

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

4. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACEROS MICROALEADOS ANTE PROCESOS DE FIH

Como muestran los resultados de las Tablas 5.2 y 5.3, los procesos de fisuración inducidos por hidrógeno en aceros microaleados dependen fundamentalmente de dos variables: la concentración de hidrógeno en el medio, evaluado a través de la densidad de corriente aplicada, y la velocidad de sollicitación durante el ensayo. El análisis de los resultados obtenidos pretende determinar el efecto de cada una de estas variables sobre las condiciones de propagación y rotura en procesos de fisuración asistida por hidrógeno de los aceros en estudio, con el objetivo fundamental de establecer un modelo mecánico que defina su comportamiento. Este análisis se acompaña con un detallado estudio de los micromecanismos desarrollados en los diferentes procesos de fisuración obtenidos en los ensayos, observados en el estudio fractográfico, a fin de establecer posibles conexiones entre los mecanismos de rotura y los parámetros macroscópicos que definen el comportamiento global del material.

En primer lugar se analiza el efecto de la agresividad del medio mediante el estudio comparativo de los ensayos realizados en cada acero a una misma

velocidad de sollicitación. Posteriormente se hace el análisis cruzado del efecto de la velocidad de sollicitación sobre el comportamiento en cada condición ambiental ensayada.

Los ensayos realizados al aire para la determinación de la curva J_R como medida de tenacidad de estos aceros, presentados en el Capítulo 3 y analizados con la metodología aquí propuesta en el Capítulo 4, sirven como extremos de referencia para el análisis a realizar en este apartado ya que aportan el comportamiento de la fisuración de los aceros ensayados en ambiente inerte. Asimismo los ensayos de resistencia a la FIH realizados sobre probetas tipo DCB, a partir de los cuales se obtienen las curvas de velocidad de propagación $da/dt-K_I$ presentadas en el Capítulo 3, marcan una referencia de comportamiento a la que debe acercarse el aquí obtenido cuando el proceso que caracteriza no esté dominado por mecanismos de rotura que establecen una gran plastificación, es decir, cuando el proceso de propagación esté controlado por parámetros elásticos.

4.1. Efecto de la agresividad

4.1.1. Acero E690

Para analizar la influencia de la concentración de hidrógeno sobre dicho comportamiento se comparan las curvas carga-desplazamiento y $da/dt-K_I$ obtenidas sobre el acero E690 para una misma velocidad de desplazamiento al variar el grado de agresividad del medio, medido a través de la densidad de corriente aplicada.

4.1.1.1. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s

A esta velocidad de sollicitación se realizaron ensayos sobre probetas en el aire y en ambiente agresivo con densidades de 5 y 10 mA/cm². Las curvas carga-desplazamiento (COD) obtenidas en dichos ensayos muestran la gran influencia del contenido en hidrógeno en los procesos de fisuración, como se aprecia en su representación conjunta en la Figura 5.15.

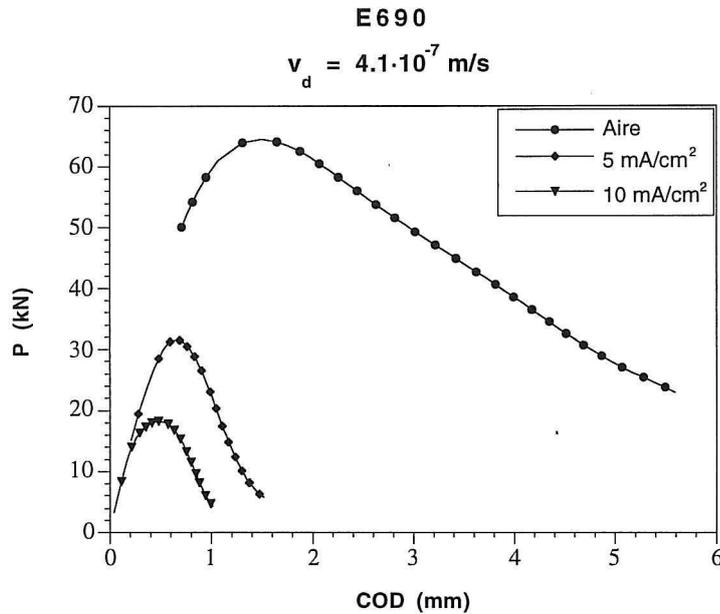


Figura 5.15. Curvas características Carga-COD para el acero E690 ensayado en presencia de hidrógeno y al aire con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

La Figura 5.16 muestra las curvas de propagación $da/dt-K_I$ conjuntamente para los tres ensayos. Los valores de K_I para el ensayo al aire son los obtenidos a partir de la expresión (5.3). La curva correspondiente a este ensayo sirve de referencia al establecer la velocidad de propagación de los procesos de fisuración de este acero a esta velocidad de sollicitación en el aire, fijándola entre $5 \cdot 10^{-8}$ y 10^{-7} m/s . Con respecto a ella se puede observar una clara diferencia de las curvas obtenidas en medio agresivo donde se produce todo el proceso de propagación bajo situaciones locales en el frente de fisura para las que en el aire no se ha iniciado siquiera.

El análisis comparativo de las probetas ensayadas en medio agresivo muestra que el factor de intensidad de tensiones umbral, $K_{I,thr}$ para el que se inicia la fisuración subcrítica, se ve afectado por la cantidad de hidrógeno presente en el material, así este parámetro presenta un valor de $41 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ para la muestra ensayada con una densidad de corriente de 10 mA/cm^2 frente al de $87 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ determinado para la ensayada con 5 mA/cm^2 . Asimismo, se observa una velocidad de propagación subcrítica superior en la probeta ensayada con una densidad de corriente de 10 mA/cm^2 que en la ensayada con densidad

87 MPa·m^{1/2} determinado para la ensayada con 5 mA/cm². Asimismo, se observa una velocidad de propagación subcrítica superior en la probeta ensayada con una densidad de corriente de 10 mA/cm² que en la ensayada con densidad de 5 mA/cm², para condiciones locales equivalentes, igual K_I , si bien en ambos casos los procesos presentan velocidad creciente desde el valor umbral, K_{thr} , al crítico, K_c , o al máximo alcanzado, con un comportamiento casi paralelo, hasta alcanzar valores de propagación casi estables entorno a $7 \cdot 10^{-6}$ m/s y $3 \cdot 10^{-6}$ m/s, respectivamente. Los valores umbrales obtenidos son muy superiores a los correspondientes de los ensayos estáticos convencionales en probetas DCB. Por su parte, las velocidades de propagación aquí obtenidas son superiores a las medidas en los ensayos estáticos presentados en el Capítulo 3.

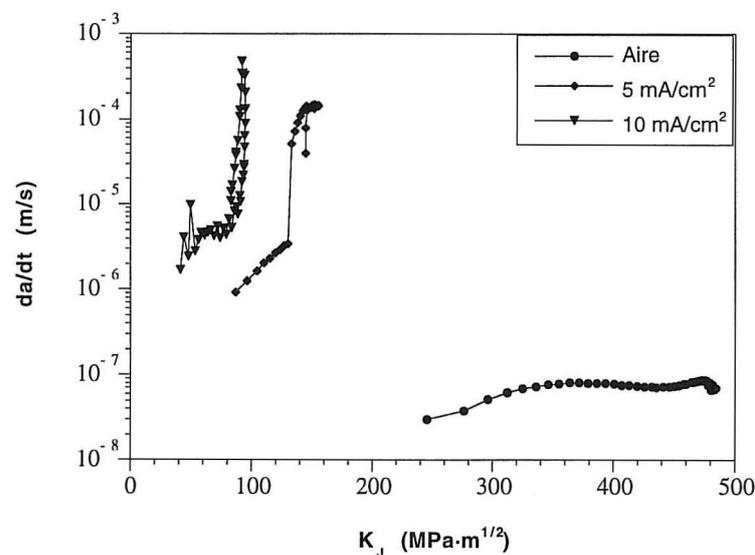


Figura 5.16. Comportamiento da/dt - K_I del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s, en diferentes medios

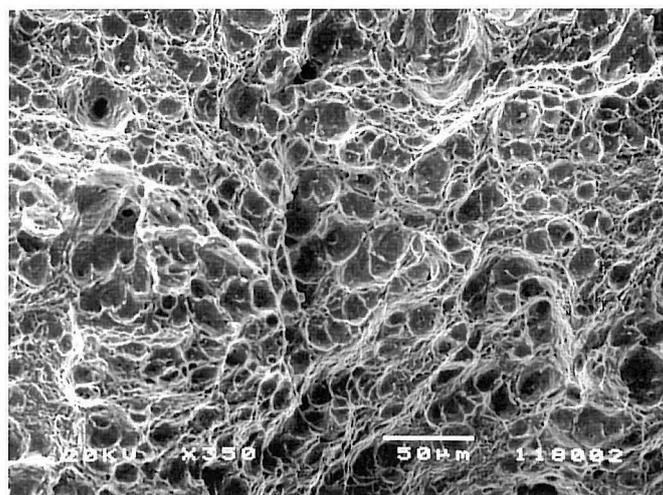
En la probeta ensayada con una densidad de corriente de 5 mA/cm² la zona subcrítica termina cuando el factor de intensidad de tensiones alcanza un valor crítico, K_c , de 130 MPa·m^{1/2}, dando comienzo a una zona de propagación crítica caracterizada por dicho factor y por una velocidad de crecimiento de las fisuras superior a $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, alcanzando valores de $2 \cdot 10^{-4}$ m/s. La probeta ensayada con una densidad de corriente de 10 mA/cm² presenta un incremento semejante

en su velocidad de propagación al iniciar la fase crítica para un factor de intensidad de tensiones de $90 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, llegando a alcanzar valores entre 3 y $5\cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, es decir en el orden, pero algo superiores, de los obtenidos para la muestra ensayada con menor densidad de corriente. También se diferencia de ésta en que no ofrece una aparente discontinuidad en la velocidad de propagación.

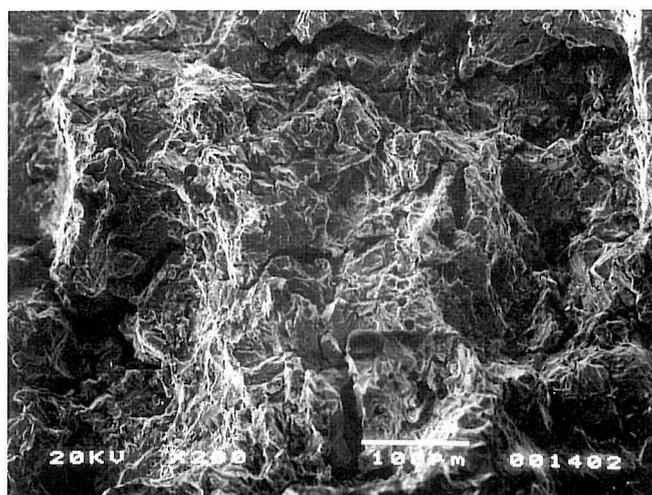
Para apoyar el análisis y la comprensión de estas diferencias, se ha estudiado detenidamente la fractografía de las diferentes zonas significativas de cada probeta. Así, la probeta ensayada al aire muestra una superficie de rotura formada mayoritariamente por microhuecos, totalmente diferente a la que presentan las muestras ensayadas en presencia de hidrógeno en la zona de propagación subcrítica. En esta zona, la superficie de rotura es predominantemente transgranular formada por clivajes, característicos de los procesos de fisuración asistidos por hidrógeno en microestructuras bainíticas [26]. En la misma zona, el porcentaje de intergranularidad es creciente con el contenido de hidrógeno. Las micrografías de la Lámina 5.2 muestran el aspecto fractográfico de la muestra ensayada al aire así como de las zonas de propagación subcrítica de las ensayadas en ambiente.

Coincidiendo con el tránsito observado en la velocidad de propagación en la muestra ensayada a 5 mA/cm^2 , para un valor crítico de K_I de $130 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, se observa la aparición de una tipología diferente en la superficie de rotura, que pasa a ser debida a mecanismos de formación y coalescencia de microhuecos, si bien éstos no presentan el mismo grado de deformación que en las probetas ensayadas al aire. Las dos primeras micrografías de la Lámina 5.3 muestra la fractografía observada en estas condiciones. Esta situación es coincidente con la consideración realizada previamente de haber alcanzado la condición crítica de rotura del material.

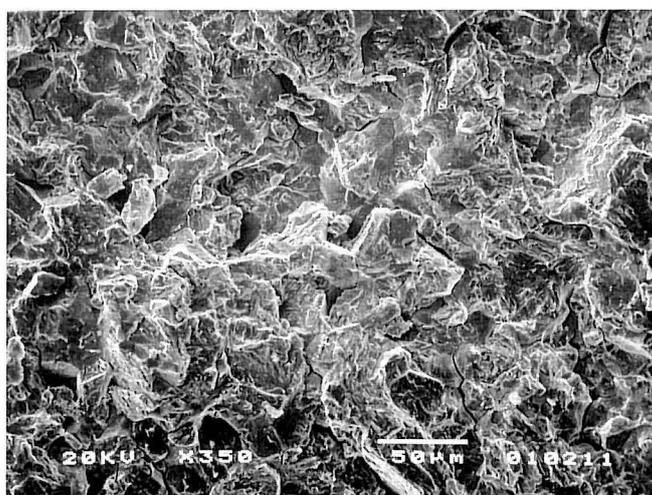
Por el contrario, la observación de la probeta ensayada a 10 mA/cm^2 no ofrece la diferenciación fractográfica mostrada anteriormente. La zona de propagación a alta velocidad, producida en torno a un factor de intensidad de tensiones, K_{cr} , de $90 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, que se extiende por 4 mm, no puede diferenciarse marcadamente de la zona subcrítica, como muestra la tercera micrografía de la Lámina 5.3. Ello concuerda con la continuidad observada en la curva $da/dt - K_I$.



(a)



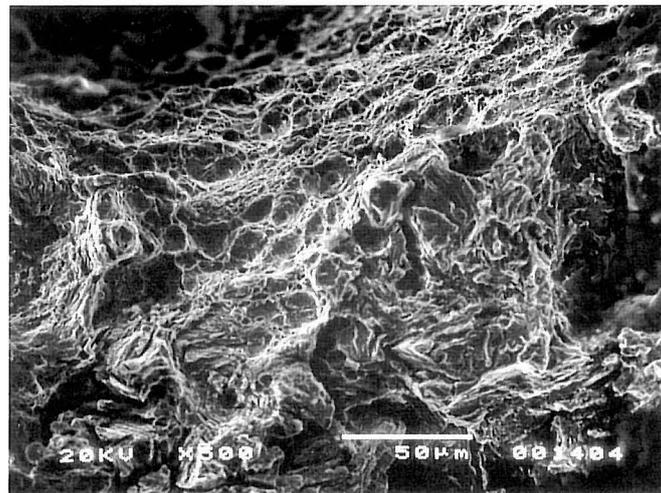
(b)



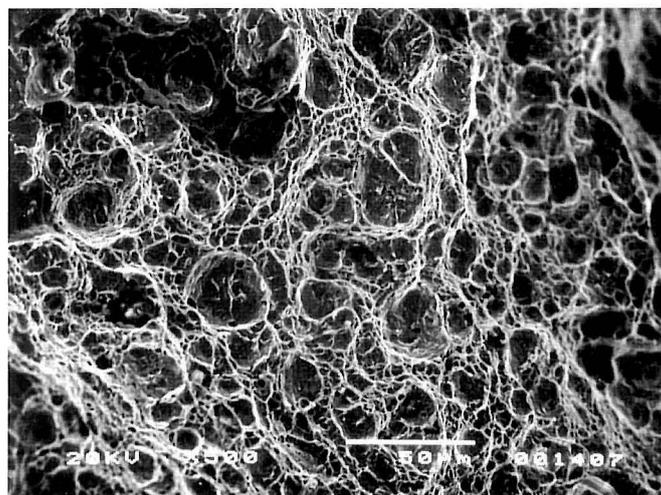
(c)

Lámina 5.2. *Fractografías de las muestras de acero E690 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*

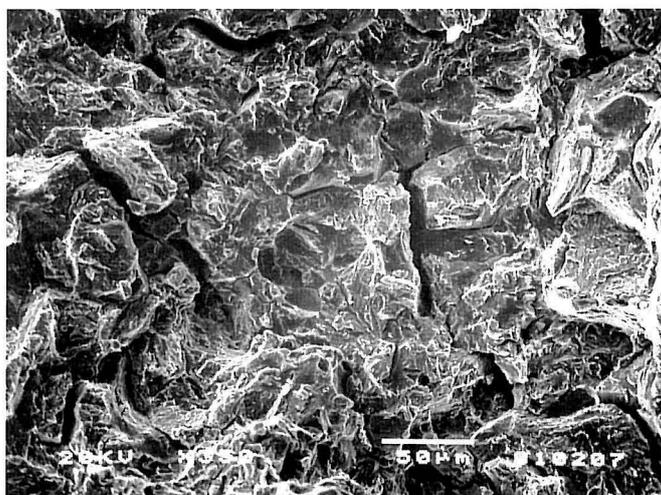
- (a) *Aspecto general del ensayo al aire*
- (b) *Zona de propagación subcrítica (5 mA/cm²)*
- (c) *Zona de propagación subcrítica (10 mA/cm²)*



(a)



(b)



(c)

Lámina 5.3. Fractografías de las muestras de acero E690 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:

- (a) Transición de zona de propagación subcrítica a crítica (5 mA/cm^2)
- (b) Zona de propagación crítica (5 mA/cm^2)
- (c) Zona de propagación crítica (10 mA/cm^2)

Para ayudar a completar este análisis se representa en la Figura 5.17 las curvas carga-desplazamiento de los tres ensayos, aire y dos ambientes, junto con las curvas teóricas propias de diferentes longitudes de fisura. El ensayo al aire muestra que en todo momento el estado de fisuración se encuentra bajo fuerte dominio plástico acorde con el proceso de rotura observado en el material. De la comparación de los cortes con la curva de ensayo obtenida con 5 mA/cm^2 se observa que las fisuras iniciales están bajo dominio elástico, propio de los clivajes existentes, mientras que las fisuras finales ya entroncan con un dominio elastoplástico, justificando la existencia de la transición observada de clivajes a microhuecos. De la comparación de las zonas de corte con las curvas de carga-desplazamiento obtenida en presencia de hidrógeno se puede deducir que el dominio plástico implicado en cada proceso de rotura es decreciente al aumentar la agresividad del medio, llegando a producirse la rotura final del material en el medio más agresivo con mecanismos de clivaje, bajo dominio elástico, no dando tiempo a la formación de microhuecos.

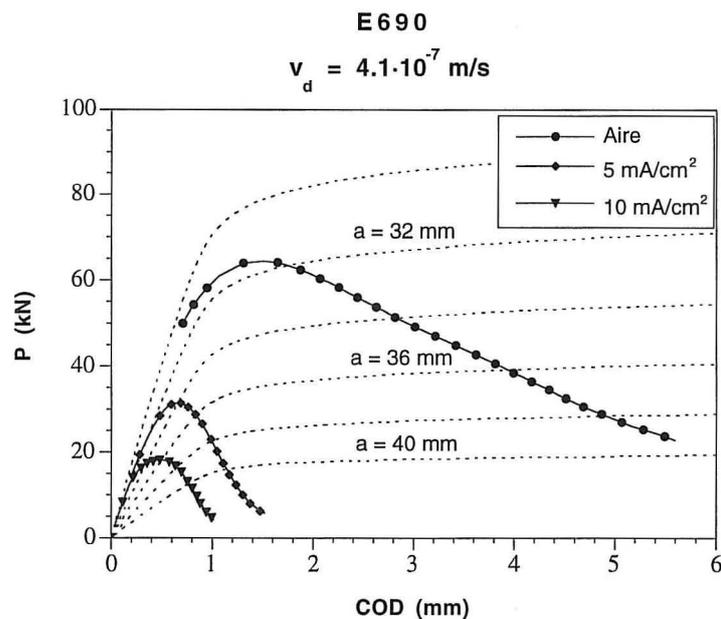


Figura 5.17. Curvas Carga-COD del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.1.2. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s

A esta velocidad de sollicitación fueron realizados tres ensayos con distintas densidades de corriente: 1, 5 y 10 mA/cm². La Figura 5.18 muestra las gráficas de las curvas carga-desplazamiento, en las que se puede apreciar el efecto que ejerce la agresividad del medio sobre el comportamiento mecánico de este material a esta velocidad.

La Figura 5.19 muestra, en las curvas $da/dt-K_I$ de la velocidad de propagación, la creciente susceptibilidad a la fisuración cuando aumenta la presencia de hidrógeno. El valor umbral para el que se inicia la fisuración decrece desde 120 MPa·m^{1/2}, deducido del valor de la integral J , para 1 mA/cm², hasta 35 MPa·m^{1/2} para 10 mA/cm², pasando por 63 MPa·m^{1/2} para 5 mA/cm². Asimismo hay notables diferencias en las velocidades de propagación que se analizan conjuntamente con su fractografía.

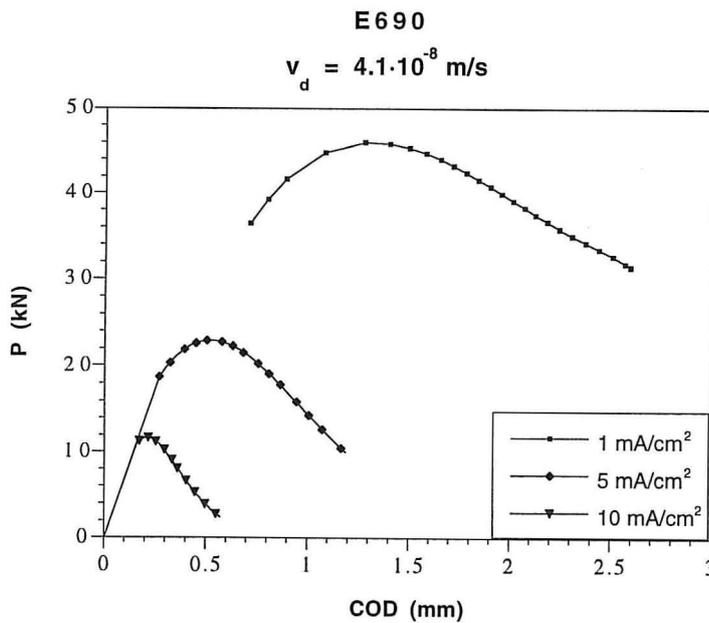


Figura 5.18. Curvas características Carga-COD para el acero E690 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s

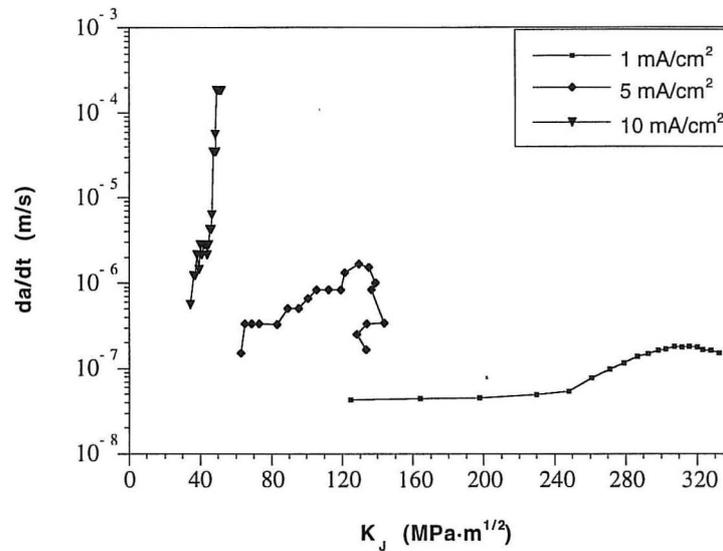


Figura 5.19. Comportamiento da/dt - K_I del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s, en diferentes medios

La probeta ensayada con concentración de hidrógeno menor, 1 mA/cm^2 , presenta un crecimiento de fisura inicialmente formado por los clivajes característicos de la propagación subcrítica. Tras un desarrollo de aproximadamente 1 mm , en el que las velocidades de propagación se establecen en torno a valores de $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, se produce un cambio de aspecto en la superficie de rotura, que pasa a ser dúctil por formación de microhuecos, similar a la de la muestra ensayada al aire presentada en la sección anterior con velocidad de sollicitación 10 veces mayor, si bien se observa una menor deformación en los huecos. En esta situación la velocidad de propagación se estabiliza en torno a 10^{-7} m/s . La Lámina 5.4 muestra en sus dos primeras micrografías, *a* y *b*, sendos aspectos de la superficie de propagación antes y después de alcanzarse la situación crítica para un valor K_c deducido de la integral J de $260 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

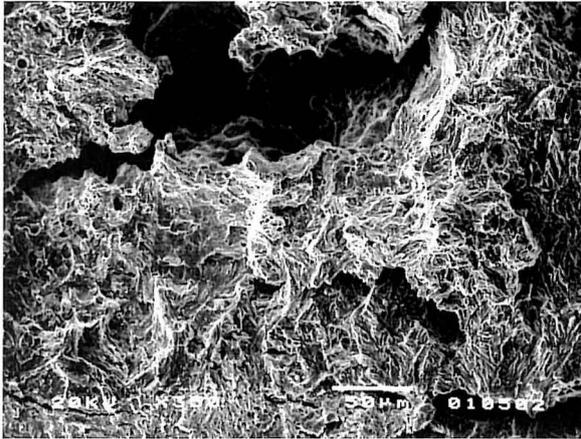
La probeta ensayada a una densidad de corriente intermedia, 5 mA/cm^2 , presenta un crecimiento de fisura por formación de clivajes sin apenas muestras de intergranularidad en la fase subcrítica, como se aprecia en la micrografía *c* de

la Lámina 5.4. En esta fase la velocidad de propagación es de $2 \cdot 10^{-7}$ m/s, obtenida a partir de un factor de intensidad de tensiones umbral de $63 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

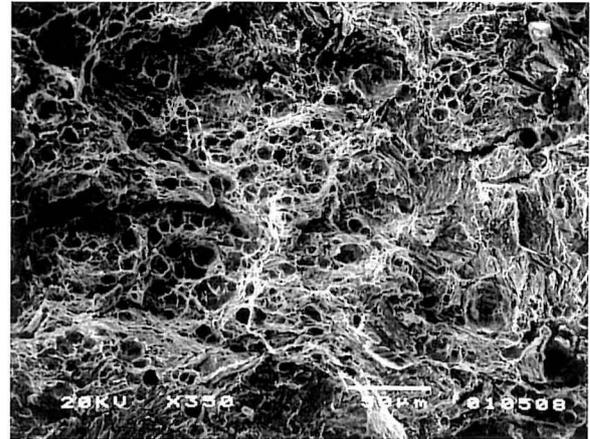
Finalmente, la muestra ensayada a la densidad de corriente más elevada, la de 10 mA/cm^2 , presenta una fisuración subcrítica, por encima del factor de intensidad de tensiones umbral de $35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, caracterizada por una velocidad de propagación creciente con K_I , desde K_{th} a K_{cr} en el rango de 1 a $6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Esta velocidad es superior a la obtenida para la muestra ensayada con una densidad de 5 mA/cm^2 , presentada en el párrafo previo, y se alcanza para estados locales para los que a ésta última aún no hay iniciación del proceso de fisuración. En esta fase subcrítica la rotura observada es mayoritariamente transgranular con presencia masiva de clivajes junto con vestigios de roturas intergranulares, como se aprecia en la micrografía *d* de la Lámina 5.4.

Para ambos ensayos, 5 mA/cm^2 y 10 mA/cm^2 , se aprecia una fractografía claramente diferenciable entre la propagación subcrítica y la crítica. Para la muestra ensayada a 5 mA/cm^2 se observa en la zona crítica una propagación por formación de microhuecos con apenas deformación, conjuntamente con zonas asemejando clivajes. En la micrografía *a* de la Lámina 5.5 se puede apreciar el aspecto de la superficie de rotura en esta zona. Dicha zona se caracteriza por una velocidad crítica de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s iniciándose para un factor de intensidad de tensiones crítico de $120 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. En la muestra ensayada con una intensidad de corriente de 10 mA/cm^2 el factor de intensidad de tensiones crítico presenta un valor notablemente inferior, próximo a $50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La velocidad de propagación en esta segunda fase crítica es en torno a 10^{-4} m/s, claramente superior a la obtenida en las otras probetas ensayadas a su misma velocidad. La superficie de la fisura en esta fase es mayoritariamente dúctil con abundante presencia de desgarros de unión de roturas locales previas formadas por clivajes, dando una apariencia a pequeños aumentos de microhuecos de gran tamaño. La micrografía *b* de la Lámina 5.5 muestra el aspecto de esta rotura.

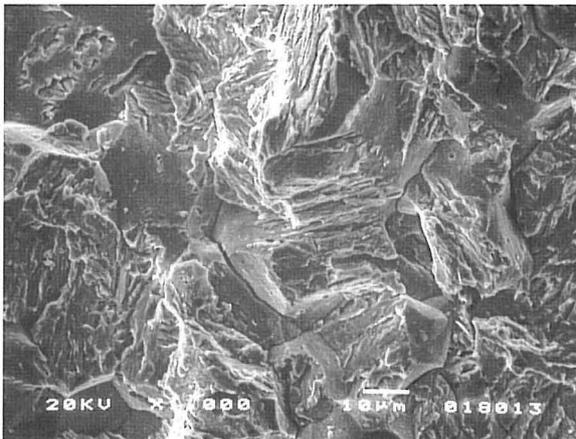
Un estudio análogo al realizado en la Figura 5.17 para los ensayos realizados a esta velocidad de desplazamiento, $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s, se muestra en la Figura 5.20. La intersección de la curva de ensayo en cada ambiente con las curvas teóricas, en la rama elástica o plástica de éstas, justifica el tipo de micromecanismos de



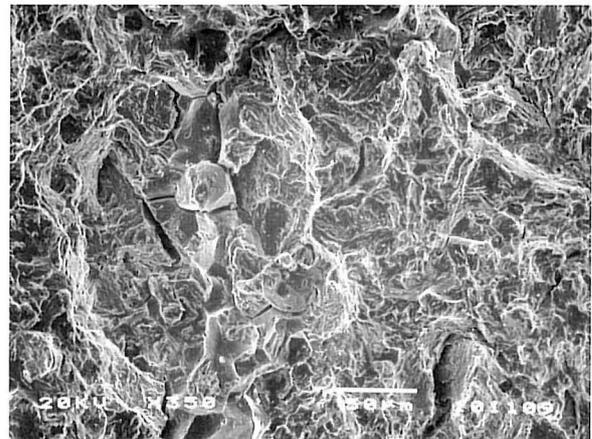
(a)



(b)



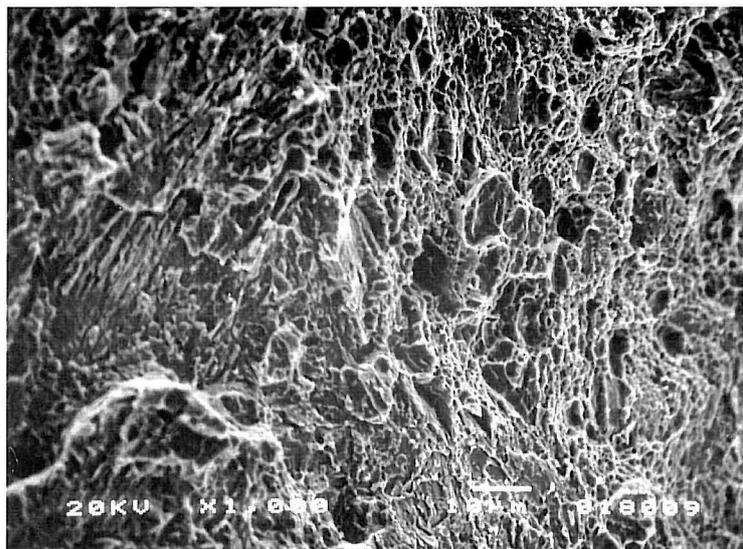
(c)



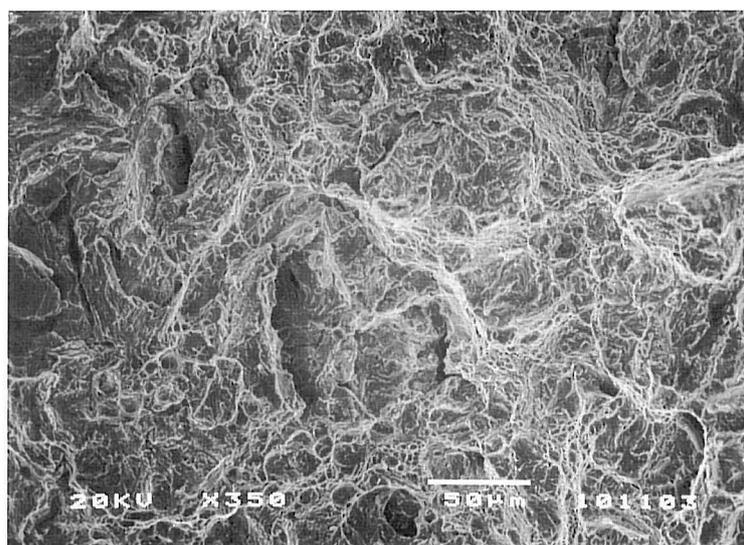
(d)

Lámina 5.4. *Fractografías de las muestras de acero E690 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*

- (a) *Zona de propagación subcrítica (1 mA/cm²)*
- (b) *Zona de propagación crítica (1 mA/cm²)*
- (c) *Zona de propagación subcrítica (5 mA/cm²)*
- (d) *Zona de propagación subcrítica (10 mA/cm²)*



(a)



(b)

Lámina 5.5. *Fractografías de las muestras de acero E690 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*
 (a) *Zona de propagación crítica (5 mA/cm²)*
 (b) *Zona de propagación crítica (10 mA/cm²)*

fisuración observados: clivaje en zona subcrítica para rápidamente pasar a microhuecos en la zona crítica de la muestra ensayada a 1 mA/cm^2 , mayoría de clivajes en las zonas subcríticas de las muestras de 5 y 10 mA/cm^2 , tránsito de clivajes a microhuecos en la zona de inestabilidad del ensayo realizado a 5 mA/cm^2 y presencia de clivajes como iniciadores de la rotura en la misma zona para el realizado a 10 mA/cm^2 .

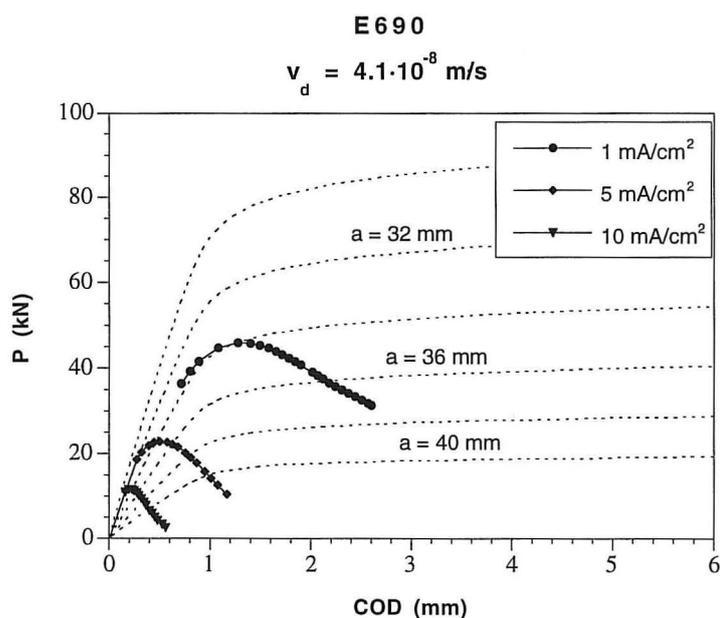


Figura 5.20. Curvas Carga-COD del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.1.3. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

Dos muestras del acero E690 fueron ensayadas a la velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ estando sometidas a diferentes procesos de carga de hidrógeno, con densidades de corriente de 5 y 10 mA/cm^2 . Las Figuras 5.21 y 5.22 presentan respectivamente las curvas carga-desplazamiento obtenidas y las curvas características de velocidad de propagación $da/dt-K_I$, derivadas de aquéllas. En ambas se aprecia el efecto de la agresividad del medio.

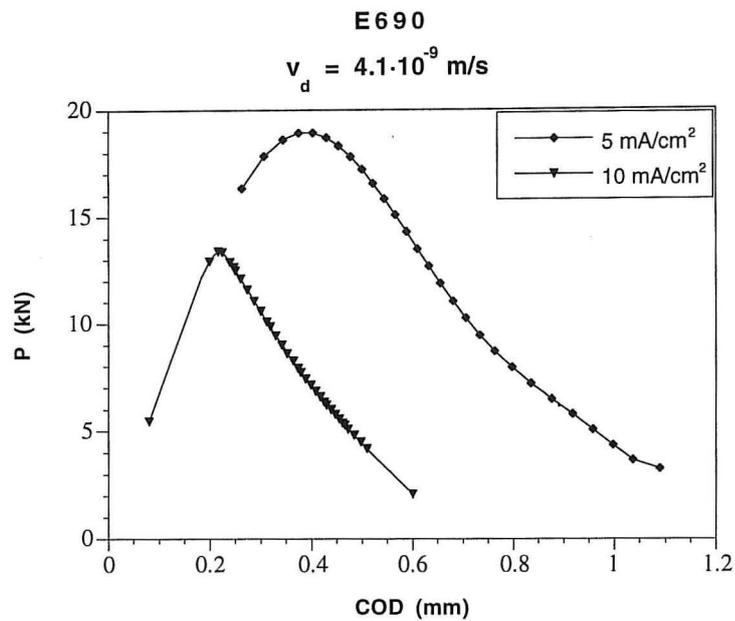


Figura 5.21. Curvas características Carga-COD para el acero E690 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s

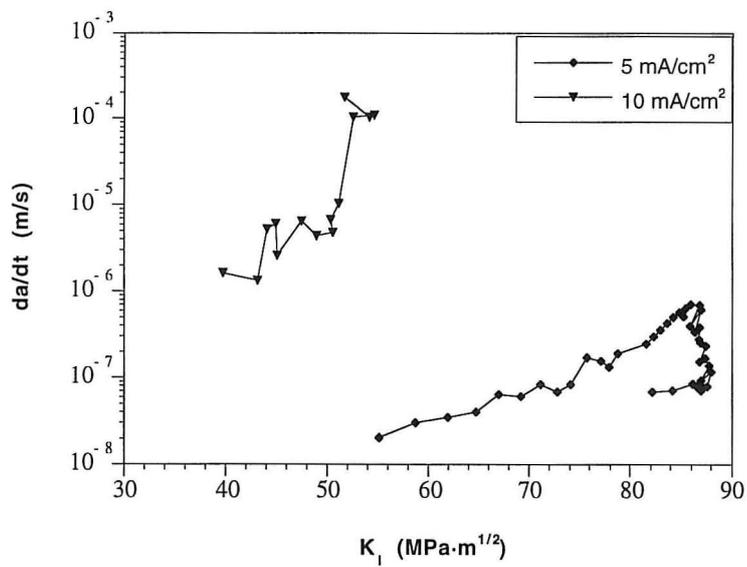


Figura 5.22. Comportamiento da/dt - K_I del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s, en diferentes medios

La probeta ensayada con la menor concentración de hidrógeno, 5 mA/cm², presenta un crecimiento de fisura transgranular por formación de clivajes. La velocidad de propagación subcrítica fue creciendo de forma continua desde 2·10⁻⁸ m/s, estando el umbral de inicio de la propagación en aproximadamente 55 MPa·m^{1/2}, hasta valores en el entorno de 2-3·10⁻⁷ m/s para valores de K_I próximos a 80 MPa·m^{1/2}. A partir de este valor la velocidad de crecimiento de las fisuras aumentó hasta valores de 1·10⁻⁶ m/s, llegando el factor de intensidad de tensiones hasta un máximo próximo a 90 MPa·m^{1/2}.

La Lámina 5.6 presenta sendas micrografías de la fractografía en la zona primera previa a la inestabilidad de la probeta y en la zona correspondiente a la propagación en la inestabilidad. A pesar de las diferencias en la velocidad de propagación, los mecanismos son básicamente idénticos, sin ofrecer discontinuidades, aunque se aprecia un incremento sustancial de zonas de desgarramiento en la región de inestabilidad.

La muestra ensayada a la densidad de corriente mayor, 10 mA/cm², presenta una fase subcrítica caracterizada por un crecimiento frágil por formación de clivajes junto a una importante presencia de zonas de crecimiento intergranular, como se aprecia en la micrografía *a* de la Lámina 5.7. Esta fase se caracteriza por una velocidad de propagación variable desde 2·10⁻⁶ hasta 10⁻⁵ m/s en la que se estabiliza. El factor de intensidad de tensiones umbral, K_{th} , tiene un valor de 40 MPa·m^{1/2}, notablemente inferior al alcanzado en la otra muestra ensayada con una menor concentración de hidrógeno. Esta zona subcrítica se desarrolla, por las condiciones de sollicitación y ambientales, en un rango muy corto de sollicitación ya que el factor de intensidad de tensiones máximo que se alcanza es de 55 MPa·m^{1/2}. Iniciada ya la descarga de la probeta, ésta presenta un proceso de fisuración crítica con apariencia de microhuecos, formados por clivajes de corto desarrollo y desgarramientos de conexión entre ellos. La micrografía *b* de la Lámina 5.7 ofrece la morfología de la superficie de propagación en esta zona crítica, caracterizada por una velocidad de propagación de 10⁻⁴ m/s.

La Figura 5.23 pone de manifiesto, una vez más, el total acuerdo entre la zona de la intersección, la zona elástica, de las curvas P - COD de estos ensayos con las curvas teóricas para las diferentes longitudes de fisura y los mecanismos de rotura presentes, clivajes.

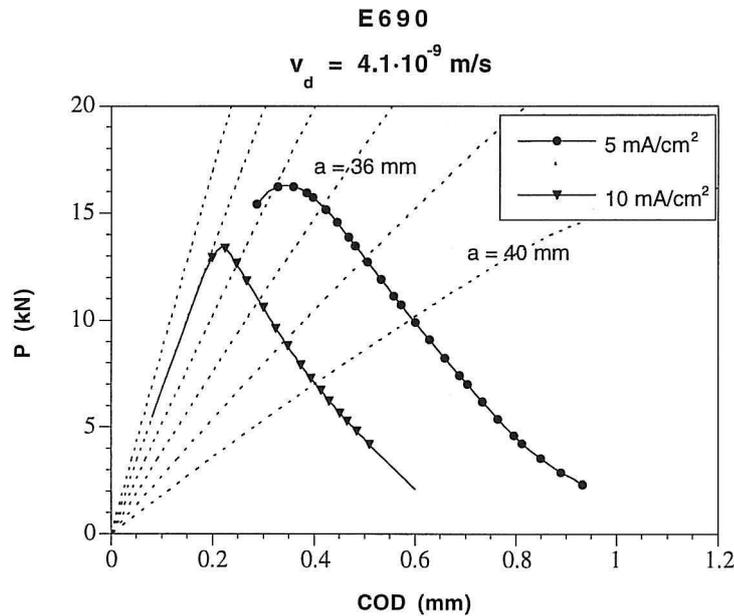
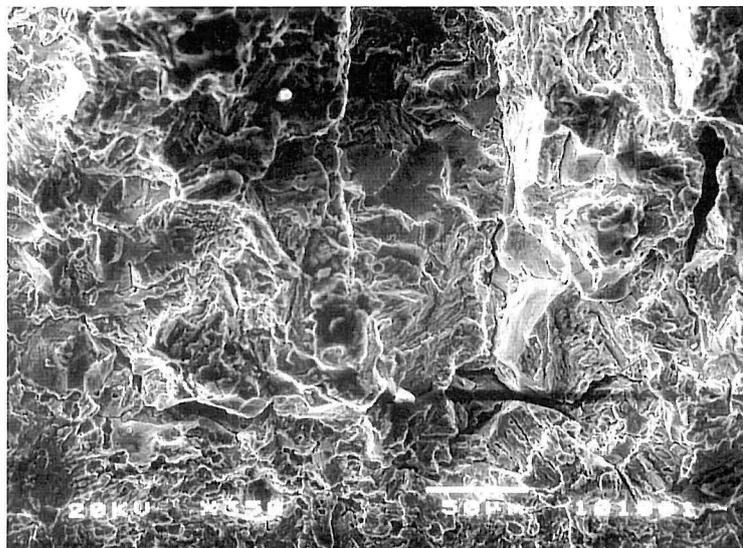


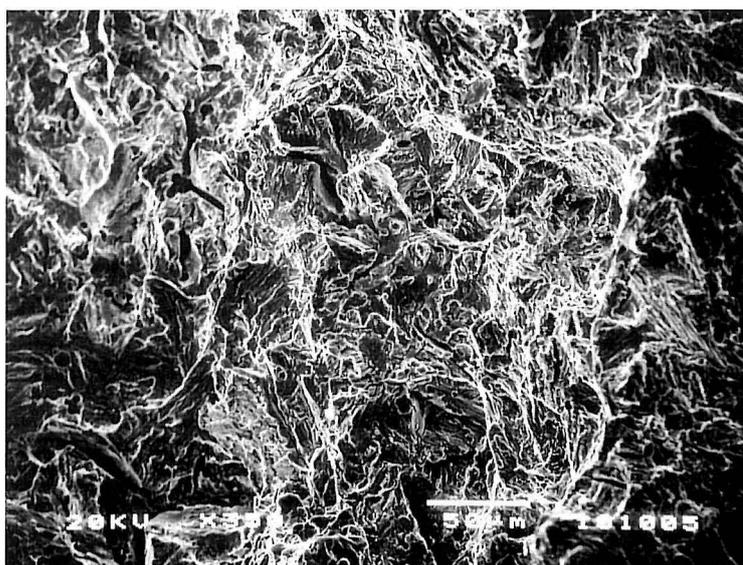
Figura 5.23. Curvas Carga-COD del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.1.4. Velocidad de desplazamiento: $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Finalmente, otras dos probetas correspondientes al acero E690 fueron ensayadas a la velocidad de sollicitación más lenta considerada, $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$. La primera de ellas fue sometida a una densidad de corriente de 1 mA/cm^2 y la segunda a una de 5 mA/cm^2 . La Figura 5.24 presenta las curvas características de carga-desplazamiento de ambos ensayos y la Figura 5.25 las curvas $da/dt-K_I$ deducidas de las anteriores.

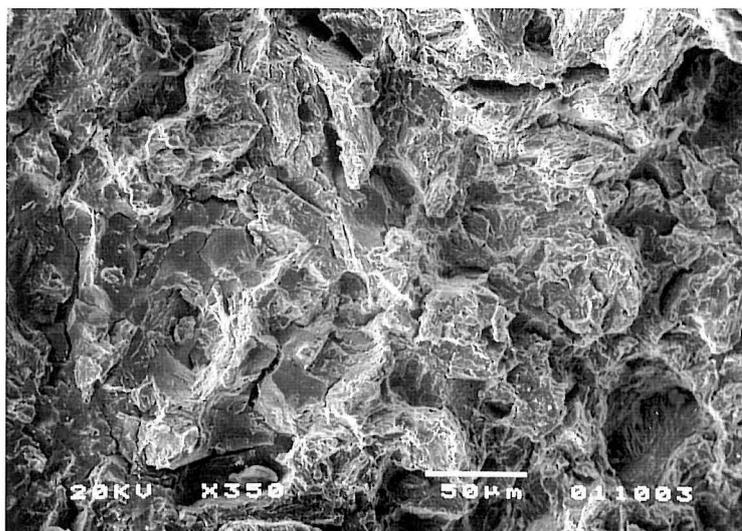


(a)

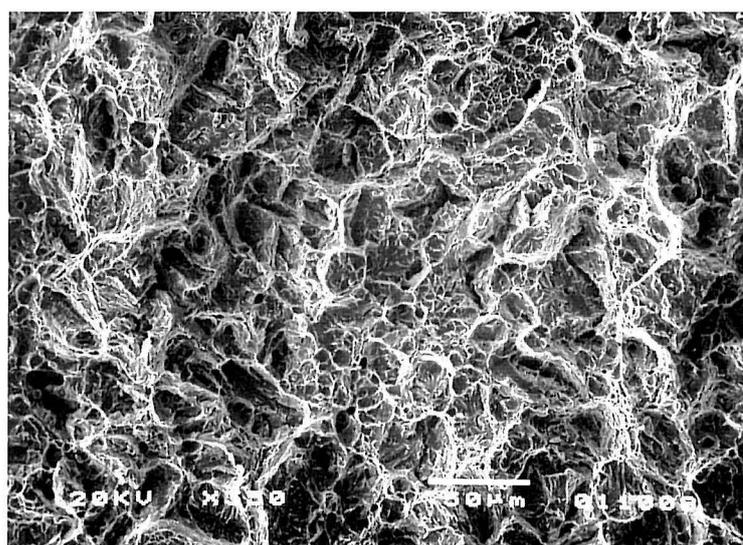


(b)

Lámina 5.6. *Fractografías de una muestra de acero E690 ensayada con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s y una densidad de corriente de 5 mA/cm²*
(a) *Zona previa a la inestabilidad de la probeta*
(b) *Zona de inestabilidad de la probeta*



(a)



(b)

Lámina 5.7. *Fractografías de una muestra de acero E690 ensayada con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s y una densidad de corriente de 10 mA/cm²:*

(a) Zona inicial subcrítica

(b) Zona crítica

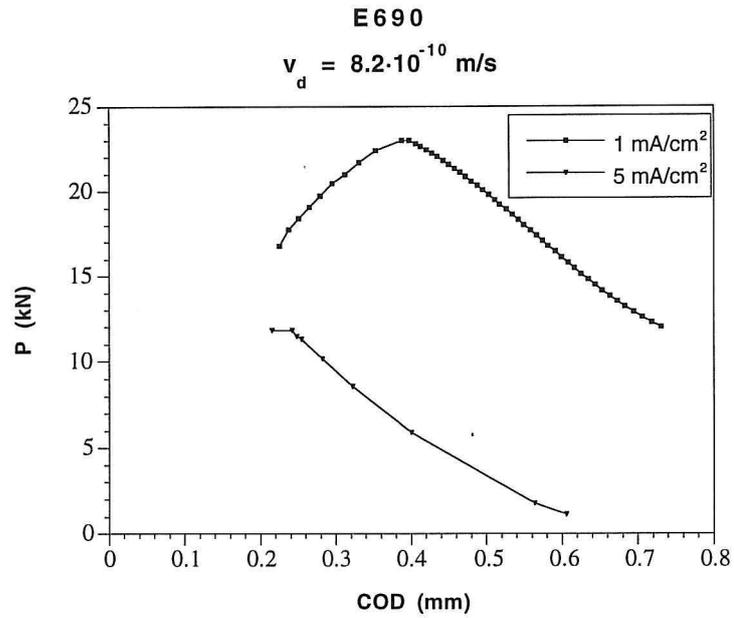


Figura 5.24. Curvas características Carga-COD para el acero E690 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

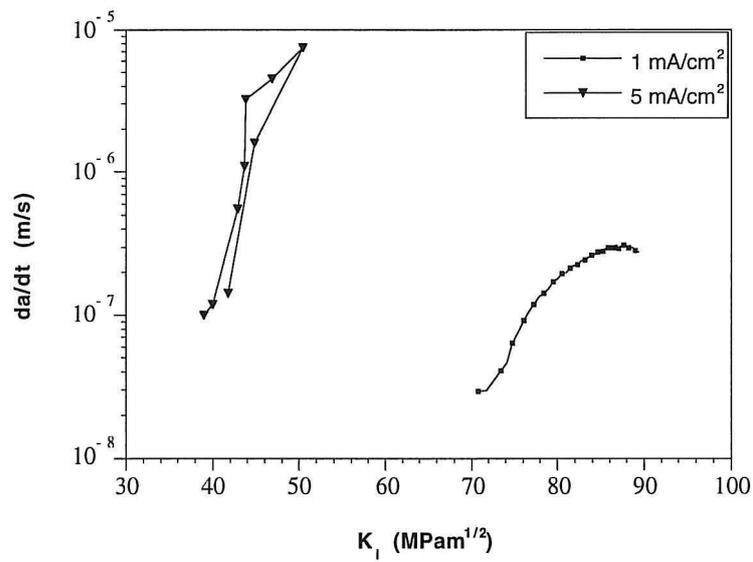
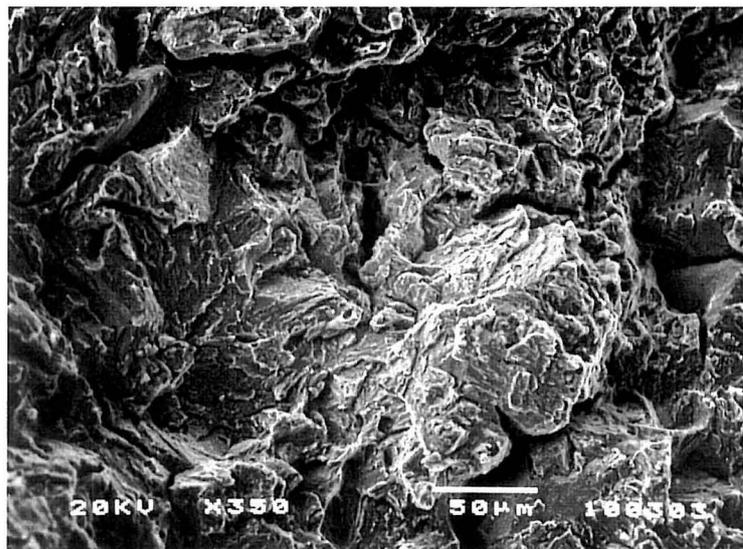


Figura 5.25. Comportamiento $da/dt-K_I$ del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, en diferentes medios

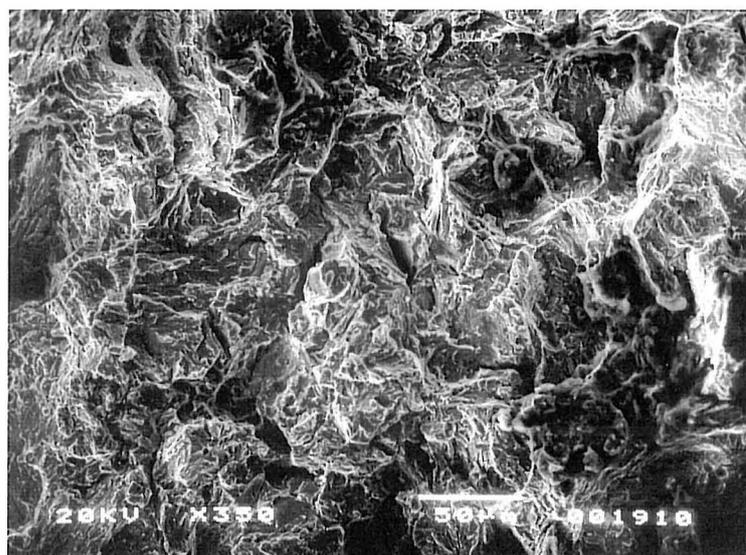
El comportamiento de la primera probeta, ensayada a 1 mA/cm^2 , durante la propagación correspondió a un proceso de fisuración subcrítica clásico, iniciándose para un factor de intensidad de tensiones umbral de $70 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, siendo la velocidad de propagación creciente desde $3\cdot 10^{-8}$ a $3\cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, esta última para el máximo valor de K_I alcanzando, $90 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, ya en la zona de descarga de la probeta. Estos valores son próximos a los obtenidos para unas condiciones de ensayo estáticas que, como se puede ver en el Capítulo 3, están en el orden de $5\cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. En cuanto a la morfología de la fisuración resultó ser mayoritariamente frágil con roturas transgranulares por clivaje asociadas a la presencia de zonas intergranulares. La micrografía *a* de la Lámina 5.8 muestra el aspecto que presenta la superficie de propagación de dicha probeta. Al igual que en algunos de los ensayos previamente expuestos, en ésta no hay cambios en la morfología de la superficie de rotura, lo que concuerda con la inexistencia de variaciones bruscas en la velocidad de propagación.

La probeta ensayada con mayor densidad de corriente, 5 mA/cm^2 , presenta asimismo una morfología de crecimiento de fisura característica de procesos subcríticos con una presencia mayoritaria de roturas transgranulares debidas a la aparición de clivajes junto con roturas intergranulares, más claramente presentes que en la muestra anterior. La micrografía *b* de la Lámina 5.8 presenta los aspectos más destacados de la zona de propagación. En esta probeta se produce un incremento rápido de la velocidad de propagación, pasando de valores de $1\cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ en las zonas de crecimiento inicial, asociadas a un factor de intensidad de tensiones umbral de $39 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, a valores más estabilizados entre 3 y $8\cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ en la zona final de la propagación, variando K_I entre 43 y $50 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, asociada a la descarga de la probeta. Para estas condiciones el factor de intensidad de tensiones umbral y la velocidad inicial de propagación resultaron ser muy próximos a los obtenidos en condiciones de ensayo estático, cuyos valores han sido presentados en la Tabla 3.6. En el estudio fractográfico no se puede distinguir una zona de crecimiento subcrítico diferenciable de otra crítica, sino una continuidad en la morfología de la superficie de rotura, formada por clivajes y roturas intergranulares.

La Figura 5.26 justifica que para ambos ensayos los micromecanismos de fisuración sean clivajes de forma continuada, al situarse los puntos propios de cada longitud de fisura en las ramas elásticas de las curvas teóricas.



(a)

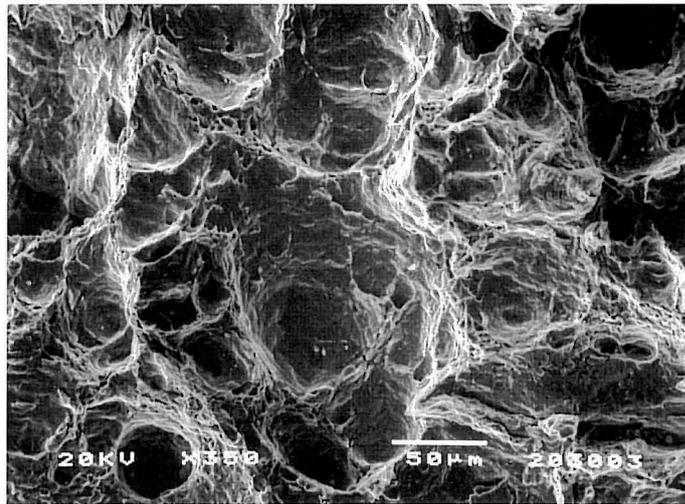


(b)

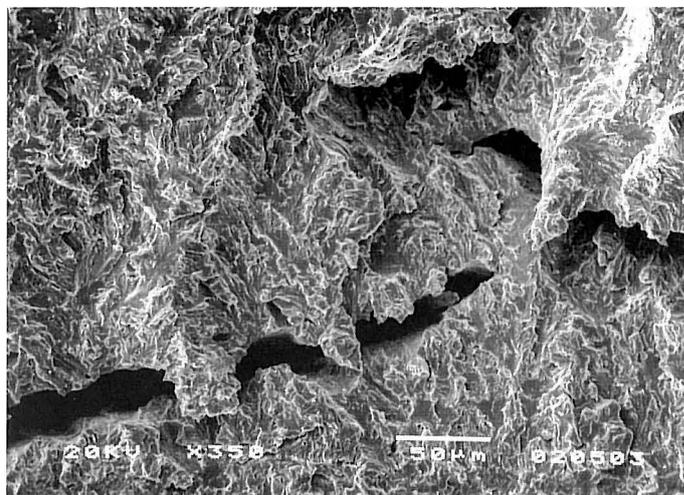
Lámina 5.8. *Fractografías de las muestras de acero E690 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*

(a) Zona de propagación (1 mA/cm^2)

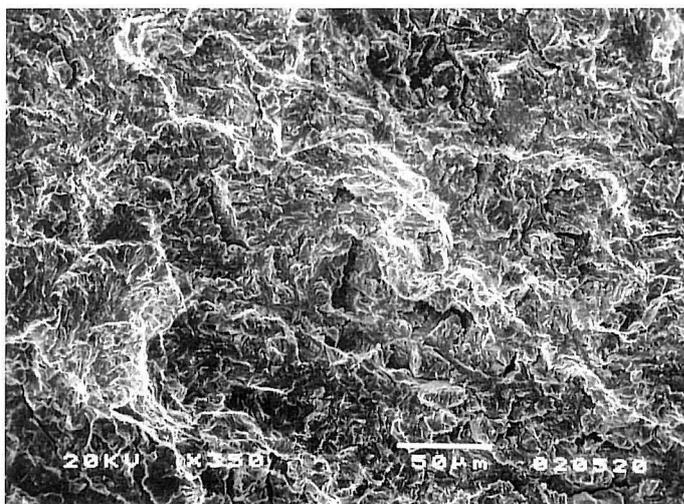
(b) Zona de propagación (5 mA/cm^2)



(a)



(b)



(c)

Lámina 5.9. *Fractografías de las muestras de acero E500 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*
 (a) *Aspecto general del ensayo al aire*
 (b) *Zona previa a la inestabilidad de la probeta (5 mA/cm²)*
 (c) *Zona de inestabilidad de la probeta (5 mA/cm²)*

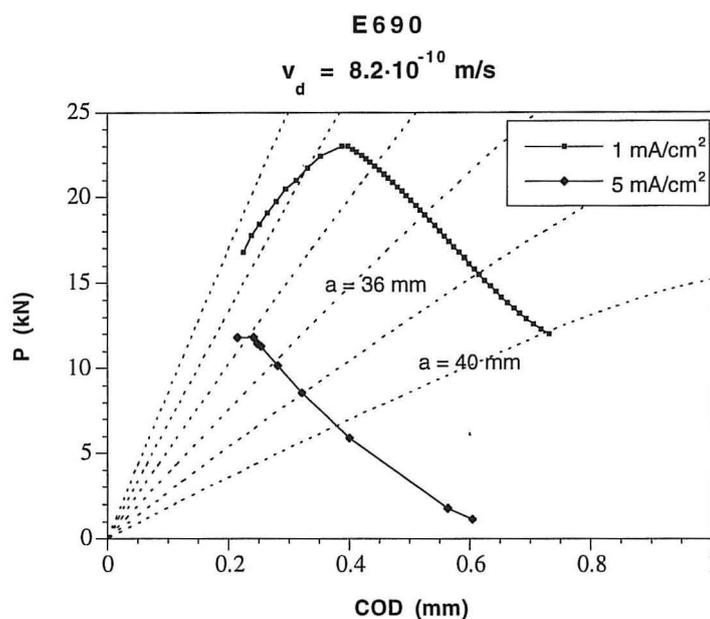


Figura 5.26. Curvas Carga-COD del acero E690, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.2. Acero E500

Sobre el acero E500 se realizó un análisis similar, aunque en este caso sólo se llevaron a cabo procesos de fisuración sobre dicho material con dos densidades de corriente 5 y 10 mA/cm², con diferentes velocidades de sollicitación en cada una de dichas condiciones.

4.1.2.1. Velocidad de desplazamiento : $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Para esta velocidad de sollicitación se realizaron ensayos de caracterización de los procesos de fisuración sobre dos probetas ensayadas una al aire y la otra con densidad de corriente de 5 mA/cm². La Figura 5.27 muestra las curvas carga-desplazamiento correspondientes a dichos ensayos, en las que se puede apreciar la gran influencia de la presencia de hidrógeno en el comportamiento del material frente a fisuración. La Figura 5.28 recoge las curvas de velocidad de

propagación $da/dt-K_I$. En estas curvas, de nuevo, aparece claro el efecto de la agresividad del medio.

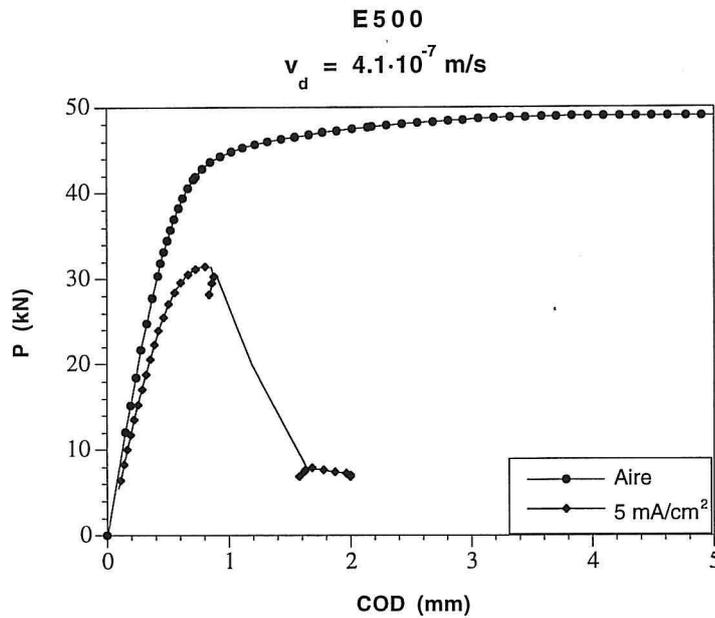


Figura 5.27. Curvas características Carga-COD para el acero E500 ensayado en presencia de hidrógeno y al aire con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

El proceso de fisuración de la probeta ensayada al aire establece unas pautas de velocidad de propagación continuas y crecientes tendentes a estabilizarse en torno a valores de 10^{-7} m/s a partir de la situación de iniciación, para un valor K_I de $160 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, en la que la velocidad está próxima a 10^{-8} m/s . Esta muestra ensayada al aire presenta una superficie de propagación formada por microhuecos con un grado de deformación importante, lo que concuerda con la respuesta macroscópica observada y la caracterización realizada. La micrografía *a* de la Lámina 5.9 muestra un aspecto típico de la superficie de rotura de esta probeta ensayada al aire.

En la probeta ensayada en presencia de hidrógeno el proceso de fisuración se inicia bajo condiciones locales para las que la anterior no ofrece ninguna respuesta. El valor umbral de K_I de $105 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ establece un proceso de fisuración subcrítica, a velocidad creciente entre $2 \cdot 10^{-7}$ y $3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, debido,

como se observa en la micrografía *b* de la Lámina 5.9, a una rotura transgranular por clivajes fuertemente desgarrada en las uniones de éstos. Para un valor de K_I de $160 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ la situación se vuelve inestable y se produce una fisuración dos órdenes de magnitud más rápida, caracterizada por un estado de desgarramiento (tearing) de gran deformación que no permite la formación de clivajes, como se observa en la micrografía *c* de la Lámina 5.9.

La Figura 5.29 justifica los micromecanismos de rotura observados. En la probeta ensayada al aire todos sus puntos de propagación cortan a las curvas teóricas *P-COD* propias de cada longitud de fisura en una zona en la que ya hay un gran desarrollo plástico, lo que se asocia a un mecanismo de formación de microhuecos. En la probeta ensayada en ambiente de hidrógeno el inicio de la propagación se establece en la zona de transición entre las ramas elástica y plástica, para ir adentrándose gradualmente en la rama plástica al avanzar la fisura. Esto concuerda bien con los clivajes de inicio de propagación y el fuerte desgarramiento entre ellos, y con el tránsito hacia mecanismos de desgarramiento dúctil creciente conforme crece la fisura.

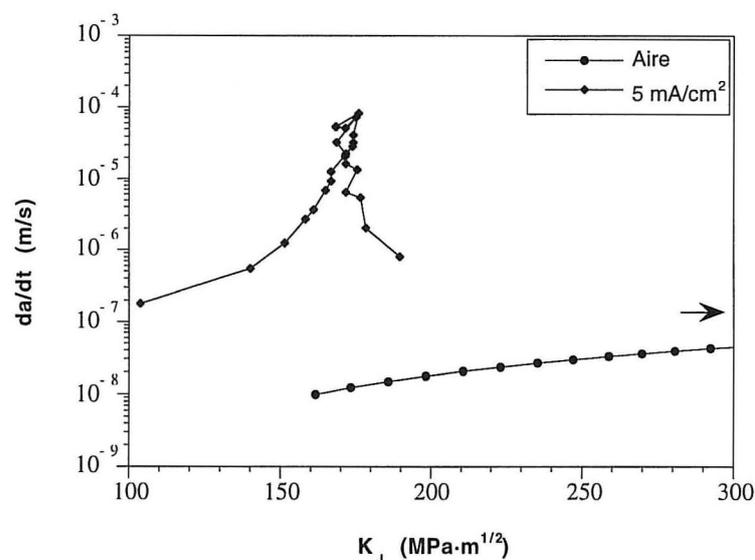


Figura 5.28. Comportamiento da/dt - K_I del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, en diferentes medios

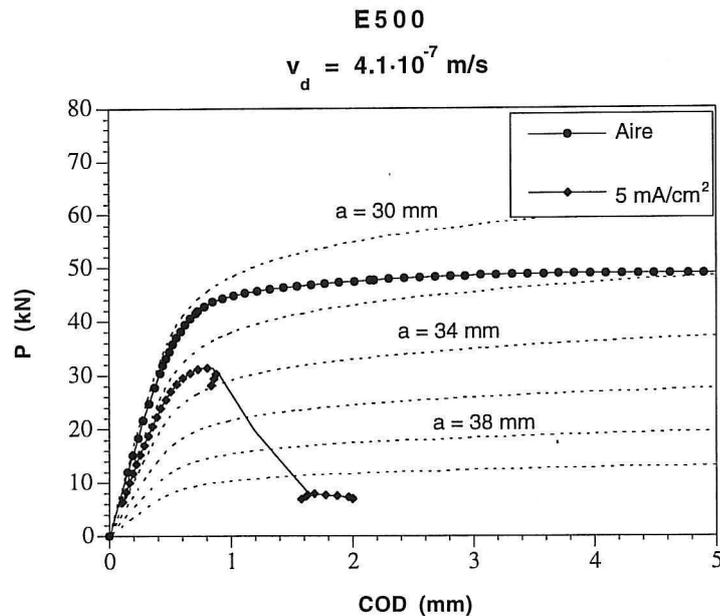
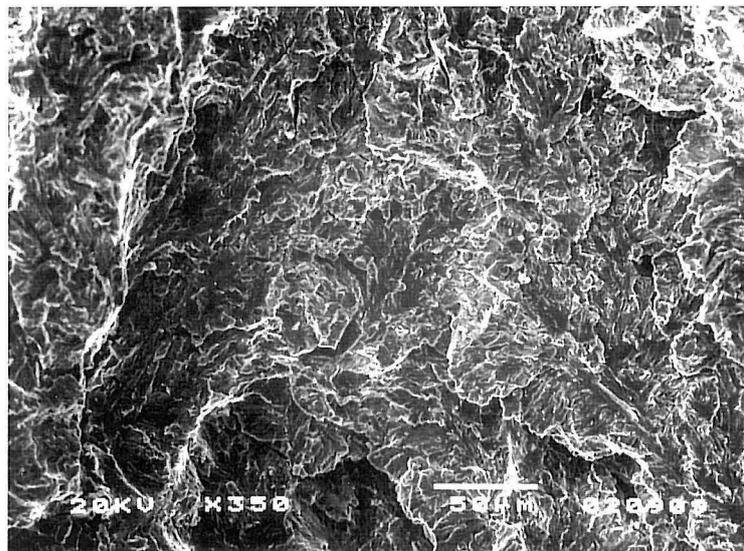


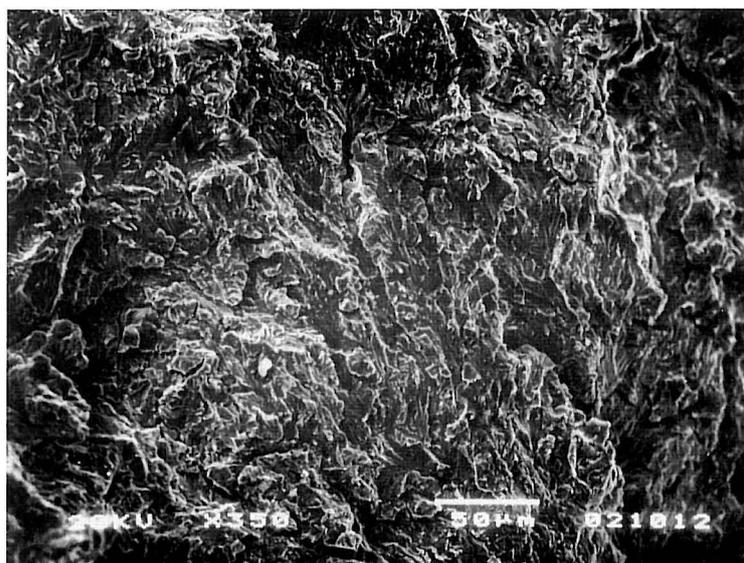
Figura 5.29. Curvas Carga-COD del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.2.2. Velocidad de desplazamiento : $8.2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ y $4.1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Dos probetas se ensayaron en ambiente agresivo a 5 y 10 mA/cm² a la velocidad de $8.2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, mostrando un comportamiento muy similar como puede apreciarse en las Figuras 5.30 y 5.31, que presentan respectivamente sus curvas carga-desplazamiento y las $da/dt-K_I$, deducidas de las anteriores. El factor de intensidad de tensiones umbral alcanzó valores de 82 MPa·m^{1/2} para la probeta ensayada en condiciones menos severas de hidrógeno y 62 MPa·m^{1/2} para la probeta ensayada en condiciones más severas. En ambas probetas se produjo un crecimiento de fisura subcrítico de características frágiles por roturas transgranulares con abundante presencia de clivajes afectados por "tearing". La Lámina 5.10 muestra dichas características, perteneciendo la micrografía *a* a la muestra ensayada a 5 mA/cm² y la *b* a la ensayada a 10 mA/cm². La velocidad de propagación resultó ser similar en ambas probetas, creciente desde el valor umbral hasta el valor del factor de intensidad de tensiones correspondiente al máximo de carga, a partir del cual prácticamente la velocidad se estabiliza,



(a)



(b)

Lámina 5.10. *Fractografías de las muestras de acero E500 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-8}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*

(a) Zona de propagación (5 mA/cm^2)

(b) Zona de propagación (10 mA/cm^2)

correspondiendo ello a la descarga por inestabilidad de la probeta. El incremento en velocidad de propagación viene acompañado con un aumento en el desgarramiento. Para la ensayada a 5 mA/cm^2 la velocidad de propagación crece de 2 a $5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, a la que se estabiliza para un factor de intensidades de tensiones de $160 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Para la ensayada a 10 crece de 0.4 a $5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, valor que alcanza para $170 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La propagación durante la inestabilidad, con velocidad prácticamente estable, mantiene una continuidad total en los micromecanismos de rotura previamente observados.

La Figura 5.32 muestra, a través de las condiciones elásticas o plásticas, de las intersecciones entre las curvas de comportamiento y las teóricas para cada longitud de fisura, que los mecanismos iniciales de clivaje se ven gradualmente afectados por una presencia creciente de plasticidad. Así, se justifica la creciente presencia de mecanismos de desgarramiento dúctil apoyados en clivajes previos de corto alcance.

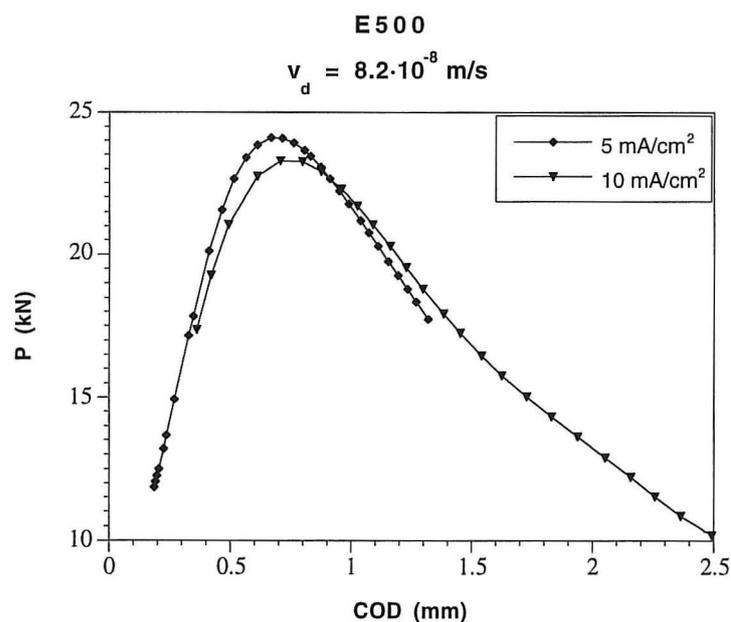


Figura 5.30. Curvas características Carga-COD para el acero E500 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

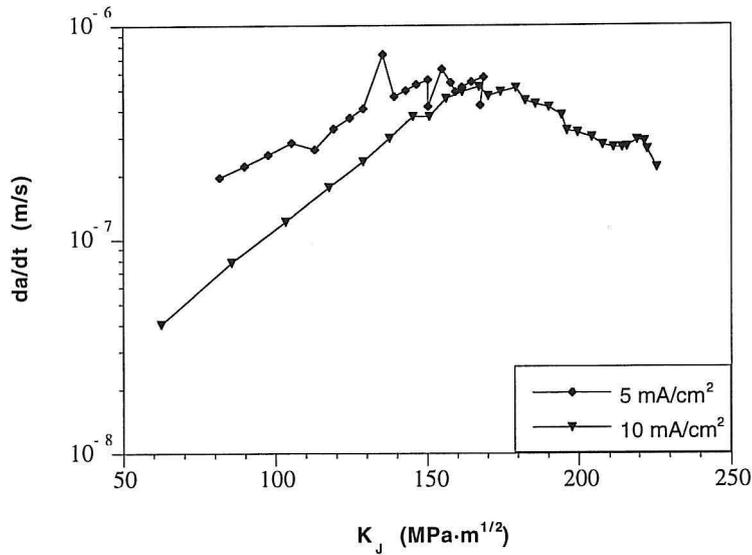


Figura 5.31. Comportamiento $da/dt-K_I$ del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-8}$ m/s, en diferentes medios

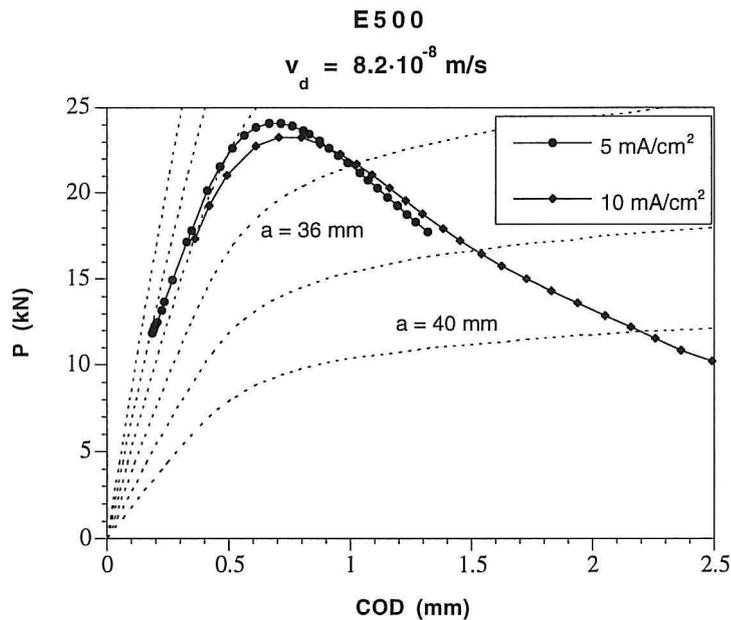


Figura 5.32. Curvas Carga-COD del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-8}$ m/s, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

Una nueva probeta se ensayó a la velocidad de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s con una densidad de corriente de 5 mA/cm^2 , cuyas curvas de comportamiento carga-desplazamiento y velocidad de propagación se presentan en las Figuras 5.33 y 5.34, apreciándose en ellas un comportamiento análogo al presentado en las Figuras 5.30 y 5.31 para la velocidad de $8.2 \cdot 10^{-8}$ m/s. En la última, se puede apreciar cómo la curva obtenida sigue las clásicas de velocidad de propagación subcrítica creciente ligeramente con el valor de K_I desde valores de 10^{-7} m/s en el umbral, próximo a $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, hasta estabilizarse en torno a $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, para un valor K_I de $142 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ alcanzado bajo carga máxima. Desde esta situación la velocidad de propagación se mantiene prácticamente constante mientras la probeta se va descargando. La fractografía propia de este proceso de propagación subcrítica, como en las anteriores probetas estudiadas, es debida a un proceso de clivajes desarrollados en la estructura bainítica de este acero, complementándose con desgarros dúctiles, tearing, cuya presencia es creciente conforme avanza la fisura. De esta forma la superficie de la rotura varía gradualmente en base a los mismos micromecanismos. Las microfotografías de la Lámina 5.11 ofrecen muestras de ello. La Figura 5.35, que guarda una similitud prácticamente total con la Figura 5.32, justifica la fractografía observada.

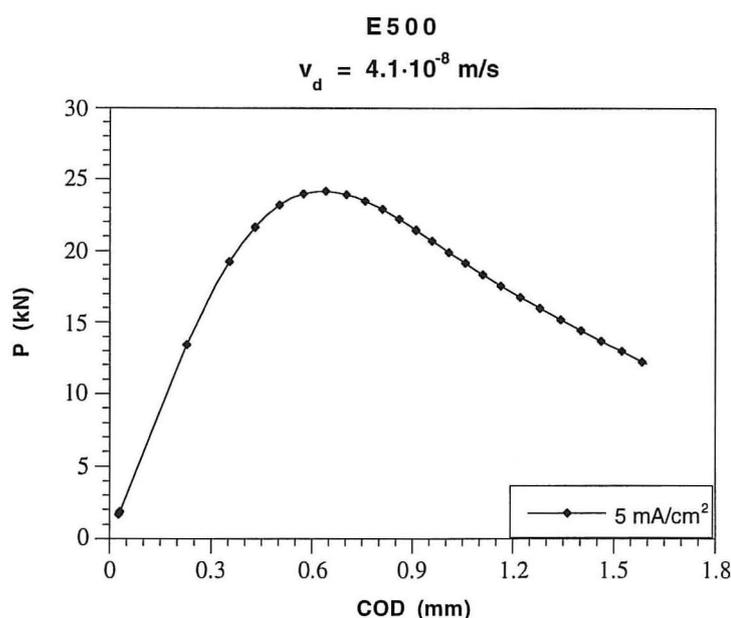


Figura 5.33. Curva característica Carga-COD para el acero E500 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s

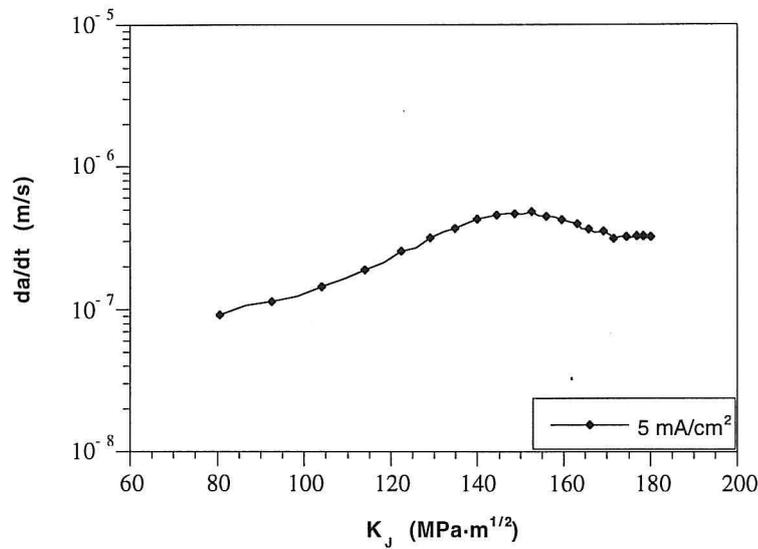


Figura 5.34. Comportamiento da/dt - K_I del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s, en presencia de hidrógeno

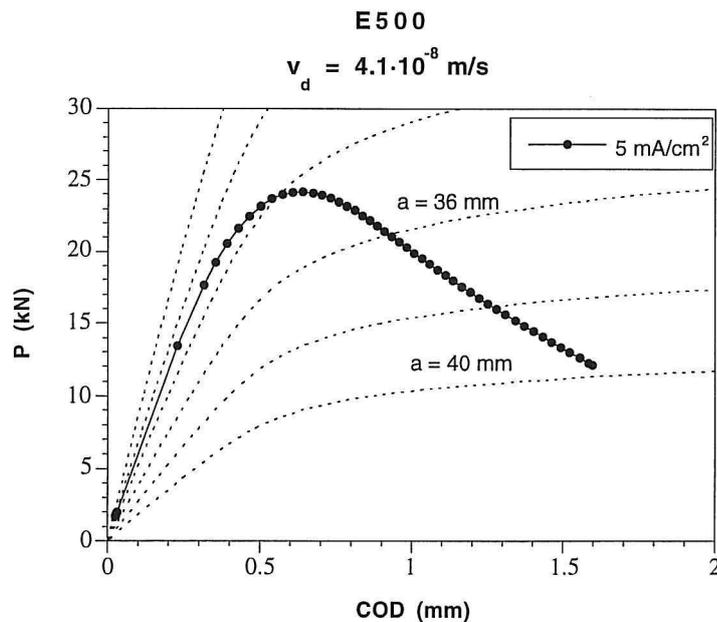
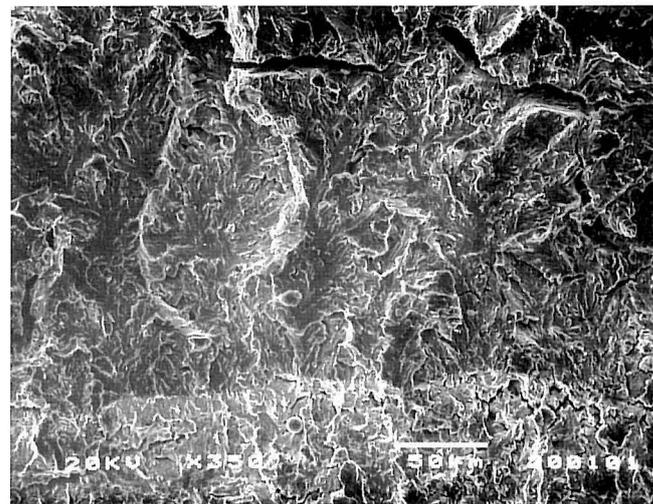
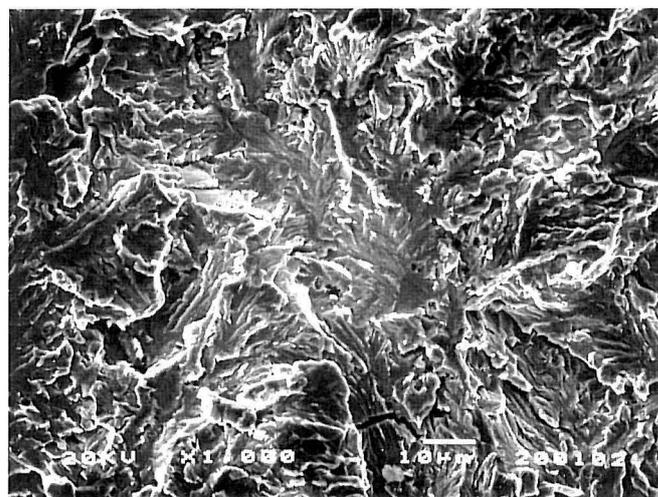


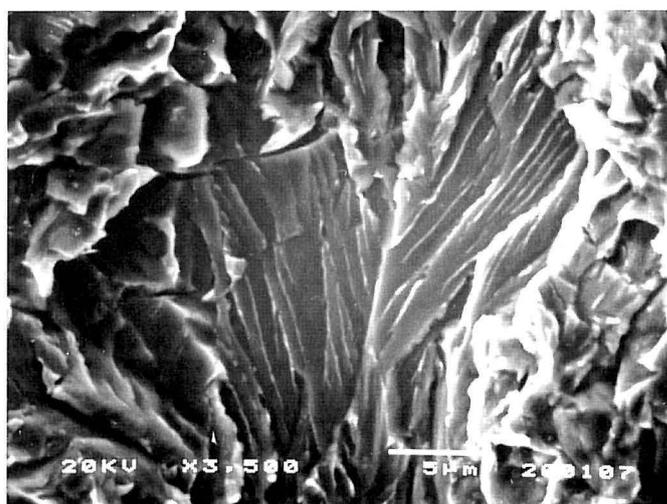
Figura 5.35. Curva Carga-COD del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s, en presencia de hidrógeno en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura



(a)



(b)



(c)

Lámina 5.11. *Fractografías de una muestra de acero E500 ensayada con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s y una densidad de corriente de 5 mA/cm²:*

(a) Zona de propagación

(b) y (c) Detalles de la zona de propagación

4.1.2.3. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s

A la velocidad de ensayo de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s se realizó un análisis similar sobre el acero E500, de nuevo para densidades de corriente de 5 mA/cm² y 10 mA/cm². La influencia de la concentración de hidrógeno, aunque no importante, se muestra algo más clara que en los ensayos realizados en la sección anterior a velocidad superior. Las Figuras 5.36 y 5.37 presentan las curvas características carga-desplazamiento y las derivadas de ellas $da/dt-K_I$, las cuales aportan la velocidad de propagación, para ambos ensayos, en las que se muestra la influencia reseñada. Uno de los efectos se presenta en el valor del factor de intensidad de tensiones umbral de inicio de fisuración que pasó de 68 a 60 MPa·m^{1/2} al aumentar el nivel de hidrógeno. Sin embargo, no se aprecian cambios sustanciales en la velocidad de propagación, para ambos ensayos en el entorno de 10^{-8} a 10^{-7} m/s, crecientes con la sollicitación local, hasta valores de ésta correspondientes a un factor de intensidad de tensiones de 125 MPa·m^{1/2}.

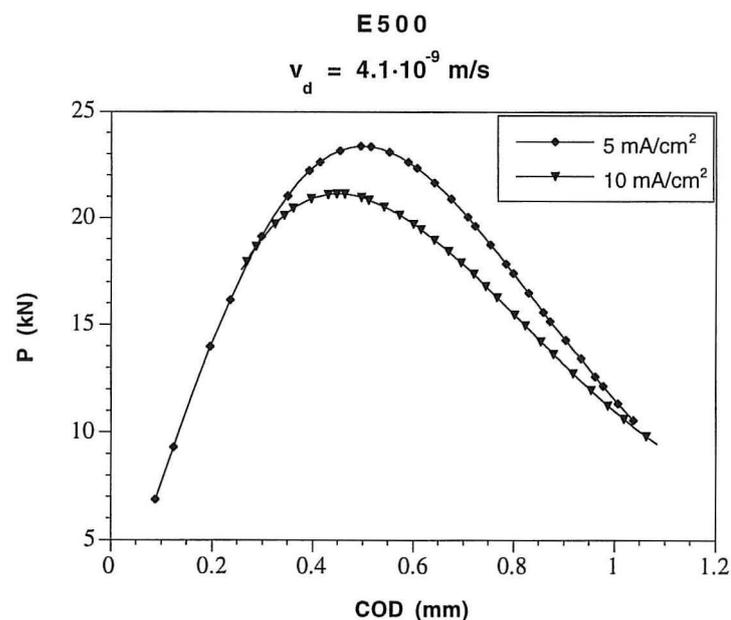


Figura 5.36. Curvas características Carga-COD para el acero E500 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s

Ello es consistente con que la superficie de rotura que presentan ambas muestras es siempre transgranular por formación de clivajes, con apenas presencia de desgarros, aunque ésta aumente con el crecimiento de la fisura. En la Lámina 5.12 aparece un estudio fractográfico sobre la superficie de crecimiento de la fisura de ambas probetas. En ellas se puede apreciar, como característica más reseñable a esta velocidad, la presencia llamativa de procesos de fisuración secundaria.

La Figura 5.38 justifica la mayor presencia de aspectos frágiles, clivajes y fisuración secundaria, en la fisuración al aumentar la presencia de hidrógeno en las condiciones ambientales de estos ensayos con respecto a los anteriores, ya que las curvas *P-COD* cortan a las teóricas en situaciones de menor desarrollo plástico que en las condiciones de aquéllos, Figuras 5.32 y 5.35.

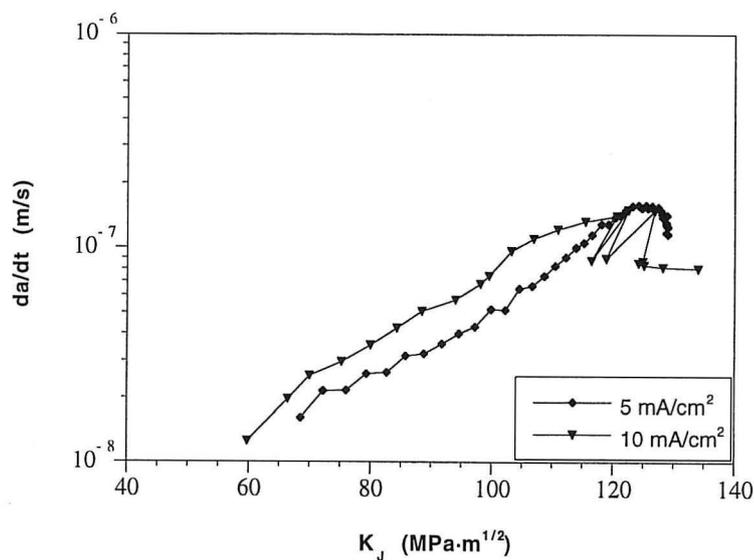
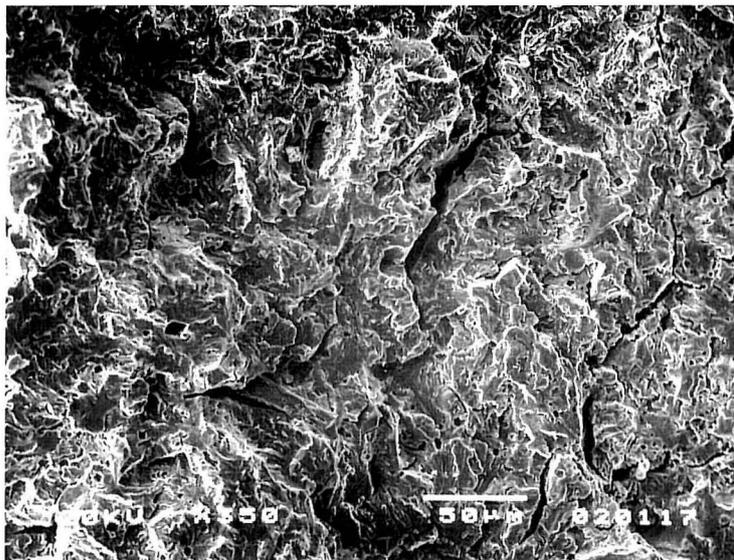
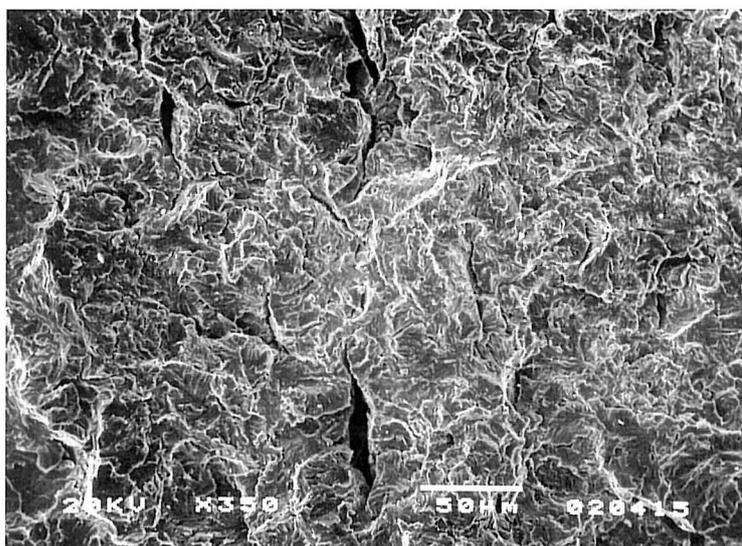


Figura 5.37. Comportamiento $da/dt-K_j$ del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s, en diferentes medios



(a)



(b)

Lámina 5.12. *Fractografías de las muestras de acero E500 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:*

(a) *Zona de propagación (5 mA/cm²)*

(b) *Zona de propagación (10 mA/cm²)*

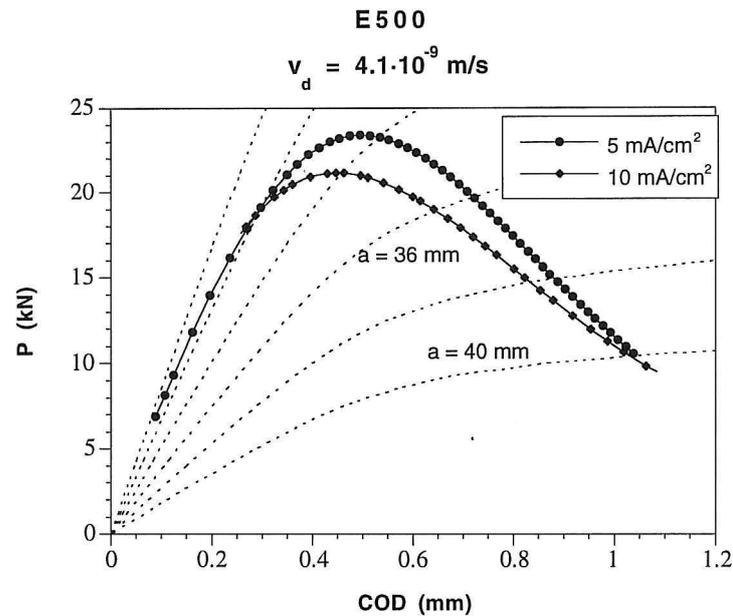


Figura 5.38. Curvas Carga-COD del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura

4.1.2.4. Velocidad de desplazamiento: $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

El análisis efectuado sobre la serie de probetas de un acero E500 ensayadas a la velocidad de sollicitación más lenta, $8.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, se hizo también bajo dos densidades de corriente, 5 y 10 mA/cm². La Figura 5.39 muestra las curvas carga-desplazamiento para ambos ensayos y la Figura 5.40 las curvas $da/dt-K_I$ obtenidas de las anteriores. La influencia de la concentración de hidrógeno se muestra a través del factor de intensidad de tensiones umbral, $K_{I_{thr}}$, que resultó tener un valor de 43 MPa·m^{1/2} para la probeta ensayada a 10 mA/cm² y de 64 MPa·m^{1/2} para la probeta ensayada a 5 mA/cm². A pesar de esta diferencia, ambas muestran un comportamiento muy similar en cuanto a la velocidad de propagación subcrítica, que resultó ser creciente entre $4 \cdot 10^{-9}$ y 10^{-7} m/s , con el factor de intensidad de tensiones, si bien en aquellas zonas de fisuración para el mismo estado de sollicitación local, igual K_I , la propagación es tres veces más rápida para las condiciones de mayor agresividad. En la probeta ensayada con 5 mA/cm² de densidad de corriente, una vez alcanzado un factor de intensidad

de tensiones de $90 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, la velocidad de propagación se estabiliza en valores próximos a 10^{-7} m/s durante la descarga de la probeta. Esto no pudo apreciarse en la probeta ensayada a 10 mA/cm^2 ya que previamente a alcanzar esta situación comenzó a ensayarse a una mayor velocidad de desplazamiento, $8.2\cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. El comportamiento en estas nuevas condiciones de ensayo ya ha sido analizado.

Estas probetas presentaron superficies de propagación frágiles, con roturas transgranulares por formación de clivajes, en los que en ocasiones se aprecia la presencia de trampas de hidrógeno. La presencia de fisuración secundaria o ramificaciones de la fisura principal es bastante acusada. Las micrografías de la Lámina 5.13 muestran zonas típicas de propagación en estas probetas. Estas zonas no presentan cambios que justifiquen el inicio de procesos críticos, siendo siempre continuas. La Figura 5.41 confirma que los mecanismos de fisuración deben ser fundamentalmente frágiles sin apenas presencia de ductilidad.

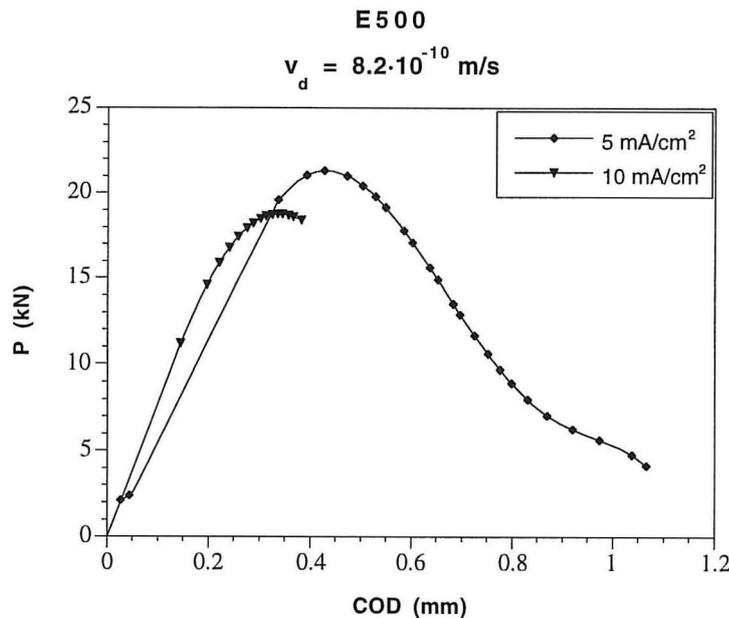
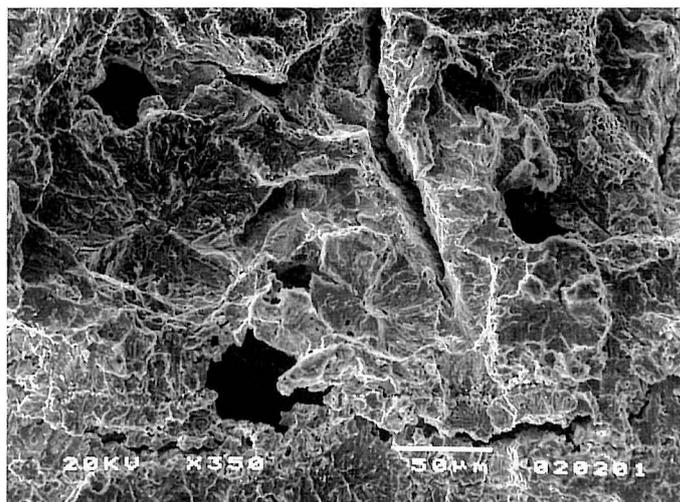
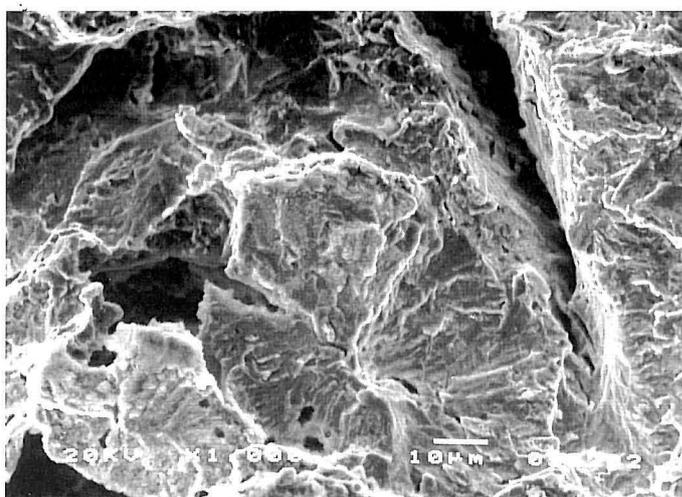


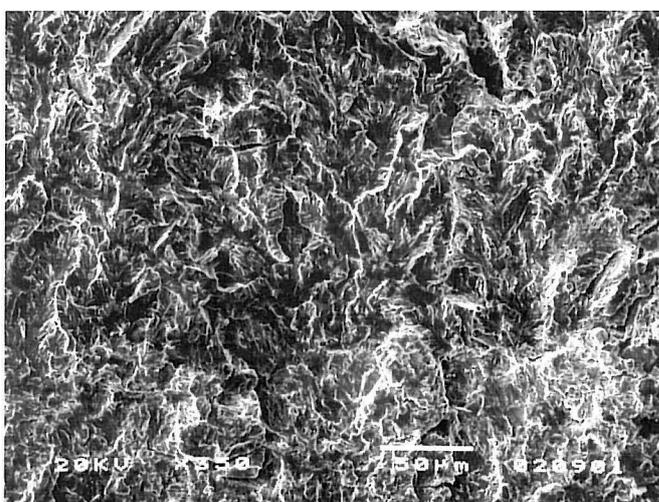
Figura 5.39. Curvas características Carga-COD para el acero E500 ensayado en presencia de hidrógeno con una velocidad de sollicitación de $8.2\cdot 10^{-10} \text{ m/s}$



(a)



(b)



(c)

Lámina 5.13. Fractografías de las muestras de acero E500 ensayadas con una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s en diferentes condiciones ambientales:
 (a) y (b) Zona de propagación con diferentes niveles de detalle (5 mA/cm^2)
 (c) Zona de propagación (10 mA/cm^2)

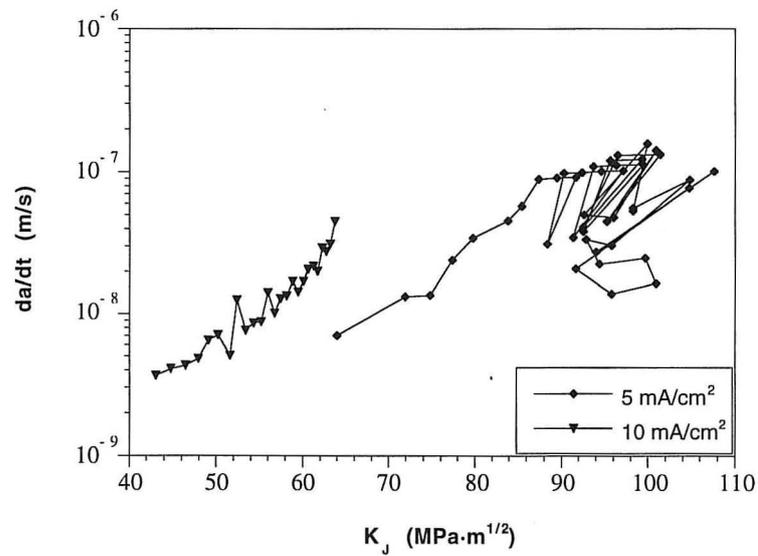


Figura 5.40. Comportamiento da/dt - K_I del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s, en diferentes medios

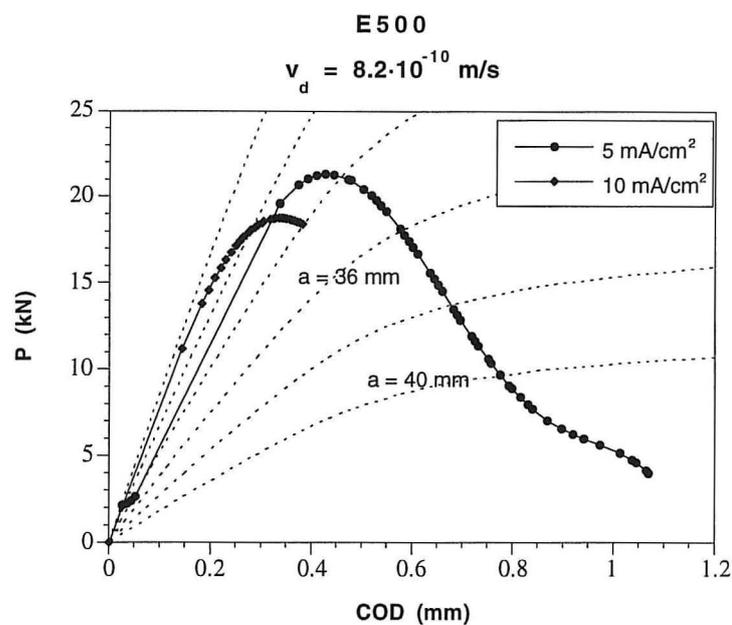


Figura 5.41. Curvas Carga-COD del acero E500, ensayado a una velocidad de sollicitación de $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s, en diferentes condiciones ambientales en comparación con curvas teóricas de diferentes longitudes de fisura