

## APLICACION DE LA MECANICA DE LA FRACTURA AL DISEÑO DE SOLDADURAS EN ANGULO

F. París, J. Cañas, R. Picón

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

La realización de ciertas uniones soldadas llevan implícitas en el diseño y/o en la ejecución una intensificación de las tensiones cuando se produce la entrada en carga. Dicha intensificación es cuantificada para el caso de dos uniones de cordones frontales en ángulo utilizando métodos fotoelásticos de campo lejano. Finalmente una evaluación del estado límite asociado con esta situación es efectuada en orden a comparar con el estado límite marcado por las normas para el diseño de uniones soldadas.

**ABSTRACT :**

Several welded joints have implicitly associated stress intensity factors due to a poor design or to a bad realization of the welding procedure. Such factors have been calculated, in this paper, for two typical cases where this situation arises, using a photoelastic far field method. The limit state associated to the unstable propagation of the crack is evaluated to be compared with the limit state established by the majority of the Standards.

**1.- INTRODUCCION**

La concepción de una unión mediante soldadura pasa por la realización de un diseño de cordones con una distribución determinada para que el valor de una función del estado tensional existente en la unión se mantenga inferior a una función de las propiedades del material.

Con esta definición no habría aparentemente diferencia entre el cálculo de la sección de unión propiamente dicha y el cálculo de otra sección cualquiera de los elementos que confluyen en la unión. Esta diferencia, sin embargo existe y se pone de manifiesto en la forma de evaluar el estado tensional actuante. En una sección de los elementos a unir dicho estado se evalúa aplicando la Teoría de la Elasticidad, la Resistencia de Materiales o bien Métodos Numéricos o

Experimentales basados en estas disciplinas. Por contra, en la sección de unión no se realiza propiamente un análisis tensional sino que al aplicarse un método en rotura, solo se requiere, como se indicará en el apartado 2, la evaluación de unos valores promedio de tensión.

La aplicación de un método en rotura conlleva, en general, el desconocimiento del margen de seguridad real que se está empleando y sobre todo, al no disponer del estado tensional, no resulta posible el establecer comparaciones frente a otros estados límites.

Este problema se agudiza para el caso de las uniones soldadas, por la existencia de configuraciones geométricas, a veces por el mismo diseño y a veces por defectos de ejecución, que llevan implícitas una intensificación de

tensiones, tal y como se pondrá de manifiesto en el apartado 3.

En el presente trabajo se van a analizar dos configuraciones usuales en la práctica de la soldadura que producen situaciones asimilables a los modos I y II de Mecánica de la Fractura. Los valores de los factores de intensificación de tensiones serán calculados aplicando la técnica de la Fotoelasticidad de transmisión y empleando un método de campo lejano que se describe en el apartado 4.

La aplicación de esta técnica a los problemas que se van a analizar se realiza en el apartado 5, dando los resultados numéricos de  $K_I$  y  $K_{II}$ , cuya evaluación se realiza, finalmente en el apartado 6.

**2.- CRITERIO DE DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS.**

Tal y como se ha indicado, las normas españolas que hacen referencia al cálculo de uniones soldadas utilizan, al igual que la mayoría de las normas de otros países, un criterio de cálculo en rotura. Desde el punto de vista de la aplicación práctica de la Norma, ésta se reduce, ante una configuración determinada, a la utilización de una fórmula para comprobar la resistencia global del cordón. En concreto, en la norma española UNE 14035 [1], la fórmula de comprobación es:

$$\sqrt{\sigma^2 + 1.8(\tau_n + \tau_a)^2} \leq \sigma_E \quad (1)$$

Los valores de  $\sigma$ ,  $\tau_n$  y  $\tau_a$  que aparecen en la expresión anterior no se corresponden, como se indicaba anteriormente, con los obtenidos de un análisis tensional, sino que están asociados a unos valores promedios calculados con las siguientes hipótesis:

- Se supone que la sección más desfavorable es, y por ende se toma como sección de cálculo, la garganta del cordón de soldadura.
- En dicha garganta se supone que las tensiones se distribuyen uniformemente, evaluando dichos valores promedios con sencillas hipótesis de equilibrio. Coherentemente con esta hipótesis el criterio se aplicará a todo el cordón globalmente.

Esta forma de caracterizar el estado tensional sólo se justifica mediante la utilización de un criterio en rotura, como el que representa la ecuación (1), cuyos coeficientes han sido ajustados acordes con la forma de calcular las tensiones. Este enfoque de cálculo de uniones soldadas es

debida a Vreedenburgh [2] y puede encontrarse una descripción de la misma en Baillo y Mazzolani [3].

La distribución de tensiones reales en un cordón de soldadura no es la que se utiliza para la aplicación del criterio ya que, entre otras razones, este implica la misma distribución para todas las situaciones y las distribuciones de tensión variarán con el caso. Además, ni siquiera la sección de la garganta es la más desfavorable ni, como era previsible, el estado tensional en el instante en que se aplica la carga que provoca el agotamiento de la sección corresponde a un estado elástico, Coffin, Paris y Picón [4]. Por consiguiente no resulta posible conocer el margen real de seguridad empleando el criterio (1) o similar para el caso de que, por ejemplo, se utilizara un material de propiedades inferiores a las de cálculo.

**3.- EXISTENCIA DE INTENSIFICACION DE TENSIONES EN UNIONES SOLDADAS**

La soldadura es un procedimiento de unión que potencialmente puede generar defectos que conlleven una intensificación de tensiones que requiere un estudio particular para determinar si la unión puede o no, con el defecto, soportar las cargas para las que estaba diseñada, procediéndose en caso negativo a resanar. Además, hay disposiciones habituales en la práctica de la soldadura que sin la existencia de defectos, llevan implícitas una intensificación de tensiones, siendo este el caso que se pretende analizar en este trabajo, que se ciñe a la configuración de cordones frontales en ángulo.

Las dos situaciones que se van a tomar en consideración se representan en la Figura 1. La configuración (a) corresponde al caso de chapas solapadas y es habitual, por ejemplo, en las uniones de los diferentes elementos que componen una celosía. Esta configuración es la recogida como casos 2 y 3 en la Norma MV 103 [5]. La intensificación de tensiones se produce por la creación artificial de una fisura, en el conjunto final, que se corresponde con la línea de contacto de las chapas a unir. Esta fisura trabaja teóricamente en modo II, si bien la existencia de un pequeño huelgo inicial entre ambas chapas puede provocar la aparición de un modo mixto I-II. No resulta inmediato el dar soluciones para evitar esta situación, sobre todo en el caso de que la dimensión perpendicular al plano de representación sea grande.

La configuración (b) corresponde al caso de chapas conectadas a tope y se da en innumerables situaciones de la Ingeniería Mecánica y Civil. Esta situación se puede presentar en los casos 8, 9, 10, 15 de la norma y uniones especiales en general.

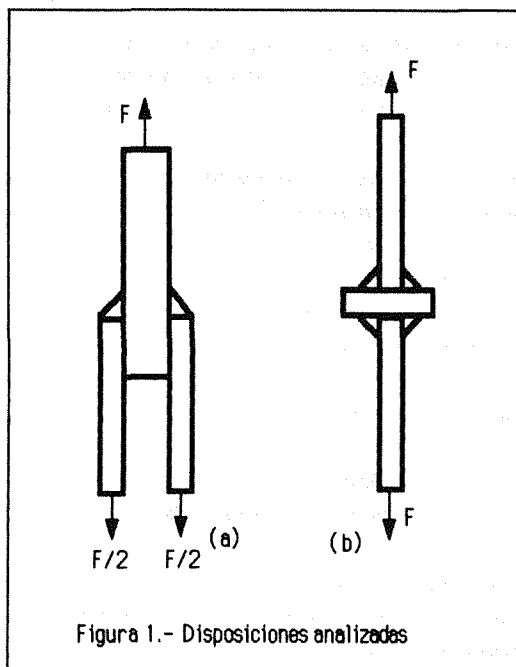


Figura 1.- Disposiciones analizadas

La intensificación de tensiones se produce por la creación artificial de una fisura, en el conjunto final, de un tamaño igual o menor que el espesor de la placa traccionada. Esta fisura trabaja en un modo  $K_I$  puro. El origen de esta situación puede ser doble. Por un lado puede estar originada por un mal diseño, no habiendo hecho preparación de los bordes a unir o utilizando tamaños de garganta no adecuados para el espesor de la placa traccionada. Por otro lado puede estar originada simplemente por una mala ejecución de la unión, pudiendo haberse producido una falta de penetración. Si la ejecución es buena y el diseño también, estas situaciones no tienen porqué producirse.

#### 4.- EVALUACION DE LOS FACTORES DE INTENSIFICACION DE TENSIONES

Para la evaluación de los factores de intensificación de tensiones,  $K_I$  y  $K_{II}$ , se va a utilizar la Técnica de la Fotoelasticidad de transmisión. Como es bien conocido, la fotoelasticidad se basa en la propiedad de birefringencia temporal que experimentan ciertos materiales elásticos cuando están sometidos a tensión. En concreto, cuando un sólido con esta propiedad se introduce en un polariscopio circular se producen bandas de extinción de luz (franjas isocromáticas), en cuyos puntos se satisface:

$$\sigma_I - \sigma_{II} = 2\tau_m = \frac{N\lambda}{e} \quad (2)$$

donde  $\sigma_I$  y  $\sigma_{II}$  son las tensiones principales en dicho punto,  $\tau_m$  es la tensión tangencial máxima asociada a dicho estado principal,  $N$  es el orden de extinción de la luz en el punto (orden de la isocromática),  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz que se emite y  $e$  es la dimensión del sólido elástico en la dirección perpendicular a la de incidencia de la luz. La técnica fotoelástica, sus fundamentos y uso, queda perfectamente recogida en Dally y Riley [6] o Kuske y Robertson [7].

Existen dos grandes posibilidades en la aplicación de la Fotoelasticidad para el cálculo de los factores de intensificación de tensiones. Una de ellas conocida como de campo cercano consiste en relacionar el campo de tensiones en el entorno de la fisura (que es función de  $K_I$  y  $K_{II}$ ) con los valores de la tensión tangencial máxima que a su vez está relacionada con las isocromáticas según la ecuación (2). Existen muchos métodos para calcular los valores de  $K_I$  y  $K_{II}$  usando la idea anterior. En todos ellos la información fotoelástica que se toma debe ceñirse al entorno de la fisura, es decir a órdenes de isocromáticas muy altos. Una descripción de estos métodos puede encontrarse en Etheridge y Dally [8] o más recientemente Rivas, Picón, París y Lara [9].

La otra gran rama de aplicación de los métodos fotoelásticos para el cálculo de  $K_I$  y  $K_{II}$  se basa en la expresión de las tensiones en un caso plano a partir de funciones de variable compleja, Muskhelishvili [10]. Si dichas funciones se desarrollan en serie en la forma:

$$Z_I(z) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{(m-\frac{1}{2})} B_m z^{m-1/2} \quad (3)$$

y se introducen en la expresión que relaciona el estado tensional con la tensión tangencial máxima:

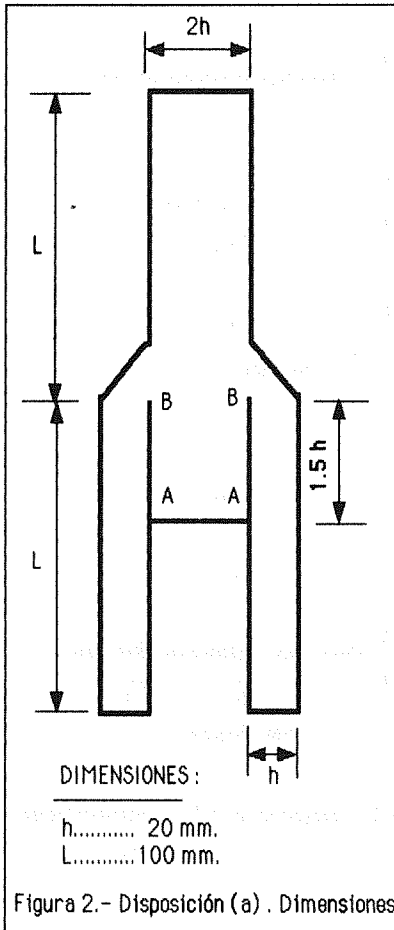
$$(2\tau_m)^2 = \left(\frac{N\lambda}{e}\right)^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2 \quad (4)$$

se obtiene una función de los coeficientes de los desarrollos en serie, que particularizada para una serie de puntos de las isocromáticas, permite obtener un sistema subdeterminado de ecuaciones que puede ser resuelto iterativamente aplicando el método de Newton-Raphson. Esta alternativa es una extensión del Método de Sanford y Dally [11], que utiliza sólo los primeros términos de los desarrollos en serie. Las particularidades del método que aquí va a ser empleado se describen en Picón, París y Rivas [12] y a ellas se referirán las características de los ejemplos que siguen.

5.- APLICACIONES

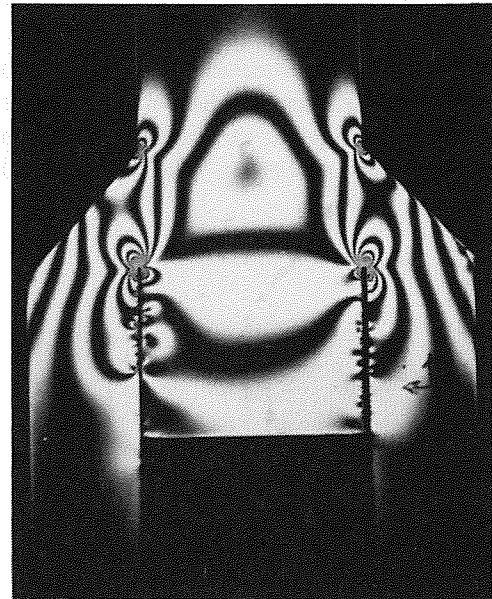
5.1 Cordones frontales en ángulo en chapas solapadas

Esta configuración corresponde a la mostrada genéricamente en la Figura 1 (a), detallándose sus dimensiones en la Figura 2.

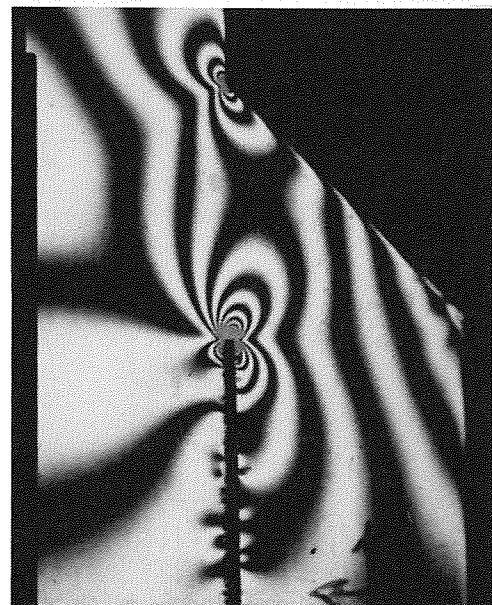


La probeta se ha realizado en Araldite CT200 con un factor de franja de 1.054 Kg./mm, teniendo un espesor de 3 mm.

La Figura 3 (a) muestra la configuración general de isocromáticas y la 3 (b) una ampliación de la zona próxima al extremo de la fisura, donde puede apreciarse claramente la agrupación de isocromáticas propia de un modo II.



(a)



(b)

Figura 3.- Campo de isocromáticas (a) general (b) entorno fondo de grieta

Admitiendo que en una situación real no existe abertura entre las dos chapas, se ha introducido en la separación que se produce durante la preparación de la probeta (líneas A-B en la Figura 2) una chapa metálica que simula la situación real. Esta chapa es la responsable de las concentraciones locales de tensión que aparecen en la configuración de isocromáticas a lo largo de la línea A-B. En caso de no introducir la chapa el contacto sólo se produciría en la zona próxima a A apareciendo en el fondo de grieta una configuración de isocromáticas propia de un modo mixto I-II.

En orden a chequear los resultados fotoelásticos se ha resuelto también el problema utilizando el Método de los Elementos Finitos. La malla utilizada y un detalle de la misma en la zona del cordón se muestran en la Figura 4 (a) y (b) respectivamente.

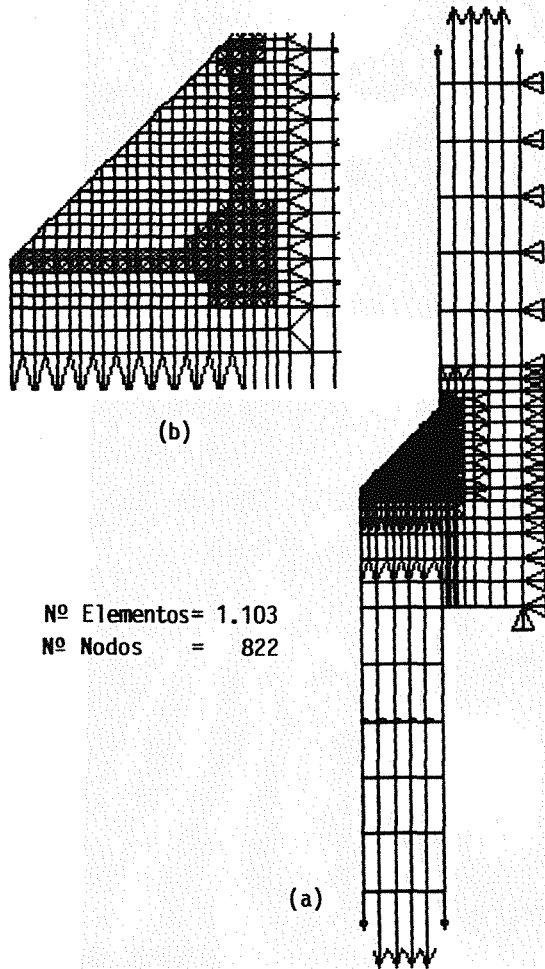


Figura 4.- Malla de Elementos Finitos. (a) General (b) detalle del cordón.

Dado que se han empleado elementos simples (triángulos lineales y cuadriláteros bilineales en desplazamientos), la comparación entre resultados numéricos y experimentales no incluye el cálculo del factor de intensidad de tensiones dado que numéricamente habría que recurrir a una extrapolación de resultados en el entorno de la fisura, pudiendo obtener diferentes resultados en función de la forma de hacer la extrapolación. La Figura 5 muestra el buen acuerdo obtenido entre los resultados de ambos métodos, habiéndose representado, para evitar manipulaciones innecesarias de los resultados fotoelásticos, directamente los valores de la diferencia de tensiones principales

normalizadas a la tensión nominal en las chapas.

Los factores de intensificación de tensiones se calculan, según se ha indicado en el apartado 4, siguiendo el método de campo lejano que se explica en [12]. Para este problema se han utilizado 322 puntos del campo de isocromáticas utilizándose para el ajuste 20 coeficientes en las funciones de variable compleja.

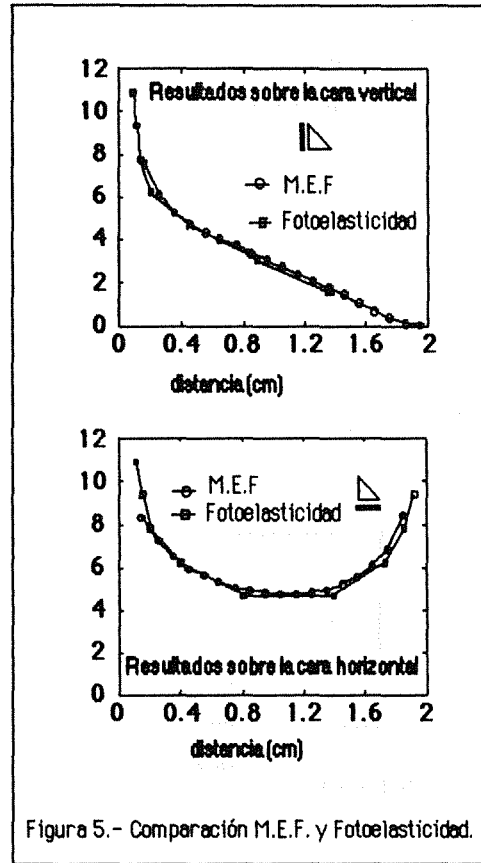
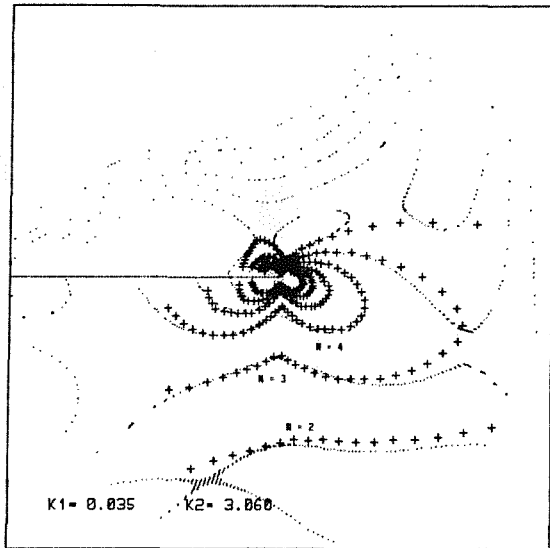


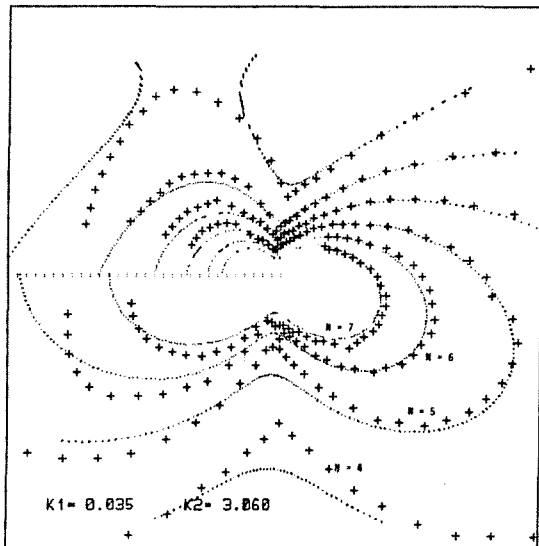
Figura 5.- Comparación M.E.F. y Fotoelasticidad.

La figura 6 muestra el campo de isocromáticas obtenido, donde las cruces representan los puntos tomados de las isocromáticas reales y las líneas a puntos las isocromáticas que se derivan de la solución ajustada. En la Figura 6 (a) se representa todo el campo y en la (b) sólo el entorno del extremo de la fisura donde el ajuste debe ser mejor. Aunque se trataba teóricamente de un modo II puro ha aparecido un pequeño valor de  $K_I$ , siendo los valores finales:

$$K_I = 0.035 \text{ Kg/mm}^{3/2} \quad K_{II} = 3.059 \text{ Kg/mm}^{3/2}$$



(a)



(b)

Figura 6.- Campo de isocromáticas obtenido numéricamente  
(a) General (b) entorno fondo de la fisura.

**5.2 Cordones frontales en ángulo en chapas a tope**

Esta configuración corresponde a la mostrada genéricamente en la Figura 1 (b), detallándose sus dimensiones en la Figura 7.

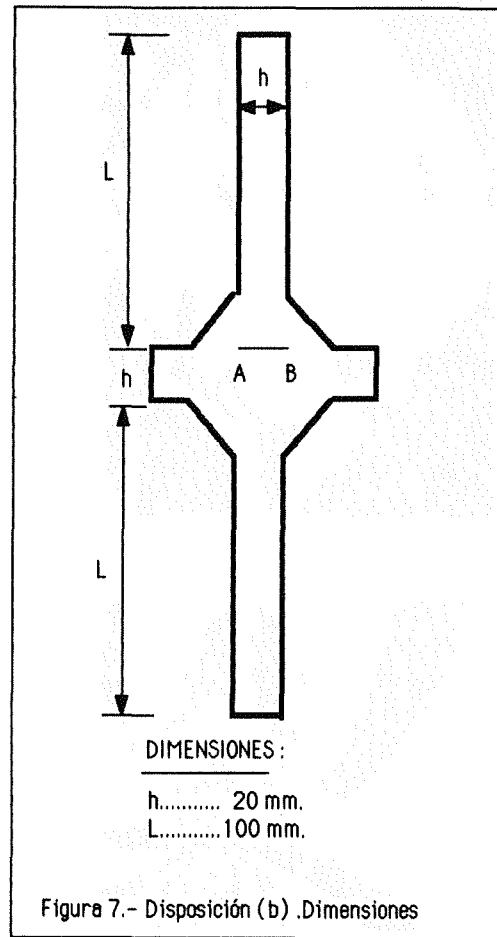


Figura 7.- Disposición (b) .Dimensiones

La probeta se ha realizado en Arelдите CT200 con un factor de franja de 1.14 Kg./mm, teniendo un espesor de 2.9 mm.

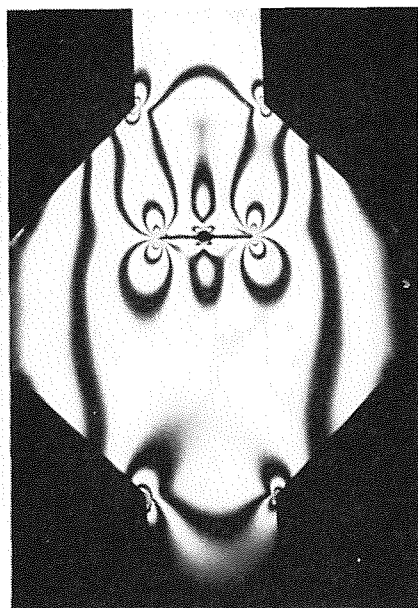
La Figura 8 (a) muestra la configuración general de isocromáticas y la 8 (b) una ampliación de la zona próxima al extremo de la fisura, donde puede apreciarse ahora la agrupación de isocromáticas propia de un modo I.

El campo de isocromáticas se ha simulado utilizando en esta ocasión 185 puntos y empleando para el ajuste 16 coeficientes en las funciones de variable compleja.

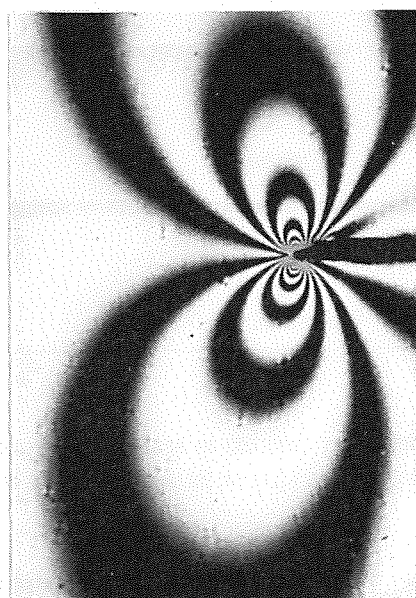
La figura 9 muestra el campo de isocromáticas obtenido con el mismo significado que en el caso anterior.

Aunque se trataba teóricamente de un modo I puro ha aparecido un pequeño valor de  $K_{II}$ , siendo los valores finales:

$$K_I = 2.852 \text{ Kg/mm}^{3/2} \quad K_{II} = -0.2 \text{ Kg/mm}^{3/2}$$



(a)

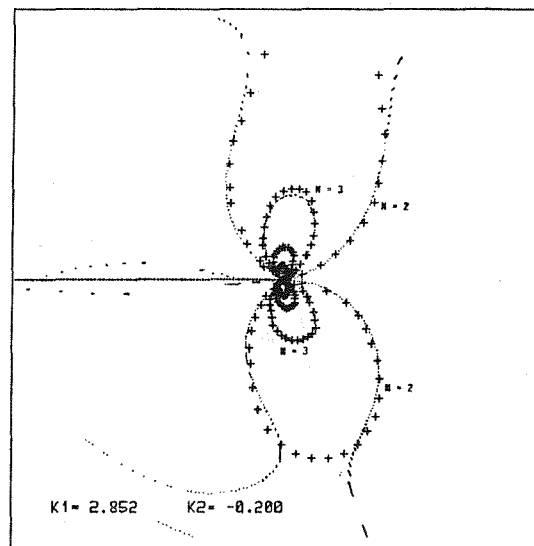


(b)

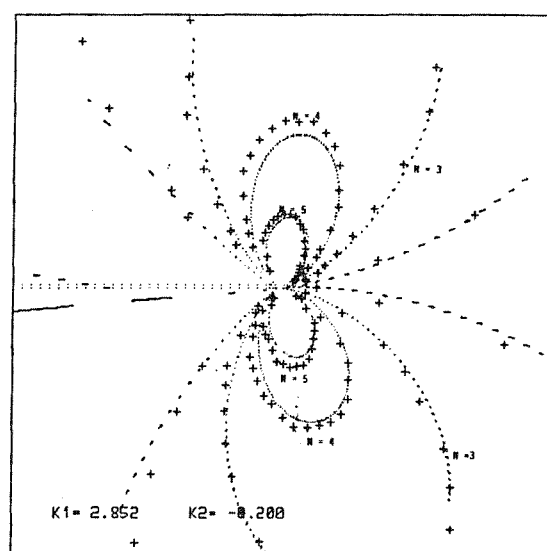
Figura 8.- Campo de isocromáticas (a) general  
(b) entorno fondo de grieta

## 6.- CONCLUSIONES

Una vez calculados los valores de los factores de intensificación de tensiones cabe sopesar la importancia de los mismos en orden a determinar cual puede ser el estado límite real de las uniones analizadas. El único enfoque factible es evaluar el valor de la tenacidad a fractura que debe tener un material para que en los casos estudiados el estado límite sea el previsto por la Norma [1]. Para la realización de este supuesto se va a considerar el caso de un acero de 5000 Kg./cm<sup>2</sup> de límite elástico.



(a)



(b)

Figura 9.- Campo de isocromáticas obtenido numéricamente  
(a) general (b) entorno fondo de fisura.

Para la configuración (a) y el acero supuesto la Norma (caso 2) predice una fuerza de agotamiento de 3606 Kg.. El valor obtenido de  $K_{II}$  correspondía a una fuerza  $F$  aplicada de 90 Kg. Por consiguiente el valor del factor de intensidad de tensiones en el modo II para la fuerza de agotamiento de la Norma sería 122.5 Kg./mm<sup>3/2</sup>. Aplicando como criterio de propagación inestable:

$$\sqrt{1.78} K_{II} = K_c$$

sería preciso, por tanto, que el material tuviera una tenacidad a fractura, para la configuración (a) presentada,

de  $163.5 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ .

Para la configuración (b) la fuerza de agotamiento predicha por la Norma (caso 2) sería  $6972 \text{ Kg}$ , para el mismo acero del caso anterior. El valor obtenido de  $K_I$  se correspondía a una fuerza aplicada de  $60 \text{ Kg}$ . El valor del factor de intensidad de tensiones para la fuerza de agotamiento sería  $331.4 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ . Aplicando como criterio de propagación inestable:

$$K_I = K_C$$

sería preciso, por tanto, que el material tuviera una tenacidad a fractura, para la configuración (b) presentada, de  $331.4 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ .

Es necesario realizar algunas precisiones para matizar la aplicabilidad de estos resultados que aparentemente requieren de unas características altas del material, en cuanto a tenacidad, para que el estado límite sea el de la Norma y no el de propagación inestable.

En primer lugar hay que indicar que la Norma se ha aplicado con  $\sigma_u = \sigma_E$ , lo cual para tratarse de un criterio en rotura significa introducir un margen de seguridad importante.

En segundo lugar la aplicabilidad de los factores de intensidad de tensiones asociados a una Teoría Elástica Lineal de la Mecánica de la Fractura para los niveles de carga asociados al enfoque anterior puede ser discutible ya que según se ha puesto de manifiesto en [4], existe una plastificación generalizada cuando se está próximo a alcanzar la carga máxima soportable por la unión según la Norma.

Por ello, los resultados anteriores, derivados del enfoque realizado deben ser tomados fundamentalmente en sentido cualitativo. Así, puede establecerse que los estados límites provocados por ciertas configuraciones típicas de uniones soldadas y/o errores de diseño y/o errores de ejecución, tienen en los cordones frontales en ángulo una gran importancia lo que requiere una profundización en el análisis de este tipo de problemas y un mayor cuidado en el diseño de este tipo de uniones, intentando evitarlas siempre que sea posible.

Comparando las dos situaciones analizadas puede decirse que la configuración con las chapas a tope ha resultado ser, como era previsible de la configuración geométrica, más severa que la configuración con las chapas solapadas. Hay no obstante que indicar que aquella resulta menos real que esta (que lo es absolutamente), dado que aún en caso de error de diseño, siempre habrá una cierta penetración de la soldadura por lo que la fisura generada sería menor que el espesor de la placa traccionada. En cualquier caso, hay que considerar que

esta configuración es siempre evitable con un diseño adecuado y una correcta ejecución.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Antonio Caffas Delgado por su inestimable colaboración en los trabajos de Laboratorio.

## 7.- REFERENCIAS

- [1] UNE 14035, Cálculo de cordones de soldadura solicitados por cargas estáticas.
- [2] Vreedenburgh, C.G.J. (1954), "New Principles for the calculation of Welded Joints", *Welding Journal*.
- [3] Ballio, G. y Mazzolani, F.M. (1983), *Theory and Design of Steel Structures*, Chapman & Hall.
- [4] Caffas, J., París, F. y Picón, R. (1990), "Análisis tensional en cordones de soldadura en ángulo" 8a. Jornadas Técnicas de Soldadura. Madrid.
- [5] MV 103, Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación.
- [6] Dally J. W. y Riley W. F. (1975), "Experimental Stress Analysis", Mc Graw.
- [7] Kuske, A. y Robertson G. (1974), "Photoelastic Stress Analysis", Wiley.
- [8] Etheridge, J. M. y Dally, J. W. (1977) "A critical review of methods for determining stress-intensity factors from isochromatic fringes". *Exp. Mech.*, Vol 17, pp 248-54.
- [9] Rivas, C., Picón, R., París, F. y Lara E. (1988), "Campo tensional en el entorno de una fisura. Determinación de  $K_I$  y  $K_{II}$  usando técnicas fotoelásticas." *Anales de Ingeniería Mecánica*. Año 6, N.3, 45-52.
- [10] Muskhelishvili, N.I. (1953) "Some basic problems of the mathematical theory of Elasticity", Noordhoff.
- [11] Sanford R.I. y Dally J.W. (1979) "A general Method for determining mixed-mode SIF from isochromatic fringe patterns". *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 11, pp 621-33.
- [12] Picón R., París, F. y Rivas, C. (1990), "Cálculo fotoelástico de factores de intensidad de tensiones mediante desarrollos en serie. Estudio numérico". *Encuentro Grupo Español de Fractura*. Sigüenza