

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

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**

Autor:

JOSE ALBERTO ALVAREZ LASO

Director:

D. FEDERICO GUTIERREZ-SOLANA SALCEDO

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor Ingeniero Industrial**

Santander, Mayo 1998

*"... que crezcas para ser auténtico
que siempre conozcas la verdad
y veas las luces que te rodean;
que seas siempre valiente
te pares erguido y seas fuerte
que permanezcas siempre joven."*

Bob Dylan ("Planet Waves" 1974)

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a las siguientes personas y entidades que han contribuido de alguna manera a la realización de esta tesis doctoral:

Al profesor D. Federico Gutiérrez-Solana Salcedo, por su magnífica labor de dirección, por haber puesto a mi alcance todos los medios necesarios para la realización de esta tesis y por el buen humor y entusiasmo que demostró en todo momento.

A los profesores D. Javier Jesús González Martínez, de la E.T.S de Ingenieros Industriales de la Universidad del País Vasco, por el gran interés mostrado hacia este trabajo y por sus valiosos consejos y a D. José María Varona Ruiz por sus certeros comentarios y sugerencias para mejorar la versión definitiva de esta tesis.

A todos mis compañeros de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria, sobre todo a Carlos Aguilar, José A. Casado, Juan A. Polanco y Frederick de Backer, que me han ayudado siempre que lo he necesitado, y en especial a Iñaki Gorrochategui y Gabriel Méndez por su colaboración en la realización de los ensayos y a Luciano Sánchez y Jesús Setién por su cuidadosa labor de microscopía electrónica.

A Irene Aizpurua, por su paciente trabajo de mecanografiado y a Christopher Tyas por su minucioso trabajo en el laboratorio de fotografía.

A los profesores D. Andrés Valiente Cancho y D. Miguel A. Astiz Suárez, de la Universidad Politécnica de Madrid, por las ideas y sugerencias aportadas.

A la empresa Creusot-Loire Industries, representada en la persona de su ingeniero Lionel Coudreuse, que suministró el material necesario para el desarrollo de esta tesis doctoral.

A mis padres, por todo el esfuerzo que han realizado para que yo pudiera alcanzar este objetivo.

El presente trabajo queda incluido dentro de los Proyectos de Investigación financiados por la Comisión Europea, del Carbón y del Acero, CECA, Proyecto nº 7210 KB/934, y por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, CICYT, del Ministerio de Educación y Ciencia, Proyecto MAT 93-0970-CE.

INDICE

CAPITULO 1	
INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
1. EL MARCO: LA FISURACION INDUCIDA POR AMBIENTE EN ACEROS DE CONDUCCIONES Y COMPONENTES ESTRUCTURALES DE PLATAFORMAS OFF-SHORE	1
1.1. <i>El desarrollo de los aceros para tuberías de conducción de instalaciones petrolíferas</i>	2
1.2. <i>Los aceros estructurales de plataformas petrolíferas marinas</i>	4
2. EL ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA: LA FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO EN PLATAFORMAS OFF-SHORE	5

3. UN OBJETIVO DE TRABAJO: DEFINICION DE UNA METODOLOGIA UNIVERSAL DE CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA Y SU APLICACION	7
--	---

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE: LA FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO Y SU CARACTERIZACION	11
---	-----------

1. PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR AMBIENTE	11
2. PROCESOS DE CORROSION BAJO TENSION	13
3. PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO	15
4. PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO EN ACEROS DE CONDUCCIONES Y COMPONENTES ESTRUCTURALES DE PLATAFORMAS MARINAS	21
5. LA CARACTERIZACION DE LOS PROCESOS DE FISURACION SUBCRITICA INDUCIDA POR AMBIENTE	23
5.1. <i>Aplicación de ensayos basados en la MFEL a procesos de FIH</i>	24
5.2. <i>Aplicación de ensayos de tracción lenta a procesos de FIH</i>	28
5.3. <i>Aplicación de ensayos basados en la MFEP a procesos de FIH</i>	32
6. CONSIDERACIONES FINALES	36

CAPITULO 3	
SELECCION Y CARACTERIZACION DE MATERIALES	39
1. INTRODUCCION	39
2. SELECCION DE MATERIALES Y ESTADO DE RECEPCION	40
3. CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL	46
4. COMPORTAMIENTO MECANICO	46
4.1. <i>Ensayos de dureza</i>	47
4.2. <i>Ensayos de tracción</i>	47
5. CARACTERIZACION DE LA TENACIDAD A FRACTURA	52
6. CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR EL AMBIENTE	60
6.1. <i>Ensayos de susceptibilidad</i>	60
6.1.1. Susceptibilidad a la CBT en ambiente marino	61
6.1.2. Susceptibilidad a fenómenos de fisuración inducida por hidrógeno	65
6.2. <i>Ensayos de caracterización de la velocidad de propagación</i>	65
6.2.1. CBT en ambiente marino	67
6.2.2. Fisuración inducida por hidrógeno	67
7. CONSIDERACIONES FINALES	73
CAPITULO 4	
CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION EN REGIMEN ELASTOPLASTICO	75
1. INTRODUCCION	75

2. ANALISIS DE COMPONENTES FISURADOS EN REGIMEN ELASTOPLASTICO	76
2.1. Soluciones para plastificación generalizada	78
2.2. Soluciones en régimen elastoplástico	82
3. APLICACION AL CASO DE PROBETA COMPACTA	84
4. APLICACION A LA CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION DE LOS ACEROS EN ESTUDIO	88
4.1. Metodología analítica	89
4.2. Desarrollo de programas	98
4.2.1. Programa "velocities"	99
4.2.2. Programa "DLJ"	99
4.3. Metodología experimental	99
5. APLICACION A LOS PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO Y A LOS DE CORROSION BAJO TENSION	101
6. CONSIDERACIONES FINALES	114
CAPITULO 5	
CARACTERIZACION DE LOS PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO DE ACEROS MICROALEADOS	117
1. INTRODUCCION	117
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	118
2.1. Selección y preparación de probetas	118
2.2. Condiciones de ensayo	120
2.3. Aplicación	122
2.4. Resultados	122

3. METODOLOGIA ANALITICA	124
3.1. Ensayos de referencia	125
3.2. Proceso analítico sobre los resultados de los ensayos	127
4. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACEROS MICROALEADOS ANTE PROCESOS DE FIH	134
4.1. Efecto de la agresividad	135
4.1.1. Acero E690	135
4.1.1.1. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s	135
4.1.1.2. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s	140
4.1.1.3. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s	143
4.1.1.4. Velocidad de desplazamiento: $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s	146
4.1.2. Acero E500	149
4.1.2.1. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s	149
4.1.2.2. Velocidad de desplazamiento: $8.2 \cdot 10^{-8}$ y $4.1 \cdot 10^{-8}$ m/s	152
4.1.2.3. Velocidad de desplazamiento: $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s	157
4.1.2.4. Velocidad de desplazamiento: $8.2 \cdot 10^{-10}$ m/s	159
4.2. Influencia de la velocidad de sollicitación en cada condición ambiental	162
4.2.1. Acero E690	162
4.2.1.1. Comportamiento con densidad de corriente de 1 mA/cm^2	162
4.2.1.2. Comportamiento con densidad de corriente de 5 mA/cm^2	167
4.2.1.3. Comportamiento con densidad de corriente de 10 mA/cm^2	172
4.2.2. Acero E500	176
4.2.2.1. Comportamiento con densidad de corriente de 5 mA/cm^2	176
4.2.2.2. Ensayos con densidad de corriente de 10 mA/cm^2	179
5. CONSIDERACIONES FINALES	183

CAPITULO 6	
VALIDACION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA	187
1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	187
2. MATERIAL	189
2.1. <i>Caracterización convencional</i>	189
2.1.1. Análisis químico	189
2.1.2. Tratamientos térmicos	190
2.1.3. Caracterización microestructural	191
2.1.4. Caracterización mecánica	191
2.1.4.1. <i>Ensayos de microdureza</i>	191
2.1.4.2. <i>Ensayos de tracción</i>	192
2.1.4.3. <i>Ensayos de tenacidad a fractura</i>	193
2.2. <i>Comportamiento ante procesos de CBT en agua de mar</i>	198
3. APLICACION DE LA METODOLOGIA DE CARACTERIZACION DE LOS PROCESOS DE FISURACION PROPUESTA AL ESTUDIO DE LA CBT DEL ACERO 4140 EN AGUA DE MAR	199
3.1. <i>Técnicas experimentales</i>	199
3.2. <i>Resultados y análisis</i>	200
4. CONSIDERACIONES FINALES	207
CAPITULO 7	
ANALISIS Y MODELIZACION	209
1. INTRODUCCION	209

2. MODELO DE COMPORTAMIENTO ANTE PROCESOS DE FIH BASADO EN LA DEFORMACION LOCAL	210
3. APLICACION DEL MODELO AL COMPORTAMIENTO DE LOS ACEROS MICROALEADOS, E500 Y E690	218
3.1. <i>Aplicación al comportamiento de los aceros microaleados, E500 y E690, en ensayos con desplazamiento constante</i>	218
3.2. <i>Aplicación al comportamiento del acero 4140 en ensayos con desplazamiento y velocidad de desplazamiento constantes</i>	220
3.3. <i>Aplicación al comportamiento de los aceros microaleados, E500 y E690, en ensayos con velocidad de desplazamiento constante</i>	223
4. AMPLIACION DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO ANTE PROCESOS DE FIH CON LA DEFINICION DE LAS CONDICIO- NES LIMITES DE LOS PROCESOS SUBCRITICOS	228
5. MODIFICACION DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO ANTE PROCESOS DE FIH BASADO EN LA DEFORMACION LOCAL	231
6. CONSIDERACIONES FINALES	238
CAPITULO 8	
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	243
1. INTRODUCCION	243
2. CONCLUSIONES SOBRE EL METODO ANALITICO	245
3. CONCLUSIONES DE LA APLICACION: CARACTERIZACION Y RESULTADOS	246

4. CONCLUSIONES DE LA VALIDACION DE LA METODOLOGIA DESARROLLADA	248
5. CONCLUSIONES DE LA MODELIZACION DEL COMPORTAMIENTO	249
6. TRABAJO FUTURO	252
CAPITULO 9 BIBLIOGRAFIA	255
ANEJO CURVAS Y FRACTOGRAFIAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	

CAPITULO 1

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1. EL MARCO: LA FISURACION INDUCIDA POR AMBIENTE EN ACEROS DE CONDUCCIONES Y COMPONENTES ESTRUCTURALES DE PLATAFORMAS OFF-SHORE

Las estructuras y componentes de las plataformas marinas u *off-shore*, al estar inmersas en el mar durante su vida de servicio, son especialmente susceptibles a la aparición de fenómenos de fisuración subcrítica inducida por el ambiente, tales como corrosión bajo tensión o fisuración inducida por hidrógeno.

Tanto las tuberías de conducción de gas o petróleo como los componentes estructurales de las plataformas para extracción de los mismos quedan expuestos a estos procesos. El tipo de material utilizado en la fabricación de cada uno de ellos es diverso, así como lo son las condiciones ambientales de su trabajo. Por tanto, la sensibilidad a estos procesos y sus efectos son muy variados.

En los últimos años se ha producido una evolución continua de los aceros de estas conducciones y componentes tendente a optimizar su comportamiento

mecánico, para obtener reducciones de uso de material o mejoras en las condiciones de transporte con mayores presiones; su tenacidad, para evitar problemas de roturas frágiles en las condiciones agresivas de trabajo por ambiente y temperatura; su resistencia al deterioro, incluyéndose en ello los procesos de fisuración subcrítica debidos a fatiga, condiciones ambientales, o ambos; su operatividad, garantizando una buena soldabilidad para su puesta en obra, y, finalmente, su costo.

1.1. El desarrollo de los aceros para tuberías de conducción de instalaciones petrolíferas

El desarrollo a partir de los años 70 de una explotación masiva de yacimientos de gas natural y la extensión a regiones cada vez más alejadas de los yacimientos de petróleo crearon la necesidad de líneas de transporte por tubería cada vez más largas, trabajando en unas condiciones desfavorables. Especialmente la aparición de yacimientos en las regiones árticas y en los fondos marinos requirió para las mismas unos materiales con propiedades cada vez más exigentes, fundamentalmente en los aspectos mencionados de resistencia mecánica, tenacidad, resistencia al deterioro, tanto ambiental como mecánico, y soldabilidad.

Todo ello, junto con la enorme demanda de material necesario para la fabricación de estas instalaciones, conduce a unas exigencias crecientes con el tiempo de los aceros utilizados, en un proceso evolutivo de sus prestaciones mínimas, necesarias para su uso, resumidas en la Figura 1.1 [1]. Esta evolución de las propiedades ha ido en paralelo con el desarrollo de los aceros, basado en las mejoras establecidas por los procesos de laminación controlada y en la tecnología de microaleación, conjuntamente con la optimización de tratamientos, ya sean del propio proceso, como el enfriamiento acelerado [2], o posteriores, que conjuntamente favorecen determinadas condiciones microestructurales, refinado de grano y formación de ferrita acicular o bainita, adecuadas a un correcto balance entre resistencia, tenacidad y soldabilidad.

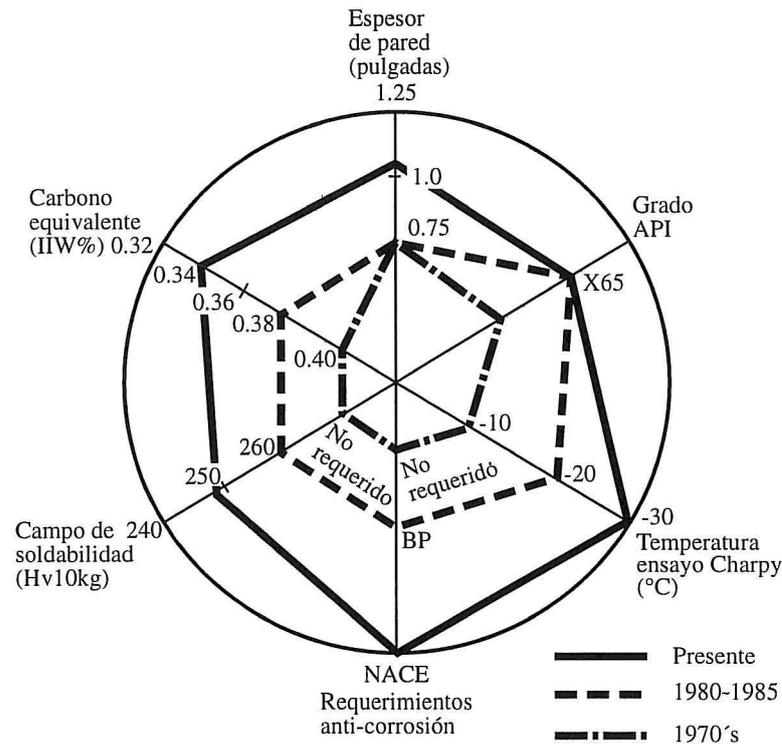


Figura 1.1. Evolución en el tiempo de las propiedades requeridas para tuberías en ambiente agresivo por presencia de H_2S (Extraído de [1])

Así los aceros de alto límite elástico microaleados que compatibilizan estas prestaciones deben también mostrar una adecuada resistencia a fisuración inducida por hidrógeno. Un accidente ocurrido en 1972 en una tubería submarina en el Golfo Pérsico puso en evidencia el problema de la fisuración inducida por hidrógeno en tuberías de transporte de gas o petróleo [2-3]. El principal causante de la fisuración de este tipo de instalaciones es el sulfuro de hidrógeno, H_2S , presente como impureza en las explotaciones de depósitos de gas natural o petróleo. Con el paso del tiempo se ha incrementado la necesidad de explotar bolsas con mayores cantidades de este sulfuro, acrecentándose la problemática de su efecto potenciada por el uso de mayores presiones en las conducciones.

El problema conocido como corrosión bajo tensión por presencia de sulfuros se puede considerar como un proceso de fisuración inducida por hidrógeno en atención a los mecanismos envueltos en el mismo, de generación y transporte de hidrógeno, y al efecto de fragilización local de éste [4-5]. La importancia del

fenómeno y su similitud con otros procesos de corrosión bajo tensión en cuanto al método de estudio han propiciado la existencia de numerosos trabajos sobre el mismo, su caracterización y sus mecanismos, de los que se han ido derivando mejoras en el diseño de los aceros en atención a los efectos microestructurales [3], como la mayor resistencia a la fisuración para estructuras bainíticas y martensíticas revenidas frente a las ferrítico-perlíticas en igualdad de prestaciones mecánicas. La consecución de las microestructuras deseadas y el establecimiento de barreras a la entrada de hidrógeno han ido marcando las líneas de variación de la composición de estos aceros [6]. Al mismo tiempo se han ido estableciendo condiciones límites de uso con las que se fijan criterios de selección de estos aceros para su uso en tuberías [7-10], condiciones válidas tanto para el material base como para sus uniones soldadas [11].

1.2. *Los aceros estructurales de plataformas petrolíferas marinas*

Los aceros estructurales de las instalaciones petrolíferas, de las que las plataformas *off-shore* son un caso particular, presentan en las dos últimas décadas el mismo tipo de compromisos en su desarrollo que los aceros de tuberías. Así, han debido compatibilizar mayores resistencias mecánicas con mejoras en la tenacidad, manteniendo una buena soldabilidad y optimizando la resistencia al deterioro en los ambientes agresivos en los que se utilizan. También en este tipo de instalaciones la gran cantidad de acero necesaria para su construcción ha dirigido el desarrollo hacia la obtención de unos aceros de características cada vez más exigentes bajo condiciones de coste limitado.

De los diferentes tipos de aceros de alta resistencia desarrollados, los microaleados estructurales o de alto límite elástico son los de mayor incidencia en sus aplicaciones actuales, alcanzando a cubrir un 70% de los componentes estructurales de las plataformas marinas [12]. Su competitividad se basa en su relación precio/resistencia, su tenacidad, su versatilidad de procesado y su buena soldabilidad, comparable o incluso mejor que la de los aceros al carbono [13]. Un gran número de trabajos recopilan el control del comportamiento mecánico de estos aceros a través de los elementos de aleación y el tratamiento termomecánico de su proceso para alcanzar las microestructuras óptimas a sus compromisos de comportamiento [14-15].

Pero la aplicación de estos aceros en plataformas exige también de ellos una alta resistencia a procesos de fisuración inducida por el ambiente de uso. En efecto, en las plataformas estos aceros se encuentran sometidos a problemas de corrosión bajo tensión en medio marino en asociación con situaciones de protección catódica o de fisuración en presencia de sulfuros causados por bacterias [16]. En ambos casos el hidrógeno juega un papel predominante en los mecanismos de fisuración por lo que estos aceros deben mostrarse como resistentes a la fisuración inducida por hidrógeno. Por ello su desarrollo avanza en paralelo al de los aceros para conducciones [17-19].

2. EL ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA: LA FISURACION INDUCIDA POR HIDROGENO EN PLATAFORMAS OFF-SHORE

Un importante número de plataformas del mar del Norte han sufrido procesos de fisuración cuyo estudio ha demostrado que estaban inducidas por la presencia de hidrógeno [20]. Las conclusiones de varios laboratorios europeos entre 1988 y 1989 sobre esta situación establecen que [21]:

- Se trata en todos los casos de fisuración asistida por hidrógeno, preferentemente en zonas afectadas térmicamente por las soldaduras, aun cuando la propagación a menudo penetra en el material base.
- La protección catódica, resuelta mediante ánodos de sacrificio de zinc, establece unos potenciales de protección, comprendidos entre -950 y -1050 mV/ECS, para los cuales la generación de hidrógeno es importante.

Como consecuencia, los organismos de seguridad británicos han preparado una guía de empleo [22] de estos aceros de alto límite elástico en plataformas marinas con las siguientes directrices:

- El proceso metalúrgico de fabricación de los materiales utilizados debe llevar a una óptima homogeneidad, tanto en las propiedades mecánicas como en la dureza, para favorecer la resistencia a la fisuración inducida por hidrógeno.

- El control del proceso de protección catódica debe ser superior, y en cualquier caso limitarse el potencial a aquél que no produzca efectos de fisuración en las condiciones de ambiente reales, sugiriendo no descender de -850 mV/ECS. Una solución propuesta consiste en reemplazar el sistema de protección por ánodo de zinc por sistemas potencioestáticos que aseguren potenciales de protección menos electronegativos.
- El acero debe ser adecuado para ofrecer procedimientos de soldadura que minimicen las zonas afectadas susceptibles a los procesos de fisuración.

Paralelamente durante las dos últimas décadas se han desarrollado numerosos proyectos de investigación y estudios, en gran parte, más de treinta programas desde 1986, bajo la financiación de la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA) [5,15,23], dedicados a diferentes aspectos de la fisuración inducida por hidrógeno de aceros estructurales de alta resistencia, como son la caracterización del comportamiento de nuevos aceros en ambientes agresivos propios del entorno de las plataformas marinas, la comparación de las técnicas de caracterización para determinar su fiabilidad o el desarrollo de medidas indirectas que garanticen la buena resistencia a la fisuración de los aceros, o la modelización de los procesos de fisuración inducida por hidrógeno para aportar un mejor conocimiento del papel en ellos de las variables metalúrgicas de los aceros, aplicable luego a la mejora de éstos.

Estos proyectos han ido proporcionando un avance muy importante en el conocimiento de estos procesos, lo que ha permitido nuevos desarrollos de aceros resistentes a la fisuración que, a su vez, garantizan mejores prestaciones en los otros aspectos a cubrir por estos aceros: resistencia mecánica, tenacidad y soldabilidad. De esta manera se ha llegado al desarrollo de aceros de alta resistencia y tenacidad, cuyo comportamiento en fisuración viene precedido de procesos de plastificación importantes, tanto más cuanto menos agresivo es el ambiente, para los que los métodos de caracterización de su resistencia a la fisuración convencionalmente utilizados no son válidos, salvo como índice cualitativo de su resistencia [15].

3. UN OBJETIVO DE TRABAJO: DEFINICION DE UNA METODOLOGIA UNIVERSAL DE CARACTERIZACION DE PROCESOS DE FISURACION INDUCIDA Y SU APLICACION

El momento actual de desarrollo de los aceros ha sobrepasado, en lo que a resistencia a la fisuración inducida por hidrógeno se refiere, el marco de comportamiento para el que resultan válidas las técnicas de caracterización convencional. Resulta indispensable encontrar un método de caracterización universal que aporte valores cuantitativos a la definición de este comportamiento para cualquier material y en cualquier medio.

Esta necesidad marca el principal objetivo de esta tesis: el desarrollo de una metodología general de caracterización de los procesos de fisuración subcrítica inducidos por un ambiente agresivo. Esta metodología debe definir 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.

El trabajo se motiva en un marco más concreto, el correspondiente al estudio de la resistencia a la fisuración de unos aceros microaleados soldables utilizados en elementos estructurales de plataformas submarinas [24]. La comprobación inicial de que los métodos de caracterización convencional basados en la Mecánica de Fractura Elástica Lineal presentan serias limitaciones para caracterizar las situaciones de fisuración, en medios para los que los aceros en estudio ofrecen una resistencia importante, justifica de pleno el desarrollo de la metodología mencionada, que debe basarse en conceptos de Mecánica de Fractura Elastoplástica.

El establecimiento de esta metodología, cuya aplicabilidad sería extensiva a cualquier proceso de fisuración subcrítico, amplía el alcance de la tesis a límites muy superiores a los meramente establecidos por el material que inicialmente la motiva. Por ello, tras aplicarse a los aceros microaleados en estudio tratando de caracterizar de forma exhaustiva su comportamiento, deben validarse metodología y formas de aplicación sobre situaciones de comportamiento conocido. Para ello se ha elegido como contraste la caracterización del

comportamiento frente a la corrosión bajo tensión en agua de mar de aceros de baja aleación, tipo 4140, conocido de forma precisa bajo todas sus condiciones microestructurales [25] y modelizado de forma precisa en todo tipo de comportamientos, fisuración intergranular y transgranular [26].

Una vez validada la metodología y su aplicación para establecer la caracterización de los procesos de fisuración, ésta debe permitir el análisis bajo condiciones de aproximación local que permita modelizar el 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. Así la metodología alcanzaría el máximo rango de aplicabilidad deseable: caracterización del comportamiento macroscópico con aporte de valores cuantificables para uso en análisis de seguridad estructural y diseño, y modelización de los micromecanismos de fisuración a escala local en relación con los rasgos microestructurales propios del material, necesario para el mantenimiento de las mejoras en el diseño del propio material.

La Figura 1.2 establece el guión de trabajo que, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, se sigue en esta tesis para cubrir estas actividades.

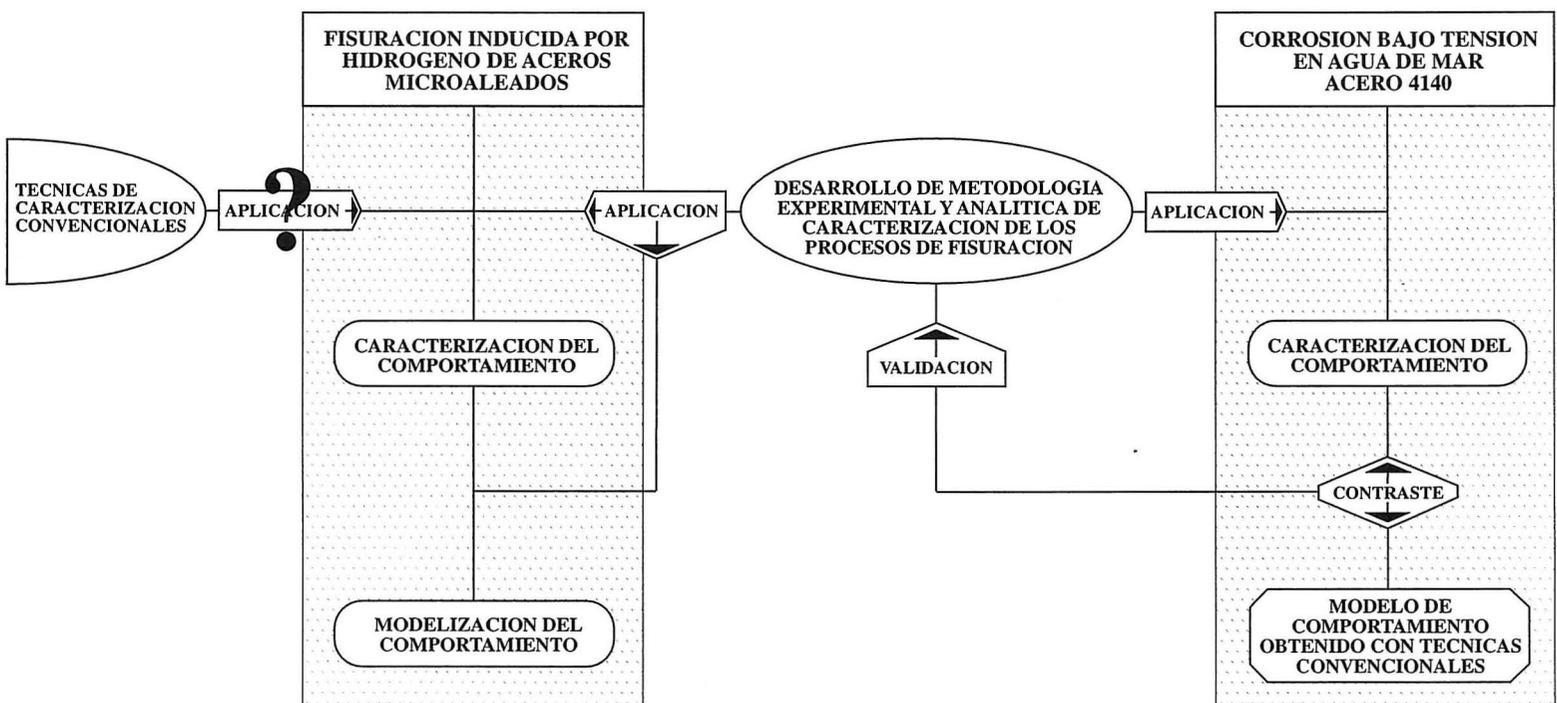


Figura 1.2. Organigramma de actividades de la tesis