

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 8

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

1. INTRODUCCION

Los aceros microaleados de reciente generación utilizados en plataformas petrolíferas, tanto de conducción como estructurales, se ven sometidos a distintas condiciones ambientales, dependiendo de su situación en las mismas. Por ello estos aceros se diseñan para aportar la máxima resistencia posible a los procesos de fisuración inducidos por esas condiciones, a la vez que para garantizar las exigencias de comportamiento mecánico y de soldabilidad que les son requeridos.

Los métodos de caracterización de procesos de fisuración inducida por el ambiente, tanto los convencionales cualitativos como aquellos utilizados tradicionalmente basados en la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (MFEL), poseen particularidades propias que limitan su rango de aplicación. La caracterización de la resistencia a la fisuración de estos aceros, basada en la MFEL, no es aplicable dado que se muestran, tal como se les requiere, adecuadamente tenaces, desarrollando mecanismos dúctiles de propagación. Bajo estas circunstancias, para estos aceros debe recurrirse a técnicas que tengan en cuenta un grado de plastificación considerable en el proceso de fisuración, lo

que aconseja el empleo de la Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP) para apoyar la caracterización de este comportamiento.

Con este planteamiento, en esta tesis se ha alcanzado el objetivo de desarrollar una metodología de caracterización basada en la MFEP capaz de establecer las características del umbral de resistencia a la fisuración inducida por hidrógeno y de la dinámica de ésta superado el umbral. Esta metodología define la cinética de fisuración en función de los parámetros que controlan la misma, con carácter universal, es decir, válida con independencia del grado de extensión de la zona plástica en el fondo de la fisura. De esta forma recoge, como caso particular, toda la metodología basada en los conceptos de Mecánica de Fractura Elástica Lineal que clásicamente se viene utilizando en la determinación de la velocidad de propagación. Su carácter universal también viene dado por su definición generalista, válida para todo tipo de procesos de fisuración, sean inducidos por ambiente o no.

El desarrollo de esta metodología analítica se ha realizado en varias etapas: *su definición*; *su aplicación* para establecer la caracterización de los procesos de fisuración de los aceros en estudio; *su validación* para garantizar su fiabilidad, y finalmente su aplicación debe permitir el análisis bajo condiciones de aproximación local a la *modelización del comportamiento* mecánico en relación con los aspectos microestructurales propios del material y las condiciones que el ambiente establece en la zona de proceso de la fisuración. De esta forma la metodología desarrollada alcanza el máximo rango de aplicabilidad deseable, cumplimentando todos los objetivos de la tesis.

En los siguientes apartados se establecen a modo de conclusiones los logros o alcances de la tesis en cada una de estas fases.

2. CONCLUSIONES SOBRE EL METODO ANALITICO

El análisis realizado en esta tesis 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 la combinación de esta metodología analítica con un proceso experimental adecuado, también definido, permite obtener relaciones del tipo $(da/dt)-J$, que caracterizan el comportamiento del material bajo condiciones ambientales agresivas tipificadas.

La metodología descrita se ha mostrado apropiada para ser aplicada a los procesos de fisuración estudiados sobre probetas compactas y, en particular, a aquéllos que comportan propagaciones subcríticas asociadas 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.

Esta metodología se ha mostrado muy eficaz para ofrecer unos resultados coherentes de unos ensayos a otros y aportar una gran cantidad de información sobre las variables que caracterizan estos procesos de fisuración, fundamentalmente la velocidad de propagación, da/dt , característico del estado de fisuración y su cinética, y las que los controlan, las condiciones de sollicitación y deformación local a través del valor de la integral J . Esto es imposible de conseguir por técnicas convencionales, especialmente cuando el proceso se asocia al régimen elastoplástico presente por ser los materiales dúctiles y poco susceptibles al ambiente o éste es poco agresivo, o ambas situaciones simultáneamente.

El método analítico es aplicable siempre que sea posible deducir de un proceso experimental el valor de la integral J , como función de las condiciones de sollicitación externa, P , geometría de la fisura, a , y condición geométrica general, es decir, cuando haya soluciones para ello. Por este motivo es aplicable, como aquí se demuestra, al uso de la caracterización de los procesos de fisuración de materiales, ensayados en probetas CT (también valdrían otras geometrías), en las que se pueda registrar la evolución de P y a durante el ensayo. Esto se

consigue experimentalmente mediante el registro *P-COD* del ensayo y la determinación analítica de *a* mediante la intersección de esta curva *P-COD* experimental y las *P-COD* teóricas para cada longitud de fisura, una vez establecido si el material está bajo condiciones de tensión o deformación plana en el ensayo.

3. CONCLUSIONES DE LA APLICACION: CARACTERIZACION Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología descrita y el análisis efectuado en la caracterización de los procesos de FIH de los aceros microaleados en estudio, como constitutivos de su caracterización, permiten obtener como conclusión general que estos aceros microaleados de estructura bainítica resultan susceptibles a presentar procesos de fisuración inducida por hidrógeno. Esta susceptibilidad sigue las pautas de dependencia clásica:

Del material, resultando aparentemente más susceptibles aquéllos de mayor límite elástico cuando la comparación se hace a igualdad de microestructura, es decir, el acero E690 es más susceptible que el E500.

Del medio, y en particular de su agresividad, que en este caso viene dada por la concentración de hidrógeno presente en el material que, al crecer con la densidad de corriente aplicada en el proceso experimental seguido, aumenta la susceptibilidad a la fisuración y ésta se produce bajo mecanismos más frágiles.

De la velocidad de sollicitación, que afecta a la susceptibilidad del material en unas condiciones ambientales dadas, en general no mediante variaciones en los micromecanismos de rotura sino a través de los parámetros que definen las condiciones propias de fisuración y la cinética de ésta, variable con dichas condiciones, de forma que a medida que la velocidad de sollicitación decrece el material se comporta como menos resistente a la fisuración.

La aplicación de la metodología desarrollada permite encontrar un modelo único de comportamiento para cada material y condición estudiada. Este comportamiento se basa en la existencia de un valor umbral de fisuración, una

velocidad de propagación de fisuras y unas condiciones de inestabilidad que definen el final del ensayo. Para todas ellas y en todos los casos ensayados, las conclusiones no sólo alcanzan a los valores de los parámetros que definen el comportamiento, sino también a la identificación de los micromecanismos de fisuración existentes para este tipo de materiales, como paso previo a su modelización final. Las principales conclusiones alcanzadas en cuanto al comportamiento de estos aceros microaleados ante procesos de FIH son:

- Unas condiciones locales de iniciación de la propagación, definidas a partir del umbral K_{th} deducido de J , variables con la velocidad de sollicitación, decrecientes aquéllas al decrecer ésta. Sólo por debajo de una velocidad de sollicitación se puede considerar dicho valor umbral, K_{th} , como independiente de la velocidad de sollicitación y equivalente al concepto generalista que ofrece el parámetro K_{Isc} .
- Unos procesos de fisuración subcrítica, definidos por su velocidad de propagación da/dt (K_I), basados en micromecanismos de rotura local por cuasiclivajes, como corresponde a estos aceros bainíticos, tanto en situaciones de dominio elástico como elastoplástico. Cuando la fisuración es estable bajo condiciones locales de baja sollicitación, K_I bajos, aparecen simultáneamente mecanismos de rotura intergranular. En su presencia la velocidad de propagación es ligeramente superior al clivaje puro, que es independiente de la velocidad de sollicitación, y depende, creciendo con éste, del estado local de sollicitación, K_I .
- La inestabilidad de la muestra ensayada se alcanza por dos razones: la primera, dependiente de las condiciones de ensayo y de la propagación, al alcanzarse las condiciones de descarga de la probeta bajo los propios procesos de fisuración subcrítica, cuyos mecanismos se observan a lo largo de todo el proceso experimental; la segunda, al alcanzarse las condiciones de inestabilidad del material que originan una variación brusca en el proceso de fisuración, el cual se acelera de forma importante asociado, a veces, a la aparición de mecanismos de rotura por microhuecos o, simplemente, a unos desgarros simultáneos a los mecanismos de clivajes y limitantes para éstos. La modelización realizada ofrece condiciones que deben satisfacerse para que se produzca una u otra situación.

- La aparición de microhuecos requiere un estado de deformación plástica propio de las condiciones de fragilización creadas por el ambiente, hidrógeno. A igualdad de condiciones ambientales la velocidad de propagación debida a la inestabilidad local por microhuecos es linealmente dependiente de la velocidad de sollicitación, por lo que ésta deberá ser alta para garantizar la existencia de este mecanismo, ya que si no los mecanismos de clivaje serán más rápidos y se mantendrán, prolongando el proceso subcrítico. Por esta razón, cuando la sollicitación es relativamente lenta, o la deformación plástica local es baja, se alcanzan las condiciones de inestabilidad mediante mecanismos basados en los clivajes de propagación previa a esta inestabilidad.

4. CONCLUSIONES DE LA VALIDACION DE LA METODOLOGIA DESARROLLADA

Una vez comprobada la aplicabilidad de la metodología experimental y analítica a la caracterización de los fenómenos de fisuración inducida por hidrógeno de los aceros microaleados en estudio, ha sido necesario validarla a través de sus resultados, comparando éstos con los obtenidos por otras técnicas más convencionales. No ha sido posible hacerlo con el estudio efectuado sobre aceros microaleados por la inexistencia o poca fiabilidad de la caracterización de sus procesos de fisuración por métodos convencionales. En este sentido, la validación de la metodología presentada se ha realizado mediante la aplicación a materiales y ambientes cuyo comportamiento en fisuración es conocido, contrastando el comportamiento deducido de la metodología desarrollada en esta tesis, como universal, frente al deducido por técnicas convencionales más limitadas.

Para ello se ha aplicado la metodología a la caracterización de la resistencia a la CBT en ambiente marino de un acero de baja aleación, acero 4140, bajo diferentes tratamientos, y por tanto diferentes estados microestructurales, cuyo comportamiento es ampliamente conocido.

Los ensayos realizados bajo diferente velocidad de sollicitación demuestran la influencia clara de este parámetro en el comportamiento en CBT. De ello se

deduce que resulta necesaria la realización de ensayos a una velocidad de sollicitación por debajo de una crítica para obtener situaciones comparables a los ensayos convencionales de CBT. Los resultados ofrecidos por el método analítico propuesto en esta tesis son plenamente coincidentes con los aportados por los ensayos tradicionalmente desarrollados para cada tipo de material cuando las condiciones de ensayo son adecuadas.

5. CONCLUSIONES DE LA MODELIZACION DEL COMPORTAMIENTO

Para justificar el comportamiento ante fenómenos de FIH, variable con el material, el medio y la velocidad de sollicitación, se han analizado las condiciones locales, estados tensionales y de deformaciones y concentración de hidrógeno, presentes en el frente de la fisura durante el proceso de propagación. Así, como paso último en este estudio, se ha establecido un *modelo de aproximación local* que justifica los fenómenos de fisuración inducida por hidrógeno observados en estos aceros. El modelo final deducido se basa en una serie de consideraciones que resumen los avances logrados en el marco de esta tesis en este ámbito. Son las siguientes:

- Siguiendo un modelo anterior [26], se postula que la propagación de fisuras bajo procesos de FIH tiene lugar como una sucesión de roturas locales aisladas, nucleadas y desarrolladas dentro de la zona plástica del fondo de fisura. Dichas roturas se nuclean cuando la deformación plástica aplicada alcanza unos valores críticos determinados por la fragilización producida en dicha zona plástica por la presencia de hidrógeno absorbido por el material. Las roturas son nucleadas en unas posiciones particulares, propias de cada tipo de microestructura dentro de la zona plástica, que son especialmente afectadas por la presencia de hidrógeno, (trampas de hidrógeno).
- El modelo anterior [26], desarrollado originalmente en el campo de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal, justifica el tipo de micromecanismos de fisuración en función de la relación entre los valores umbrales de sollicitación local, K_{Iscr} y parámetros de comportamiento mecánico, σ_y , E , y

microestructurales, d , del material en ensayo. Las condiciones de fisuración intergranular IG y transgranular TG de dicho modelo han sido asumidas por el modelo de la presente tesis para sus procesos de fisuración desarrolladas bajo dominio elástico. Así, al aplicar estas condiciones a la metodología de caracterización desarrollada en esta tesis, introduciendo en los diagramas de carga-desplazamiento, P - COD , las curvas $máxIG$ y $mínTG$, existe una total identidad entre las previsiones y el comportamiento de la fisuración, siempre que ésta esté bajo dominio elástico. La propagación de fisuras inducida por la presencia de hidrógeno puede considerarse, de este modo, como una continua superación de condiciones críticas dadas por la combinación de efectos tensionales, a través de K_J , y de efectos ambientales, a través de la concentración de hidrógeno. La variación de uno de ellos justifica la necesidad de la variación del otro para compensar el efecto y alcanzar las mismas condiciones críticas.

- No obstante la identidad encontrada entre previsiones y realidades de los mecanismos de fisuración, se ha cuestionado la amplitud de la zona entre las condiciones $máxIG$ y $mínTG$ que proviene de una falta de precisión del modelo anterior en el establecimiento de la zona de nucleación del nuevo avance de una fisura, que inicialmente fijaba en toda la zona plástica. El análisis realizado sobre los perfiles de la deformación debida a la sollicitación existente y de la deformación crítica permite definir una nueva zona de máxima probabilidad de nucleación, situada en el rango de distancias de δ a 4δ al frente de fisura existente. La mayor precisión aportada en esta tesis de la zona de nucleación permite al modelo presentado modificar la condición $mínTG$ de forma que la zona donde se pronostica la posible simultaneidad de procesos intergranulares y transgranulares se reduce a la mitad con respecto al modelo anterior, manteniendo una identidad total entre resultados y previsiones. Se consigue así un modelo predictivo muy ajustado.
- La situación, buscada en los aceros microaleados en estudio, de alta resistencia a la fisuración hace que, en función de la agresividad del ambiente y de la velocidad de sollicitación, estos aceros presenten mecanismos de propagación de gran deformación, establecidos bajo

dominio de solicitaciones locales de régimen elastoplástico. Estas situaciones no quedaban cubiertas por el modelo anterior, usado como referencia de análisis, y sí se recogen en el modelo de esta tesis. Así, en él se define la condición de abandono de la zona de dominio elástico, a partir de la cual se producen procesos de propagación (clivajes con desgarramiento creciente) con fuerte desarrollo plástico.

- El modelo finalmente integra la condición de plastificación total, propia del material pero también de la geometría de la probeta en ensayo o del componente en uso, como limitadora del campo de propagación subcrítica, dando inicio a los procesos de fisuración críticos asociados a mecanismos de inestabilidad local en el frente de fisura por formación y coalescencia de microhuecos.
- De esta forma se tiene un modelo general que define el comportamiento de estos aceros ante procesos de fisuración inducida por hidrógeno, una vez caracterizados siguiendo la metodología desarrollada para ello en este trabajo. El modelo delimita en el campo carga-desplazamiento (*P-COD*) diversas regiones, en cada una de las cuales se identifica el tipo de micromecanismos con los que el material establece el proceso de fisuración. Estas regiones son: la región de IG, la mixta IG-TG, la región TG de clivajes puros bajo dominio elástico, la región de clivajes con desgarramiento bajo dominio elastoplástico, y la región de rotura final por formación de microhuecos. A partir de estas regiones el modelo justifica unas previsiones de comportamiento, que han sido contrastadas mediante experimentación para diferentes combinaciones de agresividad de ambiente y sollicitación mecánica, y para los dos aceros E500 y E690.
- En concordancia con las previsiones del modelo establecido en la tesis, el acero E500 no ha mostrado en ningún caso vestigios de intergranularidad, y ha desarrollado procesos de propagación bajo dominio elastoplástico, con presencia de clivajes cada vez más desgarrados a medida que el desarrollo de los ensayos iba adentrando su posición en la zona correspondiente. Por el contrario, el acero E690 ha presentado procesos con intergranularidad parcial, que para las condiciones más lentas y agresivas se han quedado en el borde de presentarse como total, así como apenas ha sido capaz de

desarrollar procesos subcríticos bajo dominio elastoplástico, ya que inmediatamente a la aparición de este dominio han surgido los procesos de inestabilidad propios de la rotura última. Todo esto concuerda con la proximidad entre las dos últimas curvas definidas en la modelización para este acero, resultando un comportamiento global acorde con lo previsto por el modelo.

Una vez definida y validada la metodología de caracterización de procesos de FIH desarrollada en esta tesis, la obtención de un modelo que explica plenamente los resultados obtenidos en su aplicación, a partir de las condiciones de deformación local en relación con los aspectos microestructurales propios del material y las condiciones que el ambiente establece en la zona de proceso de la fisuración, cierra la consecución de los objetivos de la tesis. Un modelo como el desarrollado se convierte así en una herramienta con capacidad de predicción sobre el comportamiento de aceros en servicio, utilizable tanto en el análisis de seguridad estructural y diseño de componentes, como en la mejora del diseño de los propios aceros microaleados.

6. TRABAJO FUTURO

El trabajo desarrollado en esta tesis permite abrir una serie de líneas de actuación a desarrollar en el futuro, tanto en lo concerniente a la aplicación de la metodología propuesta como en el perfeccionamiento y aplicación del modelo desarrollado para los procesos de fisuración inducida por hidrógeno en aceros.

En lo referente a la aplicación de la metodología, al quedar patente que ésta es universal, se tratará de potenciar su aplicación a todos aquellos procesos de fisuración, subcrítica o crítica, que encierren la necesidad de caracterizar las condiciones para las que se produce y la dinámica de la misma.

Así, fuera del ámbito de la fisuración en ambientes agresivos, propio de esta tesis, se piensa en su aplicación a la modelización de los fenómenos de fragilización por envejecimiento de la ferrita, y los resultados aplicarlos a la ampliación de un modelo predictivo propio de este grupo de trabajo [193-194].

También cabe su aplicación en el análisis de defectos, no sólo propios del material, sino propios de la composición geométrica de la probeta de ensayo, o del componente, en el comportamiento ante procesos de fisuración.

Pero sin duda, el campo de aplicación más extenso y factible será aquél para el que se ha desarrollado: la caracterización de procesos de fisuración asistida por ambiente de distintos materiales.

En este sentido ya se ha formalizado el inicio de un nuevo estudio sobre la resistencia a la fisuración inducida por hidrógeno de aceros microaleados para tuberías soldadas, utilizadas en gasoductos, grado X-60 a X-80, alguno de ellos de nuevo desarrollo, así como el correspondiente a los aceros de baja aleación, 2.25 Cr-1 Mo y 2.25 Cr-1 Mo-V, para el uso de reactores de "hidrocracking".

En lo referente a la ampliación del modelo, ésta se centra fundamentalmente en abordar la modelización de la dinámica de propagación, es decir, identificar con apoyo en los principios del modelo la cinética propia de avance de fisura, da/dt , tratando de justificar las observaciones realizadas en la caracterización: el crecimiento de la velocidad de propagación al ir aumentando durante el proceso de ensayo las condiciones locales de sollicitación, y su disminución al decrecer de nuevo estas condiciones. Con relación a ello, también deberá investigarse cuáles son las condiciones de interacción intrínsecas entre las dinámicas de propagación y de sollicitación, de forma que permitan establecer los efectos intrínsecos del material y de la sollicitación en los procesos de fisuración.

Asimismo sería interesante trabajar con otros materiales, otros ambientes y otras geometrías de probeta o componente, junto con otras condiciones de sollicitación para ir teniendo contraste experimental para nuevos ámbitos de comportamiento previstos en el modelo. Los nuevos trabajos previstos, sobre aceros microaleados y de baja aleación, permitirá ampliar esta línea de análisis.

Finalmente, se tiene también previsto la utilización de este modelo, que justifica los micromecanismos de fisuración existentes y los cuantifica, en estudios de aproximación local para predecir, desde el conocimiento de la situación local, el comportamiento global de componentes estructurales. Para este tipo de aplicación se ha planificado la inclusión de técnicas de elementos finitos que

reproduzcan simultáneamente los procesos de movilidad del hidrógeno en el interior del componente, hasta su localización en el frente de las fisuras existentes, y los procesos de fisuración atendiendo a la modelización efectuada, adaptada ésta para su implementación.

En resumen, la metodología de caracterización desarrollada en esta tesis y la modelización de los procesos de FIH realizada, apoyada en la anterior, lejos de ser la terminación de un trabajo se convierten en nuevas herramientas, a partir de las que se abren grandes expectativas de trabajo encaminado al mejor conocimiento de los fenómenos de fisuración en materiales.