

BANCO FOTOELASTICO PARA ANALISIS DE ESTRUCTURAS FISURADAS
SOMETIDAS A CARGAS DE IMPACTO

F. París; J. Cañas ; E. Lara

E. T. S. Ingenieros Industriales de Sevilla.
Avda. Reina Mercedes s/n. 41012 Sevilla.

RESUMEN:

Se presenta un banco de Fotoelasticidad Dinámica con una cámara Cranz-Schardin de 9 disparos que permite obtener información en nueve instantes de tiempo en órdenes de microsegundos. Este orden permite analizar periodos transitorios consecutivos a la producción de un impacto sobre una estructura. En el presente trabajo se incluye el análisis de un pórtico fisurado encontrándose que el nivel de resolución alcanzado en la configuración de isocromáticas es suficiente como para poder aplicar distintas alternativas (de campo singular y de campo lejano) en orden a determinar los factores de intensificación de tensión, K_I y K_{II} .

ABSTRACT :

A Dynamic Photoelastic arrangement using a nine spark Cranz-Schardin camera is presented. A level of resolution of microseconds in the pictures is obtained. This level allows to analyze transient periods immediately after an impact has been produced on the structure. The analysis of a cracked portal frame is included finding that the level of resolution in the isochromatic pattern is good enough to apply several methods, based on the singular field or on a far field solution, in order to estimate the values of the stress intensity factors, K_I and K_{II} .

1.- INTRODUCCION

El análisis de estructuras fisuradas sometidas a cargas de impacto constituye un tema de gran interés dentro de la Ingeniería Mecánica y Civil, no tan sólo por el número de casos en que dicha situación puede presentarse, sino sobre todo por las condiciones de seguridad que suele acompañar a las estructuras donde dichas situaciones se presentan (plataformas off-shore, todo tipo de estructuras militares, etc..).

Se trata de un problema enormemente complejo donde confluyen varias fuentes de no linealidades, cada una de las cuales constituye por sí misma una rama de la Mecánica de Medios Continuos. Por un lado, el carácter dinámico de la

situación agravado por la necesidad del estudio del régimen transitorio posterior al impacto. Por otro lado, la existencia de fisuras requiere la introducción de los conceptos asociados a la Mecánica de la Fractura. Finalmente, dichas fisuras pueden generar la aparición de zonas de comportamiento plástico del material (con la posible aparición de rótulas en el caso de estructuras apuntadas), con lo que no sería válido el utilizar una teoría elástica lineal de comportamiento del material.

Por todo ello, no existen estudios analíticos que se puedan considerar generales, para abordar este tipo de problemas, si bien soluciones particulares han sido obtenidas, Sih y Loeber [1], Than y Lu [2], Lin, Keer y Achenbach [3].

Los métodos numéricos han sido utilizados para abordar situaciones más complicadas. Así, formulaciones con Diferencias Finitas, Chen [4]; Elementos Finitos, Murti y Valliappan [5], y Elementos de Contorno, Dominguez y Chirino [6], han sido presentadas. En todos los tratamientos, el problema aparece con un alto nivel de complejidad derivado en algunos casos de la necesidad de utilizar una discretización muy fina en el entorno de la fisura o un tamaño de elemento condicionado por el intervalo de integración, y en otros por el volumen de información necesaria que es preciso alcanzar para problemas con geometrías reales.

La Fotoelasticidad Dinámica aparece en la actualidad como una herramienta útil para abordar este tipo de problemas. Ha sido utilizada para problemas de propagación de grietas, Kobayashi y Fourney [7], así como para analizar comportamiento mecánico en ensayos, Mines y Ruiz [8].

No existen muchos trabajos encaminados al análisis del régimen transitorio que sigue al impacto. Ruiz, Salvatorelli y Hillsdon [9] han estudiado el efecto de grietas en la resistencia estructural de configuraciones de vigas y pórticos simples bajo cargas de impacto, usando Fotoelasticidad Dinámica y realizando un análisis del problema con Diferencias Finitas. Más recientemente Ruiz, Salvatorelli y París [10], profundizaron en la evolución de los factores de intensificación de tensiones en los instantes posteriores al impacto a partir de la Fotoelasticidad Dinámica, usando cámara de un solo disparo.

En este trabajo se aborda la realización e instrumentación de un ensayo para analizar problemas de estructuras fisuradas sometidas a cargas de impacto, utilizando cámara de múltiple disparo. Los equipos utilizados se describen en el apartado 2. El apartado 3 se dedica a la descripción del ensayo y a mostrar algunos resultados obtenidos de la información que produce el ensayo.

Dado que este trabajo representa una primera etapa en el estudio de estructuras fisuradas sometidas a cargas de impacto, en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la E. T. S. I. I. de Sevilla, se ha puesto un énfasis especial en enumerar las dificultades encontradas en la realización y puesta a punto del ensayo así como las soluciones adoptadas para resolverlas.

2.- DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE FOTOELASTICIDAD DINÁMICA.

La Fig. 1 representa esquemáticamente la descripción y conexión de los diferentes elementos que constituyen el

banco para realizar pruebas de impacto de baja energía.

La parte superior representa la configuración de un polariscopio circular clásico con la inclusión de una lente que permite recoger la información de una cámara de Cranz-Schardin de nueve disparos. Todos estos elementos se encuentran situados sobre una viga para permitir su correcta alineación, condición absolutamente indispensable para obtener buenos resultados.

La parte inferior de la Figura recoge los dispositivos electrónicos utilizados para instrumentalizar y controlar el experimento.

A continuación se detallan los elementos de mayor interés.

- Unidad productora de luz.

Para esta clase de ensayos se pueden utilizar dos tipos de unidad productora de luz. Las de múltiple disparo y las de un solo disparo. Estas últimas tienen como ventaja fundamental por el mayor tamaño del negativo que se puede usar, la calidad de la imagen obtenida Ruiz et al [10]. Su mayor inconveniente es que sólo puede obtenerse información de un instante del ensayo y si se quiere reproducir la evolución de una variable con el tiempo, es preciso superponer resultados de diferentes experimentos. La unidad múltiple de producción de luz subsana este problema si bien no resulta fácil obtener una calidad equivalente debido al menor tamaño de los negativos y a la dificultad de ajustar con la misma precisión las nueve imágenes. Problemas de interferencia aparecen también por lo que no es fácilmente reproducible un ensayo, en el sentido de obtener información en los mismos instantes de tiempo y en general, en unos previamente establecidos.

Las características de la luz producida en cada disparo son las siguientes:

Duración del flash : 10^{-7} segundos.

Energía del flash : 2.5 Julios.

Dado que en el tipo de material que se va a utilizar para el specimen, la velocidad de propagación de la onda es del orden de 2000 m/seg, la información que se obtiene recoge un posible desplazamiento de las líneas isocromáticas de 0.2 mm., lo que se puede considerar suficiente para el análisis que se realiza.

- La probeta.

Dado que se trata de un impacto de baja energía y que el tamaño de grieta está condicionado por el tamaño de la estructura que es posible ensayar, es deseable más que nunca

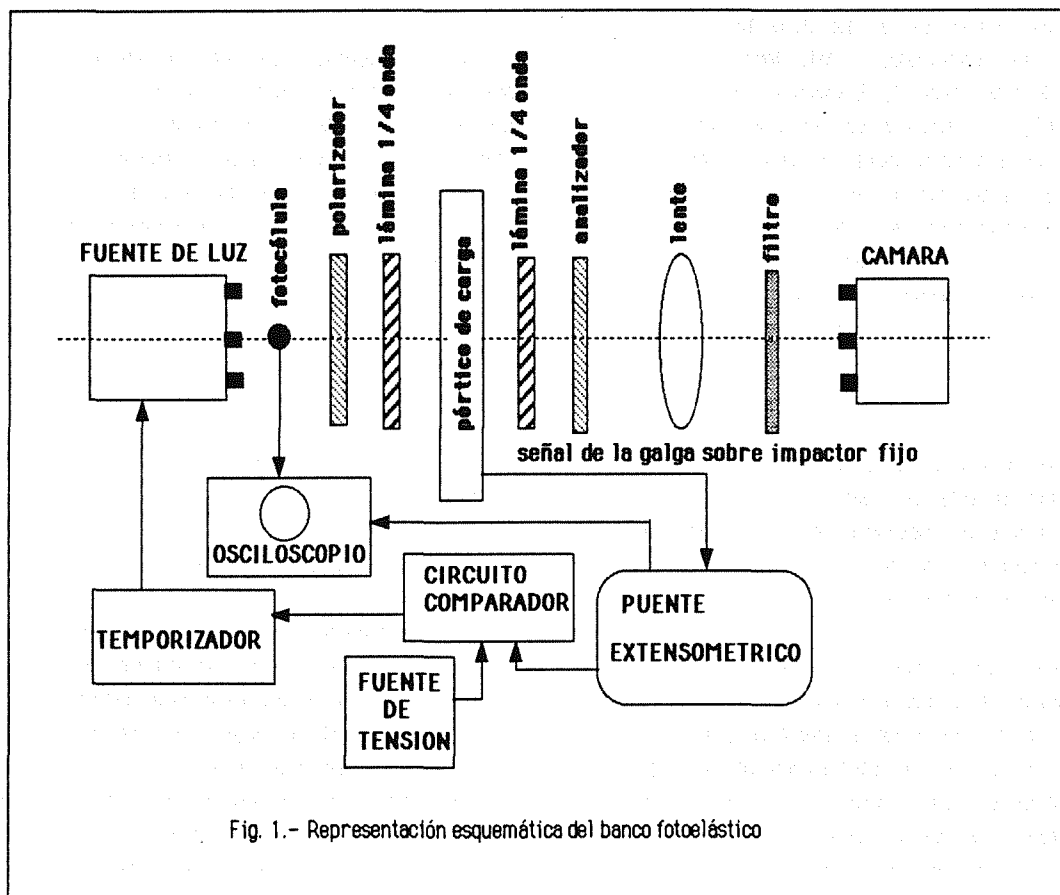


Fig. 1.- Representación esquemática del banco fotoelástico

disponer de un material fotoelástico con un valor de factor de franja lo más pequeño posible, y que al mismo tiempo sea fácilmente trabajable, fundamentalmente en lo que a preparación de grietas se refiere. Esta circunstancia descarta a cierto tipo de materiales como el Makrolon de bajo valor de factor de franja pero muy dúctil, lo que hace inviable la mecanización de fisuras. Se ha utilizado Araldite CT-200 con las siguientes propiedades:

Módulo de Elasticidad: 320 Kg/mm^2
 Densidad: 1120 Kg/m^3
 Coeficiente de Poisson: 0.36
 Factor de franja estático: 1.05 Kg/mm

Este tipo de material admite el trabajo en frío sin que se generen tensiones residuales. Las grietas que se realizan con un pelo de marquetería previamente amolado, quedando finalmente con un espesor de 0.2 mm.

La mecanización de la grieta en orden a simular la teórica debe guardar un cierto compromiso para reproducir, por un lado, el campo tensional teórico, y evitar, por otro, tanto roturas del pórtico como imágenes no deseables que

más adelante se indican.

- El dispositivo de carga de la probeta.

En orden a conseguir una mayor repetibilidad en el impacto, este se efectúa utilizando un impactor fijo que descansa directamente sobre la probeta y que recibe a su vez el impacto de un proyectil que se desliza en el interior de un tubo guía. La repetibilidad se chequea comparando para diferentes pruebas, la señal de una banda extensométrica adosada a la superficie del impactor fijo. La señal de esta banda extensométrica permite también disponer de un origen de tiempos al que referir las secuencias de los destellos de luz. El impactor fijo es una barra cilíndrica de Perspex y el móvil es una barra cilíndrica hueca para admitir peso variable.

- La cámara.

Este elemento constituye, dentro del polariscopio el de más parámetros a ajustar con una gran sensibilidad a cada uno de ellos por lo que resulta con diferencia, el elemento más complejo dentro del polariscopio.

Las variables que influyen en el correcto funcionamiento de este elemento son la distancia a la lente, el enfoque (profundidad del fuelle a la cámara), la alineación (en las tres dimensiones), y externamente a la cámara pero asociados a ella hay que introducir los filtros, la película a usar y el posterior procesado de la misma.

Los asociados a factores geométricos, hay que combinarlos de la manera más adecuada posible para conseguir que las imágenes aparezcan en las nueve lentes de la cámara, lo menos distorsionadas posible y con el mayor tamaño posible para mejorar el nivel de resolución del negativo.

Dado que durante el ensayo no es posible ajustar ningún parámetro, es preciso antes de realizarlo proceder a un ajuste en régimen estático, para lo cual se colocan nueve fuentes permanentes de luz en las posiciones de los nueve disparos, cargándose el pórtico estáticamente, lo que permite determinar la combinación de variables geométricas que mejor visión de las franjas produce.

Para el trabajo en blanco y negro los filtros son absolutamente necesarios pese a que disminuyen la cantidad de luz (no excesiva) que recibe la película. Se han probado diferentes filtros, encontrándose los mejores resultados en cuanto a nitidez y estrechamiento de las isocromáticas para filtros verdes Kodak Wratten nº 58. También la película Kodak TMY-120 produce franjas mejor definidas y mayor contraste.

- La instrumentación electrónica.

La instrumentación electrónica empleada en el ensayo tiene como función recoger la evolución de las deformaciones en el impactor fijo usado en el sistema de carga y utilizada para provocar la activación de la fuente de luz de acuerdo al tiempo de retardo seleccionado previamente al ensayo.

Como se indica en la Fig. 1., la señal recogida por la banda extensométrica situada en el impactor fijo se registra gráficamente en el osciloscopio y pasa a un circuito comparador cuya misión es convertirla en una función escalón que produce la activación del temporizador que de acuerdo a los intervalos previamente seleccionados activa a su vez la producción de los nueve destellos de luz.

Dado que la fiabilidad del temporizador no es muy alta, una fotocélula recoge la intensidad de la luz asociada a los nueve destellos, quedando dicha información en el osciloscopio para poder establecer los intervalos reales de tiempo en que se han producido los destellos.

3.- Descripción del Ensayo y Resultados

El ensayo debe realizarse con el laboratorio en oscuridad total, alcanzada la cual, la película se coloca manualmente en exposición. Previamente, en el temporizador se han seleccionado los intervalos de tiempos deseados entre sucesivos destellos de luz, así como el retraso inicial. Al producirse el impacto, la banda adosada al impactor fijo se deforma y de acuerdo con el proceso anteriormente explicado se almacena la señal de dicha banda extensométrica y la de la fotocélula en el osciloscopio, habiendo quedado impreso en la película nueve situaciones posteriores al impacto.

La Fig. 2., recoge esquemáticamente la configuración de una estructura ensayada.

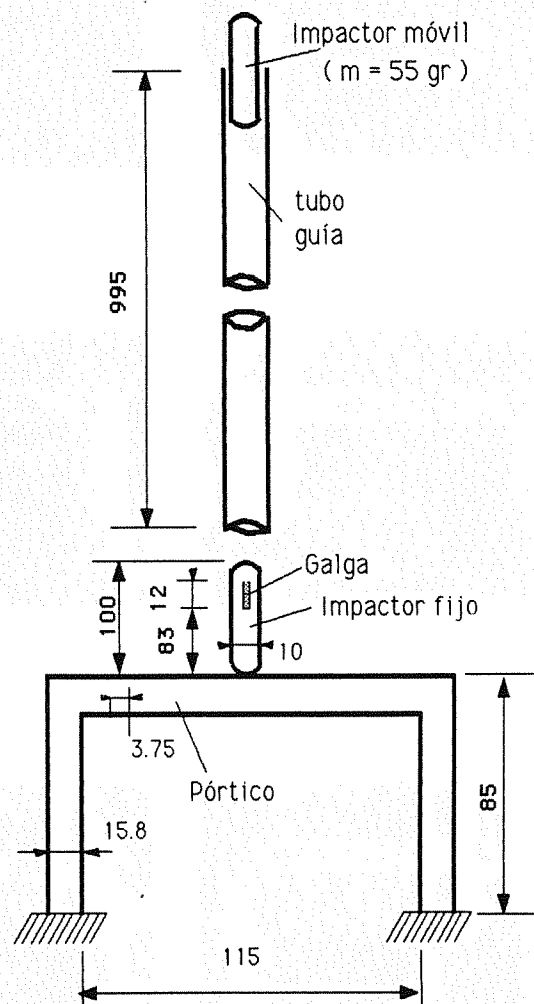


Fig. 2.- Esquema de la estructura ensayada (cotas en mm.)

Se trata de un pórtico de tres barras, doblemente

empotrado, con un espesor de 3 mm. La Fig. 3., recoge la información obtenida en el osciloscopio y la Fig. 4., muestra la secuencia de 9 configuraciones de isocromáticas obtenidas en los tiempos que se indican y que han sido deducidas de la señal de la fotocélula registrada en el osciloscopio.

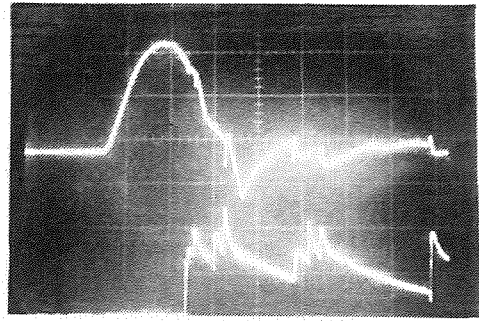
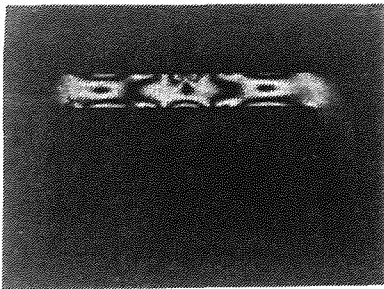
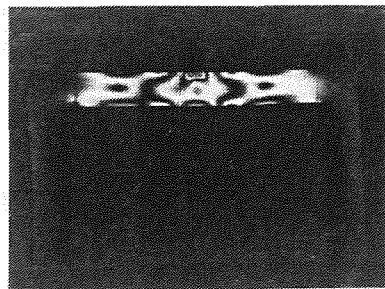


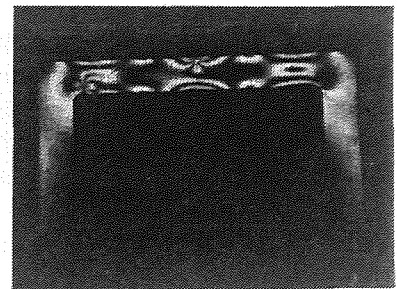
Fig. 3. Información obtenida del osciloscopio



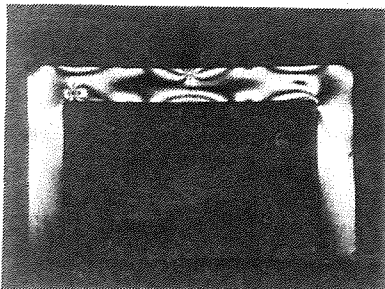
Fotografía 1 (t = 68 μ sg.)



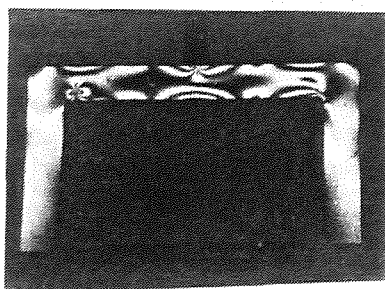
Fotografía 2 (t = 70 μ sg.)



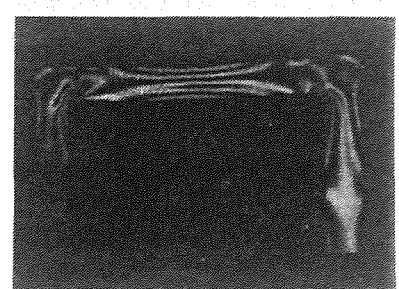
Fotografía 3 (t = 95 μ sg.)



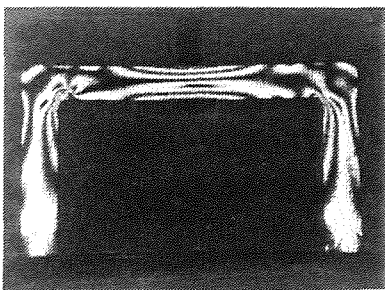
Fotografía 4 (t = 108 μ sg.)



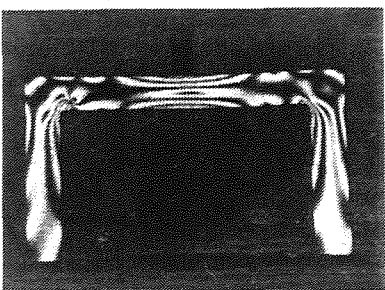
Fotografía 5 (t = 110 μ sg.)



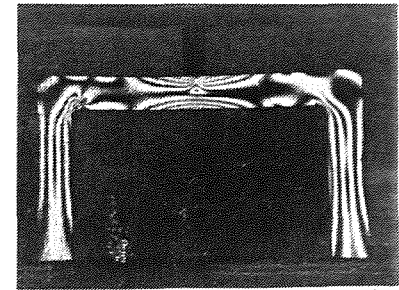
Fotografía 6 (t = 185 μ sg.)



Fotografía 7 (t = 200 μ sg.)



Fotografía 8 (t = 210 μ sg.)



Fotografía 9 (t = 340 μ sg.)

Fig. 4.- Secuencia de 9 disparos. Resultados

En este ensayo se habían seleccionado previamente intervalos de tiempo de 15 $\mu\text{seg.}$, por lo que dicha información debe considerarse solo cualitativa y tomar como medida real la señal de la fotocélula, tal como se ha hecho.

En la señal de la banda extensométrica que aparece en la parte superior de la Fig. 3., puede observarse que entre el primer pico y el segundo pico hay un intervalo de 90 $\mu\text{seg.}$, que representa el tiempo que la onda tarda en viajar desde la banda, hasta el extremo del impactor fijo y reflejarse hasta pasar por ella. Este tiempo obtenido se corresponde con la distancia indicada y la velocidad de propagación de la onda en el Perspex.

La secuencia de fotografías mostradas en la Fig. 4., ilustra las siguientes conclusiones:

- En las dos primeras fotografías, donde aún la onda provocada por el impacto no ha alcanzado la fisura y por tanto la distribución de isocromáticas es independiente de la existencia de la misma, puede apreciarse que el estado tensional es absolutamente diferente al de flexión.

- En las fotografías 3, 4 y 5 la onda acaba de alcanzar la fisura y el estado tensional que aparece próximo al fondo de grieta reproduce casi un estado puro de K_I , no habiéndose aún producido interferencias por haber alcanzado la onda la unión viga-pilar.

- En las fotografías 1 a 5 existe contacto entre el impactor fijo y el pórtico, por la concentración de isocromáticas existentes. En las fotografías 6, 7 y 8 no hay contacto entre impactor y pórtico apareciendo en la viga un estado tensional típico de los efectos inerciales de flexión. En la fotografía 9 se puede apreciar que después del rebote aparece un 2º impacto, que provoca un estado tensional local equivalente al primero.

- En las fotografías 6, 7, 8 y 9 pueden observarse estados tensionales muy complejos en el entorno de la fisura. Así aunque la fotografía 9 y la 4, presentan similares distribuciones tensionales en la viga, en la fisura son absolutamente diferentes. La razón de esta complejidad es la interferencia que origina en la propagación de las ondas la existencia del nudo, provocando reflexiones que generan los estados tensionales, no habituales, que aparecen en el fondo de grieta cuando las isocromáticas ya aparecen en los pilares.

- En general puede observarse en todas las fotografías el efecto local de la fisura ya que a una cierta distancia de la misma no hay diferencia entre las partes derecha e izquierda

del pórtico.

Puede observarse que en algunas ocasiones, vease por ejemplo la fotografía 4, aparece un pseudocaustica, fenómeno ya referenciado por Rosmanith [11]. Su tamaño aumenta con la carga aplicada y con la perfección del fondo de grieta. Puede eliminarse (al menos estáticamente) variando el enfoque, si bien las franjas pierden nitidez. Dinámicamente es prácticamente imposible de eliminar dado que no aparece por igual en todas las fotografías y que no se puede perder nitidez. Aunque no es un fenómeno deseable, desde un punto de vista práctico no resulta muy perjudicial dado que solo oculta el tamaño de la grieta, que es conocido. En algunos casos también podría ocultar una isocromática, que normalmente no puede considerarse como útil en la evaluación de K_I y K_{II} , por las proporciones del tamaño de grieta y el espesor del espécimen así como por el método a emplear para dicha evaluación.

La información contenida en las fotografías puede cuantificarse para evaluar el estado tensional en el régimen transitorio estudiado. En concreto, los valores de K_I y K_{II} en la fisura, pueden ser calculados. Así se va a realizar dicho cálculo sobre la configuración que aparece en la fotografía 5. Dado que se trata de una configuración de isocromáticas que representa aproximadamente el caso 1, diferentes métodos pueden ser utilizados.

Lo más sencillo y directo es suponer $K_{II} = 0$, y aplicar el método de Irwin a la isocromática más cercana al fondo de grieta. K_I , con referencia a la Fig. 5., toma el siguiente valor

$$K_I = \frac{N f \sqrt{2\pi r_m}}{t \sin \theta_m} \left[1 + \left[\frac{2}{3 \tan \theta_m} \right]^2 \right]^{\frac{-1}{2}} \left[1 + \frac{2 \tan \frac{3\theta_m}{2}}{3 \tan \theta_m} \right]$$

donde: N = Orden de franja
 f = Factor de franja del material
 t = Espesor de la probeta

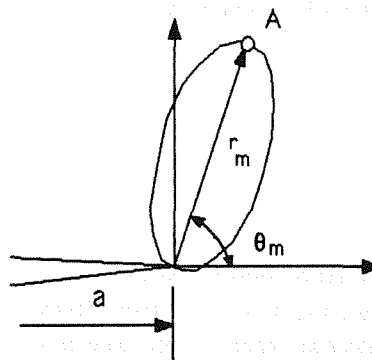


Fig. 5. Geometría de la fisura

El punto A de la isocromática más cercana (de orden 2) se encuentra en $r/h = 0.6$ que es superior al valor encontrado por Rosakis y Ravi-Shandar [12], para que no aparezcan efectos tridimensionales.

La alternativa más general, es aplicar un método de campo lejano para evaluar K_I y K_{II} , lo que permite incluir más isocromáticas. En este caso, sólo la de orden 1 podría añadirse. Siguiendo a Cottron y Lagarde [13], el estado tensional puede representarse por tres funciones de variable compleja:

$$Z_I(z) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[n - \frac{1}{2} \right]^{-1} A_n z^{n-\frac{1}{2}}$$

$$Z_{II}(z) = \sum_{m=0}^{M-1} \left[m - \frac{1}{2} \right]^{-1} B_m z^{m-\frac{1}{2}}$$

$$\eta(z) = \sum_{p=0}^{P-1} C_p z^p$$

En la configuración que se está analizando sólo se dispone de dos isocromáticas por lo que sólo se han tomado 16 puntos para ajustar el desarrollo en serie (6 sobre $N=2$, 10 sobre $N=1$).

En la tabla 1 se recogen los resultados obtenidos para ambos métodos. En este último, se han tomado diferentes combinaciones de número de términos en las tres series.

Dado que el factor de franja del material anteriormente indicado corresponde a una situación estática, se ha representado en dicha tabla valores adimensionales de k_I .

$$k_I = \frac{K_I}{\sigma_{\infty} \sqrt{\pi a}}$$

donde σ_{∞} representa el estado tensional existente en el punto asociado al fondo de grieta, si esta no existiese. (Dicho estado tensional puede tomarse, debido al efecto local de la fisura, del lado opuesto al pórtico adonde ésta se encuentra)

			k_I	k_{II}
Método de Irwin			2,14	-
Desarrollo en serie				
M	N	P		
0	1	1	1,9688	-
1	1	1	1,94	0,08
2	2	2	2,11	0,06

Tabla 1. Valores de k_I y k_{II} .

El primer valor del desarrollo en serie con $M=0$, representa una aproximación de Irwin, aunque con valores de campo lejano. El valor obtenido con 1 término de cada serie, corresponde a una solución equivalente al Método de Sanford y Dally [14], que concuerda absolutamente con los valores anteriores.

La buena concordancia encontrada entre todas las posibilidades chequeadas es debido a la existencia, como se había supuesto, de un K_{II} casi nulo y pone de manifiesto que es correcto para este caso considerar que prevalece el campo singular en la isocromática de orden 2.

No se han mostrado valores obtenidos con más términos de los desarrollos, dado que aparecen resultados discrepantes cuando se disminuye la relación entre el número de puntos utilizados para la aproximación y el número de términos del desarrollo, Rivas, Picón, París y Lara, [15].

4.- Conclusiones.

Se ha construido un banco de Fotoelasticidad Dinámica que permite calcular factores de intensidad de tensiones provocados por cargas de impacto. Dado que la información almacenada (nueve puntos) es considerable se podrán realizar estudios exhaustivos de las fases que se estimen de interés durante el transitorio posterior al impacto.

Diferentes métodos de evaluar K_I y K_{II} han sido utilizados, llevando a valores muy similares.

Para poder determinar valores absolutos de los factores de intensidad de tensión, es preciso calcular el factor de franja dinámico, para lo que será necesario realizar un

ensayo sobre una situación simple cuya solución sea conocida, lo que permitirá caracterizar el material.

Desde otro punto de vista, ha podido apreciarse que la fisura tiene un efecto puramente local. La Fotoelasticidad puede permitir acotar dicho efecto. En tal caso, sería posible realizar un estudio simplificado de la estructura sin grieta (a través de un modelo de barras) sometida a impacto. La acotación definida por la fotoelasticidad permitirá conocer sobre este modelo los valores de los esfuerzos en la zona límite, valores que pueden ser introducidos como acciones (aplicando las leyes de la Resistencia de Materiales) a la zona que incluye los efectos locales de la grieta. Dicha zona podría analizarse con un Método de Elementos Finitos o de Contorno, habiéndose reducido enormemente el número de grados de libertad del problema. Esta podría ser una forma computacionalmente factible de abordar el análisis de estructuras fisuradas de un gran número de barras sometidas a cargas de impacto.

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Profesor Carlos Ruiz de la Universidad de Oxford por sus inestimables consejos en la configuración del Banco y a Antonio Cañas por su valiosa asistencia en la ejecución de los experimentos.

Referencias

- [1].- Sih, G.C. y Loeber, J.F., "Wave propagations in an Elastic Solid with a line of Discontinuity or Finite Crack." Q. Appl. Math., Vol. 27, pp. 193-231, 1969.
- [2].- Than, S.A. y Lu, T.H., "Transient stress Intensity factors for a Finite Crack in an Elastic Solid caused by a Dilatational Wave", Int. J. Solids and Structures, vol. 7, pp 731-750, 1971.
- [3].- Lin, W., Keer, L.M. y Achenbach, J.D., "Dynamic Stress Intensity Factor by Lagrangian Finite-Difference Method", Eng. Fract. Mech., Vol. 7, pp 653-660, 1975.
- [5].- Murti, V. y Valliappan, S., "The use of Quarter Point Element in Dynamic Crack Analysis", Eng. Fract. Mech., vol. 23, pp. 585-614, 1986.
- [6].- Dominguez, J. y Chirino, F., "B.E.M. for Dynamic Crack Problems in Two Dimension", BETECH-86, J.J. Connor y C.A. Brebbia, ed., Computational Mechanics Publications, Southampton-Boston, 1986.
- [7].- Kobayashi, T. y Fourney, W.L., "Dynamic Photoelastic Investigation of Crack Propagation", Proc. of the 12th. Annual Meeting of the Soc. of Eng. Sc., University of Texas, Austin, pp. 131, 1975.
- [8].- Mines, R.A.W. y Ruiz, C., "The dynamic Behaviour of the instrumented Charpy Test". DIMAT Conference, París, 1985.
- [9].- Ruiz, C., Salvatorelli, F. y Hillsdon, G., "The effect of cracks on the structural strength of beams and portal frames under impact", IUTAM Symp. High-Velocity Deformation and Fracture, Tokyo, 1985.
- [10].- Ruiz, C., Salvatorelli, F. y París, F., "Photoelastic determination of dynamic stress intensity factors in portal frames", Int. J. Impact Eng., vol 6., Nº. 2, pp. 77-86, 1987.
- [11].- Rosmanith, H.P., "A Hibrid Technique for Improved K Determination from Photoelastic Data", Experimental Mechanics, pp 152-157, June, 1983.
- [12].- Rosakis, A.J. y Ravi-Shandar, K., "On crack tip stress state: An Experimental Evaluation of Three Dimensional Effects". A aparecer en J. of Solids and Structures.
- [13].- Cottron, M y Lagarde, A. "A far field method for the determination of mixed mode SIF from isochromatic fringe patterns". SM. Archives, Vol. 7, pp. 4-17, 1982.
- [14].- Sanford, R.I. y Dally, J.W., "A general method for determinig mixed-mode SIF from isochromatic fringe patterns". Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 621-633, 1979.
- [15].- Rivas, C., Picón, R., París, F., Lara, E., "Campo tensional en el entorno de una fisura. Determinación de K_I y K_{II} usando técnicas fotoelásticas". Anales de Ingeniería Mecánica, N 3, 45-52, Diciembre 1988.