

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 3

SELECCION Y CARACTERIZACION DE MATERIALES

1. INTRODUCCION

Como se desprende del contenido de los capítulos introductorios, la industria siderúrgica persigue la consecución de aceros fuertemente competitivos para abordar la ejecución de las complejas infraestructuras que las nuevas situaciones tecnológicas exigen. Una de estas situaciones se establece en las estructuras de ámbito marino, como las plataformas *off-shore*, cuyos aceros estructurales deben tener altas prestaciones mecánicas, ser soldables y, simultáneamente con las dos propiedades anteriores, ser resistentes a fenómenos de fisuración bajo carga en ambientes agresivos. Para cubrir estas prestaciones se han desarrollado diferentes tipos de aceros microaleados cuyo precio asegura su competitividad.

Aseguradas sus prestaciones resistentes y su soldabilidad, estos aceros deben poder caracterizarse en relación a su comportamiento frente a la fisuración bajo las situaciones de Corrosión Bajo Tensión o Fisuración Inducida por Hidrógeno, propias del medio en el que van a ser utilizados.

En este capítulo se recoge una selección de aceros representativos para cubrir la funcionalidad descrita, junto con su caracterización mecánica convencional y de resistencia a la fisuración por las técnicas actualmente utilizadas, cualitativas o cuantitativas. Las limitaciones de estos métodos de caracterización conducen al posterior desarrollo de esta tesis.

2. SELECCION DE MATERIALES Y ESTADO DE RECEPCION

La selección de los materiales estudiados en esta tesis se realizó entre aquéllos empleados en los elementos estructurales que se utilizan en la fabricación de plataformas petrolíferas marinas, susceptibles de sufrir fenómenos de CBT o FIH. De entre los diferentes aceros estructurales utilizados en estas estructuras, se considerarán únicamente aquéllos que, por su volumen de fabricación, por la responsabilidad de los elementos estructurales en que se emplean y por su prevista susceptibilidad frente a fenómenos de CBT, son más destacables, decidiéndose finalmente realizar un estudio exhaustivo de dos aceros, ambos pertenecientes a la familia de aceros microaleados soldables, constituyentes de los elementos de soporte de estas plataformas. La Figura 3.1 muestra un esquema de las mismas.

El primero de los aceros elegido, del tipo E690 según la Norma francesa AFNOR, es un acero de alto límite elástico y se emplea en la fabricación de cremalleras autoelevatrices para plataformas petrolíferas. El segundo, del tipo E500 según la misma Norma, es un acero de límite elástico medio y se utiliza para la fabricación de rigidizadores semitubulares soldados a dichas cremalleras, previéndose para él un buen comportamiento frente a fenómenos de CBT debido a su alta ductilidad y tenacidad. La Figura 3.2 muestra una fotografía del proceso de montaje de estas cremalleras con los aceros elegidos.

La situación de trabajo de estos elementos, nivel de cargas y ambiente marino, hace que sus materiales sean susceptibles de presentar fenómenos de CBT o FIH, bajo condiciones ambientales variables. Factores tan diversos como el sistema de protección catódica, la profundidad, las condiciones biológicas del agua marina a su alrededor y las condiciones de aireación, influyen en la agresividad del medio.

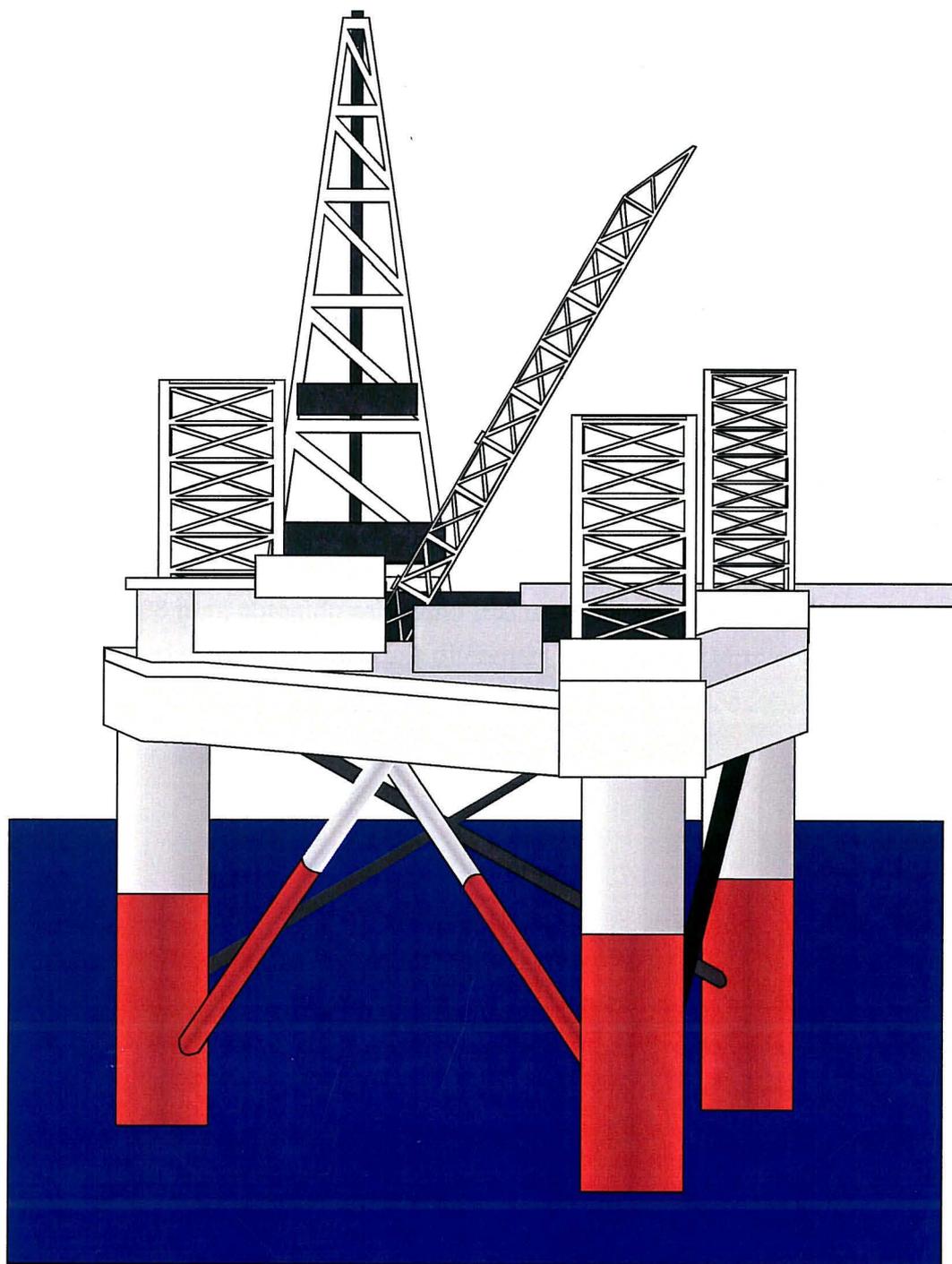


Figura 3.1. Esquema de una plataforma petrolífera marina

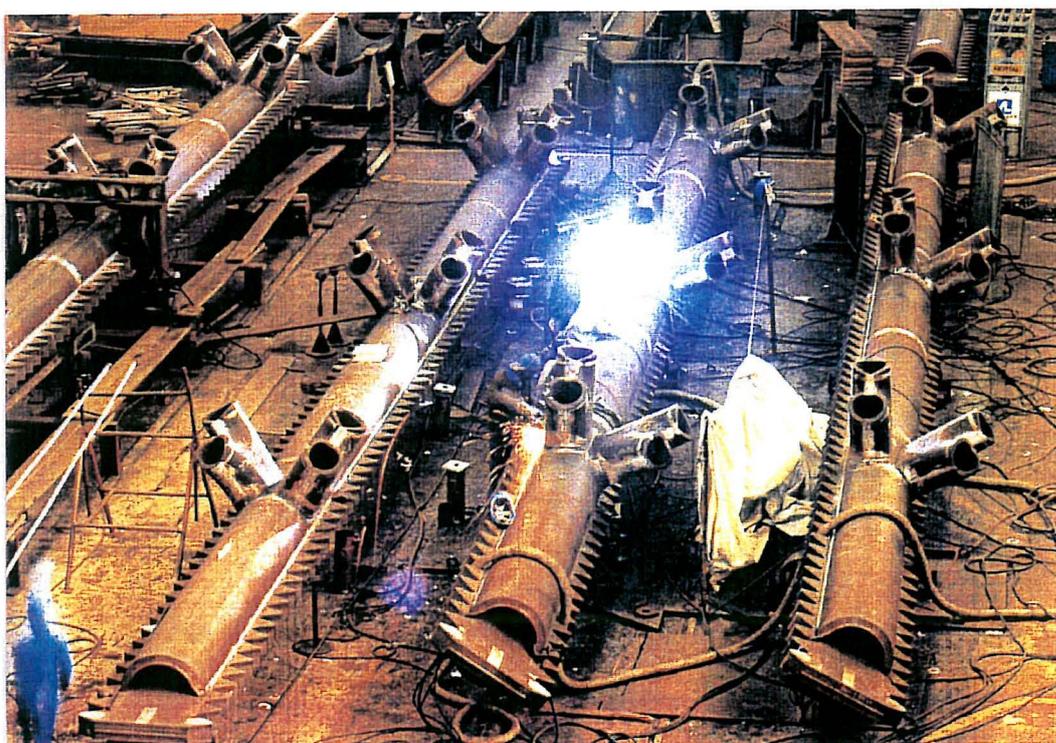


Figura 3.2. Montaje de las cremalleras autoelevatrices en plataformas marinas

Para garantizar al máximo la representatividad de los resultados de este trabajo, los materiales utilizados en la experimentación se obtuvieron en las mismas condiciones de fabricación que en sus aplicaciones industriales. Los dos proceden de coladas industriales fabricadas por Creusot-Loire Industrie. El material se suministró en forma de cupones cortados de los lingotes procedentes de dichas coladas.

El acero tipo E690 se recibió en forma de cupón de dimensiones 1100x400x82.5 mm, procedente de laminación en caliente a partir de espesores mayores. Dicho material ha sido sometido a los siguientes tratamientos térmicos:

- Austenitización a 910°C durante media hora.
- Temple en agua.
- Revenido a 600°C durante 30 minutos y posterior enfriamiento al aire.

El acero tipo E500 también se recibió en forma de cupón de dimensiones 1000x500x38 mm, obtenido asimismo tras un proceso de laminación en caliente. Dicho material ha sido sometido a diferentes tratamientos térmicos:

- Austenitización a 940°C durante media hora.
- Temple en agua.
- Revenido a 650°C durante 2 horas y posterior enfriamiento al aire.

Los análisis químicos de ambos aceros fueron efectuados sobre colada y lingote por la propia compañía suministradora Creuseot-Loire. La Tabla 3.1 recoge la composición química de los dos cupones empleados en la experimentación. Teniendo en cuenta su composición química, los aceros recepcionados se pueden clasificar de acuerdo con la norma francesa NFA 36204 dentro de los tipos E500 y E690, tal y como se ha venido exponiendo.

El acero tipo E690 es del tipo microaleado al aluminio con un contenido apreciable en níquel (1.5 %), mientras que el acero tipo E500, microaleado con vanadio, tiene un contenido inferior en níquel (0.6 %) y otros elementos afines (Cr, Mo).

A partir de los cupones recepcionados se obtuvieron las diferentes probetas y muestras utilizadas en la experimentación posterior mediante corte en frío: probetas de tracción, probetas tipo DCB y compactas CT, y muestras para análisis metalográfico. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran los esquemas del despiece efectuado sobre los cupones. Para evitar la influencia de posibles anisotropías, se decidió realizar la caracterización en la dirección más representativa de trabajo de estos materiales y, en consecuencia, todas las probetas se mecanizaron siguiendo la orientación LT.

Tabla 3.1. *Composición química de los aceros E690 y E500 (% en peso)*

Acero	E500	E690
C	0.063	0.135
Si	0.23	0.241
Mn	1.36	1.1
Ni	0.585	1.518
Cr	0.115	0.496
Mo	0.195	0.465
Cu	0.103	0.18
Sn	0.003	0.009
Al	0.017	0.078
V	0.048	<0.003
Ti	<0.003	0.003
B	0.0004	0.0026

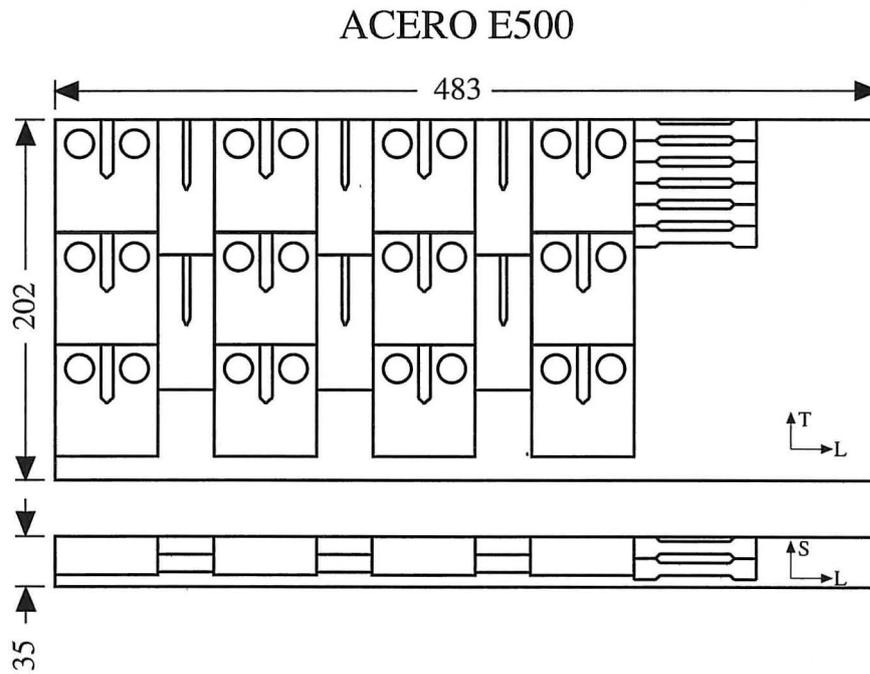


Figura 3.3. Despiece del cupón del acero tipo E500

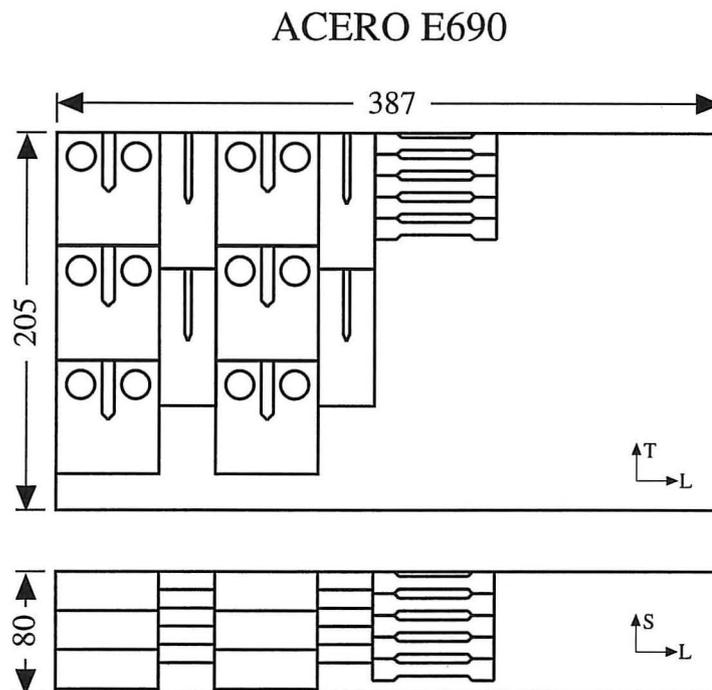


Figura 3.4. Despiece del cupón del acero tipo E690

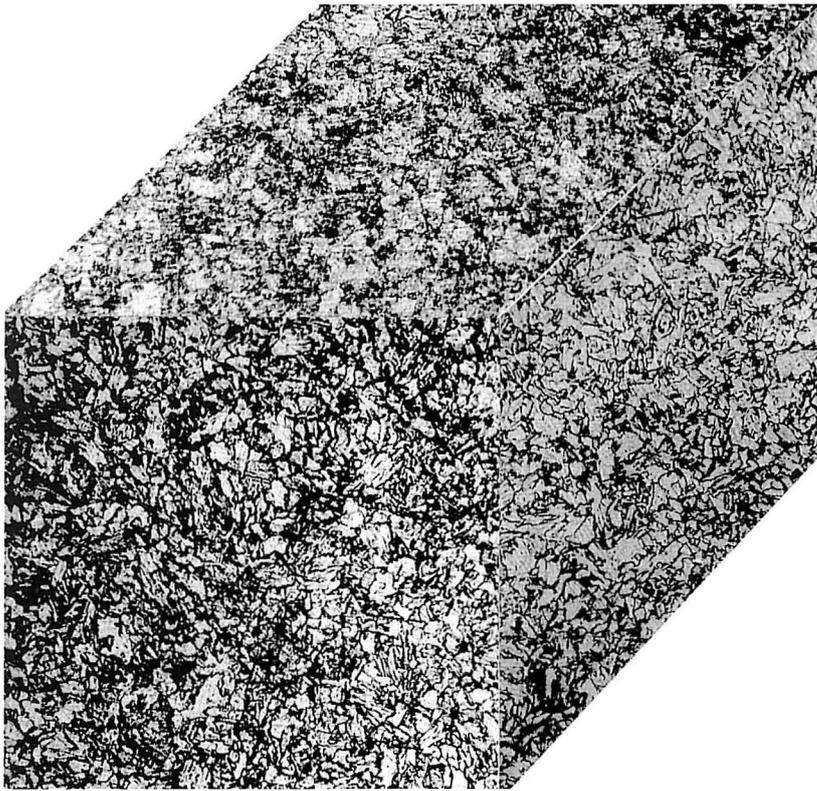
3. CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL

Se realizaron análisis metalográficos por microscopía óptica sobre las muestras metalográficas de los materiales estudiados en un microscopio óptico de reflexión invertido, NIKON, Epiphot B/D, con diferentes posibilidades de magnificación. Una vez desbastadas y pulidas, las muestras fueron sometidas a un ataque electroquímico en una disolución de ácido nítrico en alcohol (NITAL), con una concentración del 3%, para descubrir las diferentes microestructuras presentes. En ninguno de los dos materiales estudiados se apreciaron diferencias sustanciales dependiendo de la orientación. La Lámina 3.1 muestra el aspecto a 200 aumentos de las tres orientaciones para sendos materiales. El acero tipo E500 presenta, tras los tratamientos térmicos a que es sometido, una estructura bainítica revenida con un tamaño de grano de 22 μm . La Lámina 3.2 muestra el aspecto microestructural de dicho acero a diferentes aumentos. El acero tipo E690 tiene asimismo una microestructura de bainita revenida con un tamaño de grano de 44 μm . Las fotografías de la Lámina 3.3 muestran el aspecto microestructural de este acero a diferentes aumentos.

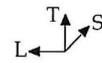
Para obtener una observación más detallada de las microestructuras presentes en cada material, se realizó también un estudio por microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio JEOL, modelo JSM 330A, equipado con un espectrómetro de rayos-X por energía dispersiva LINK, modelo AN10000. Las fotografías presentadas en las Láminas 3.4 y 3.5 muestran, a diferentes aumentos, los aspectos microestructurales que aparecen en los aceros tipo E500 y E690 respectivamente.

4. COMPORTAMIENTO MECANICO

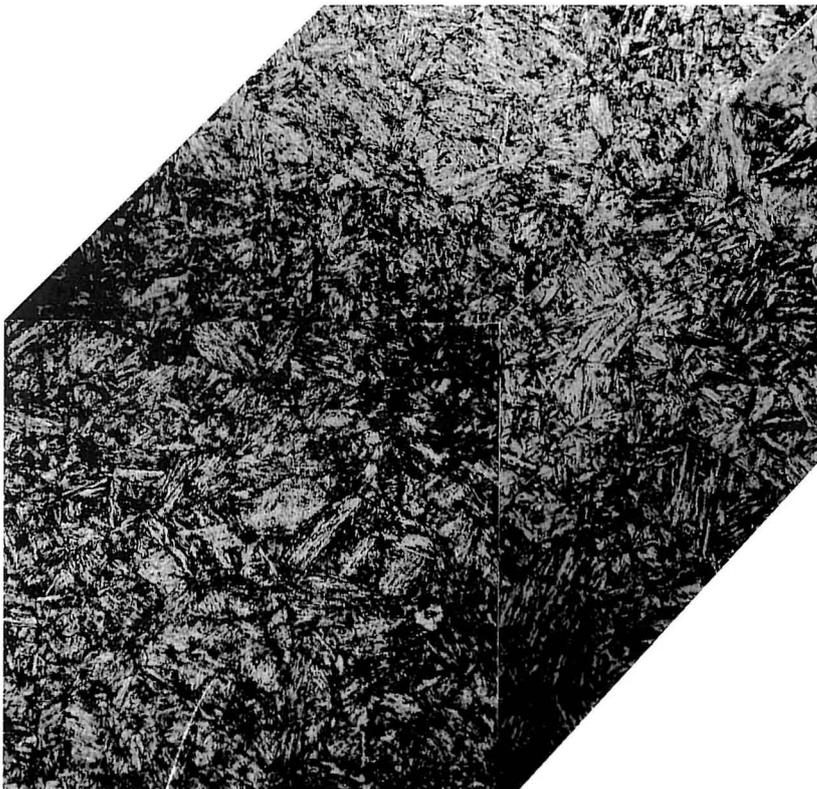
Las propiedades mecánicas del material son una consecuencia de su composición y microestructura. Su determinación es imprescindible para un conocimiento total del comportamiento del mismo. Se realizaron ensayos de dos tipos: ensayos de dureza y ensayos de tracción



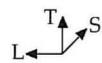
(a)



50 μm



(b)



50 μm



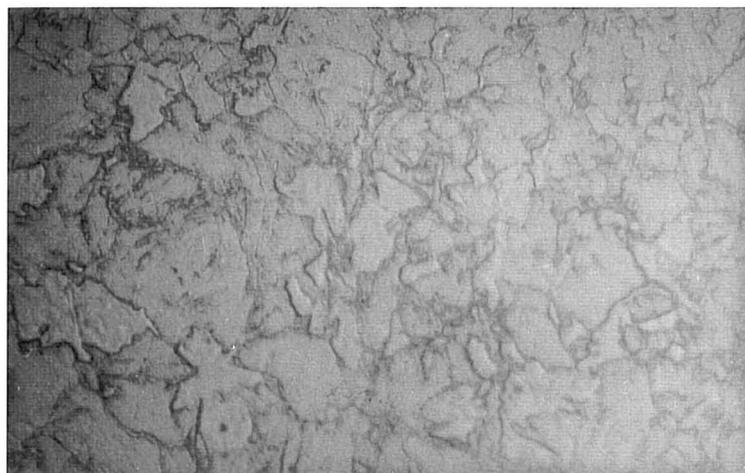
Lámina 3.1. *Composición metalográfica tridimensional de los aceros:*
(a) Acero E500
(b) Acero E690



(a)



25 μm



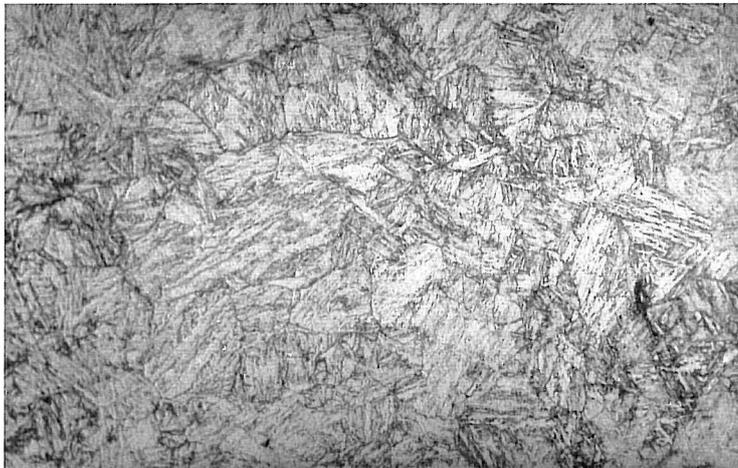
(b)



10 μm



Lámina 3.2. Estudio metalográfico por microscopía óptica del acero E500



(a)



25 μm



(b)



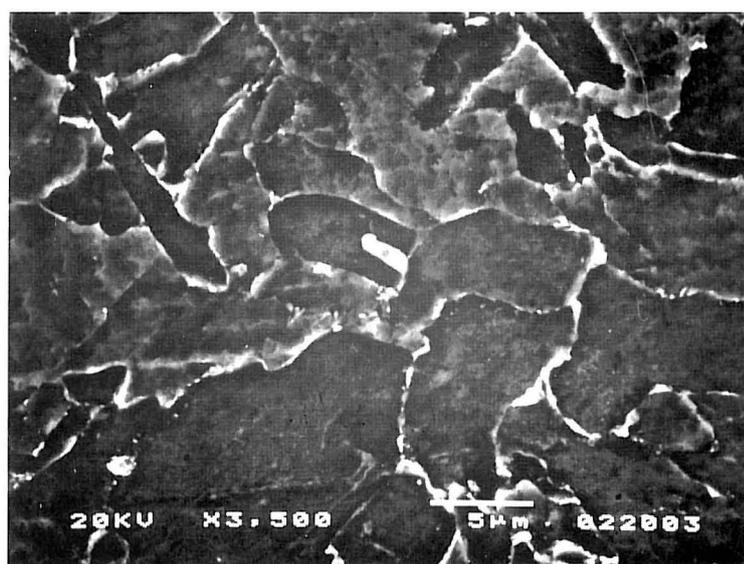
10 μm



Lámina 3.3. Estudio metalográfico por microscopía óptica del acero E690



(a)

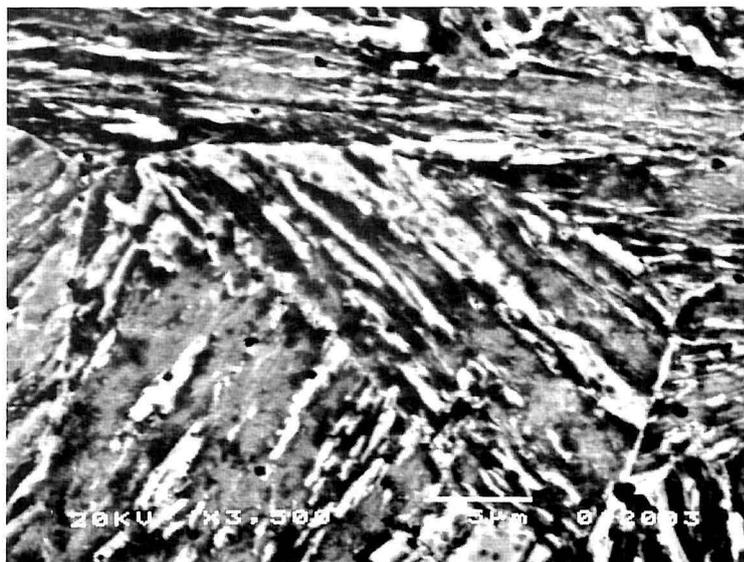


(b)

Lámina 3.4. Estudio metalográfico por microscopía electrónica de barrido (SEM) del acero E500



(a)



(b)

Lámina 3.5. Estudio metalográfico por microscopía electrónica de barrido (SEM) del acero E690

4.1. Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza sobre los diferentes aceros se realizaron sobre cupones con una superficie de 100 mm^2 pulida, aplicando cargas de 50 g durante 20 segundos. Se utilizó para ello un microdurómetro Vickers MATSUZAWA, modelo DMH-1. La Tabla 3.2 recoge los resultados obtenidos para los diferentes aceros.

Tabla 3.2. Resultado de los ensayos de dureza

Acero	Dureza (Vickers)
E500	202
E690	293

4.2. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron sobre probetas normalizadas de geometría cilíndrica de diámetro 10 mm de acuerdo con la Norma UNE 41001: "Ensayo de tracción sobre productos laminados". En la Figura 3.5 se muestra un esquema de dichas probetas.

Las probetas se marcaron y midieron con ayuda de un proyector de perfiles de $1 \mu\text{m}$ de precisión. Posteriormente se ensayaron en una máquina de tracción universal dinámica INSTRON, modelo 8033, con capacidad para 250 kN.

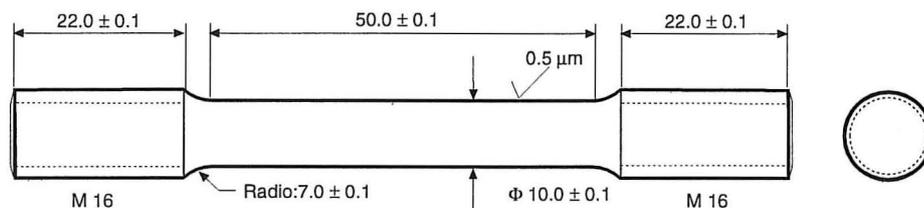


Figura 3.5. Esquema de la probeta de tracción

Los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento constante de 0.02 mm/s, registrándose, además de la carga y el desplazamiento, la deformación de la probeta. Para ello se acopló a la misma un extensómetro de 50 mm de base y capacidad hasta 40% de deformación.

Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente ($20 \pm 2^\circ\text{C}$). En cada uno de los ensayos se obtuvo la curva tensión-deformación $s-e$, de comportamiento del material, a partir de la cual se pueden calcular los parámetros característicos del comportamiento mecánico del mismo:

- Límite elástico, s_y , correspondiente a una deformación permanente del 0.2%.
- Tensión de rotura, s_u .
- Deformación bajo carga máxima, $e_{m\acute{a}x}$.

Además de los tres parámetros mencionados también se ha determinado la reducción de área, RA, como característica de la ductilidad del material, a través de la expresión dada en %:

$$RA = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

donde S_f es la sección final de la probeta después de la rotura y S_0 es la sección inicial, medidas ambas en el proyector de perfiles.

La Figura 3.6 muestra los resultados correspondientes a sendas probetas de los aceros E500 y E690 representativas de su comportamiento en tracción.

Las curvas obtenidas en variables ingenieriles en cada ensayo son fácilmente transformables a variables verdaderas a través de las simples y conocidas relaciones:

$$\sigma = s(1 + e) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.3)$$

siendo σ y ε tensión y deformación verdaderas y s y e tensión y deformación ingenieriles.

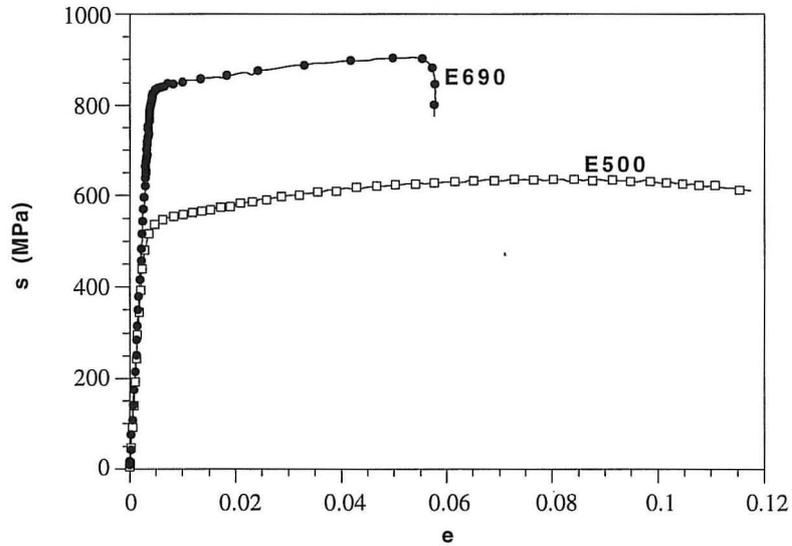


Figura 3.6. Curvas tensión-deformación de los aceros E500 y E690

Para cada uno de los ensayos se realizó un ajuste del comportamiento en el campo plástico de acuerdo a la Ley de Ramberg-Osgood del tipo:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.4)$$

siendo

$$\sigma_0 = \sigma_y \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_0 = \sigma_0 / E = \sigma_y / E \quad (3.6)$$

y por tanto la deformación plástica:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e = \alpha \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.7)$$

Con los datos de deformación plástica obtenidos en los ensayos se realizó el ajuste siguiendo la expresión (3.7), siendo α y n los únicos parámetros a determinar. En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran los ajustes realizados para una de las probetas de tracción ensayadas de cada material.

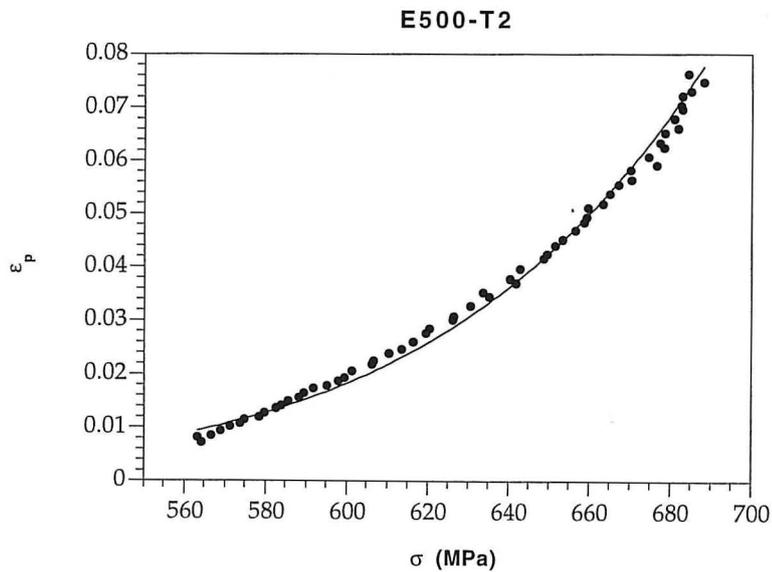


Figura 3.7. Determinación de los parámetros de Ramberg-Osgood en el acero tipo E500

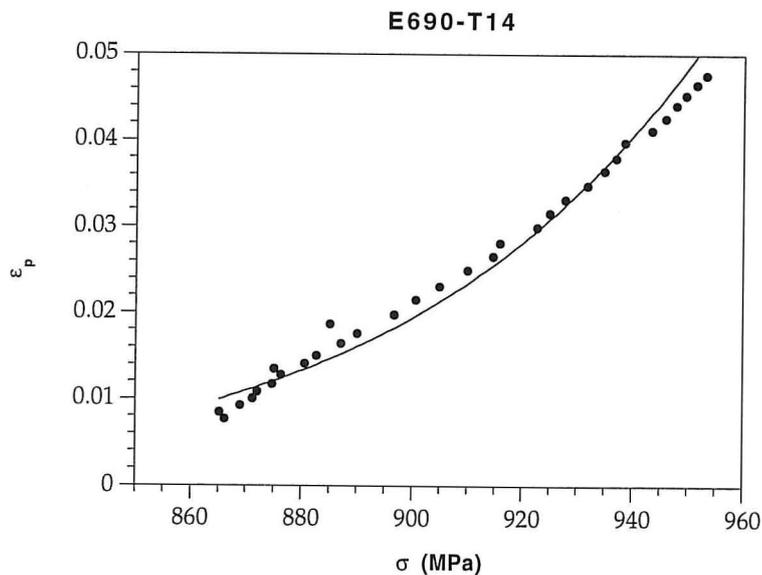


Figura 3.8. Determinación de los parámetros de Ramberg-Osgood en el acero tipo E690

El proceso mostrado en las Figuras 3.7 y 3.8 se ha repetido para cada uno de los ensayos de tracción, obteniéndose finalmente unos valores de α y n medios. La Tabla 3.3 presenta los resultados obtenidos en la caracterización a tracción de los materiales ensayados.

Finalmente se realizó un estudio fractográfico sobre la superficie de rotura de las probetas ensayadas a tracción. La Lámina 3.6 muestra en las micrografías *a* y *b* el aspecto que, a diferentes aumentos, presenta la probeta correspondiente al acero tipo E500, con una rotura mayoritariamente por presencia de microhuecos, apreciándose una gran deformación. El acero tipo E690 presenta una menor ductilidad concordante con el menor valor de la reducción de área y la mayor dureza. La Lámina 3.6 presenta en las micrografías *c* y *d* el aspecto de la superficie de rotura de una probeta de tracción de este acero a diferentes aumentos, observándose también la presencia masiva de microhuecos.

Tabla 3.3. *Parámetros característicos de tracción de los distintos materiales*

ACERO	E500	E690
s_y(MPa)	530	840
s_u(MPa)	640	915
$e_{m\acute{a}x}$ (%)	9	6.5
RA(%)	81	68
α	2.55	1.56
n	9.86	17

5. CARACTERIZACION DE LA TENACIDAD A FRACTURA

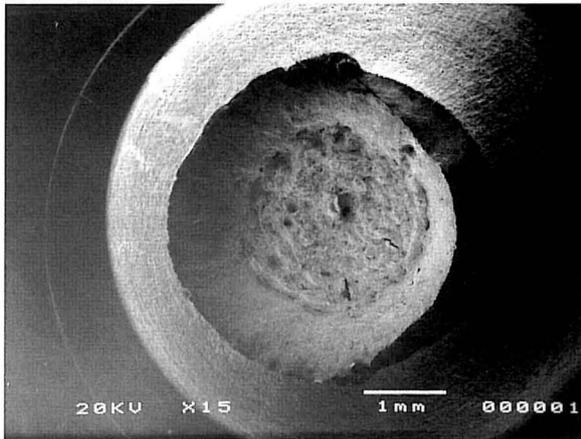
La determinación de la tenacidad a fractura es un aspecto fundamental en el marco de la caracterización del comportamiento mecánico de un material, ya que se trata de una propiedad intrínseca que define el estado de sollicitación local límite que es capaz de soportar antes de romperse, independientemente de la configuración estructural en que se encuentre. La resistencia a la fractura se define como la fuerza motriz de fisuración necesaria para producir la propagación de las grietas o defectos existentes, y se representa en función del crecimiento de la grieta por medio de las denominadas curvas de resistencia a la fractura o curvas R .

Cuando el parámetro utilizado como fuerza motriz es la integral J estas curvas se denominan curvas J_R . La integral J es una integral de contorno, que en el caso de elementos fisurados define la intensidad de la singularidad de los campos de tensiones y deformaciones en torno al fondo de fisura en régimen elastoplástico. Este parámetro es por tanto el adecuado para materiales que presentan un comportamiento plástico importante previo a la rotura. Asimismo, esta integral J tiene asociado un significado energético ya que en régimen elástico su valor coincide con la energía por unidad de área necesaria para romper el material.

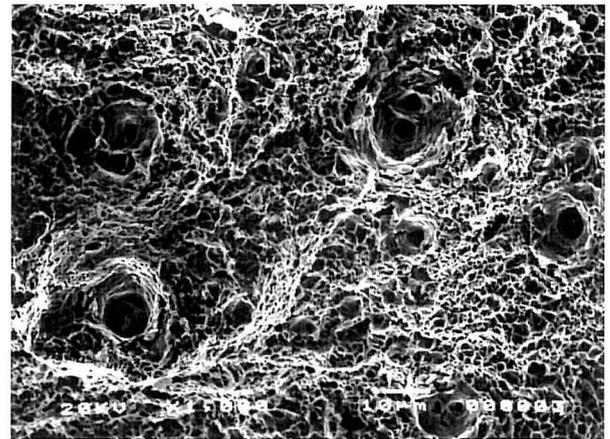
La gran tenacidad prevista de los aceros en estudio, apreciada de los resultados de los ensayos mecánicos, hace que se haya elegido para caracterizarlos la curva R de la integral J . El método utilizado ha sido el propuesto por el Grupo Europeo de Fractura ESIS P1-92 [151] en su versión de probeta única.

El primer paso para la realización de los ensayos fue el mecanizado de las probetas a partir de las piezas de material disponible. Las probetas utilizadas han sido del tipo compacto con entalla escalonada, cuya definición se representa en la Figura 3.9. Como en ella se aprecia, todas las dimensiones de las probetas fueron ajustadas a las normalizadas para un valor de $W = 50$ mm.

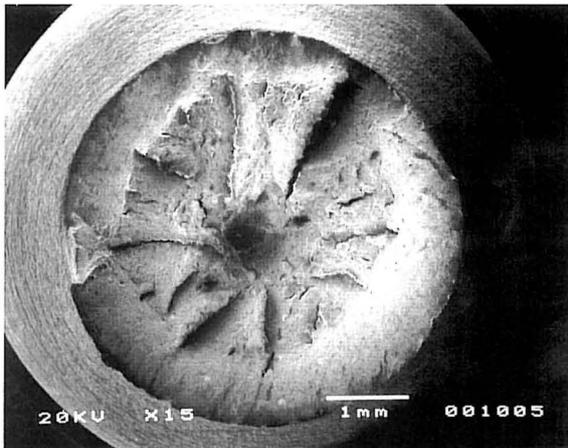
Una vez mecanizadas las probetas se realizó sobre ellas una entalla de 0.2 mm de radio en su fondo por electroerosión con hilo que facilitó la fisuración por fatiga. La prefisuración por fatiga de las probetas se realizó según establece la



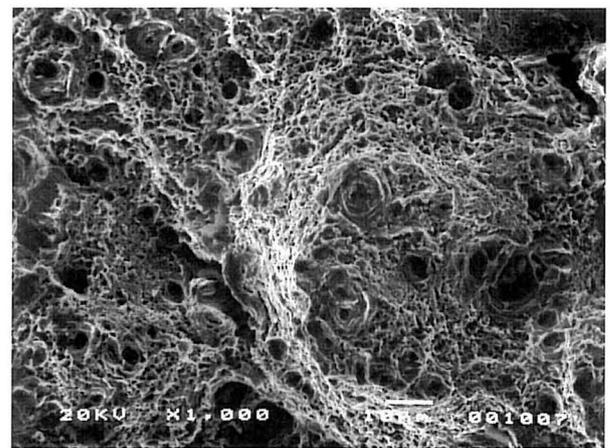
(a)



(b)



(c)



(d)

Lámina 3.6. Estudio fractográfico de los ensayos de tracción:

- (a) Aspecto general de la superficie de fractura del acero E500. Rotura dúctil por formación de microhuecos
- (b) Detalle de microhuecos de la micrografía anterior
- (c) Aspecto general de la superficie de fractura del acero E690. Rotura dúctil por formación de microhuecos
- (d) Detalle de microhuecos de la micrografía anterior

normativa, con objeto de crear un fondo de grieta cuyo radio de curvatura sea lo más pequeño posible, representativo de la situación de componentes reales. La prefisuración se realizó hasta llevar la longitud de fisura inicial a un valor en torno a 30 mm, que para la geometría usada representa una relación a_0/W de 0.6.

Una vez realizada la prefisuración por fatiga, y en un intento de limitar el crecimiento de la fisura a un solo plano normal a la dirección de aplicación de la fuerza, se realizaron ranuras laterales en ambos lados de la superficie de la probeta. Estas ranuras pueden tener una profundidad, referida al espesor B de la probeta, entre $0.1B$ y $0.25B$ y un ángulo entre 30 y 90° dependiendo de las características de ductilidad del material ensayado. Para este trabajo se seleccionaron un valor medio de profundidad $0.2B$ y el mayor ángulo posible 90° .

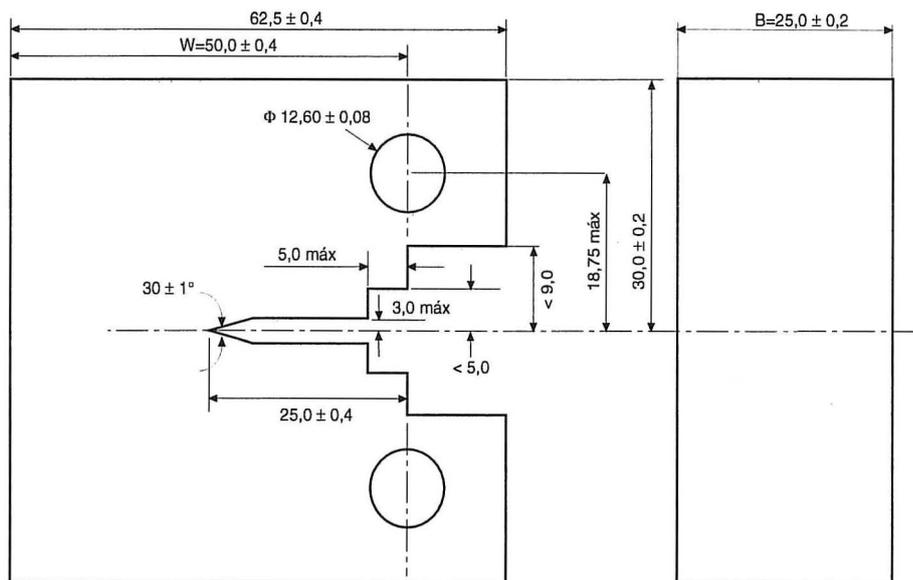


Figura 3.9. Geometría de las probetas compactas utilizadas en la experimentación

Tanto la prefisuración por fatiga como el ensayo propiamente dicho se llevaron a cabo en una máquina servohidráulica INSTRON, modelo 8501, controlada por un ordenador a través del programa Flaps Plus. El ensayo consiste en cargar la probeta de forma monótona en control de desplazamiento para evitar la rotura inestable.

El método de ensayo seguido, el de probeta única, se basa en descargas elásticas para la determinación de la longitud de fisura a través de la flexibilidad de la probeta por lo que tiene unas exigencias particulares de ensayo con relación a otros métodos. Así, en la zona elástica lineal de la rampa inicial de carga han de realizarse al menos tres descargas, a través de cuya pendiente se determina la longitud inicial de la fisura. De igual forma, durante la carga, periódicamente deben realizarse pequeñas descargas de rango elástico lineal, a través de cuya pendiente se estima la longitud de fisura en todo momento. Este proceso continúa hasta que la grieta alcanza una longitud prefijada.

Una vez finalizado el ensayo se marcó la extensión de la grieta alcanzada prolongándola por fatiga, con los parámetros previstos en la norma, tras un tintado térmico por calentamiento en horno a 150°C. Finalmente se procedió a la partición de la probeta en dos. Una vez rota la probeta, y con su superficie diferenciada, es posible medir las longitudes inicial, propia de la fatiga y final. La diferencia de ambas es el desgarro producido durante el ensayo.

Los parámetros a adquirir para poder realizar el análisis del ensayo, basándose en la integral J y para la geometría CT adoptada, son la carga aplicada, P , y el desplazamiento del punto de carga, Δ . A través de ellos se puede determinar la energía absorbida, U , en cada instante del ensayo y correlacionarlo con el avance de la fisura determinado a través de la flexibilidad, C , en las descargas. La Figura 3.10 resume la adquisición de estos parámetros en cada punto de descarga.

Una vez realizada la fase experimental sobre cada probeta, la obtención de la correspondiente curva J_R , relación J - Δa , requiere una metodología de cálculo que sigue la formulación de la norma ESIS P1-92, en la que los valores de la integral J se obtienen como función de U , a y de valores característicos del tipo de probeta ensayada.

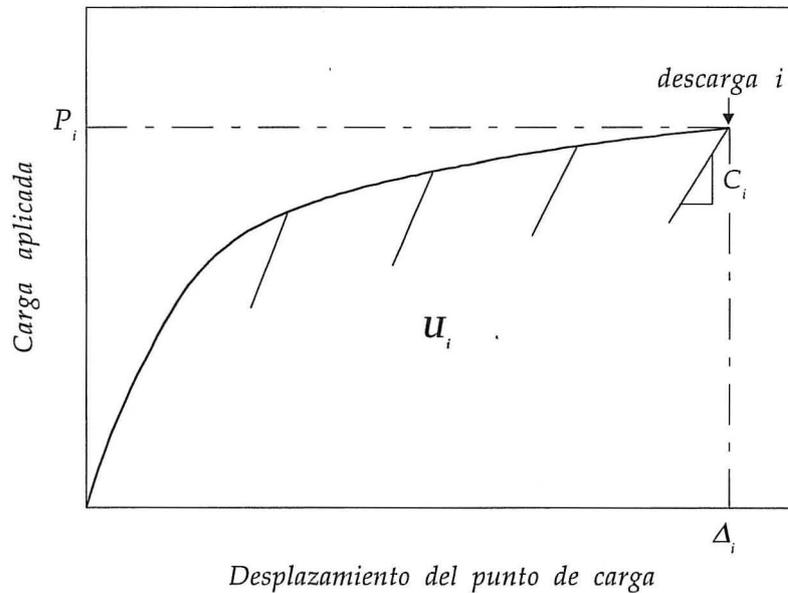


Figura 3.10. Parámetros obtenibles para cada punto de descarga

La curva J_R responde a las dos etapas claramente diferenciadas que tienen lugar durante el ensayo. En la primera de ellas se produce el denominado enromamiento del fondo de fisura, en la que el radio en el fondo de la grieta crece paulatinamente pero sin desgarrar el material debido a la deformación plástica local del material que allí se produce. La segunda etapa comienza cuando el material no puede soportar más deformación sin desgarrarse, teniendo lugar la propagación estable de la fisura. Estas dos diferentes etapas han de quedar reflejadas en la curva J_R tal como se muestra en la Figura 3.11, como zona de enromamiento y zona de propagación.

La primera zona se caracteriza por la línea de enromamiento o "blunting line", recta que pasa por el origen y que describe el comportamiento de la fisura inicial bajo cargas monótonas crecientes previo a su crecimiento estable, y tiene como expresión

$$\Delta a_B = 0.4 \cdot d_n^* \frac{J}{E} \quad (3.8)$$

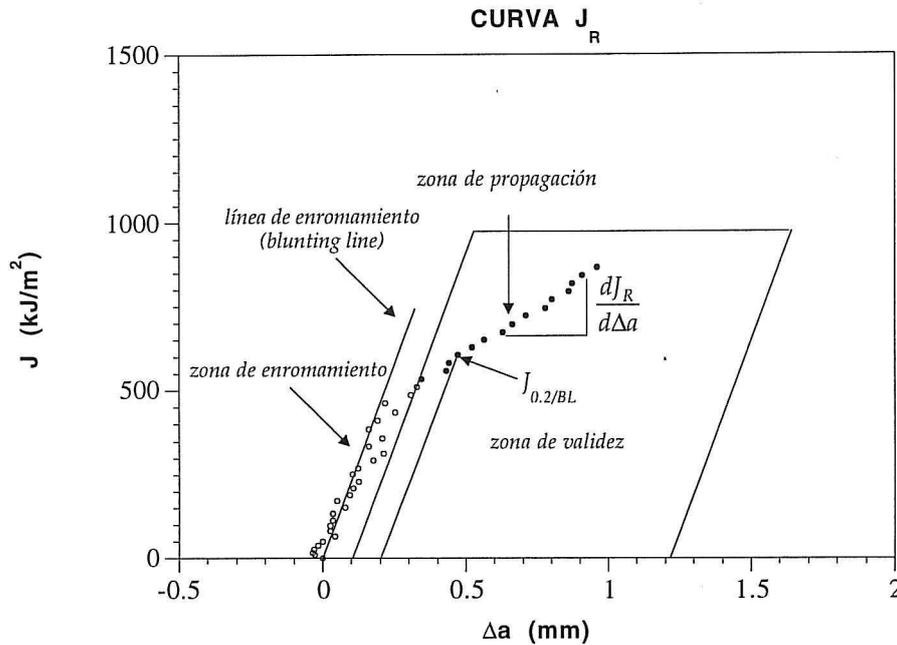


Figura 3.11. Zona de enromamiento y de propagación en una curva J_R

donde la constante de proporcionalidad d_n^* es una función de $1/n$, siendo n el exponente de endurecimiento por deformación, y de la deformación de referencia equivalente, σ_0/E . Normalmente como valor de σ_0 suele tomarse el límite elástico del material. En el Apéndice 5 de la norma ESIS P1-92 se recoge un método para determinar d_n^* suponiendo que prevalecen condiciones de deformación plana.

La segunda zona, zona de propagación de la fisura, queda definida por el parámetro asociado a la iniciación J_{Ic} , que define aquel valor de la fuerza motriz de fisuración bajo el cual se inicia el crecimiento de la grieta, y el valor de la pendiente de la curva en cada punto, como índice del aporte energético necesario para mantener la propagación. En cuanto al parámetro J_{Ic} puesto que su definición teórica es compleja y difícil de evaluar, es norma común darle una definición ingenieril que sea clara, suficientemente precisa y válida a nivel comparativo. Uno de los posibles valores previstos por la norma como J_{Ic} es el parámetro $J_{0.2/BL}$ que se define como la resistencia a la fractura tras 0.2 mm de desgarro estable de la fisura, sin incluir enromamiento.

Para dar una expresión matemática a la curva J_R obtenida, la citada norma ESIS P1-92 propone el modelo, de expresión potencial:

$$J = A \cdot (\Delta a + C^*)^D \quad (3.9)$$

donde A , C^* y D son constantes con $C^* \geq 0$.

El ajuste se realiza para aquellos puntos J - Δa obtenidos para cada descarga que quedan incluidos en una determinada zona de validez, que puede observarse en la Figura 3.11, definida según norma por unos valores de Δa máximo y mínimo, y un valor máximo de J . Los valores máximos acotan la zona de procesos controlados por la integral J en situación de deformación plana. Las curvas obtenidas en este área son, por lo tanto, una propiedad del material. El valor mínimo de Δa elimina los puntos afectados por el proceso de enromamiento.

Apoyándose en la metodología presentada se realizaron ensayos para la determinación de la curva J_R en ambos materiales ensayados al aire. Con el fin de determinar la influencia de la velocidad de sollicitación sobre el comportamiento frente a fractura, se realizaron ensayos a dos velocidades, $4.1 \cdot 10^{-6}$ y $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s, sobre cada material. En las Figuras 3.12 y 3.13 puede observarse las curvas J_R obtenidas para los aceros E500 y E690 a dichas velocidades. La Figura 3.14 muestra comparativamente las curvas obtenidas para los dos materiales a la velocidad más lenta. Estos resultados revelan una alta tenacidad en los dos aceros independientemente de la velocidad de sollicitación, especialmente en el acero de medio límite elástico, E500, que supera ampliamente los límites de validez propuestos por la normativa en vigor. La diferencia de comportamiento a ambas velocidades no es importante, quedando en el rango de dispersión característico de este tipo de ensayos.

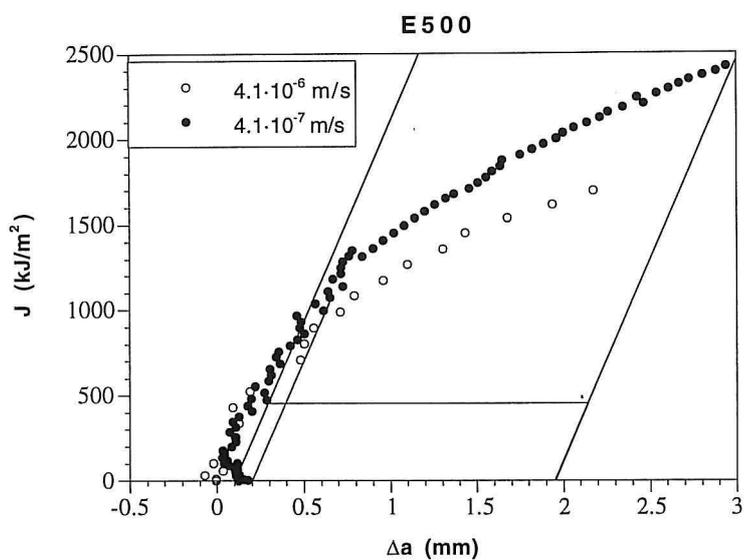


Figura 3.12. Curvas J_R del acero E500 ensayado al aire a velocidades de $4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s y $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s

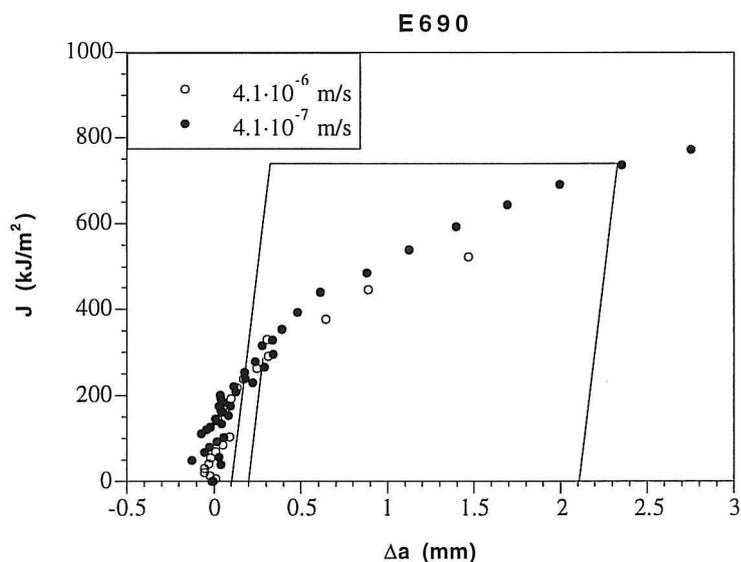


Figura 3.13. Curvas J_R del acero E690 ensayado al aire a velocidades de $4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s y $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s

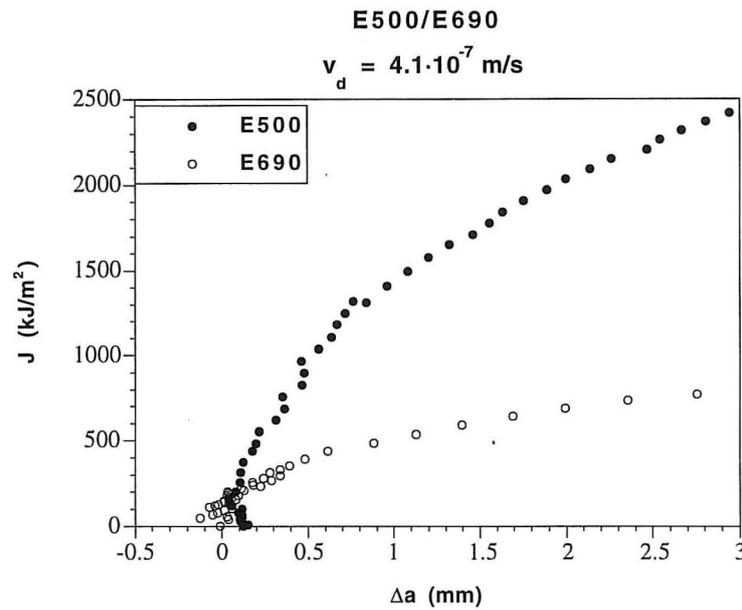


Figura 3.14. Curva J_R de los aceros E500 y E690 ensayados al aire a una velocidad de $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s

La Tabla 3.4 muestra los parámetros de ajuste A y D , junto con el parámetro de iniciación $J_{0.2/BL}$, para cada uno de los materiales estudiados.

Tabla 3.4. Parámetros característicos de la curva J_R

Acero	v_d (m/s)	$J_{0.2/BL}$ (kJ/m ²)	A	D
E500	$4.1 \cdot 10^{-6}$	960	1176.5	0.517
E500	$4.1 \cdot 10^{-7}$	1120	1409.5	0.523
E690	$4.1 \cdot 10^{-6}$	290	458.0	0.363
E690	$4.1 \cdot 10^{-7}$	310	513.4	0.445

Sobre las probetas ensayadas se realizó un análisis fractográfico que demostró en todos los casos una rotura dúctil con presencia masiva de microhuecos. Las Láminas 3.7 y 3.8 muestran el aspecto a diferentes aumentos de las probetas correspondientes a los aceros E500 y E690 respectivamente.