

METODOS OPTICOS EN FRACTURA DINAMICA

F.G. Benitez

Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla,
Av. Camino de los Descubrimientos, 41092-Sevilla.

Resumen. En esta ponencia se revisan sucintamente las técnicas ópticas con aplicación contrastada en Dinámica de Fractura, haciendo énfasis en sus ventajas e inconvenientes. Una de las secciones se ha dedicado al sistema óptico de captación de imágenes, que debido a su alto costo económico exige un detallado estudio antes de su posible adquisición con vistas a su utilización en investigación experimental. Finalmente se presenta una breve lista muy seleccionada de la bibliografía imprescindible para introducirse en este fascinante área.

Abstract. This work is an overall review of the optical methods widely used and accepted in Fracture Dynamics applications. It is focused on the advantages and drawbacks of the different techniques. One of the sections is devoted to the optical system of image capturing, due to the fact that it is a costly piece of equipment that needs a detailed study before purchasing in order to be used in experimental research. Finally a brief reference list basic for working in this fascinating area is presented.

1 INTRODUCCION

El proceso de fisuración o fracturación de un material es siempre un evento dinámico: la grieta, fisura, entalla o defecto, aparece en un instante dado, se desarrolla durante un periodo de tiempo (crece o evoluciona de determinada manera) y finalmente deja de evolucionar (se detiene) o desaparece por cambio de naturaleza (la grieta desaparece y en su lugar aparecen nuevas superficies, tal y como ocurre en el caso de la separación de un elemento en varias partes). Desde el punto de vista técnico, las tres fases anteriores se clasifican bajo las denominaciones de generación y nucleación, crecimiento, y detención.

El objeto de la Dinámica de Fractura consiste en dar respuesta, proporcionando las bases cualitativas y cuantitativas, al comportamiento de grietas y fisuras, durante el proceso de crecimiento; el cual se encuentra caracterizado principalmente por la velocidad de crecimiento, entre otros factores de menor importancia (tal como la aceleración). Desde el punto de vista cualitativo de un observador no técnico, esta velocidad podría clasificarse en el rango bajo, medio o alto, atendiendo a nuestra escala de tiempo y a la capacidad visual del ojo humano; sin embargo, cuanti-

tativamente esta clasificación puede realizarse de una forma más precisa adimensionando la velocidad de crecimiento por velocidades características de las ondas que pueden transmitirse por el material o elemento implicado (ondas c_p , c_s , superficiales de Rayleigh y Love, de flexión, de torsión, etc). Así, cuando el *ratio* velocidad de crecimiento frente a velocidad de ondas es bajo, los efectos inerciales son bajos y no puede hablarse de Dinámica de Fractura sino de un proceso estacionario *cuasi-estático* de crecimiento de grieta. Sólomente cuando el *ratio* anterior alcanza valores de tipo medio y alto puede, propiamente, hablarse de Dinámica de Fractura.

Desde el punto de vista científico al estar el objetivo de esta materia nítido, pero solo parcialmente desarrollado y alcanzado, su interés es indudable para eruditos, estudiosos e investigadores. Desde el punto de vista ingenieril, existen otras facetas de este área que merecen mención y que presentan una contraprestación práctica y aplicada. La primera de ellas presenta un carácter conservador: establecer todas las bases y fundamentos explicativos para dar respuesta al hecho del fallo de los materiales, elementos y estructuras en las que aparecen grietas y fisuras, con el fin de evitar su crecimiento y la eventualidad del fallo

final (i.e: aparición y crecimiento de grietas en el fuselaje de una aeronave); la segunda faceta tiene una orientación diametralmente opuesta: definir las condiciones más optimas para que estos defectos crezcan controladamente, a velocidad determinada fija, a máxima velocidad posible, etc.(i.e: crecimiento de grieta en el anillo de separación interfases en una lanzadera espacial).

Como en todas las áreas científicas en las que tiene cabida la experimentación, en Dinámica de Fractura esta metodología pretende reproducir el crecimiento de grietas en condiciones controladas, monitorizando parcial o totalmente el proceso. El objeto de esta comunicación es presentar un cuadro resumido de los métodos útiles para la monitorización óptica de fracturas dinámicas, la cuantificación de los estados deformacionales y la determinación de los tensionales.

2 METODOS OPTICOS

Los métodos ópticos, en experimentación, presentan la ventaja de capturar simultáneamente un cúmulo ingente de información adicional a la propia información básica que se pretende obtener. Así por ejemplo, una serie de fotogramas correspondientes al crecimiento de una grieta, no solo permite extraer la velocidad de ésta sino que puede contener el proceso de creación de una ramificación (*branching*) o la propagación de los frentes de onda circulares alrededor del fondo de la grieta, entre otras informaciones no explícitamente buscadas.

La aplicación de metodologías ópticas, como herramientas en la experimentación en Dinámica de Fractura, exige un sistema de aparataje que es subdividido en las técnicas ópticas de medida (iluminación visible, infrarroja, X; lentes y material óptico; etc.) y el sistema de captación del evento. Atendiendo a esta subdivisión, en esta comunicación, se presentará una breve descripción de los distintos equipos y metodologías existentes hasta la fecha, más comúnmente utilizados con éxito.

2.1 Técnicas Ópticas de Medida

Los sistemas utilizados persiguen visualizar los estados deformacionales y/o tensionales que se generan durante el proceso de crecimiento y propagación de una grieta. Las técnicas en las que se

basan estos sistemas se clasifican atendiendo a que puedan aplicarse al modelo real que se desea estudiar o bien a una réplica del mismo, entre las más conocidas se tienen:

2.1.1 Fotoelasticidad

Utiliza modelos réplica del original fabricados en material birrefringente. La superficie del modelo fotoelástico actúa como un divisor de haz, dividiendo éste en dos componentes polarizados ortogonalmente. Estos dos componentes atraviesan el material fotoelástico, que deberá estar cortado en láminas delgadas de espesor constante, recorriendo diferentes longitudes debido al cambio experimentado por el índice de refracción en diferentes puntos del material como consecuencia del estado tensional al que se encuentre sometido. Cuando estos componentes emergen del modelo, presentan una diferencia de fase relativa; la recombinación de estos dos componentes da lugar a un mapa de franjas interferométricas que proporcionan la información adecuada para cuantificar el estado tenso-deformacional. Esta diferencia de fase relativa es directamente proporcional a la diferencia entre las dos tensiones principales con direcciones perpendiculares a la de propagación del rayo luminoso incidente, pudiéndose expresar esta relación como:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N \frac{f}{h},$$

donde f es una constante que depende del material birrefringente y de la longitud de onda de la luz monocromática polarizada utilizada, h el espesor de la lámina del material analizado, y N es la razón entre la diferencia de fases y 2π ($\frac{\Delta}{2\pi}$).

Las franjas que aparecen cuando una réplica de un modelo bidimensional fabricado en material birrefringente se visualiza en un polariscopio circular, estando sometido a un estado tensional, representan el lugar geométrico en el que la diferencia de tensiones principales (promediadas a lo largo del espesor de la lámina) es una constante.

Esta metodología de análisis se denomina fotoelasticidad por transmisión y es únicamente válida para el ensayo de réplicas fabricados en materiales birrefringentes. Un esquema de la disposición experimental descrita se muestra en la figura 1.

Una extensión de esta técnica a réplicas tridimensionales fabricadas en material birrefringente per-

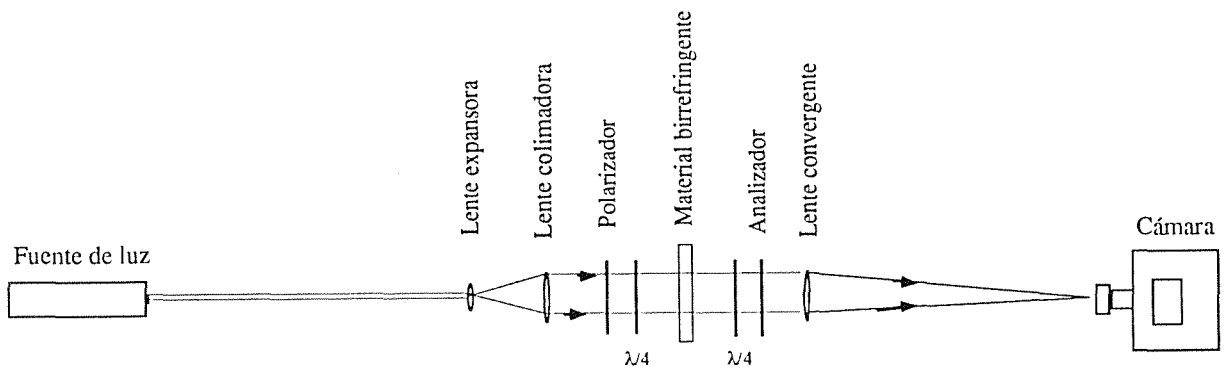


Figure 1: Fotoelasticidad por transmisión

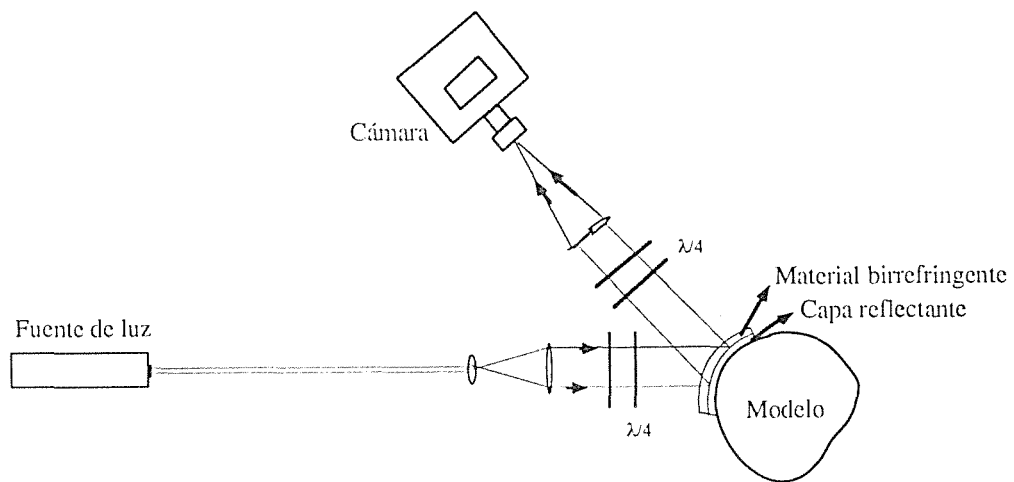


Figure 2: Fotoelasticidad por reflexión

mite analizar estados tensionales interiores del modelo. Existen diversas variedades más o menos sofisticadas:

Por congelación de tensiones. Consiste en aplicar el estado de cargas sobre un modelo fabricado en plástico birrefringente cuando está sometido a una temperatura alta; enfriamiento hasta temperatura ambiente; eliminación del sistema de cargas; cortado del modelo en rebanadas delgadas; visualización en el polariscopio del estado tensional de cada rebanada. Presenta el inconveniente de que solamente puede ser aplicado a cargas estáticas, pero no dinámicas.

Por holografía fotoelástica. Consiste en lanzar una lámina de luz monocromática y polarizada por la zona que se desea observar, atravesando una sección del modelo tridimensional birrefringente. Es una técnica aplicable al análisis de estados tensionales producidos por cargas dinámicas, ya que la técnica no exige que se destruya el modelo para su análisis. Al igual que las técnicas anteriores, presenta el grave inconveniente de que solo puede aplicarse a réplicas en material birrefringente.

Esta técnica puede también aplicarse a modelos reales transformando la transmisión en reflexión, tal y como se muestra en la figura 2.

El fundamento de la fotoelasticidad por reflexión consiste en depositar una capa de material birrefringente sobre la superficie del modelo a analizar, que podrá ser opaco, y sobre el que se habrá o bien depositado una fina capa de material reflectante o bien pulido hasta conseguir características de reflexión especular (del orden de rugosidades inferiores al 50% de la longitud de onda utilizada para visualizar el proceso). En esta técnica, las franjas obtenidas representan el lugar geométrico de los puntos de la superficie del modelo en el que la diferencia de tensiones principales es una constante. Presenta como grave inconveniente la falta de sensibilidad (pocas franjas) para altos niveles de tensión.

2.1.2 Moire Geométrico

El efecto moire es la interferencia mecánica de la luz debido a la superposición de líneas. La dis-

tribución de líneas oscuras que se observan cuando dos mallas repetitivas de líneas se superponen se denomina mapa de moire. A través de este mapa de franjas se puede cuantificar con gran precisión el movimiento relativo entre las dos mallas. Una franja de moire es el lugar geométrico de los puntos con componente de desplazamiento perpendicular a la orientación de la rejilla constante.

La técnica consiste en superponer, por adhesión, una rejilla sobre la superficie del modelo a ensayar, la cual experimentará la misma deformación que la superficie del modelo. La comparación óptica de esta rejilla con otra no deformada reproducirá el mapa de franjas de moire. Existen diversas disposiciones experimentales para visualizar las franjas. En las figuras 3 y 4 se muestran dos de ellas, la de la figura 3 corresponde a una disposición para moire en transmisión por lo que exige que el modelo sea transparente (y por consiguiente una réplica del original), la de la figura 4 muestra la disposición en reflexión y al igual que en la técnica de fotoelasticidad por reflexión se necesita que la superficie del modelo sobre la que se adhiera la rejilla sea especularmente reflectante.

La expresión que relaciona la deformación coplanaria ϵ_x con el orden de franjas es:

$$\epsilon_x = p \frac{\partial N_x}{\partial x},$$

donde p es la densidad de líneas de las rejillas de moire y N_x el orden de franjas en la dirección x .

2.1.3 Trazas de Moire (Shadow)

En esta técnica se utiliza una única rejilla, cuya proyección sobre la superficie a analizar da lugar a un sombreado que al interferir con la rejilla original da lugar a franjas. El mapa de franjas obtenido se correlaciona con el desplazamiento no coplanario experimentado por la superficie del modelo. Las franjas son el lugar geométrico de los puntos de desplazamiento no coplanario constante.

En la figura 5 se representa un esquema de la disposición experimental. Esta consiste en iluminar con luz colimada, y con un ángulo de incidencia no perpendicular a la superficie de éste, el modelo a través de una rejilla. Esta iluminación produce un sombreado en la superficie a analizar. Si esta superficie se hace reflectante, la interferencia de la luz reflejada por el espécimen y la propia rejilla

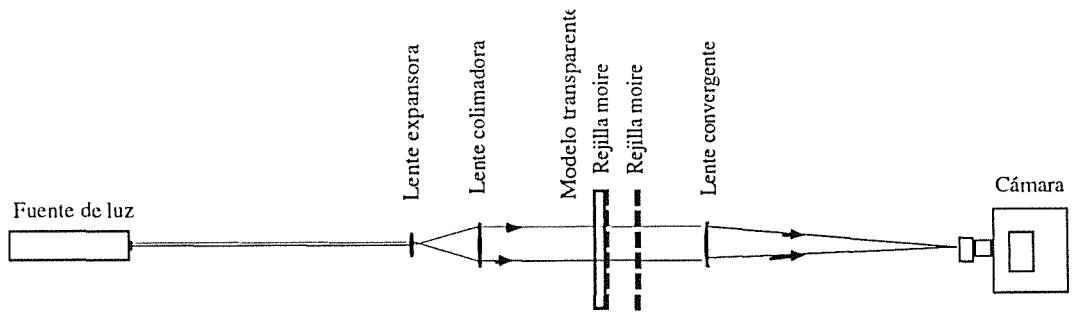


Figure 3: Moire geométrico por transmisión

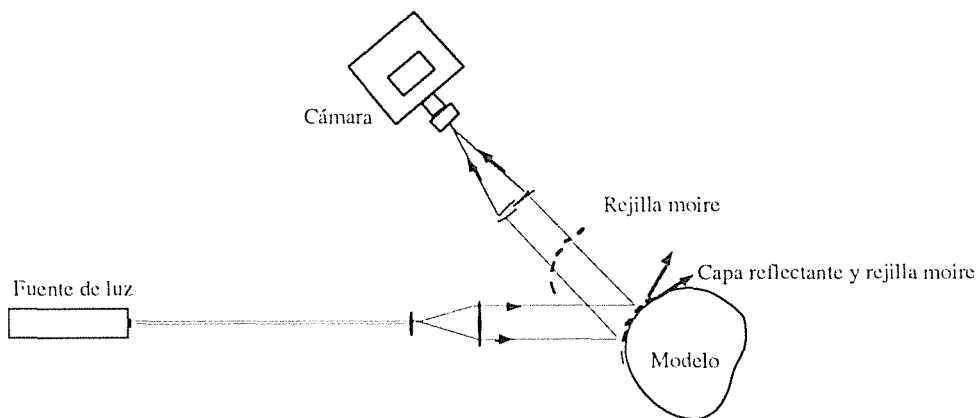


Figure 4: Moire geométrico por reflexión

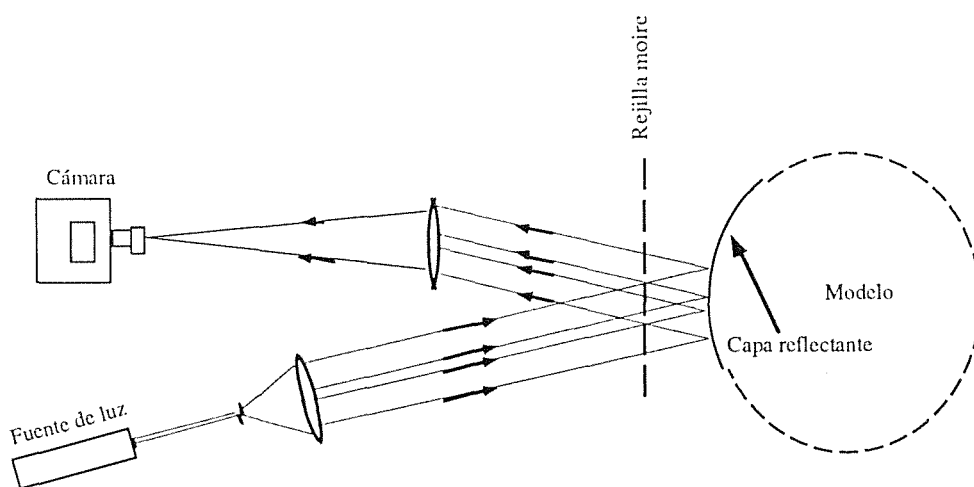


Figure 5: Trazas de Moire

da lugar a un campo de franjas observado en la dirección perpendicular.

La relación entre el orden de franjas y el desplazamiento no coplanario viene dado por:

$$u_z = N \frac{p}{\tan \alpha},$$

donde N es el orden de franja, p la densidad de líneas de la rejilla y α el ángulo de incidencia de la iluminación.

2.1.4 Moire Difractivo

Las dos técnicas de moire presentadas anteriormente no se caracterizan por la alta sensibilidad, motivada principalmente por los fundamentos físicos en los que se basa la interferometría de luz no colimada. En el caso en el que se desee una más alta definición y sensibilidad es necesario acudir a la utilización de luz coherente, entrando en juego los efectos de difracción cuando se utilizan rejillas.

La técnica de moire difractivo consiste en insertar en el haz reflejado por, o transmitido a través de, un modelo dos rejillas separadas a una determinada distancia. Esta disposición da lugar a que el haz incidente en la primera rejilla se difracte en tres haces con ordenes de difracción 0, +1 y -1; a su vez cada uno de estos haces, a su paso por la segunda rejilla, sufre una nueva difracción en otros tres haces. La superposición de estos haces mediante una lente filtrante (que actúa como un analizador espectral) y su focalización en un plano imagen permite obtener unos órdenes de difracción conjuntos denotados por 0, ± 1 , ± 2 , etc. El orden de difracción 1 o -1 contiene los rayos que han sido difractados por la primera rejilla y no lo han sido por la segunda, y los rayos que han sufrido difracción en la segunda sin haber experimentado ésta en la primera. La interferencia de estas dos familias de haces contiene información sobre el ángulo de incidencia de estos rayos sobre las rejillas, función del ángulo de reflexión (en el caso en el que hubiesen sido reflejados por una superficie) o de refracción (en el caso en el que se hubiesen transmitido a través de un medio transparente) que experimentan los rayos antes de atravesar las rejillas.

En la figura 6 se muestra una disposición para análisis por reflexión. Para la disposición por

transmisión el modelo deberá ser transparente a la longitud de onda utilizada para la iluminación. La relación entre el orden de franjas y la variación del ángulo de reflexión de la superficie viene expresada por la ecuación:

$$\frac{\partial u_z}{\partial x} = N \frac{p}{k\Delta},$$

donde N es el orden de franja, p la densidad de líneas de la rejilla, Δ la distancia entre rejillas y k una constante que vale 1 para transmisión y 2 para reflexión.

En la figura 7 se muestra una fotografía del mapa de franjas para el instante inicial del proceso de carga de una grieta en PMMA. En la figura 8 se muestra una secuencia dinámica en el proceso de fisuración de una placa de PMMA.

2.1.5 Moire Interferométrico

También se conoce por *interferometría por rejillas de difracción* y consiste en adherir íntimamente una rejilla de difracción a la superficie del sólido en estudio. La rejilla se ilumina por dos haces de luz coherente orientados de tal manera que los rayos difractados de primer orden se alejen de la rejilla según la dirección normal a ésta. Si la rejilla no se encuentra distorsionada los dos haces de orden 1 interfieren dando lugar a una franja ancha. Cualquier desviación con respecto a una perfecta alineación o bien la existencia de una deformación en la rejilla hacen que los haces emergentes de ésta interfieran dando lugar a un mapa de franjas. El esquema de esta técnica se representa en la figura 9.

Esta técnica presenta como inconvenientes la dificultad en la alineación de los dos haces que iluminan la rejilla y, especialmente, la creación de una rejilla replicante sobre la superficie del espécimen mediante técnicas de fotoimpresión. Como ventaja presenta la alta sensibilidad que tiene debido a la densidad de líneas de las rejillas creadas por fotoimpresión (del orden de varios miles de líneas por milímetro).

En la figura 10 se muestra el mapa de franjas obtenidos en un análisis de una grieta en una placa de acero sometida a carga dinámica, haciendo uso de la técnica de moire interferométrico.

La expresión que relaciona la deformación coplanaria con el mapa de franjas es idéntica a la que

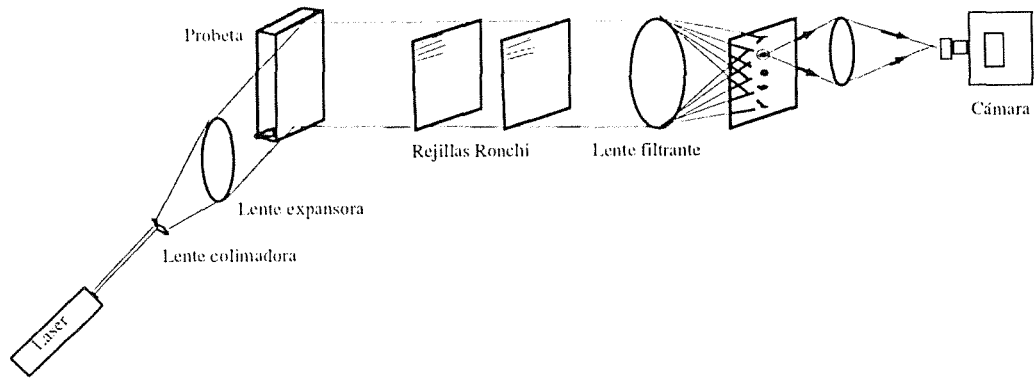


Figure 6: Moire difractivo



Figure 7: Franjas alrededor del fondo de grieta en PMMA mediante Moire difractivo

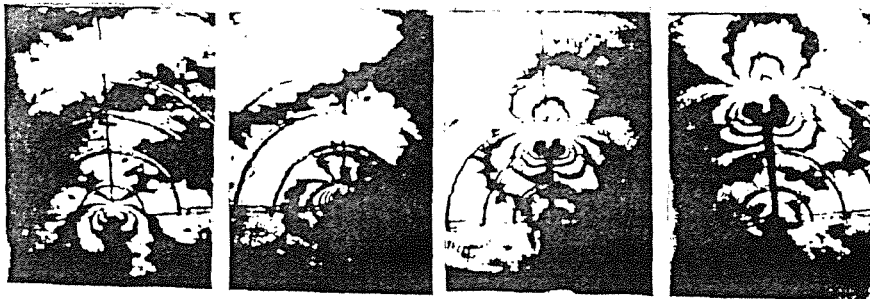


Figure 8: Secuencia dinámica de franjas en PMMA mediante Moire difractivo

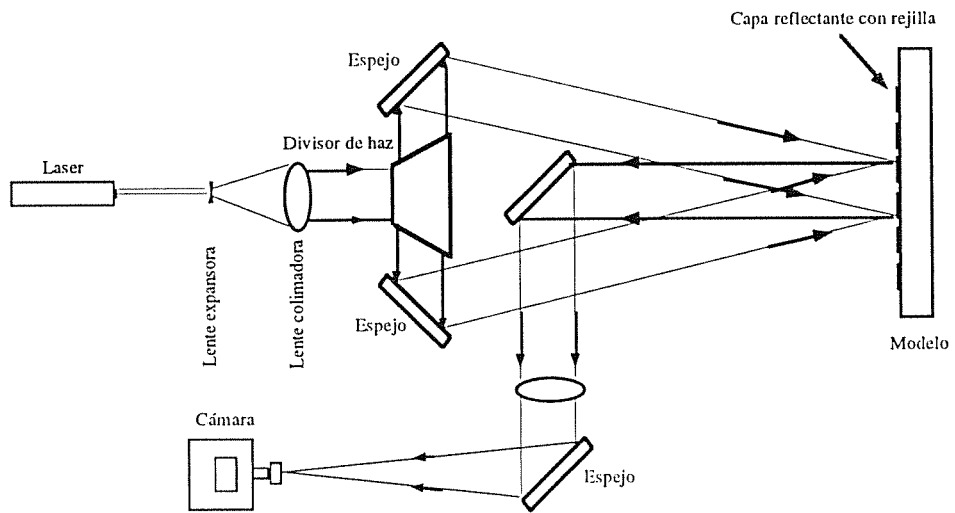


Figure 9: Moire interferométrico

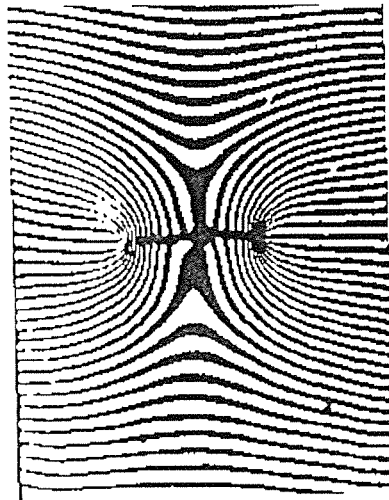


Figure 10: Franjas en acero mediante Moire interferométrico

rige la técnica de *Moire geométrico*, esto es:

$$\epsilon_x = p \frac{\partial N_x}{\partial x},$$

donde p es la densidad de líneas de la rejilla replicada sobre la superficie de la probeta.

2.1.6 Interferometría Holográfica

Esta técnica consiste en iluminar con luz colimada y coherente un objeto, haciendo interferir las ondas reflejadas por el objeto con otro haz de ondas planas de idéntica naturaleza que el primero. La interferencia de estos dos haces da lugar a franjas que son recogidas en una placa o película fotográfica. La iluminación, a posteriori de esta placa, con un haz de las mismas características que el utilizado en la iluminación del objeto, permite reproducir tridimensionalmente la imagen de éste.

Si el objeto se encuentra sometido a desplazamientos o deformaciones, en la imagen reproducida se apreciará un mapa de franjas de interferencias directamente relacionado con el campo de desplazamiento o deformación experimentado por el objeto.

La sensibilidad de la técnica alcanza el orden de la longitud de onda de la luz: una millonésima de milímetro. Esta característica es su más preciada ventaja y desventaja, ya que es difícil encontrar películas que tengan un grano tan fino como para impresionar nítidamente de 1000 a 2000 líneas/mm; además, la técnica es extremadamente sensible a microvibraciones producidas por transmisión desde el suelo a la mesa óptica o a través de movimientos del aire en el laboratorio.

En la figura 11 se muestra una de las muchas disposiciones para la realización de un análisis de deformación plano.

Esta técnica permite correlacionar el orden de franjas con las deformaciones coplanarias y fuera del plano de la superficie analizada.

2.1.7 Caústicas

Se trata de un método óptico capaz de determinar el desplazamiento no coplanario, perpendicular a la superficie analizada, en las proximidades de un punto de interés. La técnica consiste en iluminar mediante luz colimada una superficie plana, recogiendo los rayos transmitidos (en el caso de un

modelo transparente) o reflejados (en el caso de una superficie especular) en una cámara, focalizando en un plano distante una magnitud conocida de la superficie analizada. Por el hecho de focalizar en un plano diferente al plano del objeto, parte de los rayos reflejados/transmitidos no son recogidos apareciendo una zona oscura denominada caústica. La forma y diámetros de esta caústica se correlacionan con el desplazamiento no coplanario, perpendicular a la superficie, experimentado por la deformación de la zona visualizada. En la figura 12 se muestra un esquema de la disposición de los elementos ópticos necesarios para obtener caústicas. El plano focal de la cámara deberá estar posicionado a una distancia dada del plano de la imagen (desenfoque a propósito). En la figura 13 se describe el fundamento óptico de la aparición de la caústica cuando una superficie plana se deforma y refleja el haz incidente creando una zona oscura en un plano distante z_0 de la superficie.

Para que aparezca una caústica es preciso que exista una fuerte deformación en la zona analizada, de aquí que no sea una técnica de campo completo sino local.

En la figura 14 se muestra una secuencia de caústicas obtenidas en grafito-epoxy.

2.1.8 Otras Técnicas Menores

Otras técnicas ópticas utilizadas para la determinación de los campos de desplazamientos y deformaciones son:

- *Fotoelasticidad holográfica*: combinación de iluminación colimada-coherente y fotoelasticidad.
- *Fotografía granular*: se trata de un moire interferométrico en el que no existe rejilla adherida a la superficie de la probeta, sino que la propia rugosidad de ésta da lugar al efecto difractivo.

2.2 Sistemas de Captación del Evento

Para la captación de cualquier evento dinámico en fractura se precisa disponer de cámaras de captación, que se clasifican en las siguientes familias y tipos.

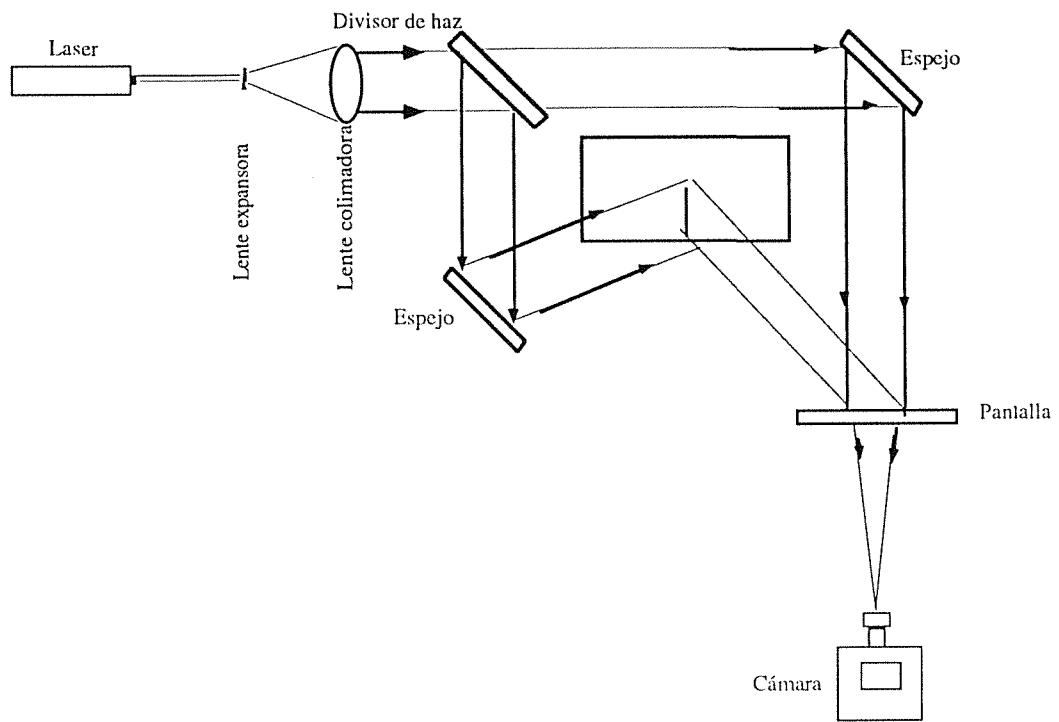


Figure 11: Interferometría holográfica

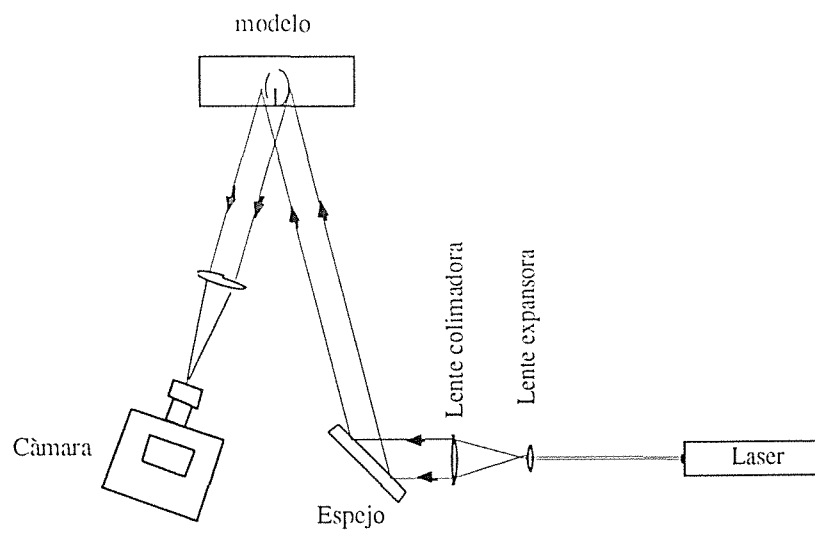


Figure 12: Cáusticas

2.2.1 Cámaras fotográficas de alta velocidad

Este tipo de cámaras están capacitadas para realizar tomas fotográficas a alta velocidad sobre película comercial o sobre formato digital. Pueden clasificarse atendiendo a varias características.

- Atendiendo al fundamento físico de su construcción se tiene:
 - Cámaras mecánicas: utilizan elementos móviles para impresionar una película, tales como lentes y espejos. Se basan en un espejo rotante que gira a gran velocidad dirigiendo el haz de luz hacia un tambor, que puede también rotar, que transporta la película. Pueden utilizar obturadores mecánicos o electrónicos.
 - Cámaras electrónicas: poseen un tubo convertidor de imágenes que transforma los fotones en un haz de electrones que dirigen hacia una pantalla que transforma los electrones en fotones para impresionar una película o bien se almacenan en memoria RAM.
- Atendiendo al formato impresionable:
 - Formato de fotograma: cada fotograma se produce cada vez que la cámara captura imágenes en intervalos intermitentes impresionándolos sobre la película. Para este tipo de cámaras la iluminación debe o bien ser continua (o pulsante con una frecuencia más alta que la frecuencia de captación de las imágenes) o bien pulsante a la misma frecuencia de captación de las imágenes (pero en este caso se requiere que tanto la fuente de iluminación como la cámara se encuentren sincronizados a fin de que cada imagen se capture en el preciso instante de la iluminación).
 - Formato continuo: la imagen es una banda continua que se ha impresionado sobre la película. Se pueden obtener fotogramas independientes utilizando iluminación pulsante.
- Atendiendo a la forma de impresión de la imagen estas cámaras pueden ser de dos tipos:

- De acceso continuo: cuando la luz desde el objeto alcanza la película en cuanto el obturador se encuentre abierto. Este tipo de cámaras es útil en experiencias en las que el momento del inicio no puede ser provocado por la cámara, sino por el evento dinámico.
- Síncronas: la luz solo alcanza la película en un instante determinado durante el funcionamiento de la cámara. En estos casos la cámara debe controlar el experimento y decidir en qué momento debe tener lugar el evento dinámico. No son muy útiles para dinámica de fractura.

2.2.2 Cámaras de vídeo de alta velocidad

Este tipo de cámaras están capacitadas para realizar tomas fotográficas a alta velocidad sobre formato magnético analógico o digital. Pueden clasificarse atendiendo a varias características:

- Las imágenes obtenidas tienen soporte digital.
- Las imágenes obtenidas tienen soporte analógico.

Aunque este tipo de cámaras están en la actualidad en el inicio de su desarrollo, comparativamente a las prestaciones que proporcionan las cámaras mecánicas de película, su futuro es prometedor en cuanto a velocidades de captación y necesidades de iluminación.

De entre las posibilidades comerciales existentes actualmente (1998) caben destacar los siguientes equipos, con capacidades contrastadas en dinámica de fractura:

Cámaras mecánicas de acceso continuo, película comercial y formato de fotograma: modelos fabricados por CORDIN (Utah, USA) hasta 2.25 millones de fotogramas por segundo ($2.25 \cdot 10^6$ fps) y capacidad hasta 500 fotogramas.

Cámaras mecánicas síncronas, película comercial y formato de fotograma: modelos fabricados por CORDIN (Utah, USA) hasta 25 millones fps y capacidad hasta 130 fotogramas.

Cámaras mecánicas de acceso continuo, película comercial y formato continuo: modelos fabricados por CORDIN (Utah, USA) hasta 155 mm/ μ s.

Cámaras mecánicas síncronas, película comercial y formato continuo: modelos fabricados por CORDIN (Utah, USA) hasta 30 mm/ μ s.

Cámaras electrónicas, de acceso continuo y síncronas, formato fotograma y continuo: modelos fabricados por HADLAND (Herts, UK) hasta 100 millones fps y 8 fotogramas; modelos fabricados por NAC (Japón) hasta 20 millones fps y 24 fotogramas; modelos fabricados por COOKE (USA) hasta 2 millones de fps y 10 pseudo-fotogramas.

Cámara de vídeo de formato digital: modelos fabricados por KODAK (USA) hasta 40,500 fps y 5,120 fotogramas.

2.3 Iluminación

El tipo de iluminación a utilizar en las técnicas revisadas en esta sección debe ser siempre colimada; será coherente o no dependiendo de que el método óptico utilizado se base en la teoría de difracción o no. Para experiencias en las que no se precise luz coherente, las fuentes de luz de mercurio o sodio son las más adecuadas. En los casos en los que se necesite luz coherente, los láseres resultan ser los equipos imprescindibles.

Dentro de toda la tipología de láseres existentes en el mercado (de Iones de Argón, Helio-Neón, Vapor de Cobre, CO_2 , Rubí, etc), la utilización de uno u otro depende de los siguientes factores:

- emitan en una longitud de onda visible.
- para la longitud de onda más potente, esta potencia supere 2 w. en emisión continua,
- el haz tenga un modo espacial TEM_{00} ,
- el haz sea polarizado (vertical u horizontalmente).

Dependiendo del sistema de captación de la imagen, por fotograma o continuo, el haz deberá ser continuo o pulsante. Los láseres pulsantes tiene la ventaja de presentar un haz más estable (desde el punto de vista de la energía emitida por unidad de tiempo, sin embargo presentan la desventaja de necesitar una caja de resonancia óptica (cavity damper) que transforme el haz continuo (generado en el tubo) en pulsante. Una de las grandes

desventajas de los haces continuos es la gran inercia en su encendido y apagado, en cortos instantes de tiempo, ya que tienen una lenta respuesta a la descarga para generar el haz; por lo que el proceso de iluminación del evento dinámico debe resolverse haciendo uso de un modulador acusto-óptico.

El modulador acusto-óptico permite "chopear" un haz continuo de tal manera que funciona como si se tratase de un obturador electrónico de alta velocidad (frecuencias de varios Mz.), permitiendo controlar la ventana de tiempo en la que puede iluminarse la probeta durante el tiempo en el que el proceso dinámico tiene lugar.

3 CONCLUSIONES: Técnicas Aplicadas a la Dinámica de Fractura

Todos los métodos ópticos revisados en la sección precedente pueden ser aplicados al análisis de grietas. Sin embargo las características de unos y otros hacen que las magnitudes a medir, así como la precisión de éstas, difieran. En la clasificación adjunta se resumen las principales ventajas e inconvenientes de cada una de ellos.

1. Fotoelasticidad. Solamente la fotoelasticidad por reflexión puede ser aplicada al análisis de probetas fabricadas con materiales reales, pero aún así esta técnica se caracteriza por su baja sensibilidad. El campo de franjas proporciona información de la diferencia de tensiones principales.
2. Moire Geométrico. Solamente la técnica por reflexión puede ser aplicada al análisis de probetas fabricadas con materiales reales. Presenta como grave inconveniente la adhesión de la rejilla sobre la superficie a analizar, que durante el proceso dinámico puede dar lugar a desprendimiento parcial. También cabe resaltar que el comportamiento del tipo de material de adherencia entre superficie y rejilla puede falsear las mediciones en un ensayo dinámico. Presenta como ventaja la relación directa entre el mapa de franjas y las deformaciones coplanarias. Las vibraciones transmitidas al espécimen son recogidas en el proceso de medición.

3. Trazas de Moire (Shadow). Presenta como ventaja, frente al Moire Geométrico, el no necesitar que la rejilla se adhiera a la superficie analizada. Como desventaja principal está su baja sensibilidad.
4. Moire Difractivo. Presenta todas las ventajas de las técnicas de Moire Geométrico y Trazas de Moire (Shadow), sin sus desventajas. Es capaz de medir la variación del desplazamiento no coplanario sobre la superficie; no tiene capacidad para medir deformaciones coplanarias. Es insensible a vibraciones exógenas.
5. Moire Interferométrico. Tiene la desventaja de la adhesión de la rejilla, al igual que en el Moire Geométrico; sin embargo la creación de rejillas, por fotoimpresión, directamente sobre la superficie de la probeta ha supuesto un gran avance. Tiene una muy alta sensibilidad. Los problemas de alineación suelen ser graves en esta técnica. Es sensible ante vibraciones exógenas.
6. Interferometría Holográfica. Muy alta sensibilidad. Como inconveniente presenta la dificultad del proceso de alineación óptico y la sensibilidad a microvibraciones.
7. Caústicas. Técnica válida a nivel local y solo cuando las deformaciones no coplanarias son elevadas. No es una técnica de campo completo. Técnica sencilla que no exige un nivel alto en la alineación del sistema óptico.

Existen otras técnicas de medición, de los estados tenso-deformacionales en las proximidades de una grieta, que no son ópticas. Estas se clasifican en los grupos siguientes:

- i técnicas basadas en la utilización de galgas extensométricas,
- ii técnicas basadas en la medición de la temperatura (válida solo para grietas propagantes),
- ii técnicas basadas en la emisión sonora (válida solo para grietas propagantes).

Frente a estas técnicas, los métodos ópticos descritos se caracterizan, principalmente, por su alta

sensibilidad. Esto que parece ser una gran ventaja puede dar lugar a dramáticos errores. Así por ejemplo, la alta sensibilidad de un método óptico puede inducir el interés de medir el estado tenso-deformacional lo más próximo que sea posible al fondo de la grieta. Cuando se utiliza un método como por ejemplo el Moire Interferométrico, el medir el campo deformacional coplanario en las proximidades del fondo de la grieta se puede realizar hasta distancias de milésimas de milímetro; ésta es una medida directa, lo que ya no es tan directo es la determinación del campo tensional. En este caso es necesario conocer las expresiones que relacionan el campo tensional con las deformaciones medidas, y es aquí donde se presentan los graves errores, ya que las aproximaciones bidimensionales (de tensión o deformación plana) no son válidas, sino que sería necesario disponer de las expresiones tridimensionales, que son hasta la fecha desconocidas. Las aproximaciones bidimensionales son válidas en una zona próxima a la grieta (bordes y fondo) no menos del 50% de la magnitud característica de la geometría (espesor de la placa que contiene la grieta pasante, menor magnitud de la grieta, distancia más próxima a un contorno o punto en el que tenga aplicada una carga, etc.).

Adicionalmente a estos factores citados, cabe recordar que incluso las aproximaciones bidimensionales son soluciones que se engloban en el comportamiento cuasi-estático, no existiendo desarrollos suficientes en el ámbito dinámico transitorio (estado en el que toda grieta se propaga, ya que nunca lo hace a velocidad constante). De todo esto puede concluirse que la aplicación de los métodos ópticos en la dinámica de fractura ha desplazado la frontera de la medición experimental hasta los ámbitos analíticos de las soluciones de las ecuaciones tensión-deformación en medios tridimensionales con la presencia de grietas.

4 BIBLIOGRAFIA

1. Benitez, F.G. Efectos Tridimensionales en Mecánica de la Fractura. Revista de Metalurgia, 27, 5, 302-315 (1991).
2. Cloud, G. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge University Press. (1995).

3. Dally, J.W.; Riley, W.F. Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill. (1991).
4. Francon, M. Optical Interferometry. Academic Press. (1966).
5. Frocht, M.M. Photoelasticity. John Wiley and Sons.
6. Ostrovsky, Y.I.; Shchepinov, V.P.; Yakovlev, V.V. (1991). Holographic Interferometry in Experimental Mechanics.
7. Stroke, G.W. (1969). An Introduction to Coherent Optics and Holography. Academic Press.

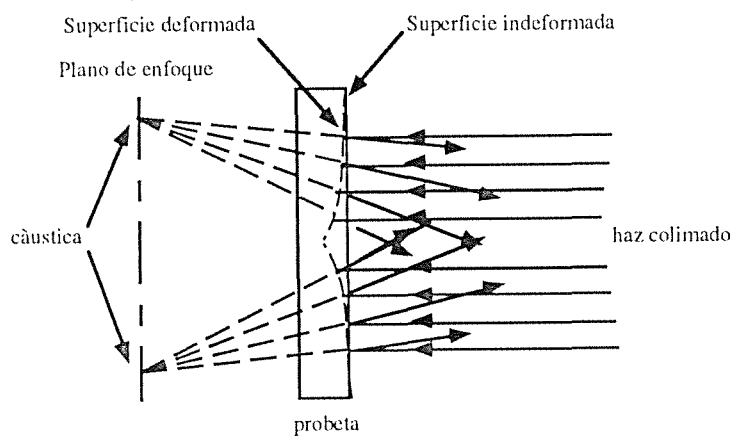


Figure 13: Formación de cáusticas

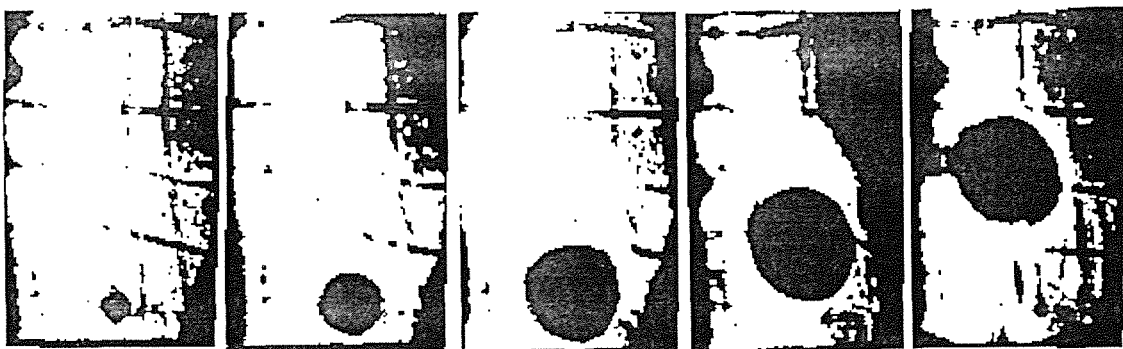


Figure 14: Cáusticas dinámicas en grafito-epoxy