

Ensayos de fatiga en soldaduras circunferenciales de un acero X60 empleado para gasoductos



ENSAYOS DE FATIGA EN SOLDADURAS CIRCUNFERENCIALES DE UN ACERO X60 EMPLEADO PARA GASODUCTOS

I. Montero¹, M. Carboneras^{2*}, J.C. Suárez²

¹ Enagás Transporte SA.U. Dirección General de Infraestructuras. Gerencia de Equipos y Materiales
Paseo de los Olmos, 19. 28005 Madrid. España

² Centro de Investigación en Materiales Estructurales (CIME). ETSI Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
Avda. de la Memoria, 4. 28040 Madrid. España

* Persona de contacto: monica.carboneras@upm.es

RESUMEN

El presente trabajo persigue como objetivo la evaluación del comportamiento a fatiga de una soldadura de construcción (*girth weld*; en soldadura y en metal base) de un gasoducto existente de transporte de gas natural. El estudio experimental se ha llevado a cabo con probetas de tubería soldada de acero API 5L PSL2 grado X60 con costura longitudinal realizada mediante arco sumergido (SAW-L), procedentes directamente de la red de gasoductos en servicio de Enagás, para mayor reproducibilidad de las condiciones reales de servicio. Se han mecanizado probetas normalizadas tipo compacto (CT) con curvatura, extraídas de la zona del baño de fusión en la unión soldada circunferencial de unión de carretes, realizada mediante soldadura con electrodo celulósico, así como probetas de idénticas características obtenidas del metal base. Esta tipología de probeta permite considerar el efecto de la curvatura en la medida de la tenacidad a la fractura, efecto que ha sido ya objeto de diversos estudios, evidenciando la problemática de emplear probetas planas, para las que el constreñimiento plástico es menor. Se han realizado ensayos de propagación de grietas por fatiga en máquina de ensayos con un sistema multiprobeta, provisto de un utillaje de introducción de carga específicamente diseñado y construido para ensayar de forma simultánea hasta cinco probetas, colocando extensómetros en la boca de la entalla de cada una de ellas para poder determinar el CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) a lo largo del ensayo. La generación de una pequeña fisura o pre-grieta inicial por fatiga a partir de la entalla inicial mecanizada (pre-agrietamiento) y el posterior análisis post-ensayo hacen posible la determinación de los mecanismos de progresión de la grieta por fatiga en el cordón de soldadura, para su futura comparación con el mismo acero fragilizado con hidrógeno. Los ensayos realizados han permitido determinar la velocidad de propagación de grieta (da/dN) en función de la variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK), desarrollando un estudio comparativo del comportamiento a fatiga del cordón de soldadura, con relación al del metal base, bajo las mismas condiciones de ensayo.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, Crecimiento de grieta, Soldaduras circunferenciales, Gasoducto

ABSTRACT

The aim of this work is to evaluate the fatigue behaviour of a girth weld (weld and base metal) of an existing natural gas transmission line. The experimental study has been carried out with welded LSAW pipes, API 5L PSL2 grade X60 material. Normalized compact tension (CT) test specimens with curvature have been machined, extracted from the girth weld, made by welding with a cellulosic electrode, as well as specimens with identical characteristics obtained from the base metal. This type of specimen allows to consider the effect of curvature on the measurement of fracture toughness, an effect that has already been the subject of various studies, evidencing the problem of using flat specimens, for which the plastic constraint is lower. Fatigue crack propagation tests have been carried out in a testing machine with a multi-specimen system, provided with a specifically designed tool for applying the load and built to simultaneously test up to five specimens, placing extensometers at the mouth of the notch of each one of them to be able to determine the CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) throughout the test. The generation of a small initial fatigue crack or pre-crack from the initial machined notch (pre-cracking) and the subsequent post-test analysis make it possible to determine the progression mechanisms of the fatigue crack in the weld bead, for its future comparison with the same hydrogen embrittled steel. The tests carried out have allowed to determine the crack propagation speed (da/dN) as a function of the variation of the stress intensity factor (ΔK), developing a comparative study of the fatigue behaviour of the weld bead, in relation to that of the base metal, under the same test conditions.

KEYWORDS: Fatigue, Crack growth, Girth welds, Gas pipeline

1. INTRODUCCIÓN

La apuesta por el hidrógeno como vector energético futuro para la descarbonización está siendo ampliamente respaldada a nivel institucional en Europa, donde la Comisión Europea está impulsando numerosas iniciativas encaminadas a desarrollar una red de transporte que conecte los centros de producción con las zonas de demanda. Más aún, estableciendo grandes corredores que conecten unas zonas de Europa potencialmente productoras, como es el caso de la península ibérica, con otras zonas ampliamente demandantes, como es el centro del continente.

Una de las principales iniciativas es el *European Hydrogen Backbone* (EHB), en la cual participa España a través de su operador de transporte certificado (TSO, *Transmission System Operator*), Enagás.

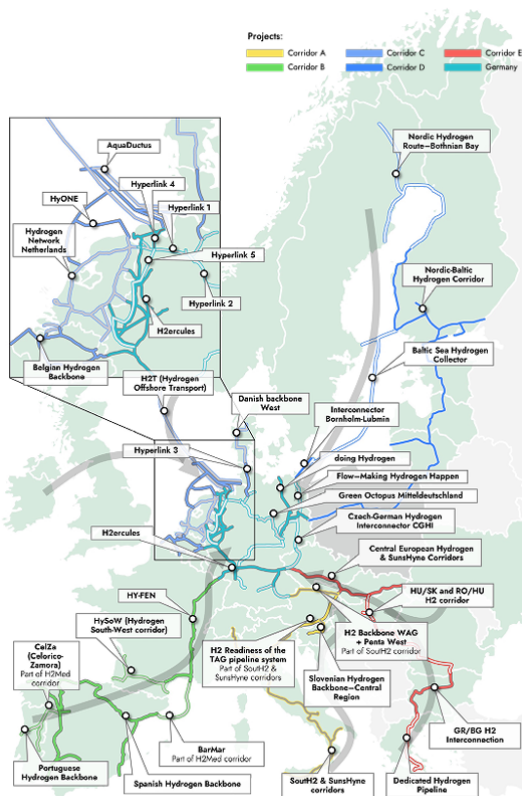


Figura 1. *European Hydrogen Backbone*. Propuestas de infraestructuras presentadas por cada país. Fuente: EHB.

Además de construir nuevas infraestructuras, se requiere reconvertir otras existentes de transporte de gas natural. En el caso de España, una parte de los 11000 km de la Red de Transporte pretende ser reconvertida, para lo cual debe hacerse un análisis detallado de la misma con vistas a garantizar la viabilidad técnica de la reconversión. Estos gasoductos de transporte están contruidos en acero al carbono, de acuerdo con el estándar API 5L/ISO 3183 [1, 2], en diferentes grados.

La actual configuración de la Red española puede considerarse como mallada y, por ello, no existen grandes oscilaciones de presión. Pero la reconversión de parte de los gasoductos implicará romper con esa configuración y dejarlos expuestos a unas condiciones de operación mucho más severas, donde se producirán significativas variaciones de presión, sometiendo a los gasoductos a tensiones cíclicas, lo cual les expone más si cabe a fatiga y a la generación de daños en el gasoducto. Normalmente estos daños comienzan en discontinuidades del material, como entallas o poros, y avanzan debido a las tensiones cíclicas hasta alcanzar el punto en que no se puede soportar la tensión y se genera la rotura por fatiga.

Más aún, las soldaduras para unión de tubos (girth welds) realizadas durante la construcción de la infraestructura son zonas de concentración de tensiones, todavía más propicias a experimentar un fenómeno de propagación de grietas por fatiga (FCG).

Por estos motivos, paralelamente al estudio de comportamiento de materiales de gasoductos expuestos a hidrógeno, se hace necesario evaluar su aptitud en caso de que sean sometidos a un mayor número de ciclos de presión. Los resultados de este estudio permitirán su comparación con los realizados para el mismo material en atmósfera de hidrógeno.

En una fase posterior, los resultados experimentales obtenidos proporcionarán importante información para completar la evaluación de la infraestructura aplicando criterios de mecánica de la fractura, en línea con lo que se establecerá en la futura EN 1594-2 [3].

Para estos estudios se ha desarrollado un programa de I+D completo, donde colaboran la Universidad Politécnica de Madrid (Centro de Investigación en Materiales Estructurales, CIME) y Enagás. Será objeto también de estos estudios validar la aptitud del sistema desarrollado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización de estos ensayos se ha utilizado el equipamiento desarrollado conjuntamente por CIME-Enagás para los estudios de comportamiento a fatiga en servicio hidrógeno.

Dicho equipamiento fue diseñado y construido siguiendo la metodología y desarrollo llevado a cabo por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST), el cual permite la realización de ensayos a fatiga en condiciones representativas de la operación real de estas infraestructuras (presión y tensión), tanto para gas natural como para hidrógeno 100%.

Igualmente, el sistema permite albergar hasta 5 probetas no aplanadas de dimensiones normalizadas según ASTM E647 [4], además de una célula de carga interior (con objeto de evitar el efecto del rozamiento en el vástago de

introducción de carga en la medición) y los extensómetros situados en la boca de la entalla de cada probeta para medir el CMOD (*crack mouth opening displacement*). Si bien la normativa de referencia contempla la realización de 3 ensayos, la posibilidad de ensayar 5 probetas simultáneamente, en las mismas condiciones (tensión, presión y porcentaje de hidrógeno), permite obtener resultados estadísticos más fiables y representativos, y en un menor periodo de tiempo.

Las características del material objeto de estudio se recogen en la Tabla 1, tratándose de un acero API 5L X60 profusamente empleado en la construcción de los primeros gasoductos de España.

Tabla 1. Características del material objeto de estudio.

Proceso fabricación	Acero API 5L	NPS (in.)	Espesor (mm)	Material aporte soldadura
SAW-L	X60	20	9,53	6010 + 8010

Un elemento diferenciador de estos ensayos con respecto a lo indicado en las normas de referencia es que las probetas de ensayo tipo CCT no son aplanadas, sino que mantienen la curvatura de la tubería. Esto se ha hecho así para tener una mayor reproducibilidad de las condiciones reales de servicio, al no inducir en ellas deformaciones ni alterar sus propiedades mecánicas. Esta tipología de probeta permite considerar el efecto de la curvatura en la medida de la tenacidad a la fractura, efecto que ha sido ya objeto de diversos estudios [5,6], evidenciando la problemática de emplear probetas aplanadas.

Ello se ha tenido en cuenta en el diseño del utillaje interior de la cámara de ensayo, como se muestra en la Figura 2, donde se observa la descomposición de fuerzas y momentos aplicados sobre la probeta.

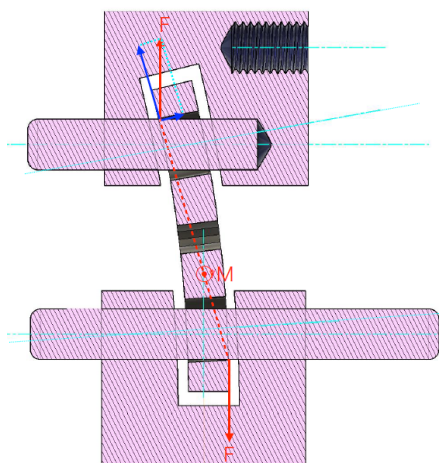


Figura 2. Cargas aplicadas sobre la probeta curva.

Otra particularidad del utillaje es que para su diseño se ha considerado que debe permitir someter a las probetas a tensiones equivalentes a la presión de servicio del gasoducto (la Red actual se diseñó para una MAOP de, en unos casos 72 barg y, en los más recientes, 80 barg).

Este diseño garantiza que, en caso de rotura de alguna de las probetas durante el ensayo, la carga se puentea, sin afectar al resto de las probetas, pudiendo continuar con el ensayo de fatiga. La Figura 3 corresponde a una imagen del montaje del utillaje interior con las probetas y sus extensómetros.

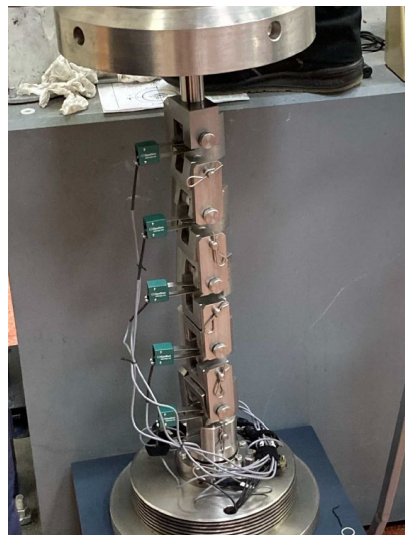


Figura 3. Utillaje interior.

El conjunto del sistema se integra en una máquina de ensayos mecánicos que permite la realización de los ensayos de fatiga a bajas frecuencias. En este caso, los ensayos son realizados en aire, pero el equipo tiene la posibilidad de efectuarlos en atmósfera de hidrógeno a presión.

Las probetas antes de ser sometidas al ensayo de fatiga son pre-agrietadas, como se observa en la Figura 4.

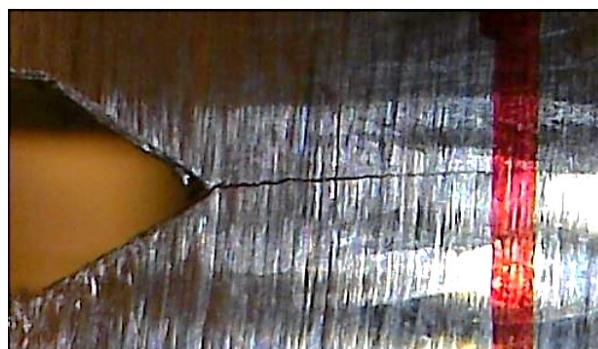


Figura 4. Pre-grieta de la probeta CCT.

El equipo experimental se complementa con otros elementos de control y operación (panel de reguladores, válvulas de alivio de sobrepresión, instrumentación, etc.), así como de seguridad (detectores de gas, campana de extracción), para garantizar que la realización de los ensayos es precisa y segura.

Los datos experimentales obtenidos a partir de los ensayos (fuerzas, desplazamientos y CMOD para cada una de las probetas) son tratados mediante un software

específico desarrollado expresamente para el proyecto de investigación por el CIME, como se observa en la Figura 5. El tratamiento de dichos resultados permite determinar la velocidad de propagación de grieta (da/dN) en función de la variación del factor de intensidad de tensiones (ΔK).

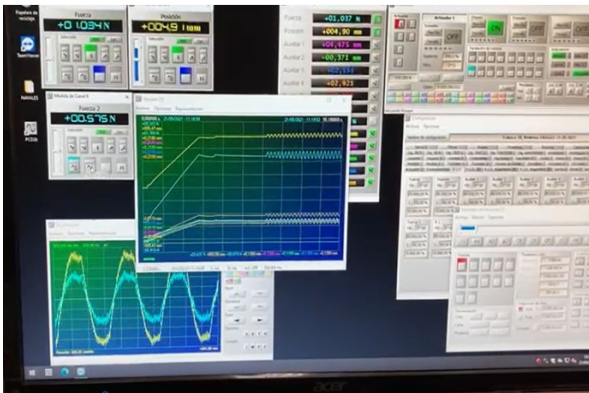


Figura 5. Software propietario para tratamiento de datos de crecimiento de grietas en probetas con curvatura.

3. RESULTADOS

Dado que en la fase de pre-agrietamiento la probeta ha experimentado también el efecto de la fatiga, los ciclos a los que ha sido sometida deben ser considerados. En la Tabla 2 se presenta el número de ciclos de pre-agrietamiento correspondiente a cada probeta ensayada.

Tabla 2. Número de ciclos de pre-agrietamiento en probetas de metal base (B1-B5) y probetas de unión soldada (S1-S5).

B1	B2	B3	B4	B5
15140	28494	20831	27948	26566
S1	S2	S3	S4	S5
30293	32046	34434	36229	37086

El número de ciclos en la probeta B1 es menor porque fue la primera en ser pre-agrietada y se le tuvo que incrementar la fuerza aplicada para que progresara la grieta. Por el contrario, a las restantes probetas ya se le aplicó desde el principio dicho valor de fuerza incrementado.

Una vez pre-agrietadas las probetas, se procedió con los ensayos de fatiga, cuyos resultados se presentan a continuación.

3.1. Unión soldada

El ensayo de las probetas extraídas de la zona de soldadura (SX), con su posterior tratamiento de datos, permite establecer para cada una de ellas los valores de da/dN a lo largo del tiempo que dura el ensayo (en minutos). Para ello se determina la flexibilidad de la

probeta a medida que progresa la grieta por fatiga, lo que permite conocer la longitud de la grieta en base a una calibración previa. Dichos valores se presentan en la Tabla 3 y Figura 6 siguientes.

Tabla 3. Valores promedio de pendiente de la recta de descarga en probetas de unión soldada, en mm/min.

	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	Tr. 4	Tr. 5
S1	0.0010	0.0048	0.0146	0.1746	0
S2	0.0003	0.0038	0.0065	-0.0010	---
S3	0.0004	0.0011	0.0012	-0.0011	---
S4	7e-05	0.0004	0.0004	-0.0033	-0.0013
S5	0.0008	0.0004	0.0130	0.3945	0

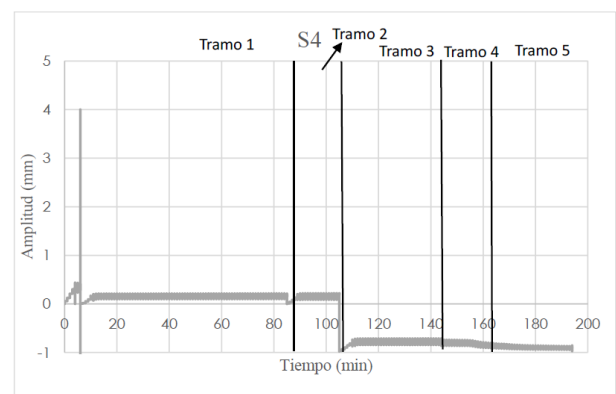


Figura 6. Gráfica de ensayo de fatiga en probeta CCT, para distintas condiciones de carga.

3.2. Metal base

De igual forma, se ensayaron a fatiga las probetas correspondientes al metal base (BX), obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores promedio de pendiente de la recta de descarga en probetas de metal base, en mm/min.

	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	Tr. 4	Tr. 5	Tr. 6
B1	0.0004	0.0030	0.0212	0.3229	---	---
B2	0.0007	0.0107	0.1289	0.4831	0	---
B3	-5e-06	0.0019	0.0008	0.0078	0.0603	---
B4	0.0010	0.0222	0.3295	0	---	---
B5	0.0003	0.0011	0.0126	-0.0003	0.0408	0.0626

3.3. Velocidades de crecimiento de grieta en unión soldada y metal base

En las Figuras 7 y 8 se representan, de forma ampliada, las velocidades de crecimiento de grieta frente al número de ciclos para cada una de las probetas ensayadas, tanto en unión soldada como en metal base.

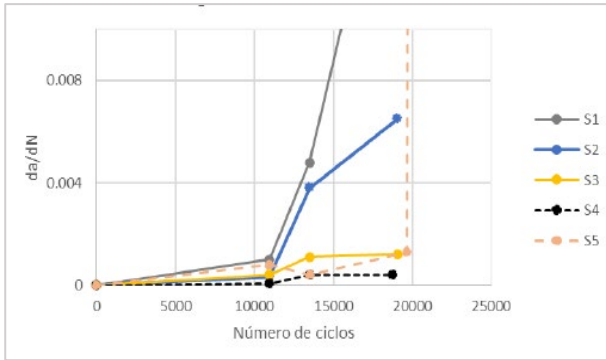


Figura 7. Velocidad de crecimiento de grieta vs número de ciclos en unión soldada (probetas S1-S5). Gráfica ampliada.

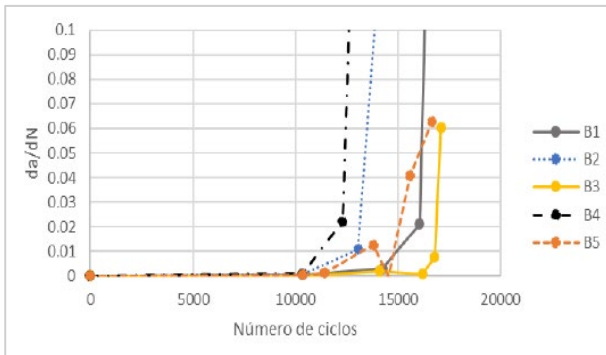


Figura 8. Velocidad de crecimiento de grieta vs número de ciclos en metal base (probetas B1-B5). Gráfica ampliada.

Por último, se determina el número de ciclos acumulados en cada probeta sometida a fatiga, incluyendo el pre-agrietamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Número de ciclos acumulados en cada probeta.

Probeta	Unión soldada	Metal base
1	82758	50735
2	84511	64089
3	86899	56426
4	88694	63543
5	89551	62161

Se observa que la unión soldada, en comparación con el metal base, requiere un mayor número de ciclos y en ella los valores de velocidad de crecimiento de grietas son menores.

4. DISCUSIÓN

4.1. Unión soldada

La existencia de valores de pendiente negativos se explicaría por una rotación del utillaje, que genera una redistribución de cargas en el resto de probetas y una medida incorrecta del extensómetro en esa probeta. Esta

rotación fue observada y documentada. Por ese motivo, no se han tenido en cuenta los valores negativos para elaborar las gráficas.

De forma general, se observa que durante los primeros 10000 ciclos las probetas presentan un comportamiento similar. Superado este umbral, el comportamiento de cada grieta se ve condicionado por la microestructura del material (Figura 9), así como por las condiciones superficiales de cada probeta.

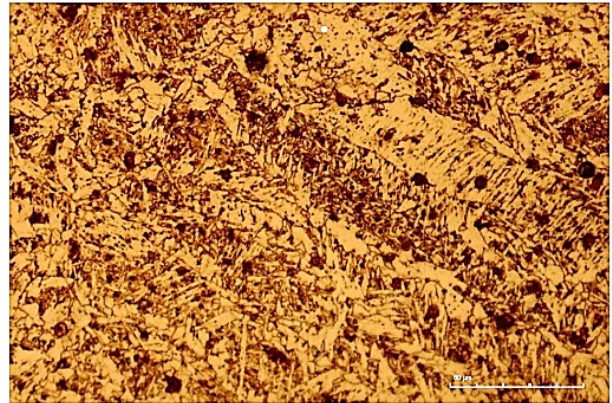


Figura 9. Micrografía de la unión soldada.

4.2. Metal base

En todos los casos, la velocidad de crecimiento de grieta obtenida es similar hasta aproximadamente 12500 ciclos debido a que la microestructura de las cinco probetas es la misma.

Superado este número de ciclos, la microestructura (Figura 10) y condición superficial influyen en la variación de la velocidad de crecimiento de grieta de unas probetas con respecto a otras. Microestructuras con un tamaño de grano ligeramente más grueso muestran una mayor velocidad de crecimiento de grieta.



Figura 10. Micrografía del metal base.

Comparativamente, el comportamiento de las probetas 3 y 5 difiere respecto de las otras tres, posiblemente debido a algún efecto particular en sus microestructuras, como pueden ser tensiones residuales de compresión, que dificultan el avance de la grieta.

4.3. Comportamiento de la unión soldada frente al metal base

El mayor número de ciclos en la unión soldada frente al metal base está determinado por las diferencias microestructurales existentes entre ambas zonas.

En unión soldada, la microestructura está formada por perlita fina y algunas agujas de bainita, lo cual permitiría mejorar la resistencia a la fatiga debido a la dureza de estas fases. Igualmente, el calentamiento y posterior enfriamiento rápido producido en esas zonas se traduce en un menor tamaño de grano que el presente en el metal base.

Comparando las gráficas obtenidas en unión soldada y metal base, se aprecia que el aumento de la apertura de grieta siempre se genera hacia el final del ensayo, por el mayor número de ciclos acumulados. Esto implicaría que la fatiga afecta en ambas zonas de la misma forma, ajustándose a las tres fases de los procesos de fatiga:

- la primera etapa de nucleación de grieta, que en este caso es provocada
- la propagación de la grieta a través de los planos cristalográficos, donde ya se ven diferencias en función de la zona sobre todo debido al tamaño de grano
- y una tercera fase de rotura, a la cual se llega antes o después en función de la duración de la etapa previa.

5. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La microestructura del material ejerce gran influencia en el fenómeno de fatiga, puesto que un tamaño de grano fino como el que presenta la unión soldada mejora de forma notable la resistencia a fatiga respecto al metal base.
- Las discontinuidades microestructurales o superficiales perjudican notablemente la resistencia a fatiga, independientemente de la zona del gasoducto.
- La resistencia a fatiga en los gasoductos fabricados con acero X60 no se ve afectada en el cordón de soldadura, de hecho, el comportamiento a fatiga en dicha región se ve mejorado.
- La consistencia y reproducibilidad de los resultados obtenidos permiten validar la aptitud del sistema desarrollado en el programa de I+D conjunto UPM-Enagás.
- Los resultados obtenidos de velocidad de crecimiento de grietas permitirán terminar de efectuar la evaluación de la infraestructura existente en presencia de hidrógeno, aplicando criterios de mecánica de la fractura, según se definirá en la futura norma EN 1594-2.

REFERENCIAS

- [1] ISO 3183, Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems. International Organization for Standardization.
- [2] API Specification 5L, 46th Edition (2018). American Petroleum Institute.
- [3] CEN/TC 234 WG3 - Gas Transportation.
- [4] ASTM E647, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International.
- [5] J.T. Evans, G. Kotsikos, R.F. Robey. A method for fracture toughness testing cylinder material. Engineering Fracture Mechanics Vol. 50, No. 2, pp. 295-310, 1995.
- [6] Lubomír Gajdoš, Martin Šperl, Petr Črha. The effect of curvature of a pipe wall on the fracture toughness and protection of high pressure pipelines. Materials Today: Proceedings 3 (2016) 973-978.