintos experimentos. En esta sección se presentan cuatro experimentos que se llevaron a cabo en una misma probeta (ea25) bajo control de fuerza en un intervalo de longitud de grieta de 12000 a 20000 μm en los cuales se facilita el análisis del comportamiento de la deformabilidad con relación a la carga y al tiempo.

Para los dos primeros experimentos que se desarrollan en un intervalo de $a = [12000 \text{ a } 16800] \mu\text{m}$ (Curvas a , b de la Fig.3.11) se utilizaron las mismas condiciones de carga; es decir que el valor promedio y la amplitud de la fuerza se mantuvieron constantes de tal forma que el factor de intensidad de esfuerzos aumenta con una misma pendiente. De igual manera para los dos últimos experimentos (Curvas c y d , de 16800 a 20000 μm). Al analizar de esta manera los experimentos, se puede ver que los dos primeros siguen una misma tendencia al igual que los dos últimos tanto en el comportamiento de C como en el comportamiento de K_{Imax} . Debido a que los datos presentados en esta sección corresponden a experimentos que se realizaron a una frecuencia de 1Hz es indistinto hablar de número de ciclos (N) o de tiempo (en s).

3.5.1 Comportamiento de la deformabilidad con relación al tiempo

Como ya se mencionó, cuando se deja de aplicar fatiga a un material éste tiende a relajarse. Es decir, bajo condiciones de carga estática la fuerza aplicada disminuye sin

que la grieta se propague. Para el caso en el que el tiempo transcurrido entre dos experimentos con las mismas condiciones de carga sea muy pequeño, el valor de la deformabilidad no sufre una variación apreciable. Sin embargo, este parámetro es más sensible a la relajación del material a menores niveles de fuerza promedio, ya que es en este segundo caso en el cual se muestra un cambio en las gráficas en función del número de ciclos o tiempo y la longitud de grieta.

Al analizar las Gráficas I y II de la Fig. 3.11 se observa que los cambios en la deformabilidad son más marcados con relación al tiempo que con relación a la longitud de la grieta, como se observa de las Curvas *ab* y *cd* en la gráfica I, donde se requiere de un mayor número de ciclos al principio del experimento para notar la influencia de las condiciones de carga. Sin embargo, después de un tiempo, *C* aumenta con una pendiente a la cual puede ajustarse una línea recta. En la gráfica I se observa que las rectas ajustadas en ambos casos son paralelas.

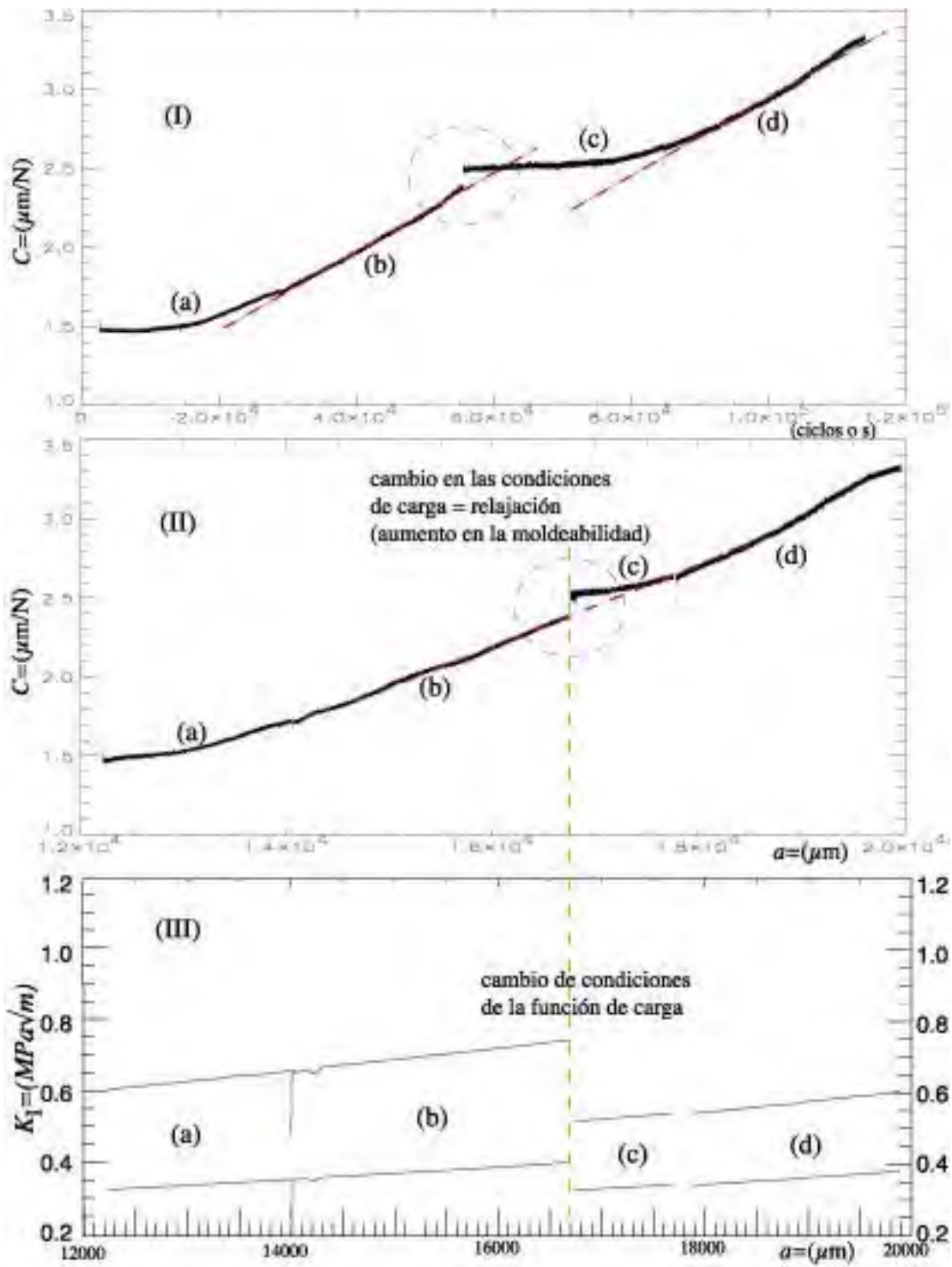


Figura 3.11. Comportamiento de la deformabilidad con respecto al número de ciclos (tiempo(I), con respecto a la longitud de grieta (II), y comportamiento de $K_{I\max}$ (III).

3.5.2 Comportamiento de la deformabilidad con relación a la carga

Es importante mencionar que al final de los experimentos *a* y *c* solamente se dejó de aplicar la función de carga por un momento y el siguiente experimento comenzó en el punto que se había quedado el anterior. La Gráfica II de la Fig. 3.11, muestra el comportamiento de *C* en relación a la longitud de grieta. Para el caso del experimento que comienza en 14070 μm (*b*), no se muestra alguna prueba de que el material se haya relajado; sin embargo, los datos del factor de intensidad de esfuerzos en la Gráfica III de la misma Fig. muestran que el valor inicial de la fuerza del experimento que comienza (*b*) es mucho menor al valor final del experimento anterior (*a*).

El experimento que comienza en $a = 16800 \mu\text{m}$ (*c*), si presenta relajación del material en esta misma gráfica, ya que el aumento de *C* corresponde a una disminución en la rigidez en este caso, asociada a una disminución en la carga; de esto se concluye que el módulo elástico disminuye con el nivel de carga. El aumento en *C* es aproximadamente de un 10% cuando la fuerza (o K_I) disminuye de 0.75 MPavm a 0.55 MPavm (que corresponde a una disminución del 27%).

Para la Gráfica II con respecto a la longitud de la grieta, ambas Curvas (*ab,cd*) tienen segmentos que pueden ajustarse a la misma recta. De la discusión anterior se desprende que:

- i.* Se presentan pequeños cambios en la deformabilidad asociados al comportamiento viscoelástico (relajación) del material.

-
- ii. Existen variaciones asociadas al cambio de nivel de esfuerzos, lo cual indica que el comportamiento mecánico es no-lineal (con aumento de rigidez asociado al aumento del nivel de esfuerzo).
 - iii. El menor cambio en la deformabilidad se debe a la pérdida de rigidez asociada a la propagación de la grieta y estos cambios absorben a cualquier otro.

Un análisis más detallado que elimine el ruido de los dispositivos electrónicos en los datos de fuerza y desplazamiento podría revelar la presencia de pequeñas variaciones en el cálculo de C relacionadas con fenómenos microscópicos que definen el comportamiento de la zona de proceso y no con el comportamiento macroscópico del material como se hace comúnmente.

3.6 Fractografía

Los dos factores principales que determinan la topografía de la superficie generada por la grieta son el valor máximo del factor de intensidad de esfuerzos, $K_{I\max}$, y la velocidad de propagación de la grieta, da/dN , aunque esta última solamente refuerce la influencia del primero, en la mayoría de los casos.

Muchos estudios sobre la morfología de la superficie fracturada concluyen que ésta depende de como se llevó a cabo la propagación de la grieta. Es decir, si la grieta se propagó a través de una sola zona de proceso que va creciendo y avanzando, entonces se genera una superficie muy suave o lisa. En el caso contrario, una superficie rugosa se debe a la propagación de la grieta a través de varios *crazes* (Skibo 1976). Por esta razón, la superficie parece formada por hojuelas del material sobrepuestas.

3.6.1 Condiciones para obtener superficies rugosas

La mayoría de los experimentos que se realizaron en probetas de 6 mm de espesor produjeron superficies rugosas. En todos los casos se observan patrones de rugosidad similares como la presencia de aparentes canales entre las rugosidades (Fig. 3.12).

Aunque la superficie generada por la grieta que se induce al principio es siempre lisa, los experimentos con $K_{I_{max}}$ mayor a 0.7 MPavm generan siempre una superficie rugosa; mientras éste no excede el 1.1 MPavm, da/dN se encuentra en un intervalo de (0.2, 1.5) $\mu\text{m}/\text{ciclo}$. Una de las probetas con la que se obtuvo una superficie totalmente rugosa en todos los experimentos, se presenta con sus respectivas gráficas en la Fig. 3.12.

En esta Figura se puede observar que entre 9000 μm y 10000 μm existe un hundimiento justo en la punta de la grieta inducida, producida por una desviación de la misma en el extremo superior de la grieta. Sin embargo, en el resto de la probeta la superficie puede describirse como regularmente rugosa. El comportamiento de la velocidad de propagación también es uniforme en un intervalo de (0.2, 0.4) $\mu\text{m}/\text{ciclo}$. El frente de la grieta al inicio de los experimentos es regular y así continúa hasta el final de los mismos; solamente al inicio, unas pequeñas áreas lisas sobreviven por las primeras 1000 μm del experimento, pero una vez que se aumentó $K_{I_{max}}$ por arriba de 0.95 MPavm desaparecen completamente. Cabe mencionar que el valor de σK_I es prácticamente constante entre el primer y segundo ajuste de las condiciones de carga lo cual confirma una vez más que el parámetro determinante en la topografía de la superficie es $K_{I_{max}}$. Estos experimentos se llevaron a cabo con un control combinado de $\mathfrak{R} = 0.62$ y el factor de intensidad de esfuerzos máximo presenta todavía una pequeña variación.

La rugosidad en las probetas de 3 mm muestra un patrón diferente a las probetas de 6 mm. Este patrón está formado por estrías a lo largo de las cuales se observan pequeños hundimientos; además, la mayoría comienzan en un vértice. Esta Sección rugosa de la probeta ga14 de 3 mm de espesor se observa en la Fig. 3.8.

3.6.2 Condiciones para obtener superficies lisas

Para probetas de 3 mm de espesor las superficies lisas se presentan con niveles de K_{Imax} por debajo de 0.74 MPavm en un amplio intervalo de velocidades de propagación (0.2, 1.5) $\mu\text{m/ciclo}$ y una frecuencia de 1 Hz. Por otro lado, para probetas de 6 mm de espesor, que corresponden a la mayoría de los experimentos, el valor de $K_{\text{Imax}} = 0.6$ MPavm es el punto de referencia para separar las superficies lisas de las superficies rugosas.

Los resultados de la probeta ga14 de 3 mm de espesor muestran una superficie totalmente lisa en un intervalo de longitud de la grieta de (12000, 16000) μm a una velocidad de propagación alrededor de 1 $\mu\text{m/ciclo}$, como lo muestra la Fig. 3.8. Esta velocidad no puede considerarse común en probetas de 6mm; de hecho, bajo estas condiciones es factible obtener una superficie parcialmente rugosa.

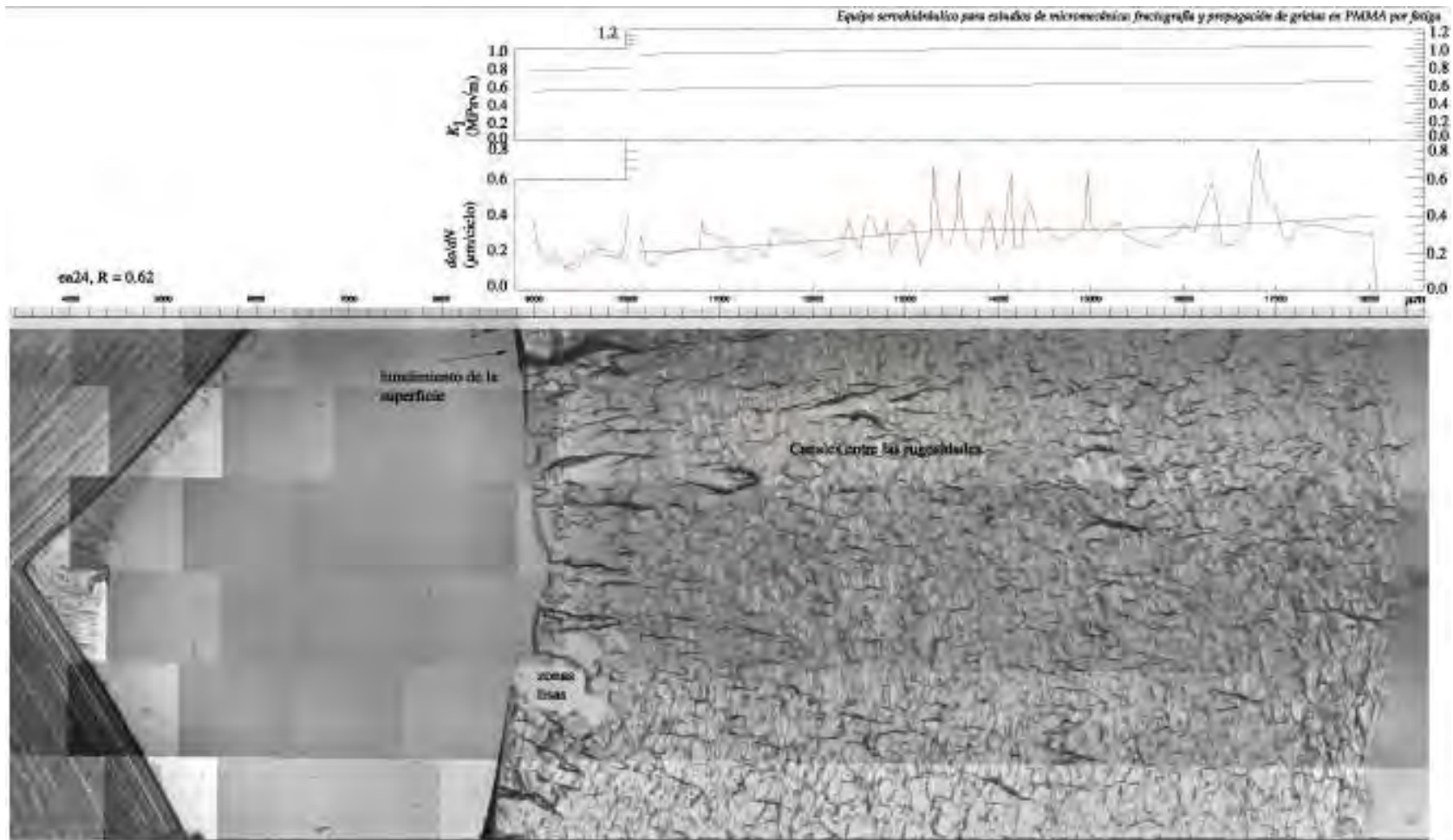


Figura 3.12. Probeta ea24, control combinado $R=0.6$, escala 25x.

3.6.3 Transiciones entre superficies lisas y rugosas

Debido a que en cada probeta se llevaron a cabo diferentes experimentos, en algunos casos se presentaron cambios en la topografía de la superficie generada por la fractura que se identifican como transiciones. Las transiciones que se presentan en los experimentos analizados, se explican a continuación en base a diferentes aspectos.

3.6.3.A El perfil de la grieta

Un antiguo estudio sobre PS de Skibo, Hertzberg y Manson (1976), propone que el perfil de la grieta que se propaga tiene distintos espesores para el caso de grietas que generan superficies rugosas en comparación con grietas que generan superficies lisas, debido a la misma razón de la formación de una o varias zonas de proceso.

Para este trabajo, se buscó una relación similar y se encontró que las grietas que generan superficies lisas tienen un perfil lineal y delgado, mientras que las grietas que presentan superficies totalmente rugosas tienen un perfil ligeramente ondulado; la diferencia en el espesor es pequeña sobre todo cuando no se está aplicando ninguna carga, comparada con la diferencia en PS, pero se puede afirmar que el perfil de una superficie rugosa es el doble de ancho del perfil de una superficie lisa. Ejemplos de estos perfiles se muestran en las Figs. 3.13 y 3.14.

Como se puede observar en la Fig. 3.13, la grieta avanzaba con una ligera desviación hacia abajo mientras generaba una superficie lisa pero a partir de la transición a una superficie rugosa, la grieta se desvía en la dirección opuesta o, dicho de otra manera, se endereza.

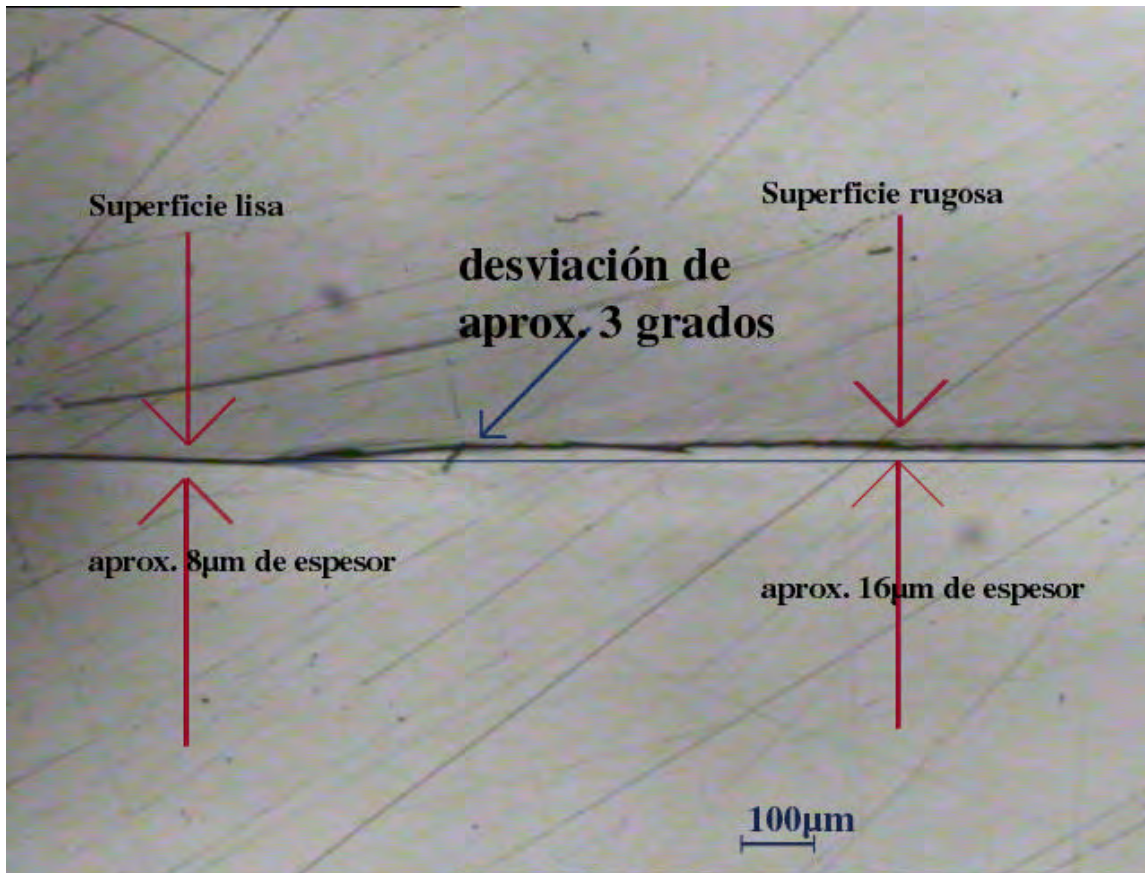


Figura 3.13. Perfil de una grieta que al principio genera una superficie lisa y después una superficie rugosa.

Al observar el perfil de la grieta se puede identificar la zona en la cual se presenta la transición de liso a rugoso al menos en el área cercana a esa cara de la probeta. Estas transiciones de superficies lisas a superficies rugosas y viceversa muestran marcas de la presencia de zonas de proceso secundarias, las cuales se observan como pequeñas curvas suaves alrededor del perfil de la grieta. Para el caso de la transición de una superficie rugosa a una superficie lisa, se observan las mismas diferencias en el espesor, pero se observan más definidas las marcas de zonas de proceso secundarias como lo muestra la Fig. 3.14.

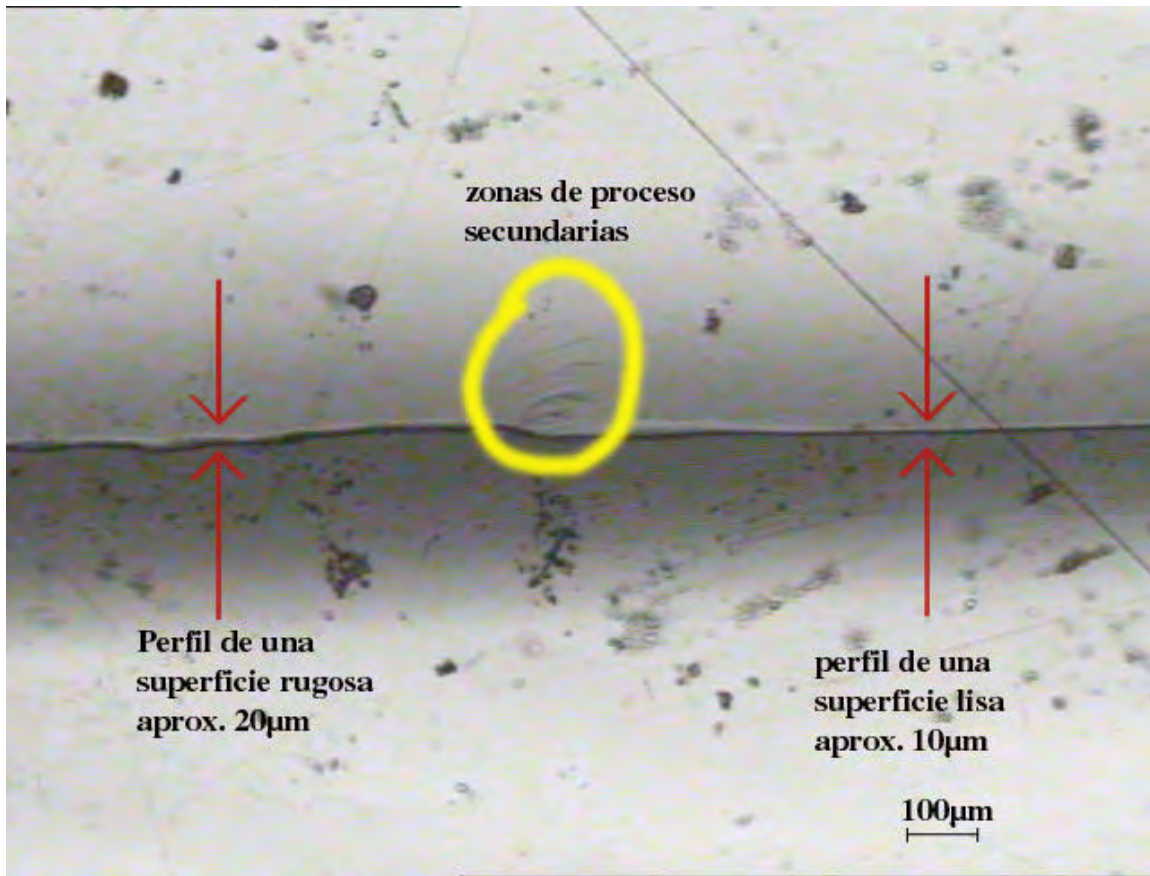


Figura 3.14. Perfil de una grieta que al principio genera una superficie rugosa y después una superficie lisa.

Las zonas de proceso secundarias se forman en las trayectorias del mínimo esfuerzo principal y para polímeros con baja temperatura de transición vítrea (t_g) este fenómeno es más fácilmente observable. Como referencia se presenta la Fig. 3.15 que corresponde a un polímero con una t_g cercana a 60 °C, mientras que la t_g para el PMMA varía entre 90 y 105 °C. En esta Figura la punta de la grieta está localizada en la región más oscura.

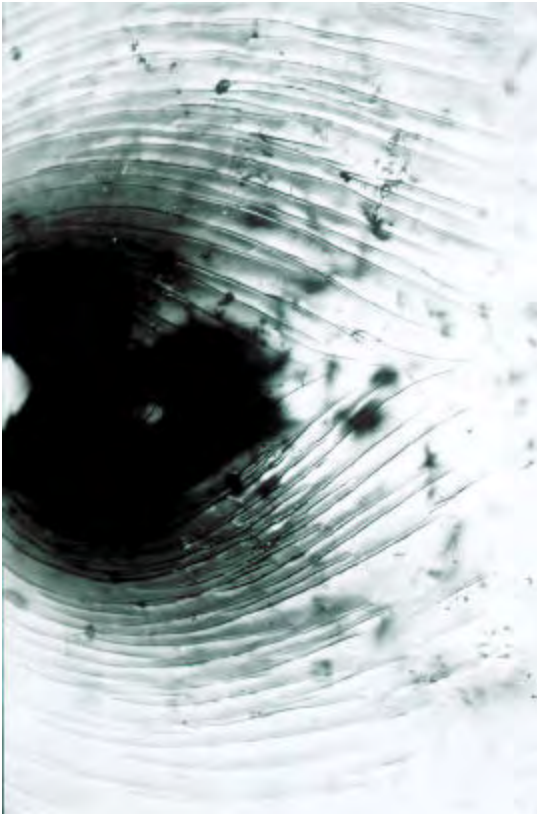


Figura 3.15. Formación de zonas de proceso secundarias en un material cuya t_g es cercana a 60 °C (cortesía de G. Pulos).

Durante las transiciones, el seguimiento de la grieta es más complicado debido a que aparentemente la grieta puede desviarse radicalmente en cualquier momento debido a la presencia de estas zonas de proceso secundarias.

3.6.3.B Formación de vértices (ángulos)

Las transiciones de una superficie lisa a una rugosa y de una rugosa a una lisa no se llevan a cabo bajo el mismo patrón. Sin embargo, cuando el cambio en las condiciones de carga es suave, la transición de superficie lisa a rugosa se presenta con la formación de vértices. El ángulo de apertura de estos vértices es diferente para las probetas de 3 mm y 6 mm de espesor; en el caso de 3 mm el ángulo varía entre 25° y 30°, mientras que para 6

mm el ángulo es en la mayoría de los casos mayor a 75° . La Figura 3.16 muestra los vértices que se forman en ambos casos.

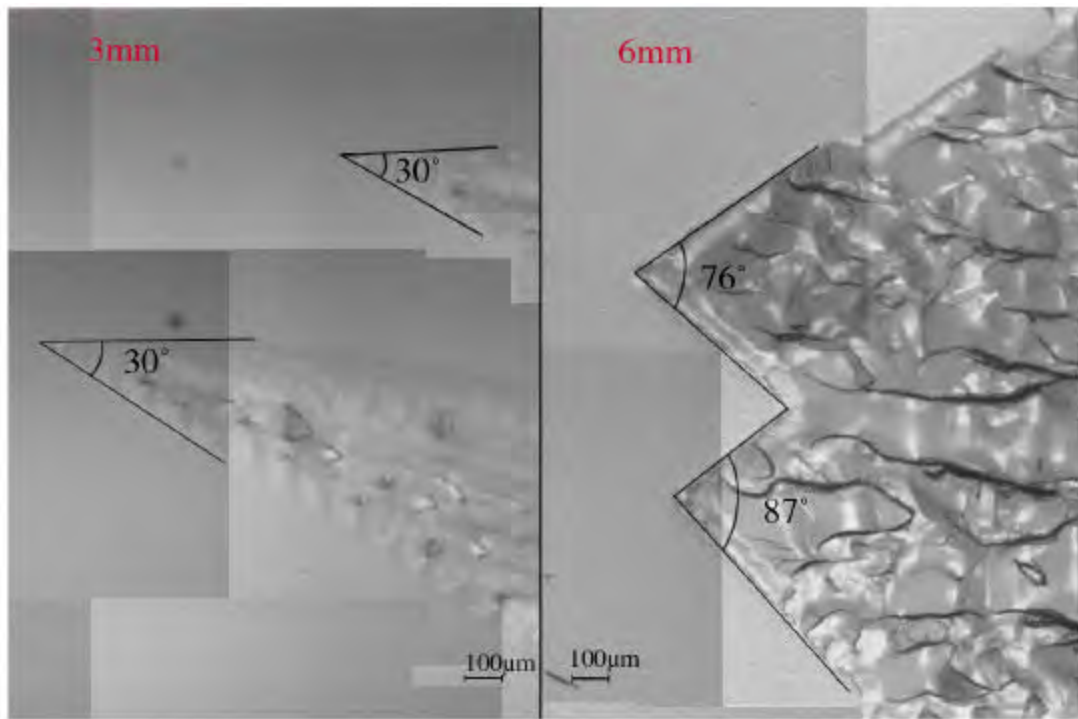


Figura 3.16. Diferentes vértices formados en probetas de 3 mm y 6 mm en la transición de una superficie lisa a rugosa.

La transición de una superficie rugosa a una superficie lisa, se puede presentar por un cambio en las condiciones de carga como se observó en la Fig.3.6 o por la aparición de pequeñas regiones lisas entre las rugosidades de la superficie conforme disminuye el factor de intensidad de esfuerzos (Fig. 3.17 casos a y b). Estas regiones comienzan también con un pequeño ángulo (menor a 30°); en algunas ocasiones desaparecen por la presencia de rugosidades como el caso (a). Sin embargo cuando $K_{I_{max}}$ es ligeramente menor, el tamaño de estas regiones aumenta conforme la grieta se propaga hasta que la superficie es totalmente lisa. Esta transición corresponde al caso (b) en la misma Fig. Es

importante concretar que una superficie totalmente lisa se obtiene con un $K_{I_{max}}$ igual a 0.6 MPavm y conforme éste aumenta, las rugosidades aparecen. Pero considerando la transición en sentido contrario, es decir, de superficie rugosa a lisa las rugosidades no desaparecen totalmente hasta que $K_{I_{max}}$ es menor a 0.58 MPavm.

Una transición de superficie rugosa a lisa que se presenta por un cambio de condiciones de carga se presenta en la Probeta ea25 (Fig. 3.18) en la cual $K_{I_{max}}$ se modifica para los dos últimos experimentos de un valor un poco mayor a 0.75 MPavm hasta un valor cercano a 0.55 MPavm y aún bajo estas condiciones la superficie generada no es totalmente lisa sino que reaparecen algunas rugosidades que pueden ser efectos de memoria del material del último nivel de carga del experimento anterior.

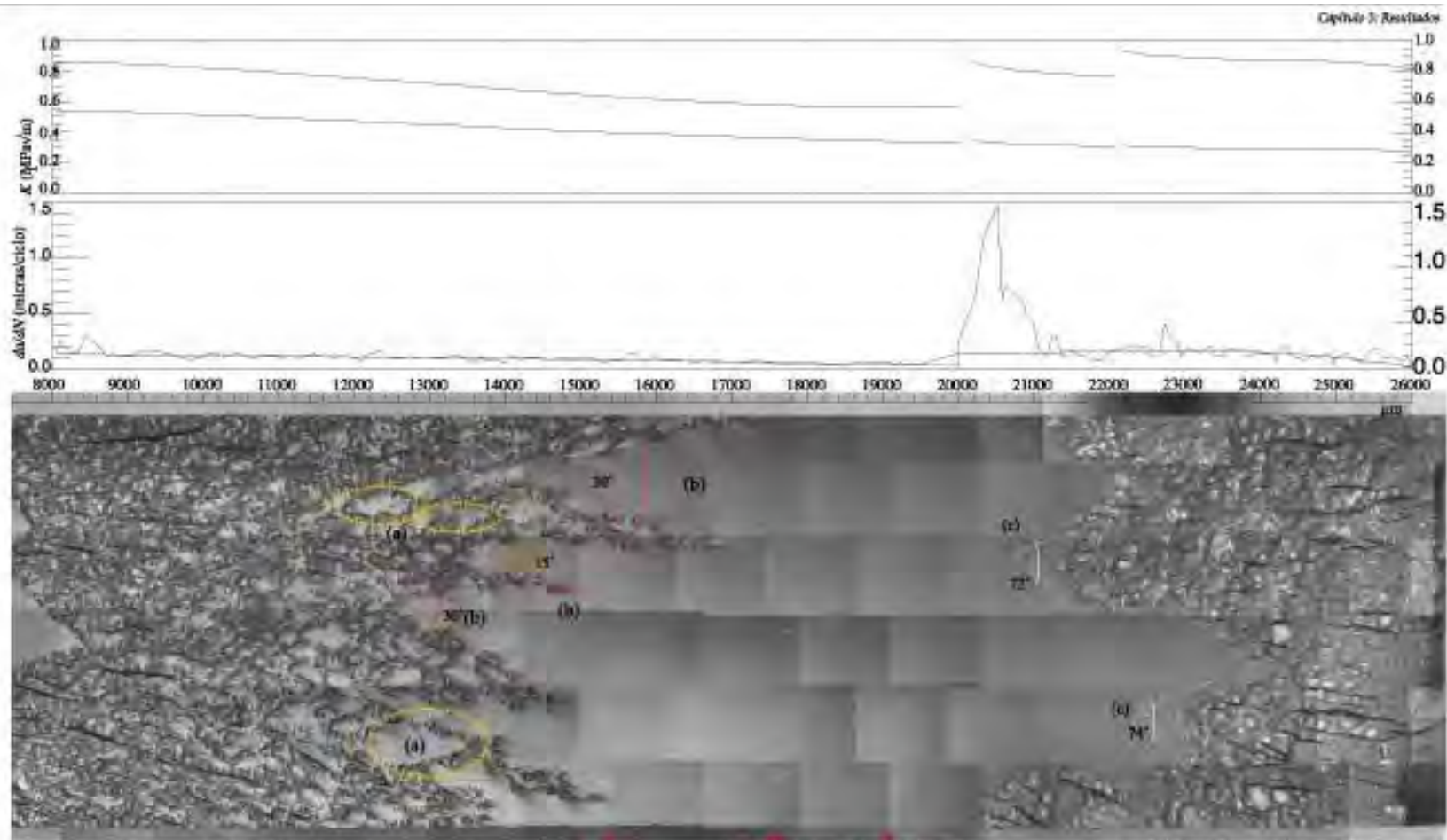


Figura 3.17. Probeta e01 bajo control de desplazamiento que muestra zonas lisas que desaparecen presencia de rugosidades (a); zonas lisas que aumentan su tamaño (b) y vértices de la transición de la superficie lisa a rugosa (c). Además se presentan unas bandas perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta en la región de la superficie lisa. Amplificación 20x.

3.6.4 Formación de bandas en superficies lisas

En la sección 1.3.2.A se menciona que la formación de bandas perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta se debe a un crecimiento normal o retardado de la misma entre otros posibles efectos. G. Pulos (1993) observa para PMMA que la formación de bandas es consecuencia de la propagación retardada de la grieta, por incrementos más o menos regulares de 20 μm .

Al observar detalladamente la sección de la superficie generada por fractura en el intervalo de $a = (16000, 20000)$ μm para la Probeta ea08 se observan al menos cuatro bandas perpendiculares a la dirección de la propagación de la grieta (marcadas en la parte inferior del mosaico de la superficie fracturada en la Fig. 3.17). La distancia entre estas bandas no es constante y se forman cuando se tienen los menores niveles de fuerza (representado por $K_{I\text{max}}$) y de velocidad de propagación de la grieta.

Al analizar la formación de bandas en un intervalo de $a = (6500, 10500)$ μm en la probeta ea25 (Fig. 3.18; las bandas se muestran en la Fig. 3.19) la formación de bandas se presenta bajo las condiciones de carga contrarias al caso de la Probeta ea08; es decir a altas velocidades de propagación de la grieta y altos niveles de $K_{I\text{max}}$. La separación de las primeras bandas es de aproximadamente 250 y 150 μm que corresponden a 9 y 6 ciclos respectivamente. Este es otro caso en el que (aparentemente) la velocidad disminuye aunque el factor de intensidad de esfuerzos aumenta. Sin embargo, los datos no son tan confiables a altas velocidades de propagación.

En la figura 3.18, se muestran los parámetros que forman esta superficie como la velocidad de propagación de la grieta y el factor de intensidad de esfuerzos. Si

comparamos ahora los valores de estos parámetros con aquéllos de la Fig. 3.6 correspondientes a la propagación de la grieta a altas velocidades, se observa que la velocidad de propagación de la grieta es del mismo orden, pero $K_{I_{max}}$ es un 15% menor en este caso, además el intervalo de a es muy cercano a la línea de carga.

En este experimento se apagó el control combinado con $\mathfrak{R} = 1$ cuando $K_{I_{max}}$ es aproximadamente 1.05 MPavm y este comenzó a disminuir rápidamente porque continúa bajo control de desplazamiento $\mathfrak{R} = 0$.

Para la Probeta ea 25 debido a que no existe una historia de carga el material se comporta de diferente manera y se producen bandas perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta.

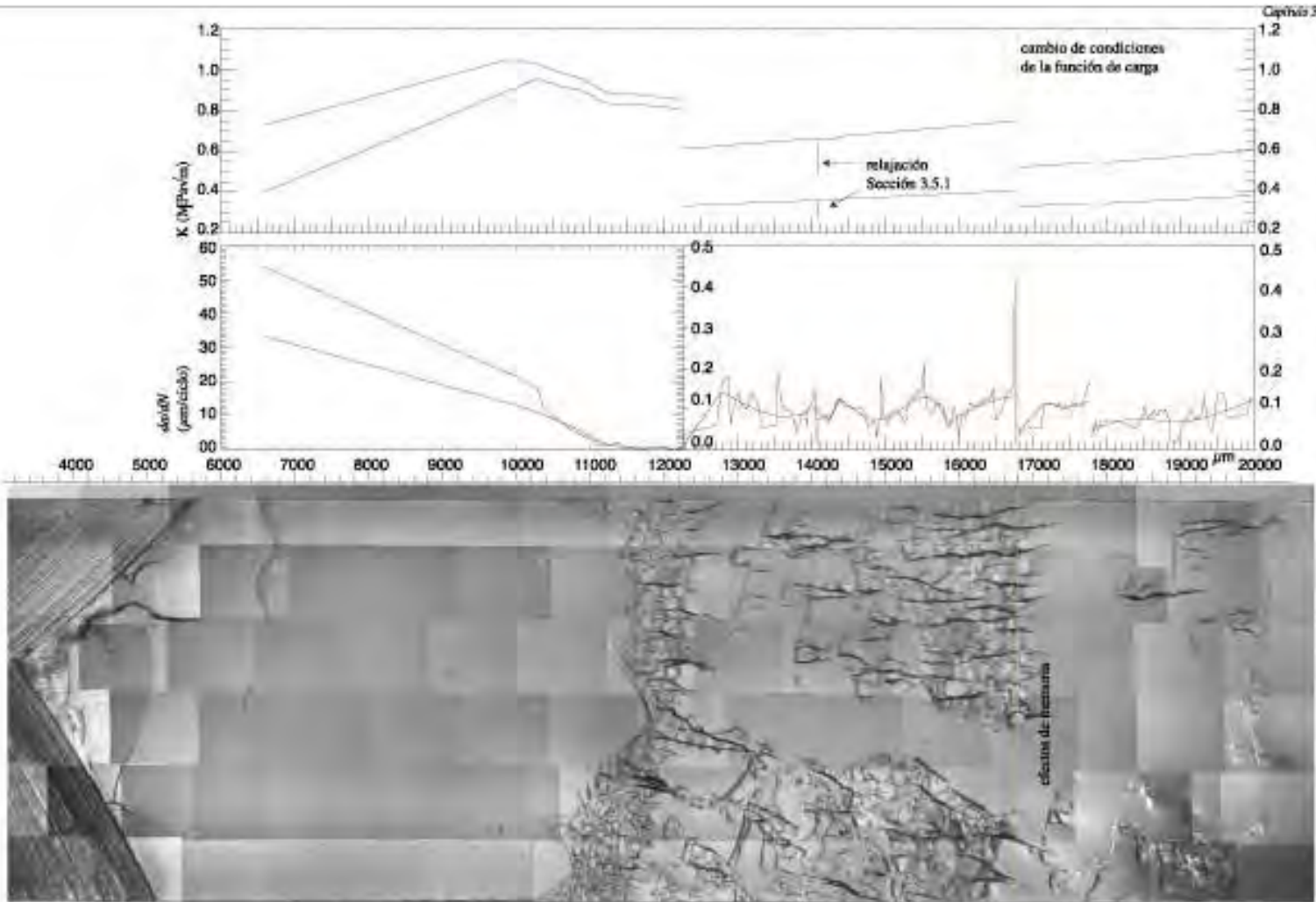


Figura 3.18 Probeta $\alpha 25$ bajo control de fuerza $R=1$, que muestra la transición de la superficie de rugosa a lisa por un cambio en las condiciones de carga. Además muestra una propagación discontinua entre 6500 y $10500 \mu\text{m}$.

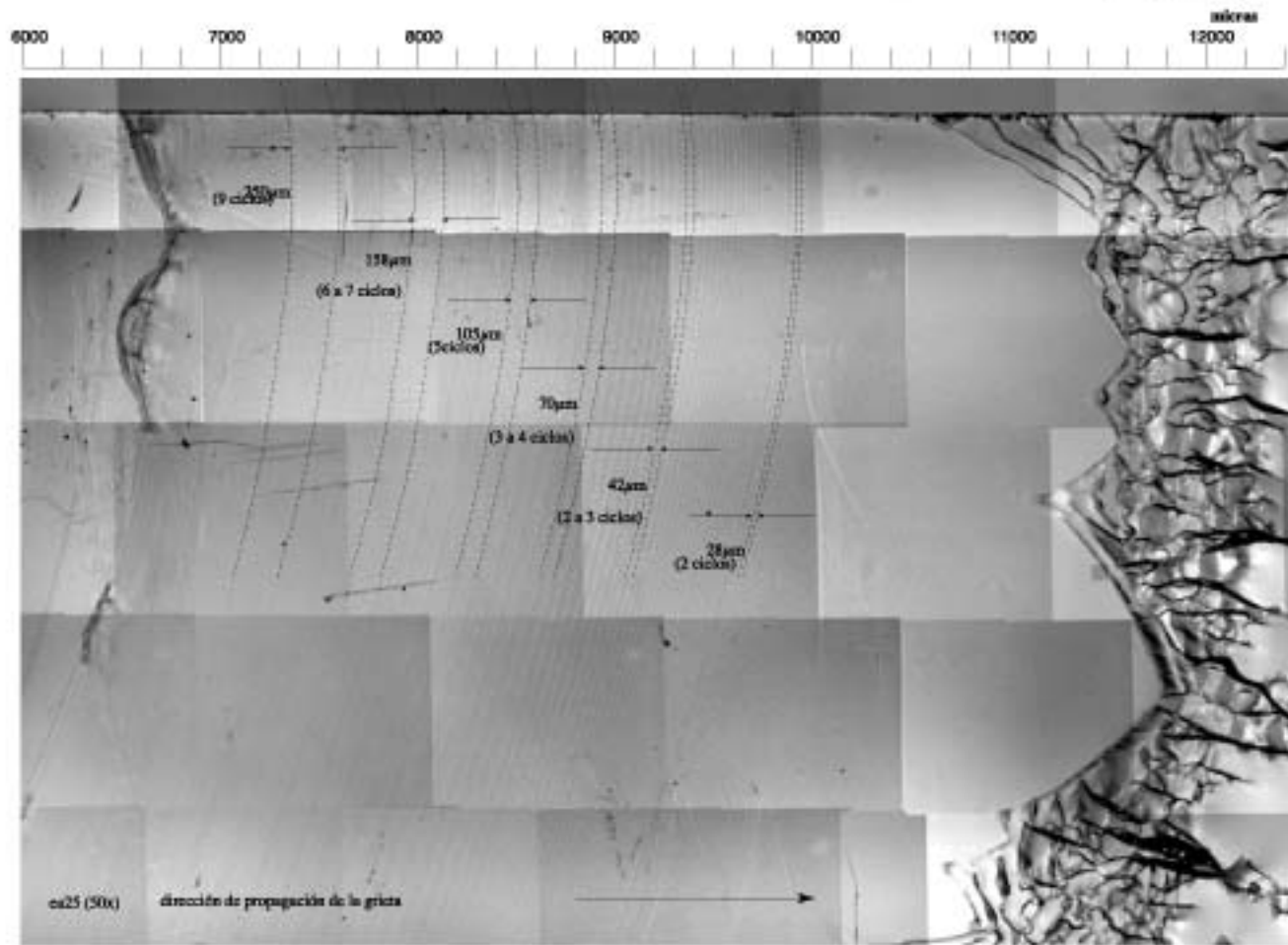


Figura 3.19. Formación de bandas.

3.6.5 Variaciones del frente de una grieta

Un experimento que tiene comportamiento uniforme como la probeta ea24 generalmente tiene un frente de grieta regular al principio y al final del experimento, sin marcas de modificaciones a lo largo del mismo. Cuando la observación de la superficie fracturada revela modificaciones en el frente de la grieta, éstas se relacionan con la presencia de defectos así como con el nivel de carga.

La presencia de un defecto en el material, como es el caso de la probeta ea13 (Fig. 3.10), provoca que el frente regular de la grieta se modifica de tal forma que la parte inferior de la superficie fracturada se va retrasando con respecto a la parte superior. Este defecto influye también en la transición de la superficie de lisa a rugosa que se lleva a cabo de los extremos hacia el centro de una forma muy marcada. Conforme continúan los experimentos, el frente se modifica poco a poco sin llegar a ser de nuevo regular y al final de los experimentos se tiene un frente no simétrico.

En la Probeta ea22 el frente de la grieta inicial describe una curva regular pero no simétrica; la diferencia inicial entre un extremo y otro del frente es de 870 μm . Bajo condiciones de carga en las cuales $K_{I\text{max}}$ es mayor a 0.8 MPavm el frente de la grieta es cuasi simétrico a lo largo de los dos experimentos que se llevan a cabo, de tal forma que al final de éstos el frente es prácticamente una línea recta. Este caso se presenta en la Fig. 3.20.

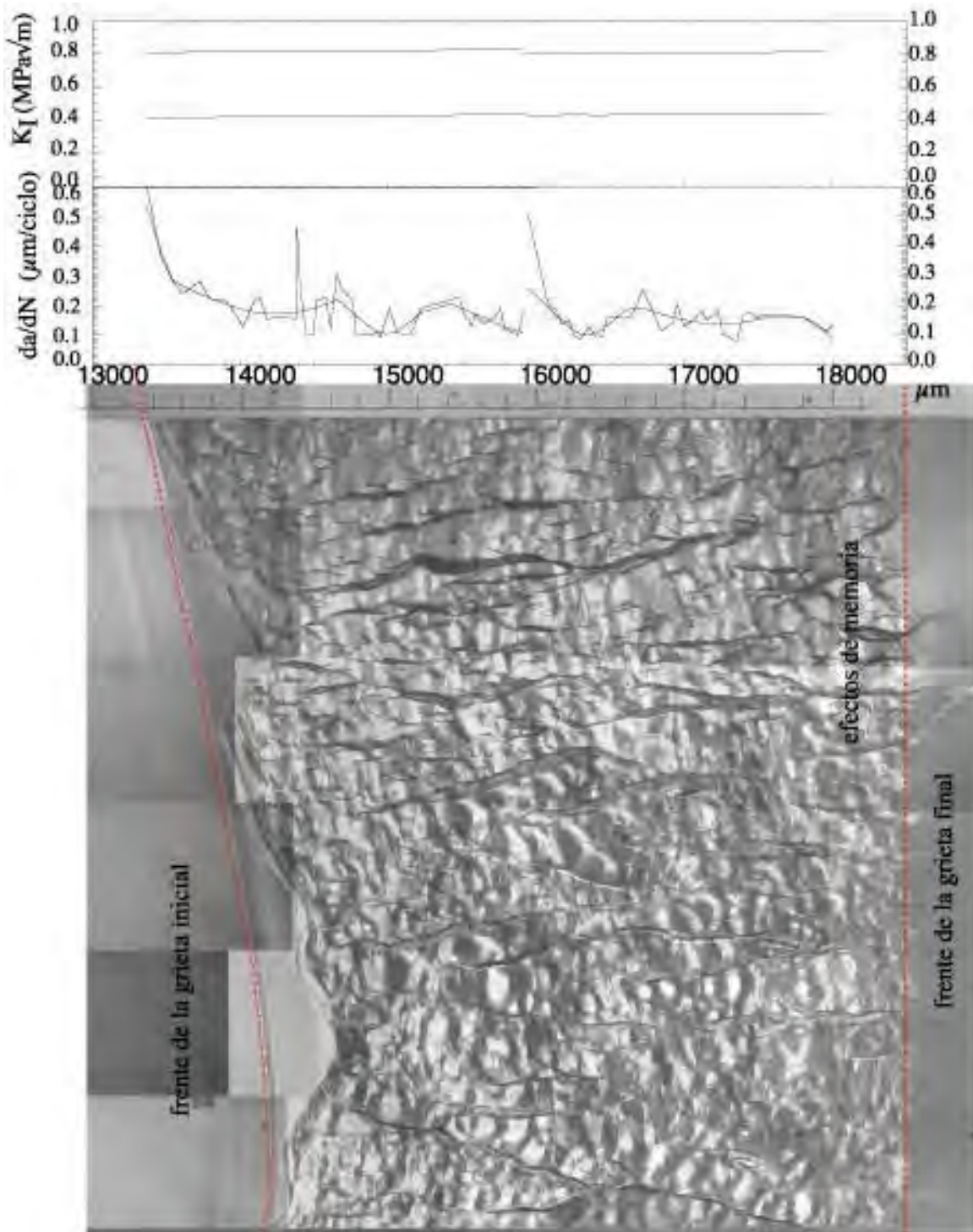


Figura 2.20. Probeta ea22 que muestra como el frente de la grieta se endereza después de dos experimentos con $R = 0.63$.

4 Conclusiones y Trabajo a Futuro

4.1 Conclusiones

4.1.1 Probador servohidráulico

Se logró diseñar y poner en operación un probador mecánico en miniatura para pruebas de fatiga y otras pruebas mecánicas de materiales donde se requiere alta precisión y resolución en la medición de fuerzas y desplazamientos. Al lograr montarlo bajo un microscopio óptico, se puede utilizar éste para estudiar los micromecanismos de deformación en materiales.

Al utilizar transformadores de desplazamiento y fuerza similares a los de un sistema comercial, se logró acoplar el probador al controlador 407 de MTS para utilizar todas las ventajas de un sistema de control comercial.

Con el diseño propuesto y utilizando la servoválvula 61-601C se lograron obtener resoluciones alrededor de 3 micras con los *LVDT* más pequeños (MHR 050) y 0.9 N para la celda de carga; lo anterior es un poco por debajo de lo esperado pues originalmente se plantearon resoluciones de 0.5 μm y 0.2 N. Por otro lado la velocidad máxima es de 27.6 mm/s que se compara muy bien con los 27.5 que se esperaban considerando las características de los módulos servohidráulicos.

Con el sistema óptico utilizado se lograron mediciones de la posición de la punta de la grieta con una resolución de 5 a 10 μm . Utilizar el sistema de movimiento x , y permite posicionar la punta de la grieta bajo el eje óptico de manera manual y al automatizar la operación del controlador de movimiento en base al análisis de imágenes, se podrá

mantener la punta de la grieta fija bajo el eje óptico aunque ésta se propague; además de ser factible reducir por un factor de cinco la resolución, es decir, tener una resolución de 0.5 píxeles.

Al utilizar el entorno de programación de LabVIEW, se logró el control del experimento de manera remota, así como la adquisición y almacenamiento de los datos. Éstos se utilizan para calcular el factor de intensidad de esfuerzos, la velocidad de propagación de la grieta y la deformabilidad de la probeta. Asimismo, se logró semi-automatizar la captura de imágenes coordinadas con la posición en la superficie fracturada para construir mosaicos de las superficies fracturadas. Se espera que con un sistema de autofocus se pueda automatizar completamente este procedimiento.

Finalmente, se logró programar un control combinado de fuerza-desplazamiento para mantener constante el factor de intensidad de esfuerzos mientras la grieta se propaga. De forma cuantitativa se logró que la variación de $K_{I_{max}}$ para un 5% de incremento en la longitud de grieta se redujera a 1%; esto se compara bien con el 10% de variación en $K_{I_{max}}$ cuando el control es de fuerza o desplazamiento. Sin embargo, aún falta refinar el control para alcanzar el 0.1% que se esperaba de los estudios teóricos.

4.1.2 El experimento de fatiga

Los intervalos en los cuales se encuentran los valores del factor de intensidad de esfuerzos (0.57 a 0.73 MPavm) y la velocidad de propagación de la grieta (0.06 a 2.0 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$) coinciden con los resultados obtenidos por G. Pulos (1993) en probetas de PMMA con un espesor de 3 mm. En ambos trabajos, la topografía de la superficie fracturada presenta características similares como la formación de vértices, estrías,

bandas y rugosidades, aunque en 1993 no se hizo énfasis en su análisis, sino solamente en las diferentes condiciones que producen superficies lisas y rugosas. Con respecto al control combinado, el trabajo de G. Pulos (1993b) definió un intervalo entre $\mathfrak{R} = [0.65, 0.70]$ para obtener el factor de intensidad de esfuerzos constante. En este trabajo, los resultados obtenidos se encuentran en un nivel ligeramente menor $\mathfrak{R} = [0.62, 0.63]$ posiblemente por efecto del espesor de la probeta (6 mm). Las demás observaciones como la desaceleración del crecimiento de la grieta con un aumento en $K_{I_{max}}$ y las diferencias en el espesor del perfil de la grieta entre superficies lisas y rugosas, coinciden bien con los resultados observados para termoplásticos como el PET (Bretz, 1981) y el PS (Skibo, 1976) respectivamente.

Con respecto a las pruebas de fatiga y como primera aproximación, la velocidad de propagación de la grieta sigue el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos. Si $K_{I_{max}}$ aumenta, la grieta se acelera; si $K_{I_{max}}$ disminuye, la grieta se desacelera mientras que si $K_{I_{max}}$ permanece constante, la grieta se propaga a velocidades constantes. Sin embargo, de acuerdo con algunos de los resultados presentados queda claro que no se puede relacionar directamente la velocidad de propagación de la grieta al factor de intensidad de esfuerzos; esto es, no existe una relación que nos dé la velocidad de propagación como función del factor de intensidad de esfuerzos.

Lo anterior se ve reflejado en los diagramas de Paris en donde todos los experimentos se deberían de colapsar a una curva, la cual sería una propiedad del material. Sin embargo, se presentan distintas curvas modificadas por la influencia de la historia de propagación, el frente de la grieta y la topografía de la superficie generada por la fractura. Aún más, los

datos para probetas de 3 y 6 mm no se colapsan a una sola curva; lo anterior pudiera estar relacionado a los distintos tipos de rugosidades que se dan en estas probetas así como a los diferentes tipos de transiciones.

Debido a que se utilizó un material comercial, no se garantizan las propiedades y la composición homogénea del mismo. Algunos de los fenómenos observados están relacionados a efectos o variaciones en el material o al proceso de fabricación, por lo cual el control sobre la composición del material y el proceso de fabricación de las probetas promoverá la precisión y confiabilidad sobre las conclusiones del comportamiento del PMMA.

Para algunos casos se logró medir una desaceleración en la propagación de la grieta aún cuando el factor de intensidad de esfuerzos aumenta. Lo anterior sucedió en casos de transiciones de liso a rugoso o cuando hubo cambios en la descripción del frente de la grieta. Queda claro que cuando hay una transición de liso a rugoso, la grieta se desacelera aunque $K_{I_{max}}$ vaya aumentando; es posible que la transición cause el aumento en $K_{I_{max}}$. Sin embargo, para cuantificar estos resultados es necesario tomar en cuenta el posible cambio en la función que describe el frente de la grieta. Lo anterior requiere de medir la posición del frente e integrar para obtener la longitud de grieta promedio; para lograr esto se requiere de monitorear la posición de la punta de la grieta en ambos lados (caras) de la probeta y a través del espesor durante el experimento con ayuda de dos sistemas ópticos extra.

Por la presencia de defectos o algunos casos de transiciones de superficies, el frente de la grieta se modifica en vez de trasladarse de manera auto semejante conforme la grieta

avanza. Al analizar las marcas que deja la forma del frente al inicio y al final de un experimento o un conjunto de experimentos, no es posible establecer bajo que condiciones éste se vuelve más o menos simétrico, pero parece que altos valores de K_I bajo control de desplazamiento o combinado favorecen que el frente se enderece o se vuelva más simétrico con respecto al plano medio de la probeta.

Con respecto a la deformabilidad, los resultados indican que lo que se ha medido hasta la fecha está asociado al comportamiento macroscópico (módulo elástico y longitud de grieta) del material. Aún no se ha logrado obtener variaciones en este parámetro que revelen detalles sobre la zona de proceso.

Uno de los posibles factores que impiden que los datos en el diagrama de Paris puedan sobreponerse para probetas con espesores de tres y seis mm es la formación de vértices. Ésta ocurre a distintos ángulos y parece ser (ópticamente) distinta para los distintos espesores. Para el caso de tres mm los vértices tienen ángulos de 30° y parecen provenir de una sola zona de proceso. Para el caso de seis mm de espesor, los vértices presentan ángulos mayores a 75° y son más rugosos. Para confirmar lo anterior se requieren estudios de perfilometría para estimar las alturas del inicio de las rugosidades.

Las transiciones de liso a rugoso parecen estar gobernadas por el nivel de $K_{I_{max}}$; esto es, para probetas de 6 mm de espesor, la superficie se torna rugosa cuando $K_{I_{max}}$ excede 0.78 MPavm; para probetas de 3 mm este nivel se reduce a 0.74 MPavm. En la transición de superficie rugosa a lisa parece que hay mayor influencia de la “historia de propagación” y no es tan claro a que nivel de $K_{I_{max}}$ se da dicha transición.

Por los resultados presentados en el capítulo anterior podemos afirmar que el valor del factor de intensidad de esfuerzos en el máximo de la función de carga ($K_{I_{max}}$) y su variación son los parámetros que más afectan el comportamiento de la velocidad de propagación de una grieta y también la topografía de la superficie generada por la fractura para PMMA. Al relacionar estos parámetros podemos definir cuatro diferentes estados del comportamiento del material que se ilustran en la Fig. 4.1.

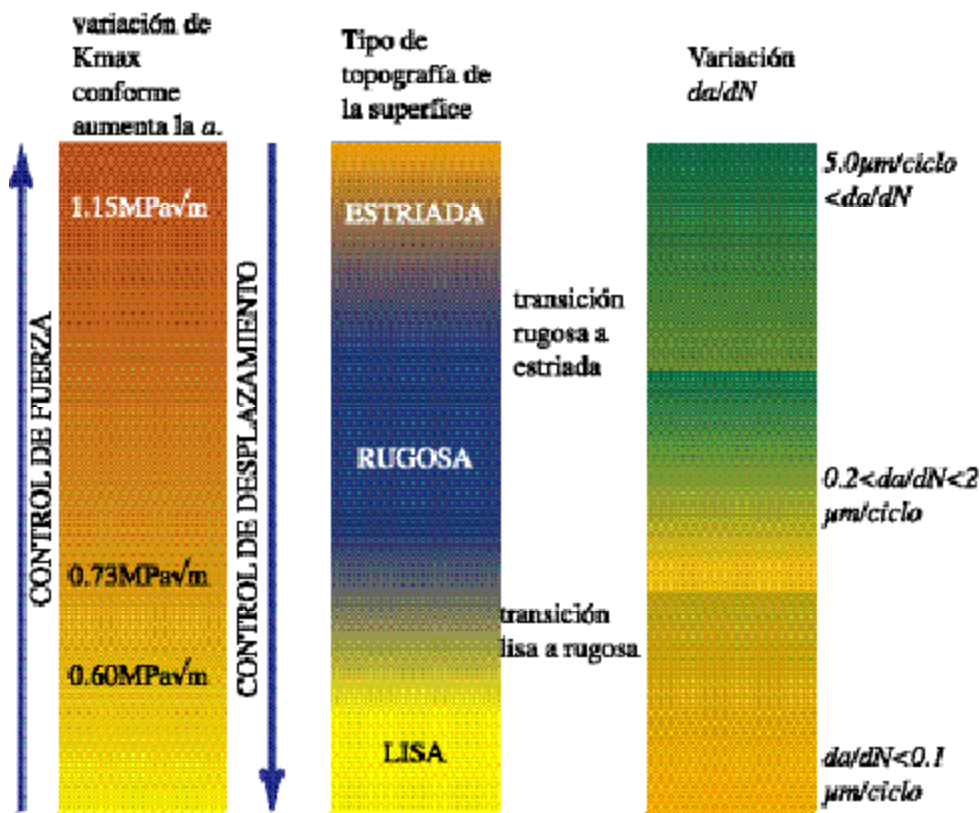


Fig 4.1. Relación entre el factor de intensidad de esfuerzos, la velocidad de propagación de la grieta y la topografía de la superficie generada por la fractura.

Al analizar las superficies fracturadas generadas en un nivel de $K_{I_{max}}$ mayor a 1.15 MPavm se observa una combinación de estrías y áreas lisas, la velocidad de propagación de la grieta es mayor a $5 \mu\text{m/ciclo}$ y menor a $60 \mu\text{m/ciclo}$.

En un intervalo de $K_{I_{max}}$ de 0.73 a 1.15 MPavm, las superficies obtenidas son rugosas y la velocidad de propagación varía entre 0.2 y 2.0 $\mu\text{m/ciclo}$. Para una $K_{I_{max}}$ menor a 0.60 MPavm la superficie generada por fractura es suave o lisa y velocidad de propagación menor a 0.1 $\mu\text{m/ciclo}$ y hasta 0.06 $\mu\text{m/ciclo}$; tales experimentos requieren de mucho tiempo de ahí la importancia de automatizar el seguimiento de la propagación de la grieta. Cabe mencionar que para el sistema de posicionamiento x, y, \mathbf{q} , la operación de seguir una grieta con una velocidad de propagación baja produce que se pierda resolución en las mediciones ya que es un procedimiento manual.

4.2 Trabajo a futuro

4.2.1 Probador servohidráulico

Con respecto al probador servohidráulico, se puede y debe aumentar la precisión y resolución del control. La resolución de los transformadores de fuerza y desplazamiento se puede aumentar si se calibran en un menor intervalo a mayores ganancias. Además se pueden realizar mediciones de repetibilidad para utilizar interpolación en las mediciones. Por otra parte, se pueden implementar sistemas de auto-calibración que permitan mayor confiabilidad en los datos adquiridos. Para el transformador de desplazamiento, se puede utilizar un motor 850F-LS que mueva el pistón cuando éste se encuentre en control de fuerza bajo una pequeña compresión del orden de -10 N. Para la celda de carga, se puede utilizar el sistema de auto-calibración por resistencia que ofrece el controlador 407 o utilizar un resorte o probeta metálica previamente calibrada. Todos estos procedimientos se pueden automatizar para realizarse entre uno y otro experimento de fatiga.

La resolución del probador se puede aumentar se utiliza un cilindro con una mayor área efectiva. Al aumentar el área disminuye la velocidad máxima pero aumenta la resolución en el posicionamiento del pistón. La velocidad máxima actual de 28 mm/s se puede reducir por un factor de 4 permitiendo pruebas hasta 40 Hz con amplitudes de 100 micras.

Es necesario medir y cuantificar el ruido electrónico del controlador 407, el cual es posible disminuirlo con un mejor diseño que además, aumente la resolución del módulo servohidráulico.

Posiblemente el mayor beneficio en las mediciones se obtenga si se automatiza el procesamiento de imágenes para determinar la longitud de la grieta. Al automatizar la detección de la punta de la grieta, se podrán posicionar las platinas para que la punta siempre coincida con el eje óptico. Una vez logrado esto se podrían realizar experimentos de forma automática.

Finalmente se puede mejorar el programa de adquisición de datos para que se pueda prescribir el factor de intensidad de esfuerzos. Aún más, se podría utilizar la base de datos con la que se cuenta para predecir y estudiar las transiciones en la fractografía y proponer un modelo que busque explicar el comportamiento tan complejo de la fatiga en termoplásticos

Para un análisis más completo del comportamiento de la grieta durante la propagación, se podrían agregar dos sistemas ópticos extras. El segundo sistema óptico tendría el objetivo de medir de la punta de la grieta en la otra cara de la probeta y el tercer sistema óptico se utilizará para realizar las mediciones de la zona de proceso durante el experimento.

4.2.2 El experimento de fatiga

El principal problema a resolver y atender en el futuro es el control de calidad en las probetas. Es necesario fabricar un molde para utilizar material caracterizado tanto física como químicamente. Además, se debe controlar el proceso de fabricación para que los estudios con probetas de diferentes espesores generen resultados más confiables.

Para poder realizar el análisis en la punta de la grieta con los tres diferentes sistemas ópticos, es importante mantener la punta de la grieta fija durante la fatiga; por esta razón un aspecto importante es la definición de la función de carga para ambos módulos servohidráulicos, de tal forma que las mediciones de longitud de grieta y zona de proceso hagan indistintamente en cualquier punto del ciclo de carga.

Con un sistema de pruebas automatizado y un mayor control de calidad en las probetas se podrá programar y estudiar de manera sistemática todos los efectos de fatiga en termoplásticos que se presentan en este trabajo.

Referencias

Ashbi, M. F. and Jones, D. R., “*Engineering Materials I. An introduction to their properties and applications*”, 2nd Ed., Butterworth Heimann, 1998.

ASTM, “*Standard Definition of Terms Relating to Fatigue*”, Designation E 1150-87, 1993.

ASTM, “*Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*”, Designation E 647-99, 2000.

Bretz, P. E., Hertzberg, R. W., Manson, J. A., “Correlation between crack growth rate and fracture mode transitions in low density polyethylene”, *Polymer Communications*, **22**, 575 – 576, 1981.

Bokoi, Y., Shiraishi, Y. and Higo, Y., “A Study of Fatigue Crack Propagation mechanisms of a non-crystalline polymer”, Karihaloo, B. L., *International Fracture Congress 9*, **Vol. 3**, 1701 – 1707, Pergamon, Australia, 1997.

Broek, D. “*Elementary Engineering Fracture Mechanics*”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland, 1991.

Döll, W. and Könczöl, “Micromechanics of Fracture under static and Fatigue Loading: Optical Interferometry of Crack tip Craze Zones”, 137 - 214 in Kausch, H.-H. “*Crazing in polymers*”, **Vol. 2**, Springer Verlag, Germany, 1990

Ellyin, F., “*Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*”, Chapman & Hall, Great Britain, 1997.

Gómez D. P., “*Desplazamientos y esfuerzos de la zona de deformación no-lineal en termoplásticos*”, 32 – 39, Tesis, FC-UNAM, México, 1998.

Gregory, B.L. and Botsis, J. “Experimental investigation of the effects of stress rate and stress level on fracture in polystyrene”, *Journal of Materials Science*, **26**, 1015 – 1026, 1991.

Hahn, Michael T., Hertzberg Richard W., Manson, John A., Rimnac, Clare M. “Comments on The molecular weight dependence of fatigue crack propagation in polycarbonate”, Discussion, *Journal of Materials Science*, **17**, 1533 – 1536, 1981.

Hertzberg R. W. & Manson, J. A., “*Fatigue of Engineering Plastics*”, Academic Press, New York, 1980.

Kallrath, J., Altstädt, V., Schöder, J. P., Bock, H. G., “Analysis of fatigue crack growth behaviour in polymers and their composites based on ordinary differential equations parameter estimation”, *Polymer Testing*, **18**, 11 – 35, 1999.

Lang, R. W., Manson, J. A. and Hertzberg, R. W. “Craze development in Poly(Methyl Metacrylate) During Stable Fatigue Crack Propagation”. *Polymer Engineering and Science*, **24**, No. 10, 833 – 842, 1984.

Morelli, T. A. and Takemori, M. T., “Fatigue-crack advance mechanisms in polymers”, Part 2: Semicrystalline polymers for $T < T_g$ (polybutylene terephthalate), *Journal of Materials Science*, **19**, 385 - 395, 1984.

Neal, T. P., “Performance estimation for electrohydraulic control system”, *MOOG Technical Bulletin*, **26**, 4, 1974.

Parker, A. P. “*The mechanics of Fracture and Fatigue. An Introduction*”, E. & F. N. SPON LTD, New York, 1981.

Pulos, G., “*Nonsteady Crack Propagation and Craze Behavior in PMMA*”, PhD. Thesis, CALTEHC, USA, 1993.

(b) Pulos, G. and Knauss, W., “Constant stress intensity factors through closed-loop control”, *International Journal of Fracture*, **63**, 101-112, 1993.

Pulos, G. and Knauss, W. “Nonsteady crack and craze behavior in PMMA under cyclical loading: I. Experimental preliminaries”, *International Journal of Fracture*, **93**, 145 – 159, 1998.

Ramsteiner, F., Armbrust, T., “Fatigue Crack Growth in Polymers” Test Method, *Polymer Testing*, **20**, 321 – 327, 2001.

Skibo, M. D., Hertzberg, R. W. and Manson, J. A. “Fatigue fracture processes in polystyrene”, *Journal of Materials Science*, **11**, 479-490, 1976.

Srawley, J. E. and Gross, B., “Compendium. Stress Intensity Factors for bend and compact specimens”, *Engineering Fracture Mechanics*, **4**, 587-589, 1972.

Young, R. J., “*Introduction to Polymers*”, Chapman and Hall, Great Britain, 1986.

Williams, M. L., “On the stress distribution at the base of stationary crack”, *Journal of applied mechanics*, **24**, 109-114, 1957.

Anexo I. Instrumentos virtuales para el control del experimento, adquisición de datos e imágenes

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering) es un lenguaje de programación compatible con diferentes sistemas de adquisición de datos y control, que sirve para crear instrumentos de control, medición y automatización de equipos en un ambiente amigable.

La programación en LabVIEW consiste en la creación de instrumentos virtuales (*vi*) por medio de íconos y símbolos que facilitan la programación. Los *vi* cuentan con un diagrama de bloques equivalente al código del programa y un panel de control, que es la interfaz con el usuario. En este último se muestran los datos importantes para el operador.

En LabVIEW es conveniente trabajar con un instrumento principal que coordine las operaciones de varios subinstrumentos (*subvi*). Estos últimos realizan tareas específicas e intercambian con el instrumento principal la información necesaria para otras operaciones.

Como se menciona en la Sección 2.2.4.B y 2.3.3.A, se tienen tres instrumentos virtuales principales con los que se llevan a cabo todas las actividades que tienen que ver con el experimento de fatiga y la obtención de las imágenes. Estos instrumentos se describen a continuación en el orden en el cual se ejecutan.

A.1 Comunicación entre la computadora y los controladores

Para iniciar la comunicación entre la computadora y los controladores 407 y PMC200, se utiliza el instrumento virtual, *init_&_load 1.1.vi* del cual se muestra el panel de control en la Fig. A1. Este instrumento está constituido por una secuencia de tres pasos. En el

primer paso se configuran los puertos seriales con los parámetros de cada controlador; al realizar esta acción con los subinstrumentos *init port 1.vi* y *init port 2.vi*, se crean las variables globales¹ necesarias para los demás instrumentos virtuales que se utilizan.

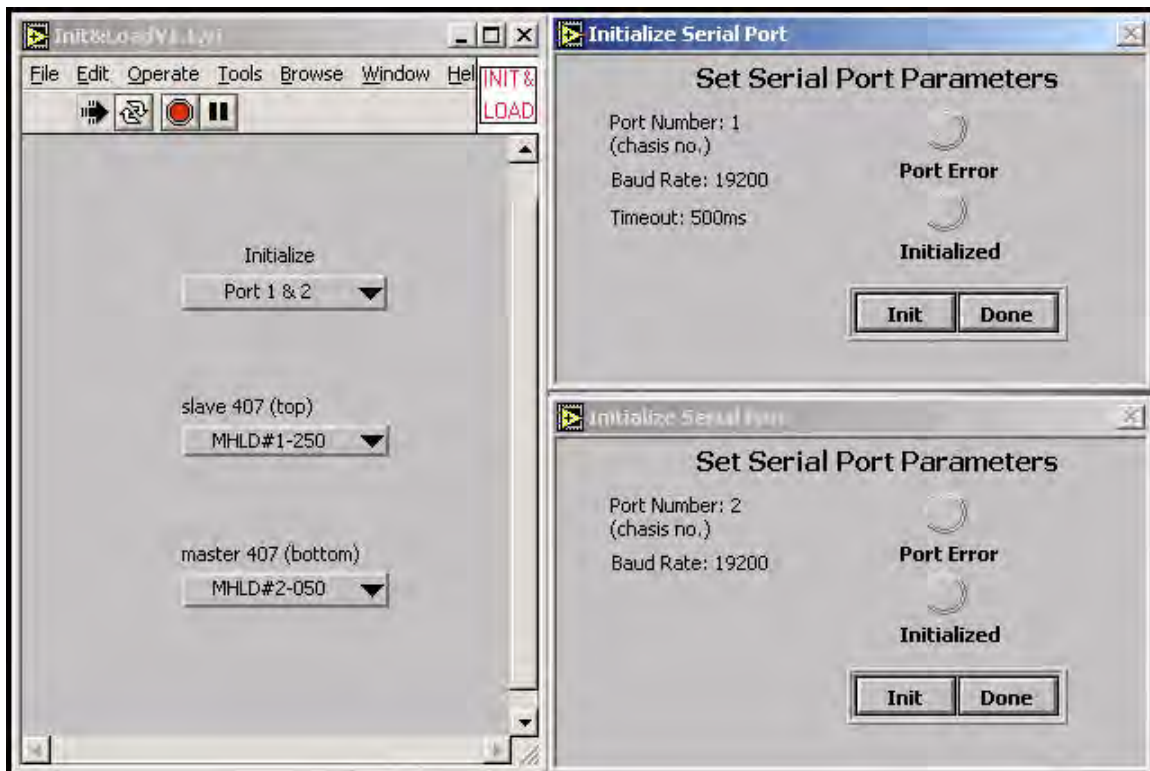


Figura A.1. Panel de control del instrumento virtual *init_&_load 1.1.vi*.

En la Figura A.2 se muestra el primer paso (#0) de la secuencia principal que contiene los subinstrumentos *init port 1.vi* e *init port 2.vi* para los puertos con los que se conectan los controladores 407 y PMC200 respectivamente.

¹ Las variables globales dependen de los parámetros de configuración del controlador y del puerto de la computadora.

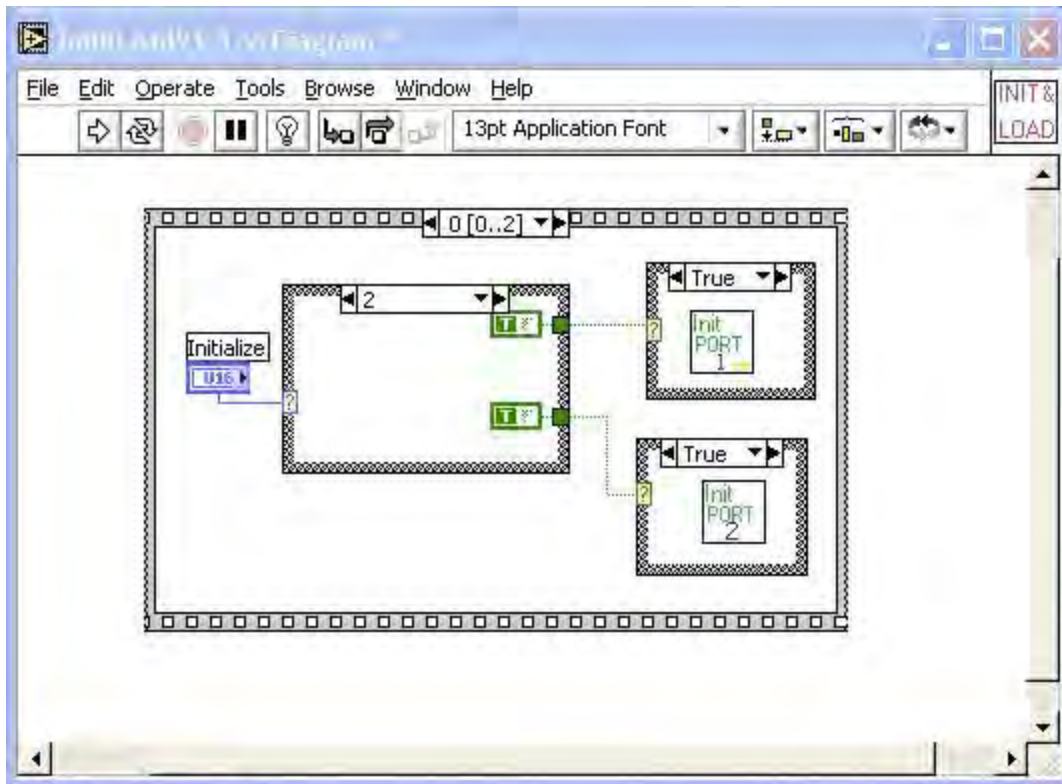


Figura A.2. Diagrama de bloques para el instrumento init_&_load 1.1.vi mostrando el primer paso de la secuencia principal.

En el segundo y tercer paso se envían a los controladores 407 los parámetros de los dispositivos de medición (LVDT y LC) así como las ganancias del controlador, la configuración de la alimentación hidráulica y la configuración del comando de la servoválvula (si recibe una señal interna o externa). El segundo paso (#1) de la secuencia principal se refiere al controlador definido como esclavo y el tercer paso (#2) que se muestra en la Fig. A.3 se refiere al controlador definido como maestro. La secuencia interna en cada paso corresponde a la selección de los parámetros para cada equipo, cada transformador y la escala de los transformadores con la que van a operar.

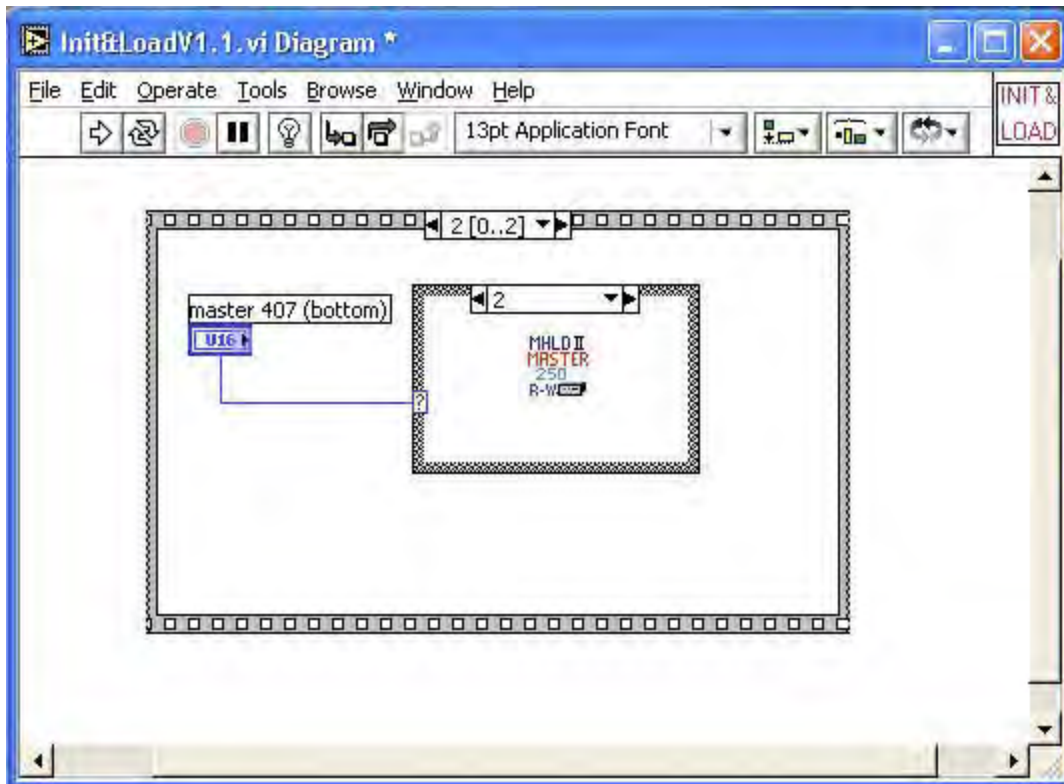


Figura A.3. Diagrama de bloques para el instrumento *init_&_load 1.1.vi* mostrando el tercer paso de la secuencia principal.

Este instrumento se utiliza una sola vez cuando se comienza a trabajar en una sesión con LabVIEW. Durante la sesión se pueden utilizar todos los demás instrumentos virtuales sin problema y sin necesidad de volver a correr el *init_&_load 1.1.vi*.

A.2 El experimento de fatiga

El instrumento virtual para el experimento de fatiga se llama *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*. Este instrumento consta de una secuencia principal en la cual en el primer paso, se confirma la comunicación con los controladores y en el segundo paso se ejecuta el ciclo principal del experimento. El panel de control de este instrumento virtual se muestra en la

Fig. A.4.

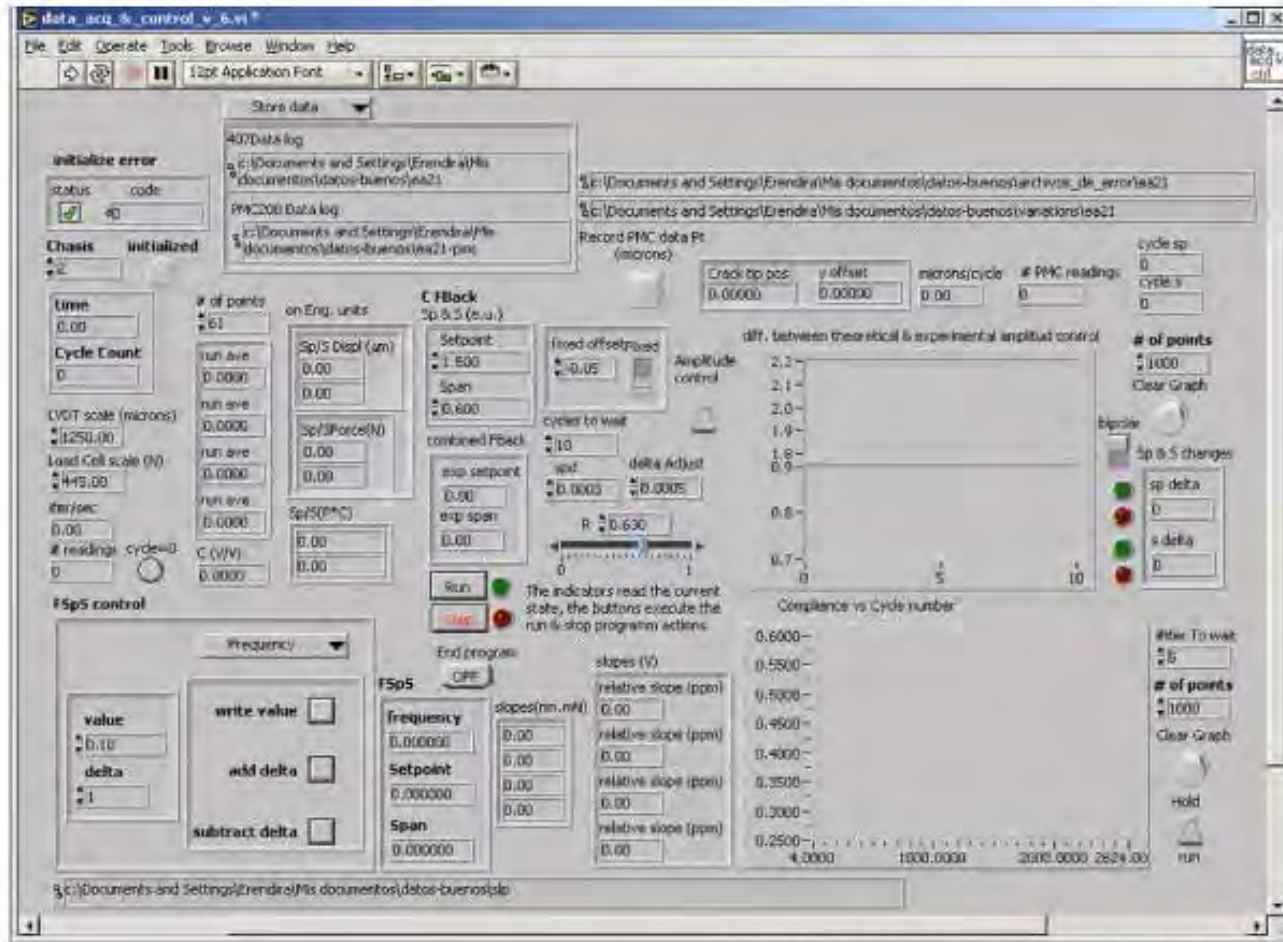


Figura A.4. Panel de control del instrumento virtual data_acq_&_ctrl_v_6.vi

Debido al tamaño de este instrumento virtual se explican los diferentes instrumentos virtuales que lo conforman tratando de agruparlos por el tipo de función que desempeñan en el instrumento principal. De tal forma que se habla de instrumentos básicos que conforman los instrumentos de lectura y escritura, de instrumentos que realizan operaciones matemáticas e instrumentos que generan archivos de los diferentes datos que se registran a lo largo del experimento.

A.2.1 Organización del instrumento virtual principal

La jerarquía de los subinstrumentos dentro del instrumento principal de fatiga *data_acq_&_ctrl_v_6.vi* se observa la Fig A.5.

Cabe mencionar que algunos de los instrumentos virtuales más básicos fueron adquiridos junto con los controladores 407, pero en su mayoría fueron modificados para que el instrumento principal fuera más eficiente, es decir que sea capaz de ejecutar el ciclo principal un mayor número de veces por segundo.

A.2.2 Descripción de los subinstrumentos virtuales generales.

Del nivel mas básico hacia arriba, el subinstrumento de comunicación entre la computadora y el controlador 407 es el *407 Serial Comm.vi*. Los instrumentos que construyen los comandos, ya sean de lectura o escritura, y los desglosan para devolver al operador un número son: *407 Build Write.vi*, *407 Build Read.vi*, *407 Integer Param.vi*, *407 Float Param.vi*, *407 Extract integer.vi*, *407 Extract float.vi* y están directamente relacionados con el *407 Serial Comm.vi*. Para el controlador de movimiento PMC200, se tiene un instrumento equivalente, que es el *PMC Serial Comm.vi*.

Los instrumentos de lectura están formados por secuencias que en cada paso se ejecuta un comando específico para leer los diferentes valores obtenidos con el voltímetro digital del controlador 407 (DVM). Estos instrumentos se comunican con el procesador (módulo 6) del controlador 407 y son:

- a) *Check chasis.vi*: confirma la comunicación de la computadora con el controlador 407 con el cual se trabaja.
- b) *407 Cycle count modif. v_1.vi*: Lee el número de ciclo aplicado por la función de carga.
- c) *407 DVM Peaks & Valleys.vi*: lee los valores de los máximos y mínimos de la función que se tiene programada en el controlador. Esta función puede ser cíclica (sinusoidal, cuadrada, triangular), una rampa o una función externa.

Para el controlador de movimiento se tiene el instrumento:

-
- d) *PMC 200 position read.vi*: Este instrumento lee la posición de la punta de la grieta (en las coordenadas definidas como la longitud de la grieta, a (crack tip position) y la desviación de la punta de la grieta (y-offset). Las lecturas obtenidas por este vi se despliegan en micrómetros en el panel de control principal.

Los instrumentos de escritura se comunican con el controlador dentro del 407(módulo 0) y son:

- e) *FSpS 3 outs*: este instrumento manipula tres diferentes parámetros de la función de carga que son la frecuencia, el valor promedio (Set point) y la amplitud (Span). Incluye el subinstrumento FSpS % (por las siglas de estos parámetros) que ejecuta los cambios en los valores de estas variables uno a uno. Debido a que existe un valor mínimo en el cual se pueden modificar estos parámetros (la delta) es necesario leer el valor real que se registró en el controlador. Este valor se despliega en el panel de control del instrumento principal.
- f) *Cycle #=zero.vi*: inicia el número de ciclo en el cual terminó el experimento anterior para comenzar desde cero ciclos el siguiente experimento.
- g) *Run & Stop.vi*: Envía el comando para iniciar o detener el programa que ejecuta la función de carga en el controlador de manera independiente del inicio o fin de la ejecución del instrumento virtual.

Estos tres instrumentos se ejecutan manualmente en el instrumento virtual, es decir, el operador determina los valores de estos parámetros y el instrumento virtual envía esta información al controlador una vez que se ejecuta el nuevo ciclo.

-
- h) *+ - delta v_2.vi*: Este subinstrumento escribe una cantidad positiva o negativa de deltas necesarias para conservar los parámetros del control \mathfrak{R} o simplemente ajustar alguno de los parámetros de la función de carga para un nuevo experimento. Este instrumento despliega los ajustes que ejecuta en el mismo indicador que el FSpS *%.vi* y puede ejecutarse manualmente desde el panel de control o automáticamente dentro del control externo \mathfrak{R} .

El instrumento general ejecuta por su cuenta diferentes acciones como encender y apagar la sección propia de control, definir el tipo de control, realizar operaciones matemáticas y gráficas que sirvan como indicadores del experimento en tiempo real, como elementos de decisión o simplemente estadística y también genera los archivos de datos. Estos otros subinstrumentos son:

- i) *4run-aves.vi*: incluye el subinstrumento Run-Ave *v_4* que calcula el promedio matemático, para un determinado número de ciclos definido por el operador, de los máximos y mínimos obtenidos del instrumento 407 DVM pks & vllys, con el fin de reducir señales de ruido o incertidumbre de la medición.
- j) *UPV SpS.vi*: Calcula, a partir de los datos obtenidos de 407, los parámetros característicos del experimento, necesarios para el control de la máquina servohidráulica, como deformabilidad, dP, dU, valor promedio y amplitud experimentales.
- k) *Control adjust v_1.vi*: compara los valores del valor promedio y la amplitud combinados que se definen para el control externo \mathfrak{R} con los valores

experimentales y calculan el número de deltas de ajuste que va a escribir el instrumento + - delta v_2.vi.

- l) *Vel m/cycle.vi*: calcula la velocidad de propagación de la grieta cada vez que se adquiere un dato de posición de la punta con respecto al número de ciclos.
- m) *Save 2 files data.vi*: Crea dos tipos de archivos. Ambos contienen el tiempo en el que se tomaron los datos y el número de ciclo. El primero guarda los valores obtenidos del 407 DVM pks & vllys.vi correspondientes a todos los ciclos que se producen, en un archivo de 6 columnas. El segundo guarda el promedio matemático de un determinado número de ciclos (calculados por el Run Ave.vi) y la posición de la punta de la grieta obtenida del PMC 200 pos read.vi.
- n) *Save D's Sp& S.vi*: este instrumento genera un archivo en el cual se guardan las modificaciones efectuadas al Set point y a la amplitud (span), incluyendo el tiempo y el número de ciclo en el cual se efectuaron los cambios.

La secuencia en la cual se ejecutan las diferentes actividades están condicionadas a no ejecutar acciones de escritura y lectura en el controlador durante el mismo ciclo para evitar que se produzcan errores en la comunicación serial. Un ejemplo es el caso del FSpS%.vi y el 407 DVM pks & vllys.vi que la ejecución de uno de ellos esta condicionada a la no ejecución del otro por un valor de verdad o falsedad de un caso. Cuando se trabaja con el control de amplitud, los cambios se ejecutan en un lazo cerrado, es decir, el operador no puede intervenir en esas acciones de control.

Las gráficas que genera el instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi* nos dan una idea del comportamiento de la deformabilidad con respecto al tiempo y una relación de los niveles que conservan los parámetros de control (S_p y S).

A.2.3 Ejecución del instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*

La primera etapa que se ejecuta en este instrumento (#0) se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. A.6, el cual tiene adjunta la sección del panel de control en la cual se muestran los indicadores de que las operaciones de confirmar la comunicación con el controlador ocurrieron sin error. También se muestra el número de controlador (chasis) con el cual se está trabajando, que es seleccionado por el operador al inicio del experimento.

En el segundo paso de esta secuencia (#1), antes de ejecutarse el ciclo principal del programa, se definen las escalas de los transformadores de fuerza y desplazamiento para obtener todos los datos en unidades de ingeniería (N y micras). Además se inician los arreglos en los cuales se van a descargar los datos obtenidos del controlador 407 para las siguientes operaciones.

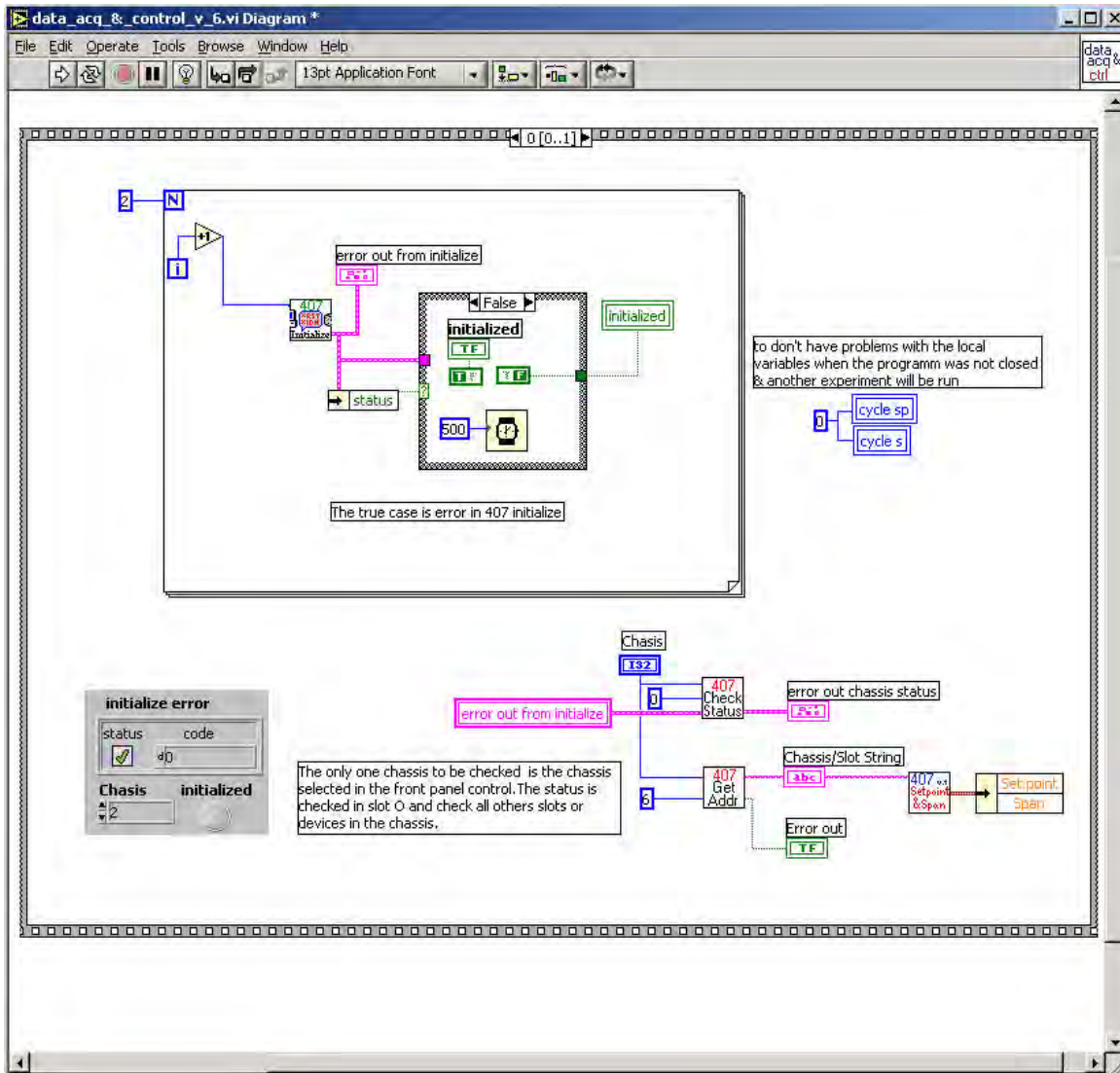


Figura A.6. Diagrama de bloques del primer paso de la secuencia principal del instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*.

Dentro del ciclo principal, las primeras acciones que se revisan están relacionadas con la existencia de cambios de los parámetros en la función de carga; si estos cambios existen, entonces se ejecutan y se salvan en el archivo correspondiente. Si no existen cambios, entonces el programa lee el número de ciclo y lo compara con el valor de la lectura

anterior para poder continuar con la secuencia secundaria. La sección del panel de control y el diagrama de bloques correspondiente a estas acciones se muestra en la Fig. A.7.

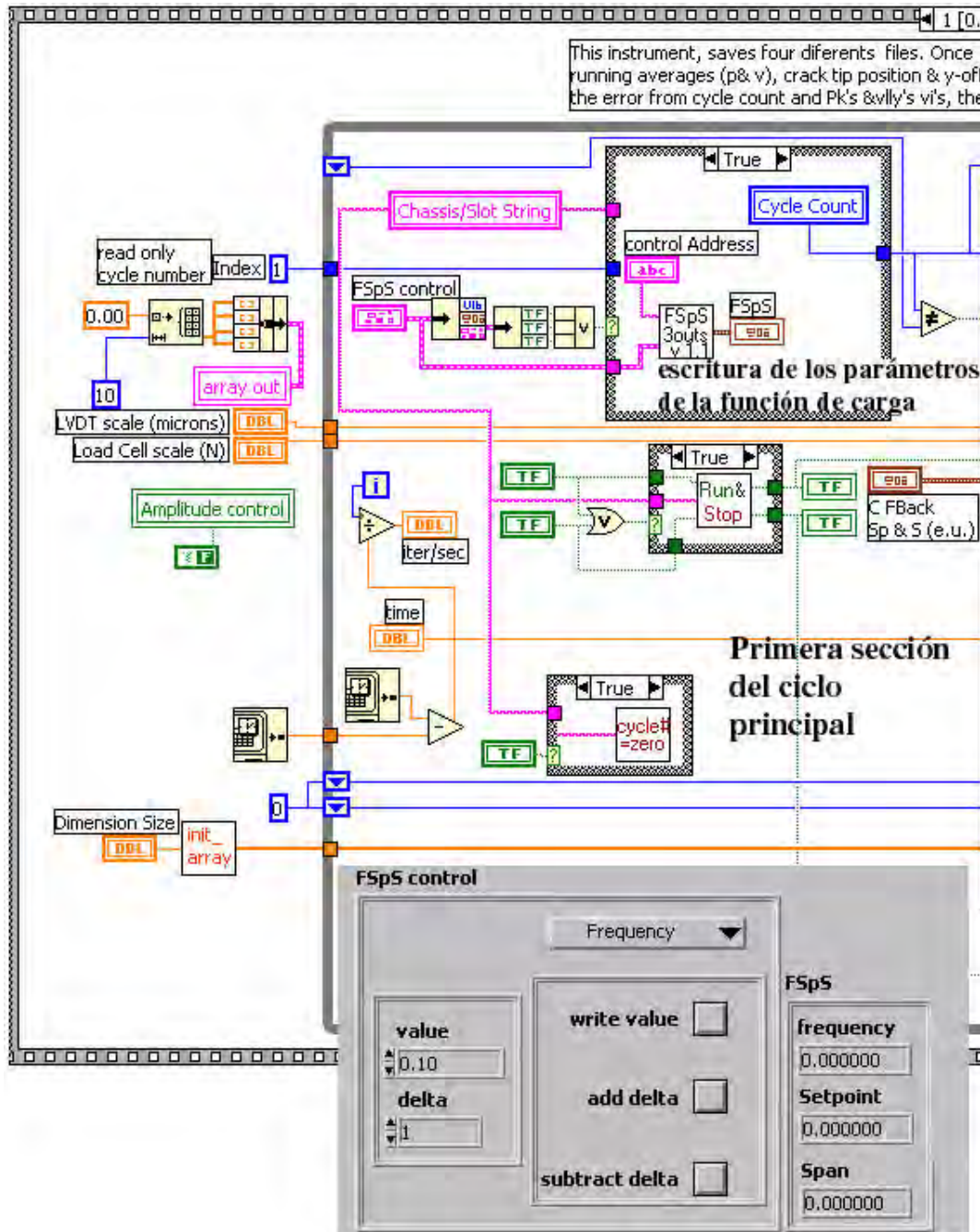


Figura A.7. Diagrama de bloques de la primera parte del segundo paso de la secuencia principal del instrumento data_acq_&_ctrl_v_6.vi.

La escritura de parámetros y la lectura del número de ciclo son acciones que se ejecutan en fracciones de segundo. Por esta razón debe esperarse a que el número de ciclo cambie para continuar con la secuencia secundaria.

En la Figura A.8, la lectura del número de ciclo se muestra en el caso falso de los cambios de parámetros de la función de carga y en la secuencia secundaria se muestra el primer paso (#0). En este paso se leen los valores de los máximos y mínimos de la fuerza y el desplazamiento que se obtienen al aplicar la carga cíclica. Estos datos no se muestran en el panel de control, solamente se almacenan en el archivo correspondiente. También se calculan los promedios de los máximos y mínimos, la deformabilidad (C), el valor promedio (S_p) y la amplitud (S). Estos datos si se muestran en el panel de control y se utilizan en el siguiente paso de esta secuencia (#1; Fig. A.9) para calcular los parámetros de ajuste del control \mathfrak{R} y efectuar dichos ajustes

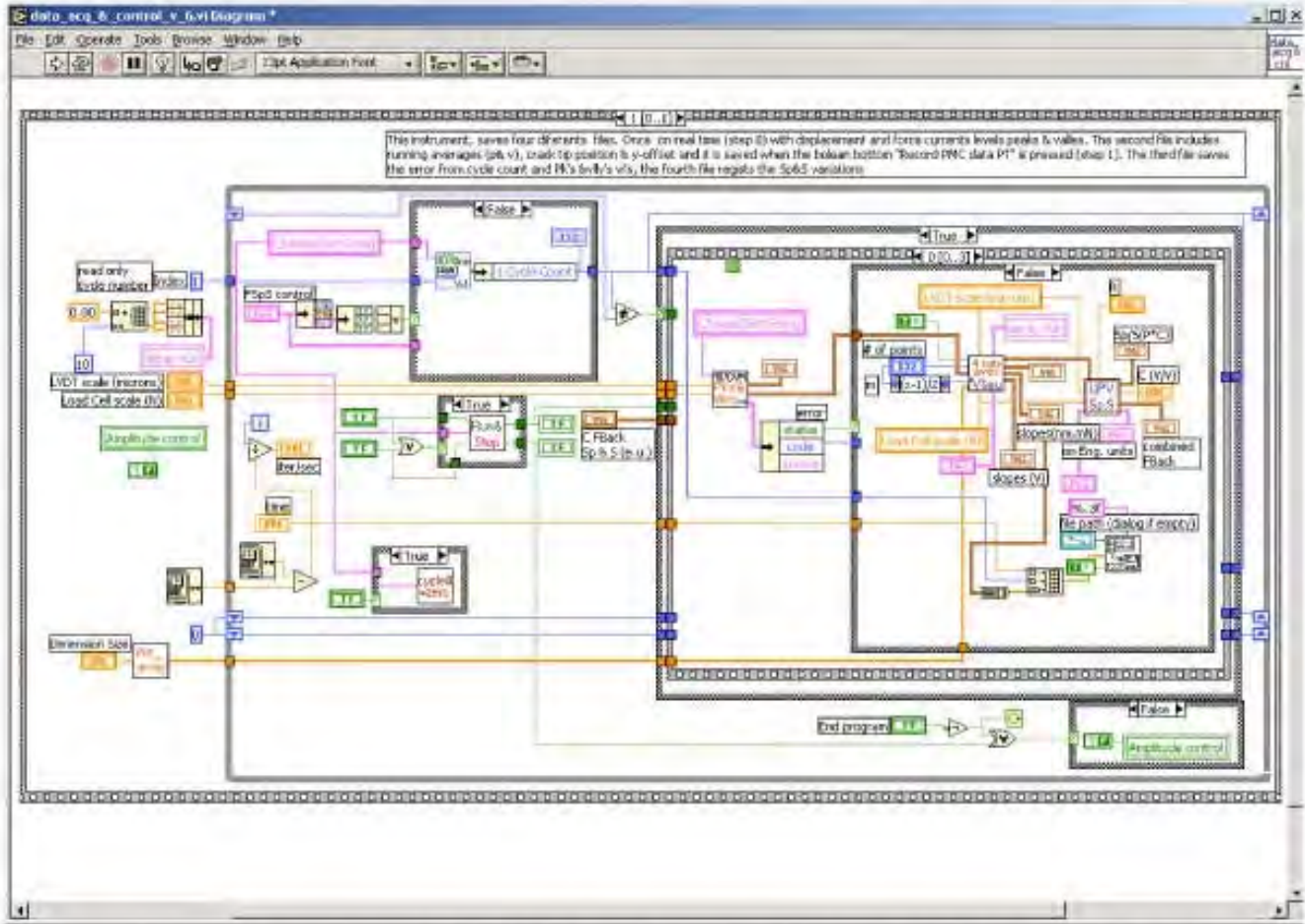


Figura A.8. Diagrama de bloques del instrumento virtual *data_acq_&_ctrl_v_6.vi* mostrando el segundo paso de la secuencia principal y el primer paso de la secuencia secundaria 167

Figura A.8. Diagrama de bloques del instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*, mostrando el segundo paso de la secuencia principal y el primer paso de la secuencia secundaria.

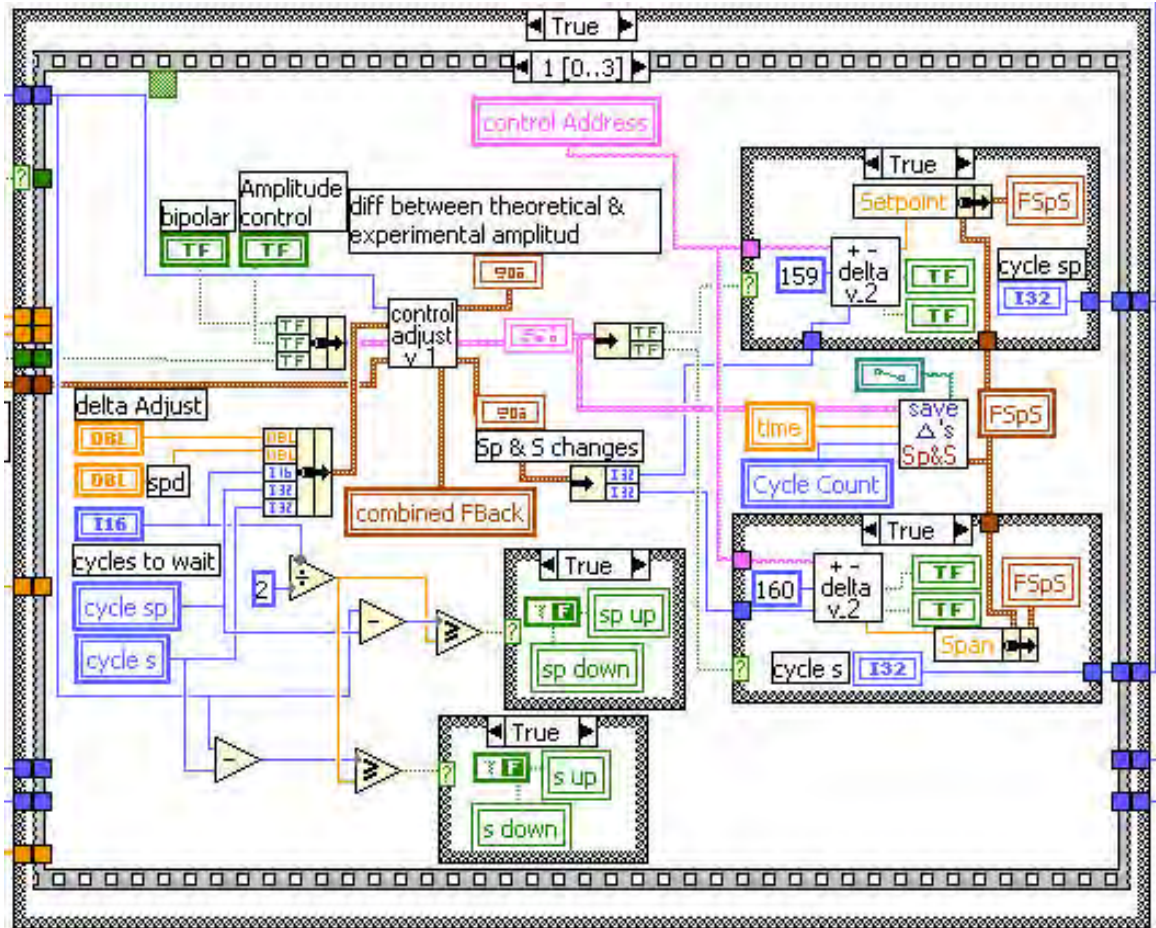


Figura A.9. Diagrama de bloques del segundo paso de la secuencia secundaria del instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*

La lectura de la posición de la grieta se ejecuta en caso de ser solicitada por el operador en el tercer paso (#2; Fig. A.10) de esta secuencia secundaria. Una vez obtenida la nueva longitud de la grieta se calcula la velocidad de propagación de la grieta por número de

ciclo. Tanto la posición de la punta de la grieta como la velocidad de propagación de la misma se despliegan en el panel de control del instrumento principal.

En el último paso de esta secuencia (#3; Fig. A.11) se almacenan los datos obtenidos durante el ciclo en dos archivos diferentes, el primero con los valores de los máximos y mínimos de la función de carga para la fuerza y el desplazamiento ciclo a ciclo y el segundo para la posición de la punta de la grieta junto con los valores promedio de los máximos y mínimos.

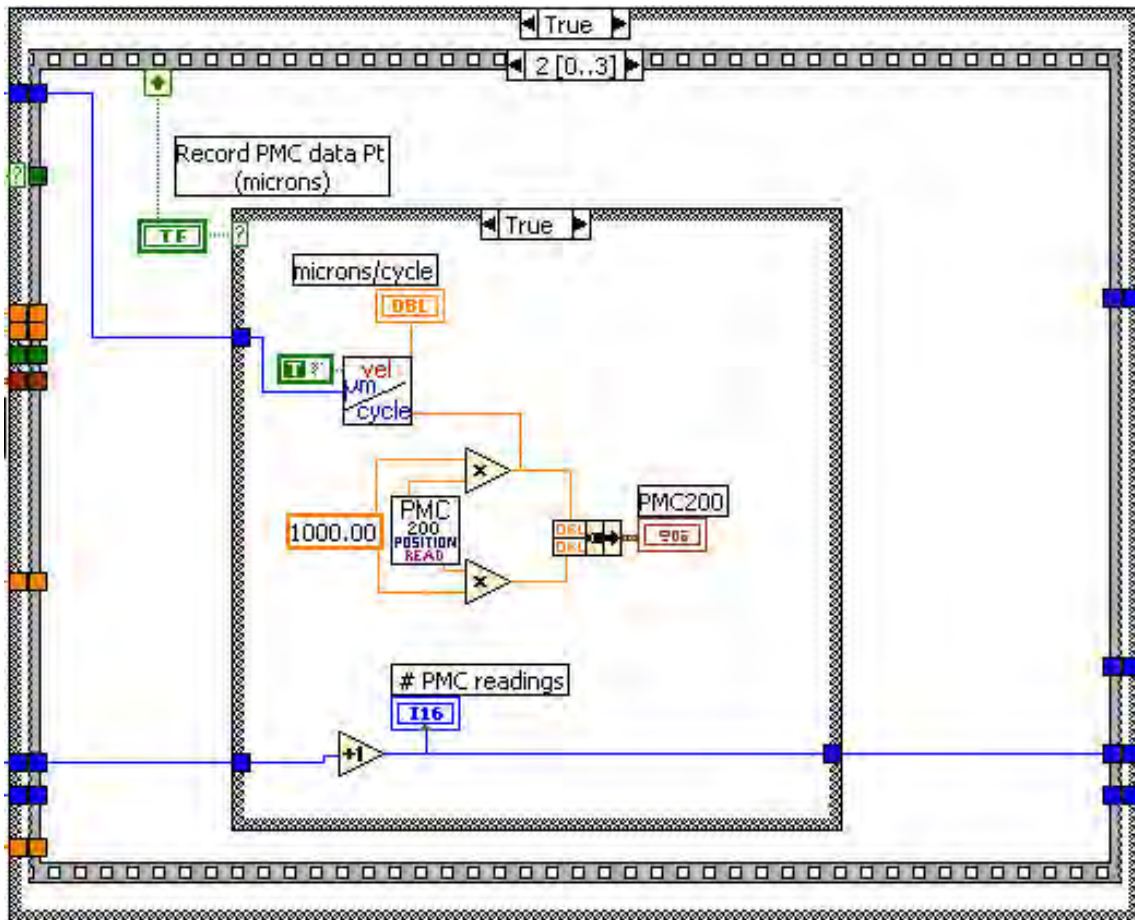


Figura A.10. Diagrama de bloques del tercer paso de la secuencia secundaria del instrumento `data_acq_&_ctrl_v_6.vi`.

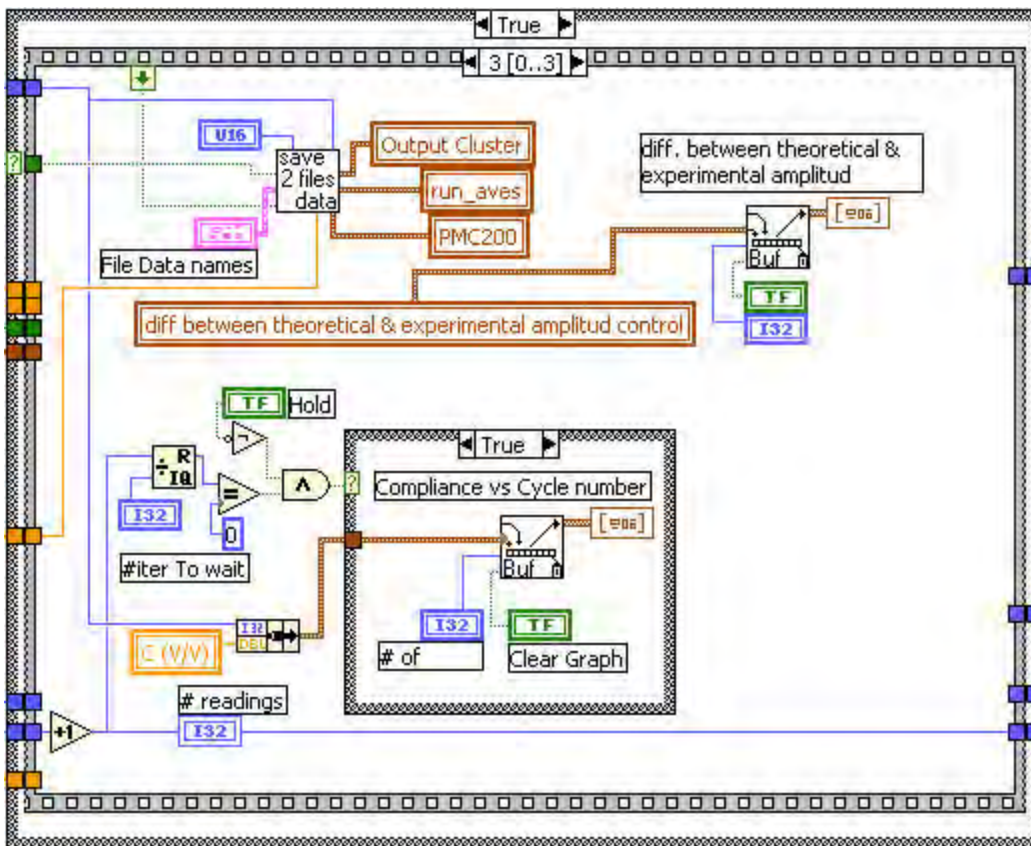


Figura A.11. Diagrama de bloques del último paso de la secuencia secundaria del instrumento *data_acq_&_ctrl_v_6.vi*.

Este ciclo principal continúa ejecutándose mientras el operador no interrumpa la ejecución del programa desde el panel de control.

A.3 Barrido de la superficie generada por fractura

Una vez que la probeta se fractura completamente, se selecciona una de las partes para la obtención de las fotografías que van a formar el mosaico de la superficie fracturada. La probeta se mueve en la dirección de la propagación de la grieta con un paso de 1.2mm y en la dirección perpendicular con un paso de 1mm. Para este movimiento se utiliza el

instrumento virtual *PMC move.vi* que tiene como subinstrumento el *PMC one move.vi* y *PMC serial comm.vi*. Estos instrumentos son los únicos que escriben comandos en este controlador. Tanto el panel de control del instrumento principal como el diagrama de bloques se muestran en las Figs. A.12 y A.13. En esta última se muestran los cuatro pasos de la secuencia de este instrumento virtual.

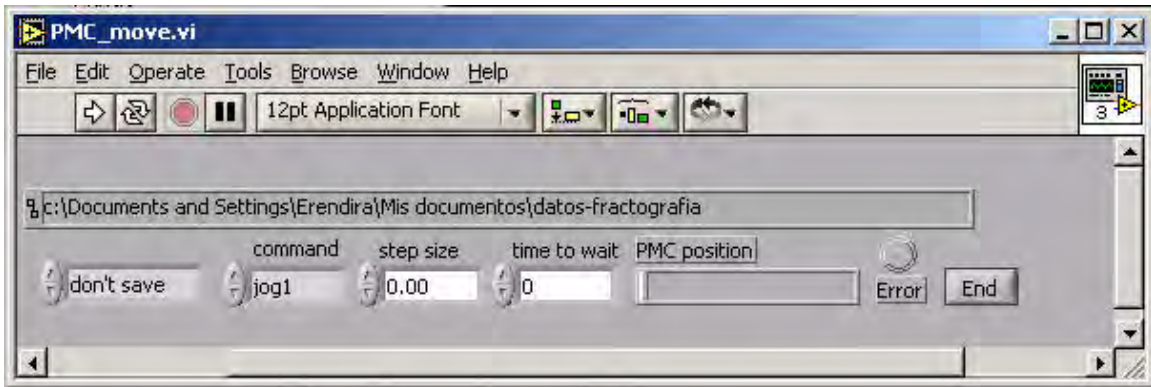


Figura A.12. Panel de control del instrumento virtual *PMC move.vi*.

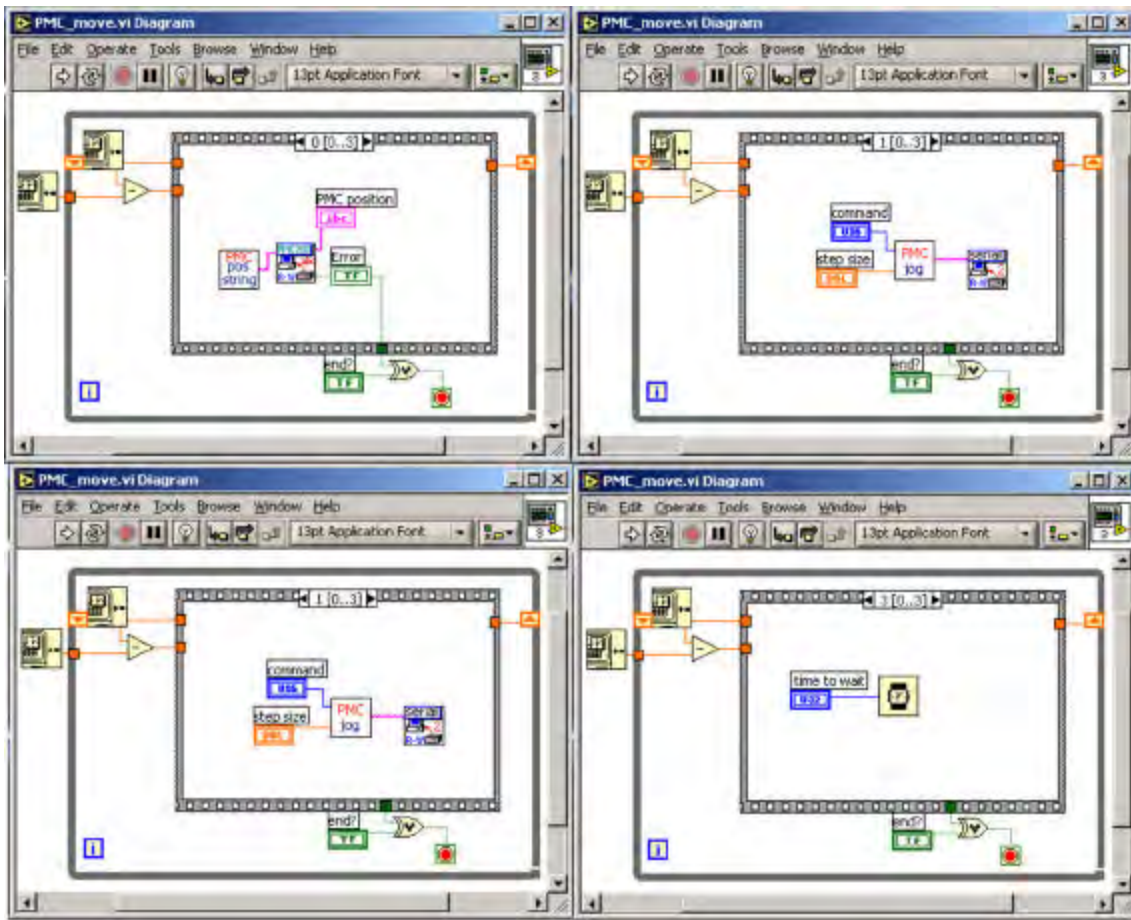


Figura A.13. Diagrama de bloques del instrumento virtual PML move.vi.

Como se menciona anteriormente, los instrumentos virtuales básicos se utilizan para distintos instrumentos de un nivel intermedio en la jerarquía del instrumento principal, de igual manera que los instrumentos del nivel intermedio de lectura de parámetros del controlador 407 (por ejemplo) se utilizan en otros instrumentos principales que no necesariamente están relacionados con el experimento de fatiga.