

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERIA DEL  
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO DE ACEROS  
SOLDABLES MICROALEADOS: CARACTERIZACION Y  
MODELO DE COMPORTAMIENTO

JOSE ALBERTO ALVAREZ LASO

Santander, Mayo 1998

## CAPITULO 4

# CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION EN REGIMEN ELASTOPLASTICO

### 1. INTRODUCCION

Una vez expuesta la necesidad del empleo de la Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP) para apoyar la caracterización de los procesos de fisuración en ambiente agresivo de los aceros en estudio, este capítulo trata de desarrollar las metodologías, analítica y experimental, necesarias para ello.

La caracterización de los procesos de fisuración se establece con la determinación de la velocidad de propagación de las fisuras existentes en función de la fuerza motriz que los controla. A medida que la resistencia a la fisuración crece, el material desarrolla mecanismos de rotura local, con mayor deformación plástica, controlados por los estados locales de tensión y deformación en la zona de proceso del frente de fisura, que son dependientes del estado de fisuración y de la sollicitación actuante a través de los parámetros que los definen. Por tanto, es necesario desarrollar una metodología analítica que permita obtener, en un proceso de fisuración, la velocidad de propagación en cada instante y relacionarla con el valor de la integral  $J$ , como parámetro general capaz de cubrir la caracterización de todo tipo de procesos de fisuración, desde

aquéllos que apenas desarrollan una pequeña zona plástica y se asimilan al régimen de análisis elástico lineal, hasta los que desarrollan zonas de plasticidad más extendidas y deben analizarse en régimen elastoplástico.

Esta metodología analítica deberá aplicarse a los resultados experimentales a obtener con probetas de los materiales en estudio, en ensayos representativos de su comportamiento en condiciones de trabajo, en ambientes susceptibles de desarrollar procesos de fisuración subcrítica. De esta forma, el acoplamiento de las dos metodologías, analítica y experimental, permitirá obtener una relación entre la dinámica de propagación y la fuerza motriz,  $(da/dt)-J$ , que caracterice el comportamiento del material y sea válida para aplicaciones al diseño, a la selección del material adecuado y a otras posibles aplicaciones tecnológicas.

## 2. ANALISIS DE COMPONENTES FISURADOS EN REGIMEN ELASTOPLASTICO

Las situaciones más usuales de sollicitación de componentes fisurados están resueltas en el campo de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal, existiendo ya un amplio catálogo de funciones tabuladas que permiten la determinación de la variable elegida como fuerza motriz. Así, una serie de expresiones genéricas permiten calcular, para un sistema fisurado, los valores de la integral  $J$  y de los desplazamientos en función del esfuerzo aplicado  $P$  por unidad de espesor y del estado de fisuración, caracterizado por la longitud relativa de la fisura respecto de una dimensión del sistema,  $a/W$ . Los referidos desplazamientos pueden ser evaluados tanto en un lugar genérico de la línea de propagación, definiendo la abertura de fisura o "*crack opening displacement*", COD o  $\delta$ , como en un punto concreto de dicha línea coincidente con el punto de aplicación de la carga,  $\Delta_L$ . Las expresiones que finalmente permiten determinar los valores referidos son:

$$J_e = f_1(a/W) \frac{P^2}{E'} \quad (4.1a)$$

$$\delta_e = f_2(a/W) \frac{P}{E'} \quad (4.1b)$$

$$\Delta_{L_e} = f_3(a/W) \frac{P}{E'} \quad (4.1c)$$

siendo  $E'$  el módulo de elasticidad generalizado, propio de las condiciones existentes en el fondo de la fisura,  $E' = E/(1-\nu^2)$  para deformación plana y  $E' = E$  para el caso de tensión plana, y  $f_1, f_2$  y  $f_3$  funciones dependientes de la geometría y la longitud de fisura, teniendo la primera de ellas dimensión de  $L^{-1}$  mientras que las dos últimas son adimensionales [153]. En las anteriores expresiones el subíndice "e" denota únicamente el carácter puramente elástico de los parámetros determinados por las mismas.

En el caso de la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica, el Centro de Investigación y Desarrollo de la General Electric Company, bajo el patrocinio del Electric Power Research Institute, ha desarrollado un método ingenieril de caracterización del estado de sollicitación y su aplicación a las condiciones de rotura, conocido como GE-EPRI [154]. La clave de este método se encuentra en la obtención previa de soluciones válidas para el caso de plastificación total y su posterior extensión a la situación elastoplástica por combinación apropiada con la solución elástica correspondiente, fundamentándose en los siguientes aspectos, propios de la Mecánica de la Fractura:

- Identificación de  $J$  o  $CTOD$  como parámetros caracterizadores del estado local de sollicitación, fuerza motriz, y el empleo de las curvas de resistencia a la rotura basadas en estos parámetros para definir las condiciones de rotura de materiales dúctiles.
- Un procedimiento de estimación de parámetros elastoplásticos para cuerpos agrietados, proveniente de los trabajos de Shih y Hutchinson [155-156], Bucci *et al.* [157] y Rice *et al.* [158]. En él, las soluciones elastoplásticas se estiman mediante interpolación de las soluciones elásticas y las completamente plásticas. Las soluciones elásticas, como antes se refirió, están tabuladas convenientemente en manuales [153,159], proviniendo de Goldman y Hutchinson [160] la idea de que las soluciones plásticas estén igualmente tabuladas en función de la carga aplicada.



- El desarrollo de los elementos finitos incompresibles [161-164], necesarios para los cálculos en régimen de plastificación generalizada, que hicieron posible la posterior estimación de los parámetros mencionados en régimen elastoplástico.

En consecuencia, las principales aportaciones de dicho método son:

- Un catálogo, en forma de manual, de soluciones de la integral  $J$ , la abertura del fondo de fisura,  $CTOD$ , y el desplazamiento del punto de carga,  $\Delta_L$ , para diferentes configuraciones, en régimen de plastificación generalizada.
- Un procedimiento de estimación que permite el cálculo de la fuerza motriz del agrietamiento en régimen elastoplástico como combinación de la solución elástica y la solución completamente plástica obtenida del catálogo.
- Unos métodos gráficos de análisis que permiten predecir de forma simple el inicio de la fisuración, el crecimiento estable de fisuras y la inestabilidad o rotura última, por comparación de la fuerza motriz aplicada  $J_{app}$  con la curva de resistencia del material  $J_R$ .

Los dos primeros pasos, soluciones para plastificación generalizada y procedimiento de estimación elastoplástico, son los utilizados para resolver el estado de fisuración de cuerpos agrietados en régimen elastoplástico.

## 2.1. Soluciones para plastificación generalizada

Las expresiones (4.1) representan para un sólido fisurado soluciones elásticas tabuladas respecto a la carga aplicada sobre el mismo y su longitud de fisura. Una forma de estas soluciones es la siguiente:

$$J_e / (\sigma_0 \varepsilon_0 a) = \left[ \frac{P}{P_0} \right]^2 \hat{J}_e(a/W) \quad (4.2a)$$

$$\delta_e / (\varepsilon_0 a) = \left[ \frac{P}{P_0} \right] \hat{\delta}_e(a/W) \quad (4.2b)$$

$$\Delta_{L_e} / (\varepsilon_0 a) = \left[ \frac{P}{P_0} \right] \hat{\Delta}_{L_e} (a/W) \quad (4.2c)$$

En estas expresiones (4.2) el subíndice  $e$  denota el régimen elástico;  $P$  es la carga generalizada por unidad de espesor;  $a/W$  es la relación entre longitud de fisura  $a$  y una dimensión característica del elemento  $W$ ;  $\sigma_0$  es el límite elástico del material;  $\varepsilon_0$  es la deformación correspondiente a la tensión  $\sigma_0$ , y  $P_0$  es la carga límite o de referencia por unidad de espesor, definida como:

$$P_0 = \zeta \eta c \sigma_0 \quad (4.3)$$

donde  $\zeta$  es un factor de confinamiento adimensional que depende de la configuración,  $\eta$  es un factor geométrico adimensional que depende de la longitud relativa de la fisura, y  $c$  es la longitud del ligamento remanente en el sólido fisurado. Los factores  $\hat{J}_e$ ,  $\hat{\delta}_e$  y  $\hat{\Delta}_{L_e}$  son funciones adimensionales de  $a/W$  exclusivamente.

El comportamiento plástico del material se ajusta en el caso de tracción uniaxial según una relación tensión-deformación plástica tipo Ramberg-Osgood, con coeficiente de endurecimiento  $1/n$ , de la forma siguiente:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} = \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (4.4)$$

Con objeto de generalizar esta expresión para un estado multiaxial se define en primer lugar el tensor desviador para este tipo de sollicitación por sus componentes  $\sigma'_{ij}$ .

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad (4.5)$$

donde  $\sigma_{ij}$  son las componentes del tensor de tensiones y  $\sigma_{kk}$  su primer invariante.

La coaxialidad de los tensores desviadores de tensión y deformación, unida a la proporcionalidad de sus valores principales, que postula la teoría de

deformaciones totales de la Plasticidad, juntamente con la relación entre tensión,  $\bar{\sigma}$ , y deformación,  $\bar{\varepsilon}$ , equivalentes que se deriva de (4.4), permiten deducir la relación existente entre tensiones,  $\sigma'_{ij}$ , y deformaciones,  $\varepsilon'_{ij}$ , desviadoras para un estado tensional general:

$$\frac{\varepsilon'_{ij}}{\varepsilon_0} = \frac{3}{2} \alpha \left( \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_0} \quad (4.6)$$

estando relacionadas sus partes isotropas a través del módulo elástico volumétrico o de compresibilidad y resultando nula la deformación isotropa para el caso de considerar material incompresible ( $\nu=0.5$ ). Además, las componentes  $\varepsilon'_{ij}$  coinciden con las componentes plásticas y con las componentes del tensor de deformación  $\varepsilon_{ij}$  cuando se desprecian las componentes elásticas frente a las plásticas, como se puede asumir en condiciones de plastificación generalizada.

Basándose en la referida teoría, Ilnynshin [165] advirtió que, para materiales cuyo comportamiento sigue la expresión (4.6), la solución a los problemas de contorno, propios de estados de sollicitación realizados bajo carga o desplazamiento monótonamente crecientes, se basa en dos propiedades importantes. La primera es que los campos de tensiones y de deformaciones son directamente proporcionales a la carga o al desplazamiento impuestos elevados a una potencia dependiente del coeficiente de endurecimiento  $1/n$ . Para el caso de carga aplicada por unidad de espesor  $P$ , los campos de tensiones, deformaciones y desplazamientos presentan la siguiente forma funcional [160]:

$$\sigma'_{ij} = \frac{P}{\ell} f_{\sigma_{ij}}(x_k, n) \quad (4.7a)$$

$$\varepsilon'_{ij} = \alpha \varepsilon_0 \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n f_{\varepsilon_{ij}}(x_k, n) \quad (4.7b)$$

$$u_i = \alpha \varepsilon_0 \ell \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n f_{u_i}(x_k, n) \quad (4.7c)$$

donde  $\ell$  es un parámetro de longitud y  $f_{\sigma_{ij}}$ ,  $f_{\varepsilon_{ij}}$  y  $f_{u_i}$  son funciones adimensionales dependientes de la posición espacial  $x_k$  y del coeficiente de endurecimiento  $1/n$ . La segunda propiedad se deduce de las dos primeras ecuaciones de (4.7), que justifican que tensión y deformación, si se cumplen las (4.6), crecen en igual proporción en cada punto. Así, la solución para el caso de plastificación total basada en la teoría de las deformaciones incrementales es la misma que la obtenida para la teoría de las deformaciones totales.

La sencilla dependencia funcional de estos campos con respecto a la carga aplicada, o al desplazamiento impuesto, implica que cantidades como la integral  $J$ , el COD y el desplazamiento del punto de carga respondan a las expresiones siguientes:

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 c \left[ \frac{P}{P_0} \right]^{n+1} \hat{J}_p(a/W, n) \quad (4.8a)$$

$$\delta_p = \alpha \varepsilon_0 a \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n \hat{\delta}_p(a/W, n) \quad (4.8b)$$

$$\Delta_{L_p} = \alpha \varepsilon_0 a \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n \hat{\Delta}_{L_p}(a/W, n) \quad (4.8c)$$

donde el subíndice  $p$  señala el carácter plástico de estas cantidades. Las funciones  $\hat{J}_p$ ,  $\hat{\delta}_p$  y  $\hat{\Delta}_{L_p}$  son adimensionales y dependen de la relación  $a/W$  y  $n$ .

La forma funcional de las ecuaciones (4.8) es similar a la de las ecuaciones (4.2) dadas para elasticidad lineal, excepto por la dependencia de los parámetros de Ramberg-Osgood  $\alpha$  y  $n$ , pudiéndose separar en ambos casos los factores dependientes de la carga de los de la configuración geométrica y del material. En consecuencia, es posible tabular las soluciones en régimen plástico en función de  $a/W$  y  $n$  para las configuraciones que ya presentan soluciones tabuladas en régimen elástico lineal. Las soluciones plásticas se han obtenido en tensión plana a través de técnicas convencionales de elementos finitos [155,162], y en deformación plana por técnicas especiales, ya que el carácter indeformable en una de las direcciones provoca la aparición de tensiones triaxiales [161,164].

Soluciones para diversas configuraciones en régimen de plastificación generalizada se pueden encontrar en diferentes referencias bibliográficas, como [154,166-167], habiendo sido comprobadas experimentalmente para el caso elástico puro ( $n=1$ ) por comparación con las soluciones descritas en la literatura [153,159].

Aunque no existen soluciones desarrolladas para el *CTOD*, éste puede calcularse a partir de las soluciones de la integral *J* mediante la relación:

$$\delta_t = d_n \cdot \frac{J}{\sigma_0} \quad (4.9)$$

en la que  $d_n$  es un factor variable entre 0 y 1 en función de las características del material y del estado tensional [168].

## 2.2. Soluciones en régimen elastoplástico

Las soluciones para casos de plastificación generalizada son únicamente aplicables a configuraciones agrietadas completamente plastificadas, para las que las deformaciones elásticas son completamente despreciables frente a las plásticas ( $P \gg P_0$ ). Las soluciones en régimen elástico lineal sólo son válidas para situaciones limitadas de plastificación contenida en el fondo de fisura ( $P \ll P_0$ ). La mayor parte de los problemas de interés práctico se encuentran en régimen elastoplástico, intermedio entre los estados elástico y plástico anteriormente expuestos. La solución a este caso se obtiene por medio de un procedimiento de interpolación entre las soluciones de ambos.

Los materiales caracterizados por una ley de Ramberg-Osgood siguen una relación tensión-deformación reflejada en la ecuación (3.4). Para ellos, las fórmulas de interpolación que resuelven esta situación elasto-plástica intermedia son esencialmente una suma de las soluciones elástica lineal y de plastificación generalizada, que toman la forma [155,156]:

$$J = J_e(a_{ef}) + J_p(a, n) \quad (4.10a)$$

$$\delta = \delta_e(a_{ef}) + \delta_p(a, n) \quad (4.10b)$$

$$\Delta_L = \Delta_{Le}(a_{ef}) + \Delta_{Lp}(a, n) \quad (4.10c)$$

La contribución elástica se basa en la longitud de fisura efectiva  $a_{ef}$ , que incorpora un término corrector debido a los efectos de la plastificación a pequeña escala:

$$a_{ef} = a + \varnothing r_y \quad (4.11)$$

donde

$$r_y = \frac{1}{\beta\pi} \frac{n-1}{n+1} \left( \frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \quad (4.12)$$

es la corrección al tamaño de fisura debido a la zona plástica, dado por la expresión de Irwin modificada para materiales que presentan endurecimiento por deformación. En estados de deformación plana la constante  $\beta$  vale 6, mientras que en tensión plana su valor es 2. El coeficiente

$$\varnothing = \frac{1}{1 + (P/P_0)^2} \quad (4.13)$$

se introduce en un intento de limitar la corrección a los estados de plastificación contenida, tendiendo a anularla para el caso de plastificación generalizada.

La formulación elastoplástica (4.10) ha sido ampliamente contrastada por medio de elementos finitos y ensayos en laboratorio [154,158,169-170], mostrándose suficientemente precisa para cualquier valor del coeficiente de endurecimiento del material y todo tipo de configuración geométrica.

Este procedimiento estimativo, que se ha venido experimentando, es también aplicable a materiales cuyo comportamiento en tracción uniaxial no cumple estrictamente una ley del tipo Ramberg-Osgood. En el método GE/EPRI se

proporcionan formulaciones alternativas en función del tipo de ajuste de la curva tensión-deformación del material.

### 3. APLICACION AL CASO DE PROBETA COMPACTA

Para la aplicación de la metodología descrita en el apartado anterior, se han desarrollado en el propio método GE/EPRI soluciones tabuladas para el caso de plastificación total en diferentes tipos de componentes, en particular probetas, para un amplio rango de valores de longitud de fisura, relacionados con la geometría de la probeta mediante la relación  $a/W$ , y del coeficiente de endurecimiento  $1/n$ , en los dos estados extremos de tensión plana y de deformación plana. Este es el caso de las probetas de tipo compacto, presentadas en la Figura 3.9, en las que se basa el trabajo analítico y el posterior experimental realizado en esta tesis.

Para las mismas configuraciones, la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal proporciona soluciones para el factor de intensidad de tensiones,  $K_I$ . Estas soluciones se relacionan con la integral  $J$  a través de la ecuación:

$$J_e = \frac{K_I^2}{E'} \quad (4.14)$$

donde  $E'$  es el módulo de elasticidad generalizado, como ha quedado descrito.

Ambos tipos de soluciones, en plasticidad generalizada y en elasticidad lineal, existen para las probetas tipo compacto, probetas CT. Las soluciones en el campo plástico para este tipo de probeta vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 c h_1(a/W, n) \left[ \frac{P}{P_0} \right]^{n+1} \quad (4.15a)$$

$$\delta_p = \alpha \varepsilon_0 a h_2(a/W, n) \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n \quad (4.15b)$$

$$\Delta_{L_p} = \alpha \varepsilon_0 a h_3(a/W, n) \left[ \frac{P}{P_0} \right]^n \quad (4.15c)$$

$$\delta_{t_p} = \alpha \varepsilon_0 c h_4(a/W, n) \left[ \frac{P}{P_0} \right]^{n+1} \quad (4.15d)$$

En estas ecuaciones  $\delta$  representa el valor del desplazamiento en la cara exterior de la probeta; el desplazamiento en la línea de carga viene dado por  $\Delta_{L_p}$  y la apertura en fondo de grieta *CTOD* por  $\delta_{t_p}$ , siendo  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  las funciones tabuladas adimensionales derivadas de las expresiones (4.8), equivalentes a las  $\hat{J}_p$ ,  $\hat{\delta}_p$  y  $\Delta_{L_p}$  respectivamente, y  $h_4$  la equivalente a  $h_2$  para el *CTOD*, cuyo valor, de acuerdo con (4.9), es:

$$h_4 = h_1 \cdot d_n \quad (4.16)$$

El subíndice  $p$  denota el carácter plástico de los parámetros evaluados por las funciones anteriores. Los valores de estas funciones, tanto para el estado de tensión plana como para el estado de deformación plana, se encuentran en tablas y gráficos en la documentación del método propuesto por GE/EPRI, en función de los valores  $a/W$  para distintos valores de  $n$ . Para relaciones  $a/W$  o valores de  $n$  no incluidos en las tablas, los valores de las funciones se pueden obtener por métodos de interpolación o extrapolación a partir de los valores en ellas contenidos. De esta forma es posible obtener las funciones geométricas para todo el rango de valores de longitud de fisura y endurecimiento del material.

La carga límite por unidad de espesor,  $P_0$ , viene dada para el estado de tensión plana por:

$$P_0 = 1.455 \eta (W-a) \sigma_0 \quad (4.17)$$

y para el estado de deformación plana por:

$$P_0 = 1.071 \eta (W-a) \sigma_0 \quad (4.18)$$



En las anteriores expresiones el factor de confinamiento referido en (4.3) es una constante, función del estado plano existente, mientras que el factor geométrico  $\eta$  viene dado por:

$$\eta = \left[ \left( \frac{2a}{c} \right)^2 + 2 \left( \frac{2a}{c} \right) + 2 \right]^{1/2} - \left( \frac{2a}{c} + 1 \right) \quad (4.19)$$

Las expresiones (4.16) concuerdan con las obtenidas por diferentes autores a través del método de los elementos finitos incomprensibles [171-172], ofreciendo buenos resultados para condiciones geométricas en las que se cumple que  $\frac{a}{W} > \frac{3}{8}$  y donde  $n$  es mayor que 3.

La contribución elástica a los parámetros  $J$ ,  $\delta$  y  $\Delta_L$  para la geometría de tipo compacto se suele presentar mediante la siguiente formulación:

$$J_e = \frac{a F_1^2(a/W)}{E' W^2} P^2 \quad (4.20a)$$

$$\delta_e = \frac{1}{E'} v_1(a/W) P \quad (4.20b)$$

$$\Delta_{L_e} = \frac{1}{E'} v_2(a/W) P \quad (4.20c)$$

siendo las funciones adimensionales  $F_1, v_1$  y  $v_2$  dependientes únicamente de la relación  $a/W$  y existiendo una relación inmediata con las presentadas en (4.1):

$$f_1 = \frac{a F_1^2}{W^2} \quad (4.21a)$$

$$f_2 = v_1 \quad (4.21b)$$

$$f_3 = v_2 \quad (4.21c)$$

Estas funciones se encuentran tabuladas en la referencia [153] en base a las siguientes expresiones dadas para ellas:

$$F_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\sqrt{\frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}} \left\{ 0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\} \quad (4.22a)$$

$$f_2\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{7.954 + 25.12 \frac{a}{W} - 43.79 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 30.45 \left(\frac{a}{W}\right)^3}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^2} \quad (4.22b)$$

$$f_3\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^2} \left[ 38.2 - 55.4 \frac{a}{W} + 33 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \quad (4.22c)$$

Por otra parte, recordando la ecuación (4.14), se puede expresar la parte elástica de la integral  $J$ ,  $J_e$ , en función del factor de intensidad de tensiones en modo I. Este factor presenta para este tipo de probetas la siguiente expresión:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.23)$$

siendo  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  el factor geométrico, cuya expresión polinómica y tabulación de valores se encuentra en diferentes normas vigentes. Existe, por tanto, una relación entre las expresiones de los factores geométricos utilizados en el campo elástico lineal para la geometría estudiada, dada por:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\frac{a}{W}} F_1\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.24)$$

Finalmente, con el apoyo de la formulación anterior, puede determinarse el comportamiento en régimen elastoplástico de una probeta con geometría de tipo compacto, CT. Las expresiones finales características de dicho comportamiento resultan, en atención a lo anteriormente expuesto:

$$J = f_1 \left( \frac{a_{ef}}{W} \right) \frac{P^2}{E'} + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 (W - a) h_1 \left( \frac{a}{W}, n \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)^{n+1} \quad (4.25a)$$

$$\delta = f_2 \left( \frac{a_{ef}}{W} \right) \frac{P}{E'} + \alpha \varepsilon_0 a h_2 \left( \frac{a}{W}, n \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)^n \quad (4.25b)$$

$$\Delta_L = f_3 \left( \frac{a_{ef}}{W} \right) \frac{P}{E'} + \alpha \varepsilon_0 a h_3 \left( \frac{a}{W}, n \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)^n \quad (4.25c)$$

#### 4. APLICACION A LA CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION DE LOS ACEROS EN ESTUDIO

La aplicación de la formulación desarrollada en los puntos anteriores a la caracterización de procesos de fisuración exige, en primer lugar, la utilización de probetas o componentes para los que existan soluciones tabuladas y sean representativos del comportamiento a caracterizar.

En este apartado se aborda, apoyándose en la formulación desarrollada por el método GE/EPRI, la metodología analítica a emplear en la determinación de los parámetros característicos de procesos de fisuración en régimen elastoplástico, el desarrollo de la programación necesaria para la aplicación de esta metodología, y la definición del proceso experimental que aporte los datos necesarios para la misma. Todo ello aplicado ya a procesos propios de los aceros microaleados en estudio.

Para una mejor comprensión de los diferentes pasos analíticos abordados, éstos se aplican a los procesos de fisuración obtenidos en los ensayos de caracterización de la resistencia a la rotura de estos aceros realizados al aire bajo diferentes velocidades de sollicitación.

#### 4.1. Metodología analítica

La formulación previamente presentada requiere como datos de entrada las características mecánicas del material, modelizadas según una ley de tipo Ramberg-Osgood, y la definición de una geometría de ensayo concreta para la que las expresiones analíticas sean conocidas.

Las curvas tensión-deformación de los dos aceros microaleados en estudio han sido presentadas en el capítulo anterior y proporcionan los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\sigma_0$  y  $\epsilon_0$  que aparecen en la Tabla 3.3. Por otro lado, la probeta elegida para caracterizar los procesos de fisuración de estos aceros, en atención a las condiciones de recepción, ha sido la compacta, CT, de espesor 25 mm ( $W = 50$  mm) y con ranuras laterales de 2.5 mm de profundidad en cada cara.

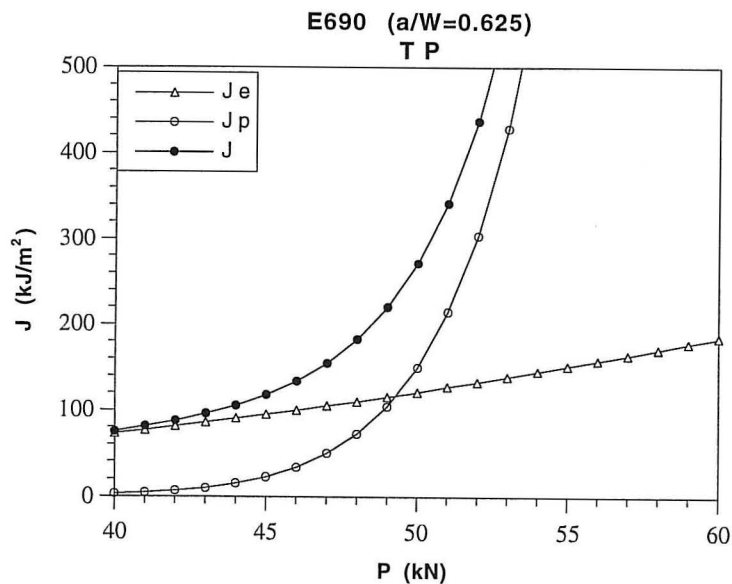
Los valores de las funciones  $h$  para el parámetro  $n$  de cada material pueden obtenerse por interpolación en las tablas correspondientes, que para cada estado de deformación, tensión plana o deformación plana, se encuentran en el método GE/EPRI. Como ejemplo, la Tabla 4.1 recoge los valores de las funciones  $h_1$  y  $h_3$  tabulados en función de la longitud de fisura relativa,  $a/W$ , para los dos aceros en estudio, considerando un estado de deformación plana.

**Tabla 4.1.** Valores de las funciones  $h_1$  y  $h_3$  tabulados para los aceros estudiados en condiciones de deformación plana

FISURA RELATIVA ( $a/W$ )	$h_1$ $n=9.9$	$h_3$ $n=9.9$	$h_1$ $n=17.0$	$h_3$ $n=17.0$
0.25	1.26	7.92	1.38	9.7
0.375	0.44	1.29	0.16	0.44
0.5	0.46	0.89	0.19	0.35
0.625	0.60	1.00	0.32	0.52
0.75	0.72	1.11	0.42	0.64
1.00	0.95	1.44	0.70	1.03

Sustituyendo en las ecuaciones (4.25) los valores anteriores puede obtenerse la relación entre la integral  $J$  y la carga por unidad de espesor,  $P$ , para cada longitud de fisura  $a$ . Así la Figura 4.1 muestra, como ejemplo, la variación de la integral  $J$ , y sus componentes elástica y plástica, frente a la carga  $P$  para una determinada longitud de fisura en el material E690, en condiciones de tensión plana.

La relación  $\Delta_L$ - $P$  se obtiene de manera similar. La Figura 4.2 muestra las curvas  $\Delta_L$ - $P$  obtenidas para el mismo caso de la figura anterior pero bajo condiciones de deformación plana. Esta misma relación se puede expresar en la representación clásica  $P$ - $\Delta_L$  en función de la longitud de fisura y de la situación correspondiente, sea de tensión o de deformación planas, en la manera que se observa en la Figura 4.3 para el acero E690 en deformación plana.



**Figura 4.1.** Variación de la integral  $J$  con la carga aplicada, en condiciones de tensión plana, para una longitud de fisura fija en el acero E690

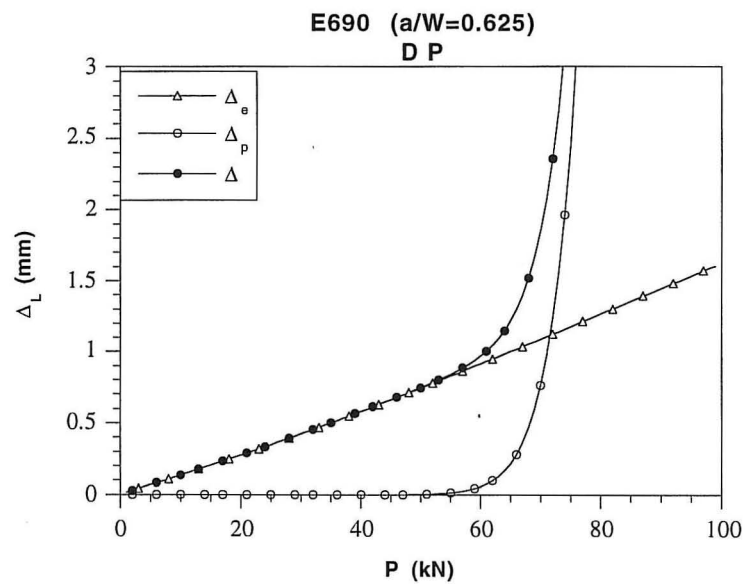


Figura 4.2. Variación de COD con la carga aplicada, en condiciones de deformación plana, para una longitud de fisura fija en el acero E690

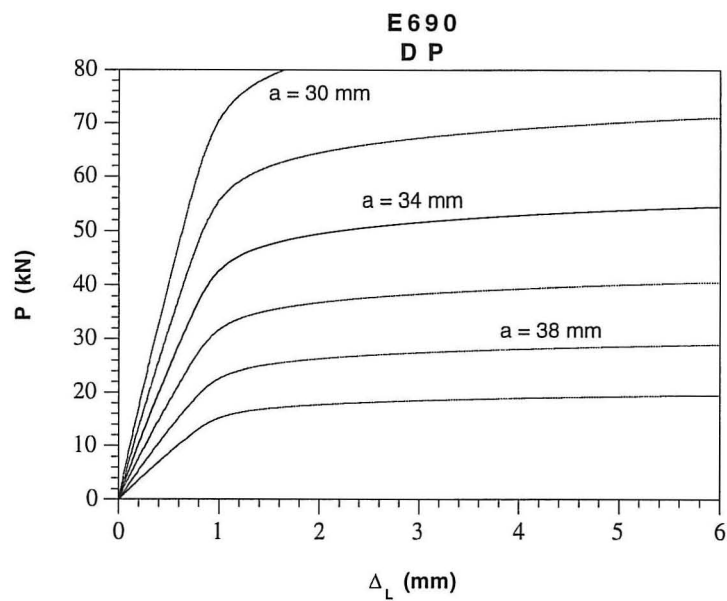


Figura 4.3. Curvas carga-desplazamiento iso-a, en condiciones de deformación plana para el acero E690

Cuando a una familia de curvas, como la representada en la Figura 4.3, se superpone una curva real carga-desplazamiento obtenida experimentalmente, las intersecciones de ésta con las diferentes ramas iso- $a$  analíticas proporcionan la variación de la longitud de fisura a lo largo del ensayo, como función de cualquiera de sus parámetros de control o respuesta,  $P$  o  $\Delta_L$ , o del tiempo al incorporar el dato sobre la velocidad de sollicitación. De esta manera es posible, partiendo de una curva carga-desplazamiento obtenida experimentalmente al ensayar el material y geometría elegidos, y conociendo las características mecánicas del material y las funciones geométricas de la probeta, obtener la ley de variación de la longitud de fisura. En la Figura 4.4. se presenta un esquema de dicho procedimiento y en la Figura 4.5 la aplicación de dicho proceso de cálculo a un ensayo sobre probeta compacta de acero E690 realizado a una velocidad de desplazamiento de  $4.1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

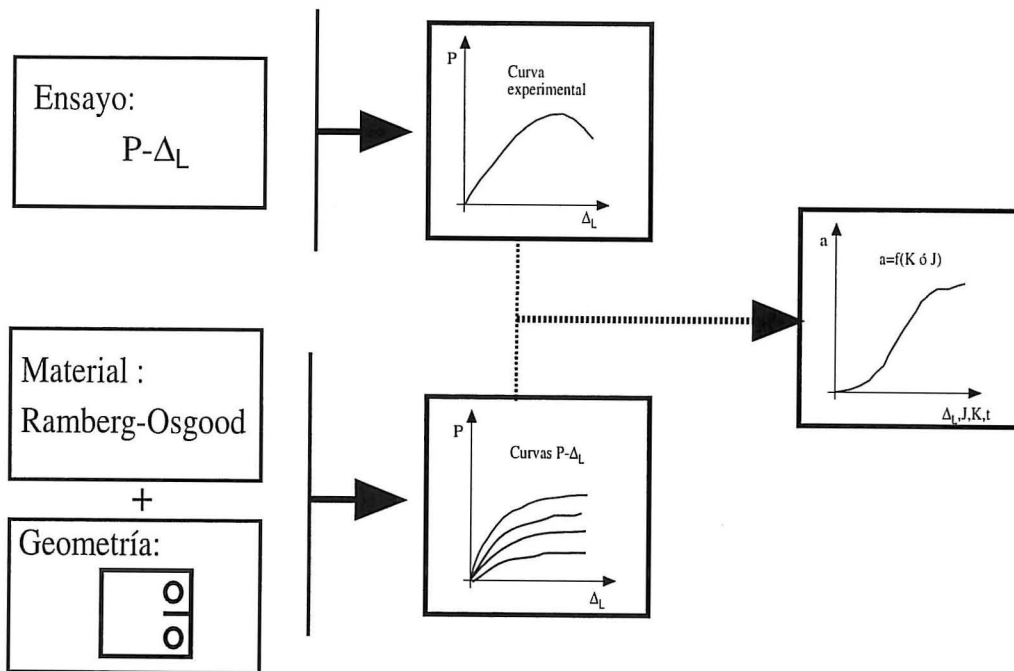
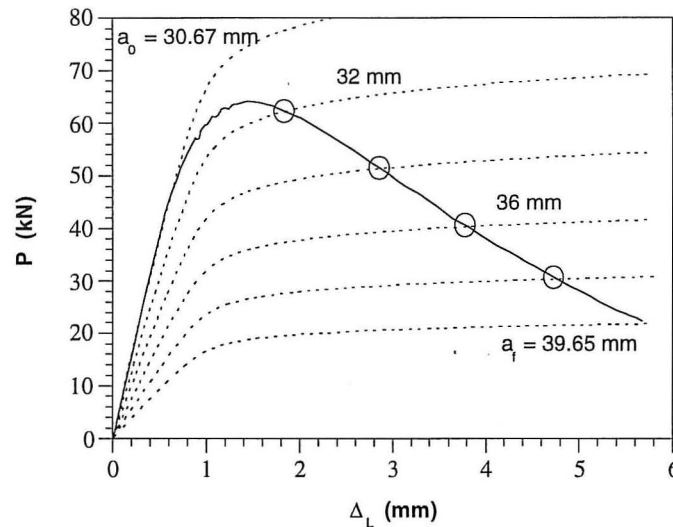


Figura 4.4. Esquema del procedimiento de determinación de longitudes de fisura durante un ensayo J



**Figura 4.5.** Determinación práctica de la longitud de fisura en uno de los ensayos realizados: Acero E690 y  $v_d=4.1 \cdot 10^{-7}$  m/s

La ley de variación de la longitud de fisura, que puede expresarse en función de varios parámetros como  $P$  o  $\Delta_L$ , resulta más útil como función del parámetro de control del proceso experimental. Supuesto éste a velocidad de desplazamiento constante,  $v_d$ , resulta muy sencillo la determinación de la velocidad de propagación de fisura, como demuestra el desarrollo siguiente aplicado a dos estados del ensayo separados por un intervalo de tiempo  $\Delta t$  suficientemente pequeño:

$$\frac{da}{dt} = \frac{a_{i+1} - a_i}{\Delta t} = \frac{\Delta a}{\frac{\Delta(\Delta_L)}{v_d}} = \frac{\Delta a}{\Delta(\Delta_L)} \cdot v_d \quad (4.26)$$

La velocidad de propagación así obtenida es dependiente de cada punto concreto de la curva  $P$ -  $\Delta_L$ , pudiendo, por tanto, quedar expresada en función de cualquier otro parámetro característico de dicho punto en la misma curva, bien sean los propios del ensayo,  $P$  o  $\Delta_L$ , o los que controlan el estado del fondo de



fisura,  $J$  o  $CTOD$ , derivados de los anteriores. La utilidad perseguida en la aplicación a fenómenos de fisuración hace que sea la integral  $J$  el parámetro más apropiado, al ser el más frecuentemente utilizado y de amplio rango, entre los que controlan la zona de proceso en la fisuración.

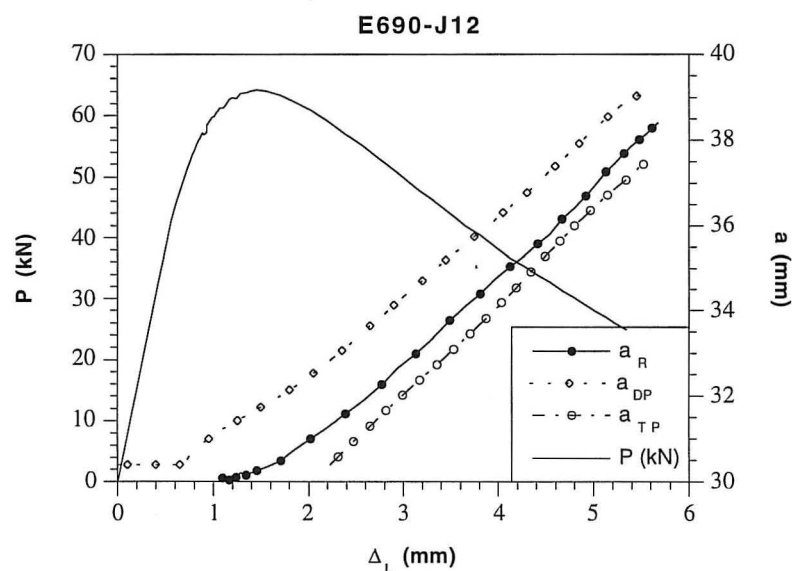
El valor de la integral  $J$  se obtiene mediante la aplicación de las fórmulas descritas en (4.25) para los valores de carga y longitud de fisura. Para su determinación en cada punto de la curva carga-desplazamiento propia de un ensayo, el conocimiento del valor de la carga es inmediato, recogido de la toma de datos, sin embargo la longitud de fisura debe calcularse a partir del procedimiento señalado en la Figura 4.5, por intersección de la curva  $P-\Delta_L$  real con las teóricas para cada longitud de fisura. La validez de la integral  $J$  así calculada va a depender de la correcta estimación del valor de la longitud de fisura a lo largo del ensayo, lo cual dependerá a su vez de la selección adecuada del estado correspondiente para la definición de las curvas teóricas

La determinación de la evolución de  $a$  a lo largo del ensayo al que corresponde la Figura 4.5 permite observar, como se aprecia en la Figura 4.6, los valores de  $a$  estimados experimentalmente, por el procedimiento de descargas elásticas, frente a las previsiones realizadas, tanto en deformación plana como en tensión plana. En ella se puede ver claramente la tendencia del proceso a sobrevalorar la longitud de fisura al suponerse condiciones de deformación plana, e infravalorarlo bajo condiciones de tensión plana.

En la Figura 4.6 se observa, independientemente del estado tensional considerado, un claro paralelismo en la representación de los valores de longitud de fisura frente a  $\Delta_L$ . En consecuencia, la velocidad de propagación de fisuras estimada para ambos estados tensionales va a ser la misma.

La aproximación del valor de la longitud de fisura obtenido analíticamente al valor real de la misma depende de la correspondencia entre la situación real en el fondo de aquélla y el estado utilizado para definirla en el proceso analítico teórico. La propia metodología analítica permite una evaluación del estado tensional, siendo para ello necesaria la realización de ensayos de referencia que proporcionen información de la evolución real de la longitud de fisura para las condiciones de caracterización de los procesos de fisuración, en función de los

parámetros básicos de este tipo de ensayos: carga y desplazamiento en línea de carga.



**Figura 4.6.** Comparación de la longitud de fisura real,  $a_R$ , con las previstas analíticamente para el mismo ensayo, dependiendo de la aplicación de condiciones de tensión plana,  $a_{TP}$ , o deformación plana,  $a_{DP}$

El conocimiento de la longitud de fisura a lo largo de un ensayo, se puede realizar por diferentes técnicas de evaluación directa o indirecta de la longitud de fisura, algunas de carácter continuo y otras discreto. Aún no siendo continua, una de las técnicas más universales, el método de las descargas elásticas basado en la flexibilidad de la probeta y ya descrito en el anterior capítulo, es el aquí utilizado. Cualquier otra técnica sería igualmente válida siempre que no afecte a los propios procesos de fisuración.

Los ensayos realizados sobre los dos materiales analizados, E500 y E690, proporcionan una información completa y continua de los parámetros fundamentales, carga y  $\Delta_L$ , y discontinua en cada descarga de la longitud de fisura, obteniéndose todos ellos de una manera simple y precisa.

Tomando como parámetros fijos los valores de  $P$  y  $a$  para cada una de las descargas y aplicando la formulación descrita para este tipo de probetas bajo las condiciones de ensayo, se obtienen los valores de  $\Delta_L$ , los cuales van a variar sustancialmente si se decide aplicar el método suponiendo condiciones de deformación plana o tensión plana. Las curvas  $P-\Delta_L$  así obtenidas en ambos supuestos pueden compararse con las reales determinándose el estado tensional propio del ensayo.

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran las curvas reales y teóricas obtenidas en ensayos de los dos materiales en estudio a velocidades de sollicitación diferente. En las mismas puede apreciarse cómo las condiciones reales de sollicitación de las muestras ensayadas al aire, evaluadas por medio de la curva  $P-\Delta_L$  propia del ensayo, se encuentran definidas en un estado intermedio entre deformación plana y tensión plana. La proximidad a uno u otro estado va a depender de las condiciones de ensayo, geometría de la probeta, medio agresivo y velocidad de sollicitación.

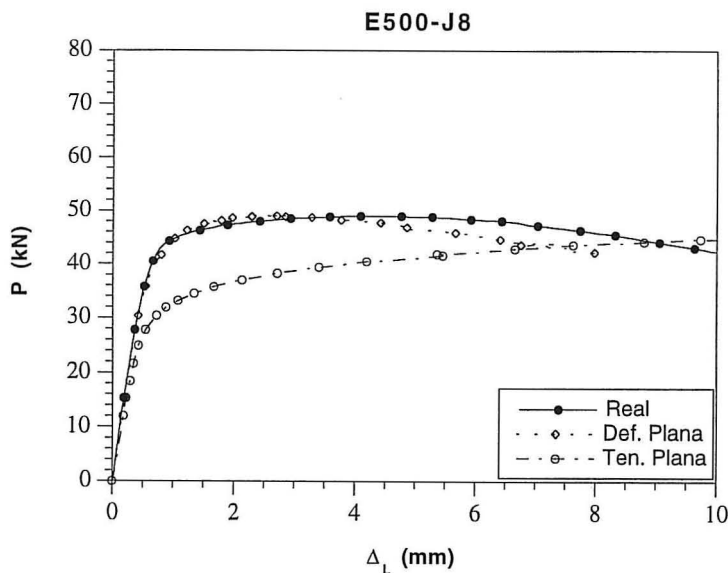
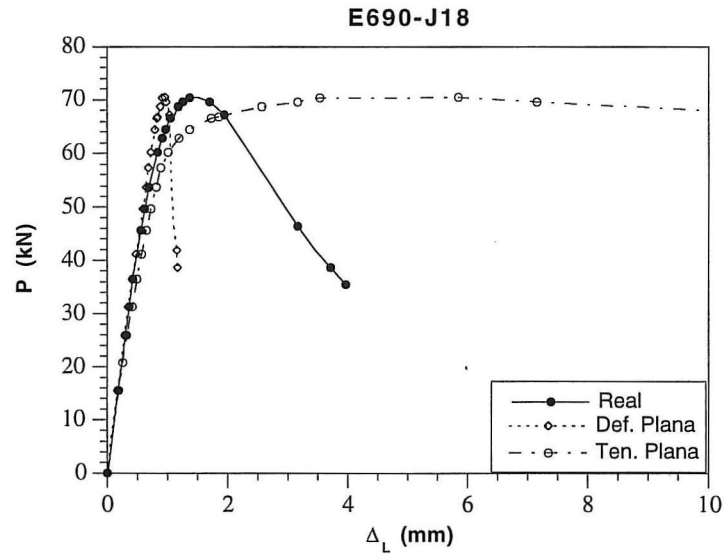


Figura 4.7. Representación de las curvas  $P-\Delta_L$  para estados de tensión y deformación plana y comparación con la curva experimental de un ensayo en el acero E500



**Figura 4.8.** Representación de las curvas  $P-\Delta_L$  para estados de tensión y deformación plana y comparación con la curva experimental de un ensayo en el acero E690

En consecuencia, si la curva correspondiente  $P-\Delta_L$  prevista para uno de los estados bidimensionales extremos coincide con la curva real, dicho estado será el real del componente. Si por el contrario, no existe coincidencia con ninguno de los estados considerados será necesario recurrir a procesos de interpolación para determinar la situación tensional real del componente.

Una vez conocido el estado tensional para unas condiciones de ensayo, geometría de la muestra y ambiente dados, todo el proceso analítico descrito de determinación del estado de fisuración y su evolución, resumido en el esquema de la Figura 4.4, se desarrolla adecuadamente. A partir de esto, los parámetros que controlan las condiciones locales en el entorno de la fisura pueden ser determinados y con ellos su relación con la velocidad de propagación de las fisuras, relación que caracteriza el proceso de fisuración y que, por tanto, es la buscada. Una forma de la misma serían las expresiones  $J-da/dt$ .

La puesta a punto de la metodología analítica desarrollada requiere la realización de unos ensayos de referencia, en las condiciones a caracterizar, que

definan o acoten el estado tensional con relación a las conocidas por la formulación. Así, partiendo del conocimiento previo del estado tensional se puede aplicar toda la metodología analítica a un proceso experimental extenso basado únicamente en la determinación de las curvas  $P-\Delta_L$ . Para ello resulta útil desarrollar una serie de programas y procedimientos que permitan la aplicación del método a las condiciones de ensayo dadas.

#### 4.2. Desarrollo de programas

El proceso analítico descrito está basado en la formulación propia de la geometría del componente o probeta del ensayo, dependiente de las funciones  $h$ , los parámetros propios de la sollicitación y las condiciones de fisuración. Asimismo, esta formulación empleada también depende del estado tensional, asociado al fondo de fisura. Para su aplicación sencilla ha sido necesario la elaboración de unos programas de cálculo, describiéndose los dos más importantes a continuación.

##### 4.2.1. Programa "velocities"

Este programa desarrollado en lenguaje Pascal responde básicamente al esquema presentado en la Figura 4.4 siendo capaz de obtener, a partir de los valores de  $P$  y  $\Delta_L$ , la evolución de la longitud de fisura a lo largo del ensayo y, a partir de la misma, la curva de velocidad de propagación frente a cualquier variable. Los datos de entrada al mismo se pueden agrupar en:

- a) Característicos del material:  $\sigma_0, \alpha, n, E, \nu$
- b) Característicos de la probeta:  $B, W, a_0$
- c) Propias del ensayo:
  - velocidad de sollicitación,  $v_d$
  - longitud final de fisura,  $a_f$
  - curva experimental  $P-\Delta_L$
- d) Propias del estado tensional asociado al fondo de fisura:
  - funciones  $h_i$  para el estado tensional correspondiente.

Los datos de salida se presentan en forma tabulada, estando representados los valores de  $a$  y  $da/dt$  frente a valores propios del ensayo. La Figura 4.6 es un ejemplo de las posibilidades de aplicación de este programa.

#### 4.2.2. Programa "DLJ"

Este programa se encuentra escrito en lenguaje Basic utilizando los siguientes datos de entrada:

- a) Característicos del material:  $\sigma_0, \alpha, n, E, \nu$
- b) Característicos de la probeta:  $B, W, a_0$ , funciones  $f_i(a/W)$
- c) Propias del ensayo: carga  $P$ , longitud de fisura  $a$
- d) Propias del estado tensional asociado al fondo de fisura:  
- funciones  $h_i$  para el estado tensional correspondiente.

Este programa permite obtener, a partir de una curva con valores de carga y longitud de fisura conocidos, el desplazamiento de la línea de carga  $\Delta_L$  y la integral  $J$ , ambos descompuestos en su parte elástica y plástica. Para su ejecución es necesario, como paso previo, el cálculo por interpolación de los valores de las funciones  $h$  para dichas longitudes de fisura y el coeficiente de endurecimiento propio del material,  $1/n$ . Este programa ha sido fundamentalmente utilizado en la fase de determinación del estado tensional, deducido a partir de la obtención de las curvas *carga- $\Delta_L$*  para condiciones de tensión y deformación plana y su posterior comparación con las curvas reales, y en la obtención de los valores de la integral  $J$  una vez conocido el estado tensional. Las Figuras ya presentadas 4.7 y 4.8 son ejemplos de los resultados obtenidos por medio de este programa.

### 4.3. Metodología experimental

La caracterización de procesos de fisuración requiere un proceso experimental adecuado previo a la posterior implantación, en base a los resultados obtenidos, de la metodología analítica definida. Este proceso consiste en dos fases:

- a) Ensayo o ensayos de referencia, en idénticas condiciones a las que se programa para la caracterización, con identificación experimental de la evolución de la longitud de fisura para la determinación analítica del estado tensional asociado a la misma.
- b) Ensayos de caracterización, en los que el único registro necesario es la curva  $P-\Delta_L$ , siendo todos los demás parámetros de caracterización del proceso de fisuración determinados analíticamente. Cuanto mayor sea el número de ensayos de caracterización cubiertos por los ensayos de referencia mayores ventajas tendrá la aplicación de esta metodología.

## 5. APLICACION A LOS PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO Y A LOS DE CORROSION BAJO TENSION

Los procesos de fisuración inducida por ambiente, en particular los de FIH y los de CBT, se pueden caracterizar a través de la velocidad de propagación de sus fisuras. Esta se puede determinar en primera aproximación en función de un parámetro propio del proceso experimental correspondiente,  $P$ ,  $\Delta_L$  o  $t$ , de acuerdo con la metodología analítica previamente expuesta. Sin embargo, el carácter no universal de estos parámetros los hace poco útiles en la caracterización genérica de este tipo de procesos. En concreto, parece necesario en esta caracterización la utilización de parámetros que controlen el estado local del frente de fisura, dominando los mecanismos que generan su avance.

El factor de intensidad de tensiones,  $K_I$ , es el más frecuentemente utilizado para definir las curvas de caracterización del comportamiento frente a estos procesos:  $da/dt-K_I$ . Sin embargo, su validez sólo se extiende a las situaciones recogidas por la elasticidad lineal, es decir, con plastificación a pequeña escala comparada con las longitudes de las fisuras. Para condiciones de plastificación más extendida, la integral  $J$  se ha mostrado como un buen parámetro de correlación con la evolución del estado de fisuración [143]. Por tanto, buscando el mayor rango de representatividad a la caracterización de estos procesos, ésta debe basarse en la integral  $J$ . La metodología propuesta permite obtener, en función de este valor, la evolución de la longitud de fisura de una manera continua a lo largo de los

ensayos de caracterización propuestos y, además, diferenciar el valor de la integral  $J$  en sus componentes elástica y plástica. Estas características la hacen especialmente adecuada para su aplicación a estos procesos de fisuración subcrítica.

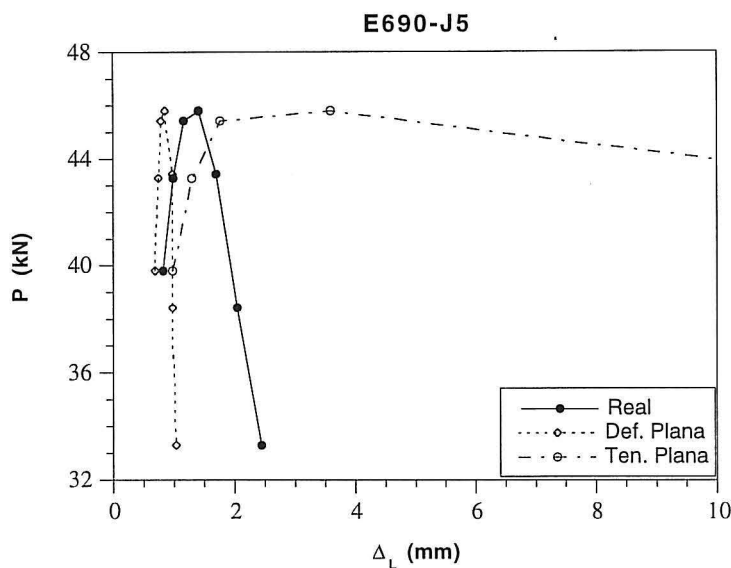
Ya ha sido comentado en el Capítulo 2 que se ha publicado algún intento previo de caracterización de procesos de CBT basándose en la integral  $J$  [143-146] para diversos materiales y condiciones ambientales. Salvo en algún caso [143] en el que se evalúa la variación de la velocidad de propagación en función de la integral  $J$ , la mayor parte de los trabajos se limitan a obtener las curvas de resistencia a la fisuración  $J_R$  para los ambientes estudiados. En estos trabajos se puede observar las dificultades de este tipo de análisis. Una primera limitación se debe a la dificultad en la determinación de la longitud de fisura a lo largo de un proceso de propagación en ambiente agresivo, siendo este valor primordial en la determinación de la integral  $J$ . En segundo lugar, la aplicación de la normativa vigente referente a las curvas de resistencia a la fisuración  $J_R$  choca con las características propias de estos ensayos en procesos de CBT, resultando que la pendiente de las curvas  $J_R$  en estos casos va habitualmente a situarse por debajo de los valores recomendados por las normas [173].

La metodología aquí propuesta no necesita una medición directa de la longitud de fisura, sino que la establece de forma continua analíticamente, y aborda directamente la caracterización de las curvas  $da/dt$ - $J$ , eliminando las anteriores dificultades. Sin embargo, previamente a su aplicación extensiva a la caracterización de los procesos en estudio en esta tesis, este apartado recoge una evaluación inicial de la aptitud de esta metodología a las condiciones ambientales y de material propias de los mismos.

Para ello, se ha aplicado la metodología a dos ensayos patrón sobre el acero E690, en condiciones estudiadas en la caracterización de estos materiales descritas en el Capítulo 3, polarización catódica con dos densidades de corriente, de 1 y 5 mA/cm<sup>2</sup>, y dos velocidades de sollicitación,  $4.1 \cdot 10^{-8}$  y  $4.1 \cdot 10^{-7}$  m/s respectivamente. La primera fase consistió en la determinación del estado tensional real presente en ambos, considerados como ensayos de referencia. Con este objetivo se eligió inicialmente el ensayo realizado en unas condiciones de mayor ductilidad, realizado con una densidad de corriente de 1 mA/cm<sup>2</sup>, y se



determinó, mediante la aplicación de la metodología expuesta, dicho estado tras la medida de la longitud de fisura en sucesivas descargas. La Figura 4.9 muestra comparativamente las curvas  $P-\Delta_L$  previstas en condiciones de deformación plana y tensión plana y la curva correspondiente real de comportamiento en las condiciones de ensayo realizadas. En dicha gráfica se puede apreciar cómo las condiciones reales están mucho más próximas a las previsiones del método en deformación plana que a las de tensión plana.

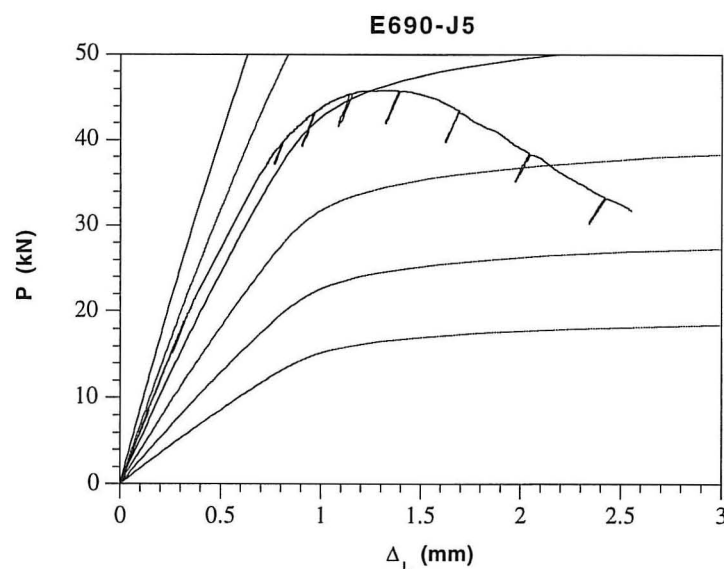


**Figura 4.9.** Representación de las curvas  $P-\Delta_L$  para estados de tensión y deformación planas y comparación con la curva experimental en el acero E690 ensayado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$

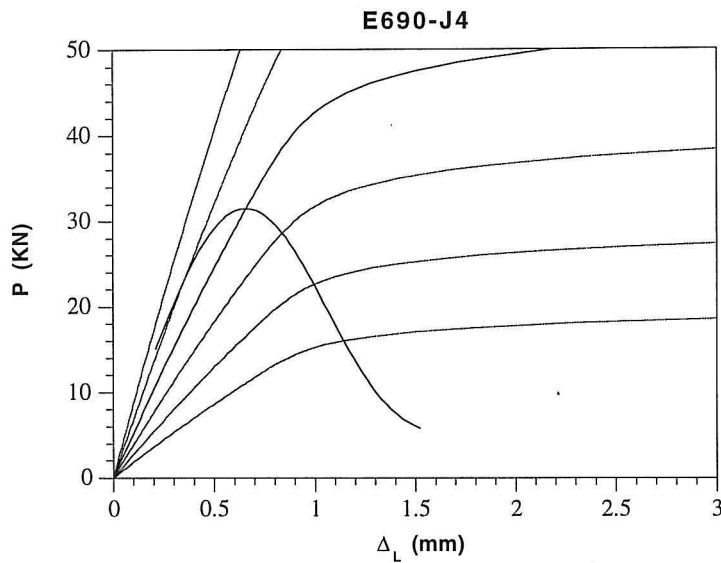
La dificultad de evaluar la longitud de fisura correctamente se puso en evidencia en el otro ensayo de referencia, para una densidad de corriente de  $5 \text{ mA/cm}^2$ , al constatar que en los procesos de descarga la fisura mantiene su crecimiento una vez iniciada la fisuración bajo mecanismos de CBT o FIH. De este modo, cobra vital importancia poder establecer la situación real de deformaciones en este tipo de ensayos. Si bajo la situación menos agresiva del ensayo anterior, es decir  $1 \text{ mA/cm}^2$ , las condiciones ya se aproximan suficientemente a las de deformación plana, este estado será cada vez más próximo al real a medida que

aumenta la agresividad del medio [174], lo que sucede al crecer la densidad de corriente  $y$ , para condiciones constantes de ésta, al decrecer la velocidad de sollicitación.

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran para los dos ensayos patrones las curvas  $P-\Delta_L$  reales y las previstas por el método para diferentes longitudes de fisura bajo condiciones de deformación plana. En la Figura 4.10 se puede observar cómo el ensayo realizado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$  presenta una propagación de fisura que requiere el desarrollo de un estado marcadamente elastoplástico, mientras que el ensayo de la Figura 4.11 realizado con una densidad de  $5 \text{ mA/cm}^2$ , tiene una respuesta asociada a zonas de comportamiento más elástico. El grado de plastificación alcanzado en un instante del proceso de propagación es perceptible conociendo la situación del punto de corte entre la curva real y las curvas teóricas previstas para cada longitud de fisura.



**Figura 4.10.** Curva real  $P-\Delta_L$  del acero E690, ensayado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$ , y curvas previstas para diferentes longitudes de fisura en condiciones de deformación plana

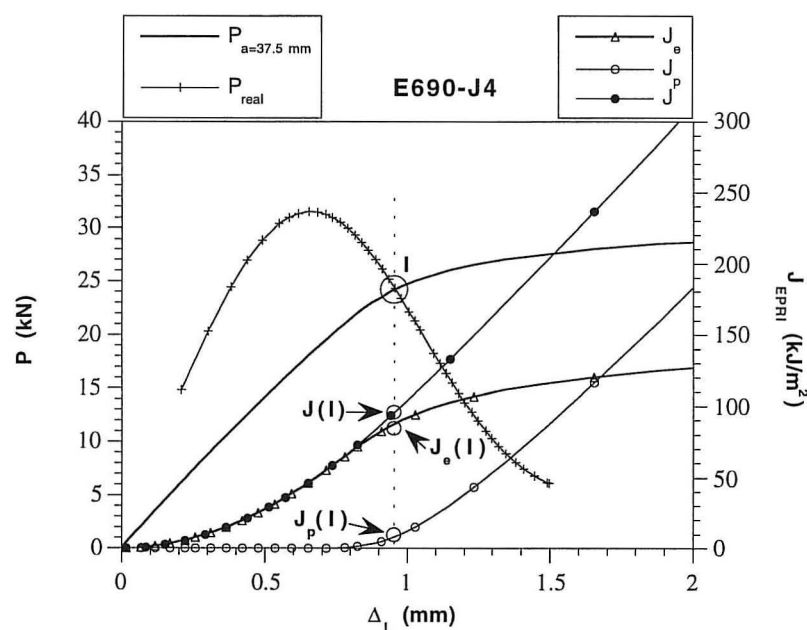


**Figura 4.11.** Curva real  $P-\Delta_L$  del acero E690, ensayado con una densidad de corriente de  $5 \text{ mA/cm}^2$ , y curvas previstas para diferentes longitudes de fisura en condiciones de deformación plana

La elección del estado tensión o deformación plana adecuado permite, mediante la aplicación de los programas descritos, la determinación de la longitud de fisura a partir de la curva carga-desplazamiento del punto de carga real. Igualmente es posible obtener, tal y como se dedujo para los ensayos realizados al aire, la velocidad de propagación de las fisuras.

El método de determinación de la integral  $J$ , definido en la formulación y a través de los programas descritos, evalúa dicho parámetro en cada punto de la curva  $P-\Delta_L$  dependiendo únicamente de la longitud de fisura existente y del estado tensional, es decir, resultando el valor de la integral  $J$  en cada punto independiente de la forma que tiene la curva  $P-\Delta_L$ . Establecida una relación  $P-\Delta_L$  teórica para una longitud de fisura y estado de deformación dados, se puede determinar la evolución con el COD, u otra variable, del valor total de la integral  $J$ , así como del de sus componentes  $J_e$  y  $J_p$ .

En la Figura 4.12 pueden observarse la curva  $P-\Delta_L$  real y la prevista por la formulación seguida para una longitud de fisura de 37.5 mm en el ensayo realizado con 5 mA/cm<sup>2</sup> de densidad de corriente. La evolución de la integral  $J$ , como suma de componentes elástica y plástica, para una longitud de fisura, se deduce de la curva prevista para ella en función del desplazamiento. Estas curvas de evolución  $J-\Delta_L$  aportan los valores propios de la situación de ensayo para la abscisa de corte de las curvas real y prevista para la longitud de fisura en estudio. Todo ello queda recogido gráficamente en la misma Figura 4.12.



**Figura 4.12.** Curva  $P-\Delta_L$  real y teórica prevista para una longitud de 37.5 mm y valores de la integral  $J$  asociados a esta última en el acero E690 ensayado con una densidad de corriente de 5 mA/cm<sup>2</sup>

En la Figura 4.13 pueden observarse las mismas curvas con un análisis similar para el otro ensayo patrón y una longitud de fisura de 36 mm. Comparando esta figura con la anterior, se observa el aumento de la influencia de la componente elástica con la agresividad del medio, lo que acrecienta la validez del análisis en deformación plana para estas condiciones.

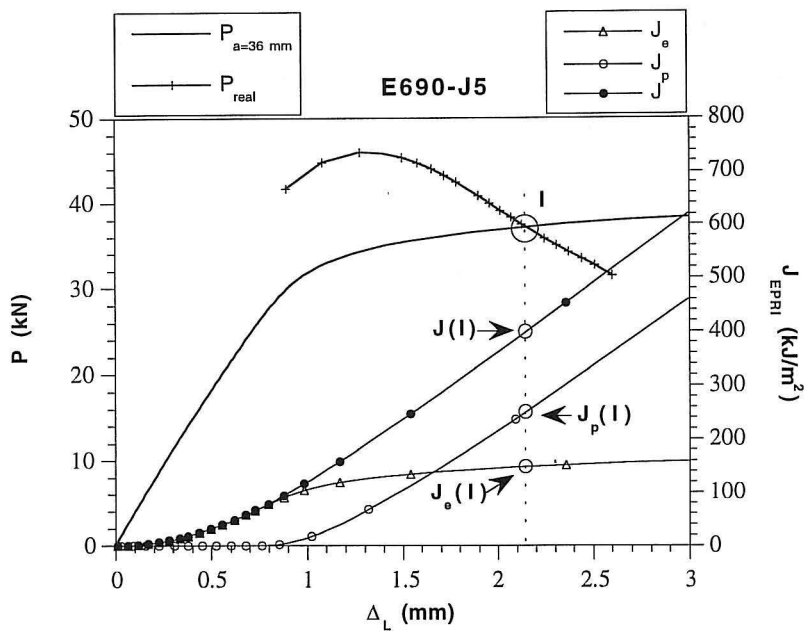


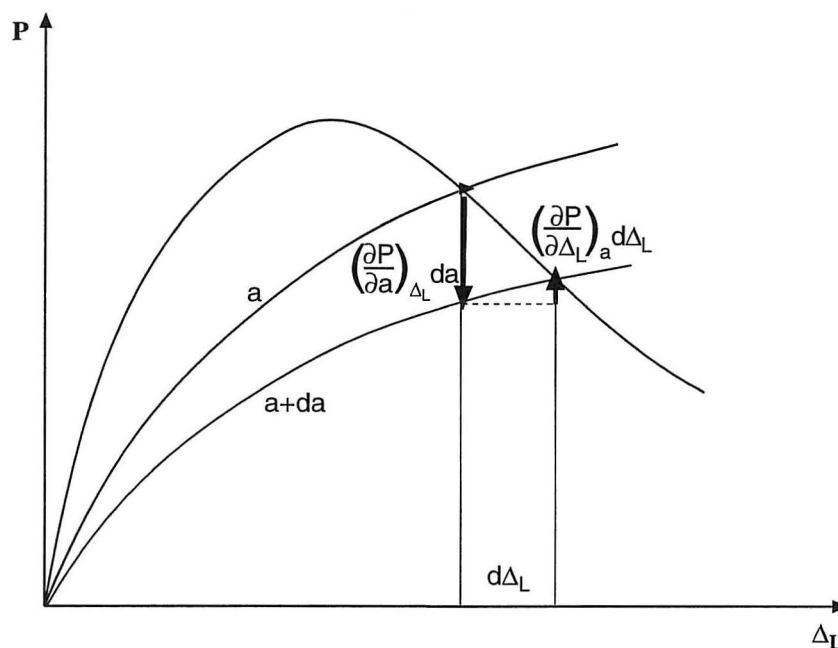
Figura 4.13. Curva  $P-\Delta_L$  real y teórica prevista para una longitud de 36 mm y valores de la integral  $J$  asociados a esta última en el acero E690 ensayado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$

Este método, por tanto, asocia a cada estado local de fondo de fisura, definido por la determinación de sus valores de integral  $J$ , la velocidad de propagación de la misma. Al establecerse además las componentes elástica y plástica ( $J_e$  y  $J_p$ ), se determina la relevancia de la presencia de la plasticidad en el proceso de fisuración, lo que permite discernir los procesos que se producen bajo situaciones definidas en régimen elástico de aquéllos que lo hacen en régimen elastoplástico. Por tanto se pueden acotar los campos dominados por los distintos tipos de micromecanismos presentes en los procesos de fisuración.

La obtención de los valores de la integral  $J$ , en base a sus componentes elástica y plástica, a lo largo de un ensayo, consiste en la repetición del proceso presentado en las Figuras 4.12 ó 4.13 a todos los puntos de la curva real  $P-\Delta_L$ .

En condiciones de propagación, en particular para los procesos en estudio de CBT y FIH, el recorrido de la curva  $P-\Delta_L$  va a estar condicionado por dos aspectos diferentes. Como puede apreciarse en la Figura 4.14, en primer lugar se

producirá una tendencia a incrementar la carga como consecuencia del proceso de sollicitación mecánico creciente,  $\left[ \frac{\partial P}{\partial \Delta_L} \right]_a d\Delta_L$ , dando esto origen a un término,  $\left[ \frac{\partial J}{\partial \Delta_L} \right]_a d\Delta_L$ , positivo con la evolución del ensayo. En segundo lugar, habrá una tendencia a disminuir dicha carga a causa de la propagación de la fisura,  $\left[ \frac{\partial P}{\partial a} \right]_{\Delta_L} da$ , originando un término,  $\left[ \frac{\partial J}{\partial a} \right]_{\Delta_L} da$ , negativo en cada instante del ensayo. El camino final que siga la curva  $P-\Delta_L$  será una combinación de los efectos anteriores, creciente hasta llegar a una situación de máxima carga ( $dP=0$ ), a partir de la cual la probeta comienza una descarga progresiva. Aun así, el valor de la integral  $J$  puede seguir creciendo, aunque también tiende a alcanzar un valor máximo, limitando el rango de validez del ensayo, ya que a partir de ese momento las condiciones locales se mantienen constantes o se reducen, reproduciendo estados previos que deben incidir en igualdad de cinética de fisuración.



**Figura 4.14.** Evolución de los valores de la carga durante el proceso de ensayo y el consecuente crecimiento de la fisura

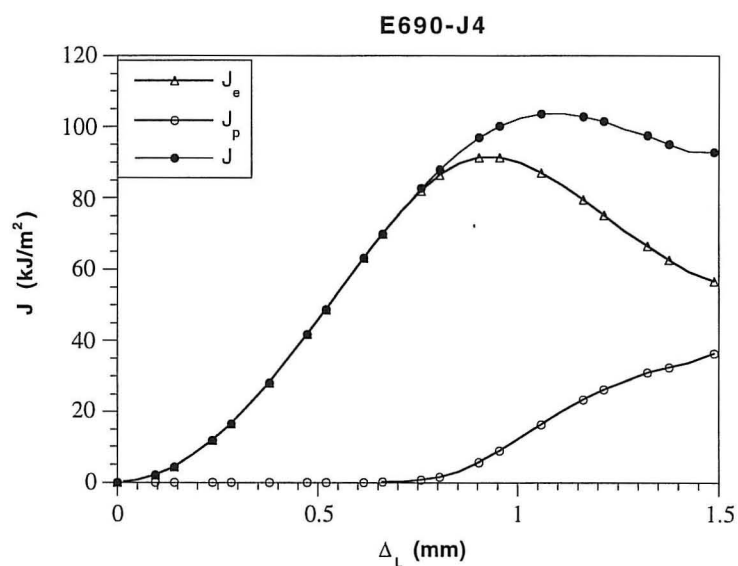
Este análisis sobre el recorrido de la curva  $P-\Delta_L$  justifica cualitativamente la influencia de la velocidad de sollicitación en el comportamiento de un material ante procesos de fisuración debidos a la presencia de ambiente. Esta influencia se basa en que la evolución de la carga,  $dP$ , depende del tiempo a través de la variación del desplazamiento con el tiempo, variable de control, y de la velocidad de propagación, característica del proceso de fisuración del material bajo las condiciones de ensayo.

Si a lo largo del ensayo se observa una variación drástica de la influencia relativa de las componentes elásticas y plásticas de la integral  $J$ , es esperable observar cambios en los micromecanismos de rotura y por tanto en la velocidad de propagación de las fisuras. En el caso concreto de fisuración en ambiente agresivo, CBT o FIH, lo que puede suceder es un tránsito, como en el de la Figura 4.11, de roturas bajo condiciones elástico-lineales a roturas en régimen elastoplástico, ya que la evolución de las condiciones de la probeta no permite que se alcancen las condiciones de rotura previamente a desarrollar una plastificación importante. Si este tránsito se produce para un valor de  $J$  inferior a la  $J_{máx}$  del ensayo, se podrán observar los mecanismos elastoplásticos más propios de rotura del material con poca o ninguna influencia del ambiente. Si no sucede esto todo el desarrollo de la fisuración se producirá bajo mecanismos subcríticos.

Por tanto, una vez desarrollado el método analítico y considerada su idoneidad para su aplicación a procesos de fisuración bajo condiciones de fragilización notables, debe hacerse un análisis similar al representado en la Figura 4.12 y 4.13 para evaluar el peso, en cada punto de la curva real  $P-\Delta_L$ , de las componentes elástica y plástica de la integral  $J$ .

La Figura 4.15 presenta un esquema de la evolución de la integral  $J$  y sus componentes para el material ensayado en las condiciones patrón de mayor agresividad ambiental. En la misma puede verse cómo la componente elástica de la integral  $J$  es predominante, pudiendo tomarse como valor aproximado de la misma en un rango importante del ensayo. Cuando esto sucede, la integral  $J$  puede ser sustituida por el factor de intensidad de tensiones equivalente a su parte elástica definido según la expresión (4.14). Este ensayo es sensible a

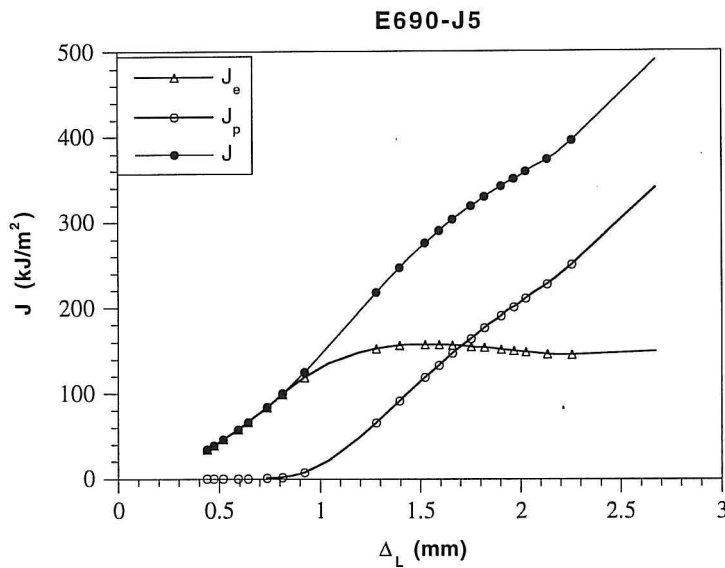
mostrar una evolución en sus mecanismos de propagación puesto que el inicio de la influencia del efecto plástico es previo al máximo valor de  $J$ .



**Figura 4.15.** Determinación de los valores de la integral  $J$  como suma de sus componentes elástica y plástica en el ensayo realizado con una densidad de corriente de  $5 \text{ mA/cm}^2$  en el acero E690

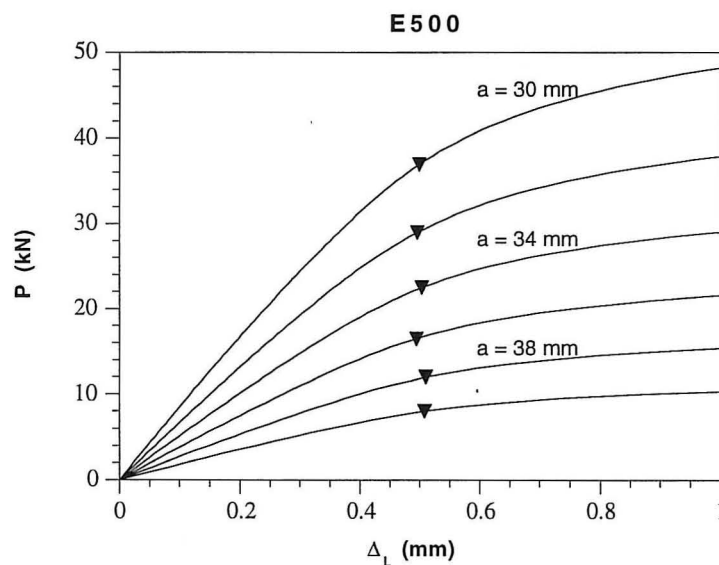
La Figura 4.16 presenta la curva  $J$ - $\Delta_L$ , con sus correspondientes partes elástica y plástica, para el ensayo realizado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$ . En este caso la parte elástica no es claramente predominante, debiendo tenerse en cuenta la componente total de la integral  $J$  en prácticamente todo el rango de caracterización de la fisuración.





**Figura 4.16.** Determinación de los valores de la integral  $J$  como suma de sus componentes elástica y plástica en el ensayo realizado con una densidad de corriente de  $1 \text{ mA/cm}^2$  en el acero E690

Puesto que el cálculo de la integral  $J$  en el ensayo dado se hace a través de la curva  $P-\Delta_L$  teórica para cada longitud de fisura, como se ha descrito en la Figura 4.12, se puede determinar para cada material y condición, tensión o deformación plana, la situación de tránsito, en las condiciones de control de los procesos de fisuración, en régimen elástico a plástico. Elegida esta situación de tránsito cuando la componente plástica de la integral  $J$  supera el 5% del valor total de la misma, se pueden establecer los límites en que los procesos de fisuración están dominados por  $J_e$  o  $K_I$ , pudiendo expresarse mediante relaciones  $da/dt-K_I$ . La Figura 4.17 muestra los rangos de dominio elástico y elastoplástico para el acero E500 junto con los puntos de tránsito en condiciones de deformación plana. En cada uno de estos puntos frontera se deduce el valor de  $J_e$  y  $K_I$  correspondientes que se presentan en la Tabla 4.2 en función de la longitud de fisura.

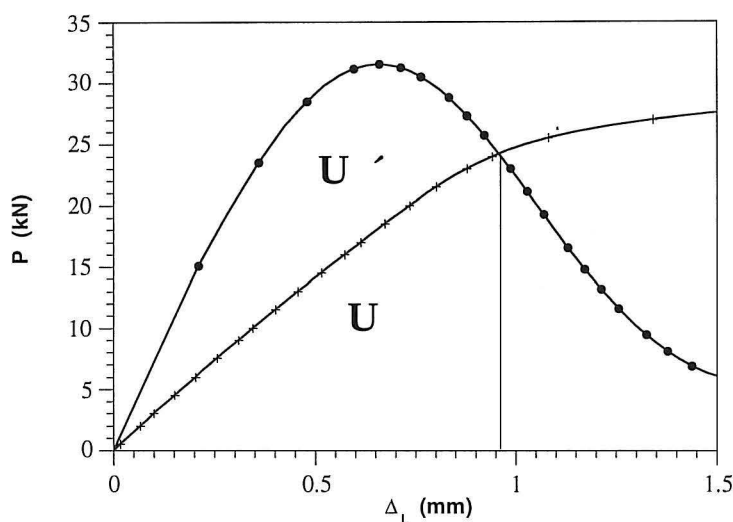


**Figura 4.17.** Determinación, en condiciones de deformación plana, de las áreas de influencia elástica y elastoplástica en el acero E500

**Tabla 4.2.** Determinación, en condiciones de deformación plana, de las áreas de influencia elástica y elastoplástica en los aceros E500 y E690 a través de los valores de  $J$  correspondientes

a(mm)	$J_e$ (kJ/m <sup>2</sup> )	
	E500	E690
30	44	160
32	38	140
34	33	120
36	27	100
38	23	80
40	18	70

Este procedimiento de determinación de la integral  $J$  descrito difiere de los métodos referidos en las normativas en vigor. En estos últimos, el valor calculado de la integral  $J$  es dependiente de la forma que tiene la curva  $P-\Delta_L$ , es decir, con referencia a la Figura 4.18, el valor de la integral  $J$  depende del valor del área total bajo la curva  $U+U'$ .

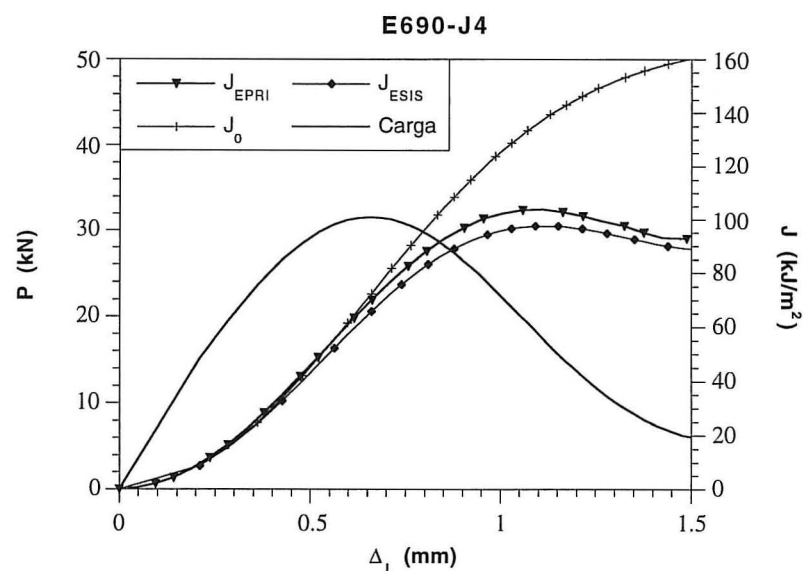


**Figura 4.18.** Descripción de las áreas bajo la curva utilizadas en los cálculos de la integral  $J$ , dependiendo del método

Con el objetivo de llevar a cabo un análisis comparativo, se ha determinado el valor de la integral  $J$  para los ensayos patrones utilizando la normativa existente,  $J_{ESIS}$ , y el método propuesto en este trabajo,  $J_{EPRI}$ . Las Figuras 4.19 y 4.20 muestran las curvas  $J$  obtenidas por ambos procedimientos para ellos, así como el valor de  $J_0$ , correspondiente a la integral  $J$  sin corrección por crecimiento de fisura. En las mismas se puede observar la buena relación existente entre ambos métodos en las zonas de crecimiento pequeño de fisuras y especialmente en el ensayo realizado en condiciones menos agresivas para el que se alcanza una mayor deformación. El máximo del valor de  $J$  también es reproducido por ambos métodos cuando éste se alcanza en el rango del ensayo estudiado, como se aprecia en la Figura 4.19.

A pesar de que ambos métodos basan la determinación de la integral  $J$  en áreas de energía de deformación diferentes,  $U$  frente a  $U+U'$ , la corrección por crecimiento de fisura, utilizada en el método normalizado, conduce a resultados finales semejantes a los del método analítico.

Los resultados semejantes de la comparación previa permite establecer que la utilización del método analítico es idónea para caracterizar procesos de fisuración subcríticos afectados por el ambiente, como las situaciones de CBT o FIH que motivan este trabajo. El método define los parámetros que controlan los valores locales de forma apropiada, distingue entre la componente elástica y elastoplástica de los mismos, lo que permite aportar información sobre posibles cambios en mecanismos de rotura local, y se aplica sin necesidad de provocar interrupciones o discontinuidades en el proceso de sollicitación, como son las descargas que, de darse, podrían afectar a los procesos de fisuración subcrítica que se pretende caracterizar.



**Figura 4.19.** Determinación de los valores de la integral  $J$  por diferentes métodos para la muestra de acero E690 ensayado con una densidad de corriente de  $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$

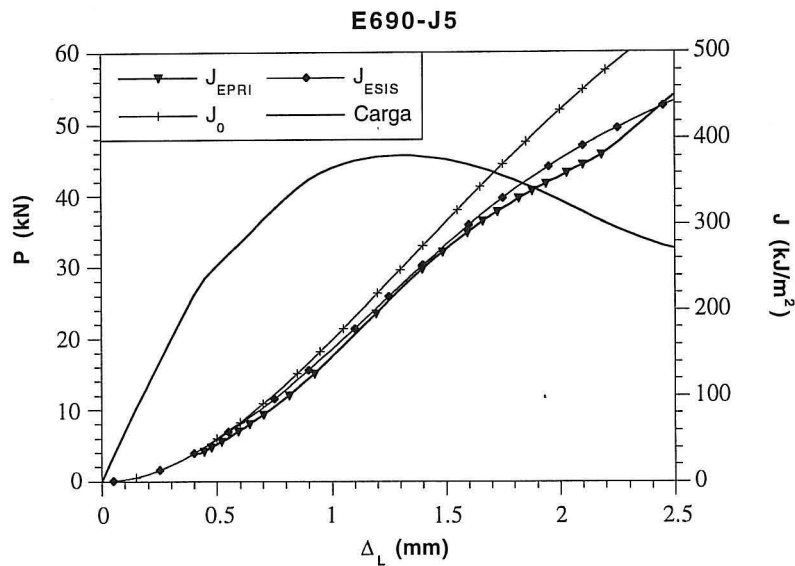


Figura 4.20. Determinación de los valores de la integral  $J$  por diferentes métodos para la muestra de acero E690 ensayado con una densidad de corriente de 1 mA/cm<sup>2</sup>

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

El análisis realizado en este capítulo ha permitido establecer una metodología analítica capaz de implantarse a los resultados experimentales obtenidos sobre probetas de los materiales en estudio representativas de su comportamiento en condiciones de trabajo susceptibles a desarrollar procesos de fisuración subcrítica. De esta forma las metodologías analítica y experimental van a permitir relaciones del tipo  $(da/dt)-J$ , que caractericen el comportamiento del material bajo condiciones ambientales agresivas tipificadas.

La metodología descrita se ha mostrado propicia para ser aplicada a los procesos de fisuración estudiados sobre probetas compactas y, en particular, a aquellos que comportan procesos subcríticos asociados a la presencia de ambientes agresivos, como en el caso de los procesos de corrosión bajo tensión o fisuración inducida por hidrógeno que se abordan en este trabajo.

Se ha definido el proceso experimental necesario para sustentar dicha metodología analítica, que sirva a la caracterización de los materiales en estudio. Proceso que, previo a su desarrollo exhaustivo y experimentalmente simplista, requiere la realización de ensayos de referencia que definan el estado de deformaciones bajo los que trabaja el material en las condiciones en que se estudia.