

ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS CILÍNDRICAS SOMETIDAS A FATIGA ASISTIDA POR EL AMBIENTE EN CONDICIONES PWR MEDIANTE CAÍDA DE POTENCIAL

S. Arrieta^{1*}, F.J. Perosanz², J.M. Barcala³, M.L. Ruiz⁴, S. Cicero¹

¹ LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

² División de Combustión y Gasificación, Departamento de Energía, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Av. Complutense 40, 28040 Madrid, España

³ División de Instrumentación Científica, Departamento de Tecnología, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Av. Complutense 40, 28040 Madrid, España

⁴ Unidad de Biocarburantes Avanzados y Bioproductos, Departamento de Energía, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Av. Complutense 40, 28040 Madrid, España

* Persona de contacto: sergio.arrieta@unican.es

RESUMEN

La técnica de caída en potencial de corriente continua (DCPD) se emplea en ensayos de crecimiento de grieta para medir la velocidad de crecimiento de grieta (CGR). El incremento de la corriente que circula por la probeta permite estimar la variación de la longitud de la grieta. En este caso, el DCPD se usó en probetas cilíndricas sólidas (sin entalla o pre-grieta), ensayadas a fatiga de bajo número de ciclos en ambiente simulado de reactor de agua a presión (PWR). Las probetas fueron ensayadas hasta el fallo por fatiga, al mismo tiempo que se medía la señal DCPD durante el proceso de fatiga. Aunque se observó la aparición de múltiples puntos de iniciación, a medida que la fatiga progresaba, una de las grietas se hacía dominante y progresaba hasta el fallo. La medida DCPD permitió estimar la CGR media de la grieta principal. Finalmente, para validar las CGR medias obtenidas, estas se compararon con la CGR media derivada de la medición del espacio entre estrías, observadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y los valores recopilados en el NUREG/CR-6909.

PALABRAS CLAVE: caída de potencial, fatiga asistida por el ambiente, velocidad de crecimiento de grieta.

ABSTRACT

The direct current potential drop (DCPD) technique may be used in crack propagation tests to measure the crack growth rate (CGR). Potential probes attached to the specimen allow the variation of the crack length to be estimated. In this research, the DCPD technique was applied to solid bar specimens (without any initial notch or crack) subjected to low-cycle fatigue testing in simulated pressurized water reactor (PWR) environment. The specimens were tested to fatigue failure under different strain amplitudes and frequencies, while also measuring the corresponding DCPD signal during the fatigue process. Although it was observed that the initiation of multiple cracks occurred, as fatigue continued, one of them became dominant and progressed to cause the failure. The DCPD technique allowed to estimate the average CGR of the dominant crack. Finally, the obtained average CGRs were validated by comparing them with average CGRs derived from striation spacing measurements, by scanning electron microscopy (SEM) and from literature values gathered in the NUREG/CR-6909.

KEYWORDS: Potential Drop, Environmentally Assisted Fatigue, Crack Growth Rate.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de caída de potencial de corriente continua (*direct current potential drop*, DCPD) se usa habitualmente para medir la longitud de la grieta en las pruebas de crecimiento de grietas por fatiga [1]. Su uso está especialmente indicado para materiales conductores ensayados en ambientes agresivos, donde no se pueden utilizar otras técnicas convencionales. Se han realizado ensayos de fatiga asistida por el ambiente (*environmentally assisted fatigue*, EAF) en condiciones

simuladas de reactor de agua a presión (PWR) para la detección del inicio y crecimiento de grietas.

El principio físico de esta técnica se basa en la ley de Ohm y la variación de la resistencia de la probeta: la reducción de la sección provocada por la propagación de la grieta está directamente asociada a un aumento de la resistencia eléctrica de la probeta. La caída de potencial resultante está ligada a una densificación de las líneas de campo de potencial [2] y a la geometría de la probeta y de la fisura [3].

Monitorear la señal DCPD permite desarrollar un método para la estimación de la velocidad de crecimiento de grieta (*crack growth rate*, CGR) en ensayos EAF.

El desarrollo de grietas se puede dividir en tres fases [4]:

- Fase 1: Nucleación de grietas. Comprende el número de ciclos para crear una fisura de cierta longitud (p. ej., un grano) en un material no fisurado. Los micromecanismos de iniciación han sido ampliamente analizados [4]. Cuando se ensayan probetas sólidas sin defectos macroscópicos, los puntos de iniciación de grieta por fatiga se ubican en la superficie de la probeta, y una gran proporción de la vida a fatiga se consume en la fase de nucleación [5]. La técnica DCPD es capaz de detectar esta primera fase.
- Fase 2: Propagación de grietas. Incluye el crecimiento de grietas cortas y grietas largas. La primera etapa se rige por la microestructura del material y corresponde al número de ciclos requeridos para hacer crecer una grieta del tamaño del grano hasta una grieta lo suficientemente larga para ser regida por las propiedades del material; mientras que la segunda se corresponde con una etapa controlada por las propiedades del material y, en condiciones de fatiga de alto número de ciclos, la mecánica de fractura elástica lineal convencional (*linear elastic fracture mechanics*, LEFM) es válida (p. ej., ley de París [6]). En esta segunda etapa, la propagación es estable y continua, las estrías de fatiga generalmente están bien definidas y el proceso se puede analizar mediante DCPD. Las estrías producidas por la propagación de grietas [7] se pueden observar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). El espaciamiento entre ellas se emplea para estimar su CGR (da/dN).
- Fase 3: Fallo. La propagación de grietas por fatiga se vuelve inestable y la sección restante no soporta la carga aplicada, produciendo la fractura final. Esta etapa no es analizada, ya que los ensayos se detuvieron al alcanzar una cierta caída de carga.

Los resultados obtenidos con DCPD se han validado comparándolos con las expresiones del NUREG/CR-6176 [8] y NUREG/CR-6909 [9] para la fatiga en ambiente PWR, y con la medida de distancia entre estrías obtenidas a partir de imágenes SEM.

El apartado 2 presenta el material y los métodos utilizados, el apartado 3 recoge los resultados obtenidos, el apartado 4 esboza las principales conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material y método de ensayo

Los ensayos de fatiga asistida por el ambiente se llevaron a cabo en probetas cilíndricas sólidas de acero inoxidable austenítico 304L. Su geometría se muestra en la Figura 1a. Este tipo de probetas no están específicamente diseñados para estimar la velocidad de crecimiento de grietas (como sí lo están las probetas de tensión compacta (CT)). En las probetas cilíndricas sólidas, la longitud calibrada es uniforme y no contiene ningún defecto o

entalla, lo que significaba que la ubicación del lugar de iniciación de grieta es incierta a priori.

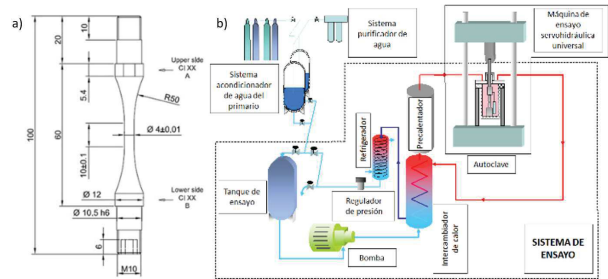


Figura 1. (a) Geometría de la probeta; (b) Diagrama del circuito de ensayo.

Se realizaron ensayos de fatiga con control de deformación con diferentes condiciones de carga y frecuencias (condiciones de ensayo y ambientales se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente). En todos los casos, la relación de deformación es $R = -1$. Estos ensayos no están estandarizados, por ello, se han realizado siguiendo las normas ASTM E606 [10] e ISO 12106 [11], tan estrictamente como fue posible. Una descripción pormenorizada del programa de ensayos se encuentra en el Proyecto INCEFA-PLUS [12].

Tabla 1. Parámetros de ensayo.

Test	Diámetro (mm)	Amplitud de deformación (ϵ_m , %)	Velocidad de deformación a tracción ($\dot{\epsilon}$, %s ⁻¹)	Frecuencia (Hz)
CI6	3.79	0.60	0.01	0.0076
CI11	3.99	0.60	0.01	0.0076
CI12	3.99	0.23	0.01	0.0198
CI15	3.98	0.60	0.01	0.0076
CI16	4.00	0.60	0.01	0.0076
CI18	3.99	0.30	0.01	0.0152
CI19	3.75	0.60	0.01	0.0076
CI20	3.60	0.30	0.01	0.0152
CI22	3.65	0.23	0.01	0.0198

Tabla 2. Ambiente simulado PWR.

Parámetro	Valor
Temperatura	300 °C
Presión	150 bar
Contenido de litio	2 ± 0,2 ppm LiOH
Contenido boro	1000 ± 100 ppm H ₃ BO ₃
Hidrógeno disuelto	25 ± 5 cc(STP)H ₂ /kg
pH (300 °C)	≈6.95
Conductividad (25 °C)	≈30 μS/cm
Oxígeno	<5 ppb

El ensayo mecánico de fatiga se realizó en una máquina de ensayos universal (MICROTEST Serie EFH). El diagrama del circuito de ensayos se muestra en la Figura 1b. Las medidas de DCPD se realizaron con un Celians 3310/SUIV-FISSURE-5309. Se soldaron dos cables de níquel de 1 mm de diámetro (por descarga de capacitor), por encima y por debajo de la longitud calibrada. Para la medición de caída de potencial, se condujo una corriente constante de 1 A, que era digitalizada por el sistema de adquisición de datos. Además, se colocó junto a la probeta una muestra de referencia del mismo material, pero sin estar sometido a carga, para eliminar las pequeñas fluctuaciones de la señal causadas por razones internas o externas.

2.2. De las medidas de DCPD a la geometría de grietas

La caída de potencial permite obtener una expresión que relaciona la tensión eléctrica con el patrón de carga aplicado, el avance del frente de grieta y, finalmente, con el correspondiente factor de intensidad de tensiones, cuando sea necesario. En los ensayos realizados, el lugar de iniciación de la grieta estaba en la superficie y avanzaba hacia el centro. La longitud final de la grieta se midió físicamente una vez finalizado el ensayo EAF.

Los cambios en el voltaje que circula a través de la probeta están directamente relacionados con el crecimiento de la grieta por fatiga (ver Figura 2). Así, a partir de la medida de la variación de corriente fue posible estimar la velocidad de crecimiento de la grieta. Para esto, en primer lugar, se empleó la siguiente expresión [13]:

$$\Delta DCPD_{\text{signal}} = \frac{1}{2} \left\{ \ln \left(\frac{V_{\text{test}}}{V_{\text{test0}}} \right) - \ln \left(\frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref0}}} \right) \right\} \quad (1)$$

donde V_{test} es el potencial medido en la longitud calibrada a lo largo del ensayo, V_{test0} es el valor inicial de V_{test} ($t=0$), V_{ref} es el potencial medido en la muestra de referencia durante el ensayo y V_{ref0} es el valor inicial de V_{ref} ($t=0$).

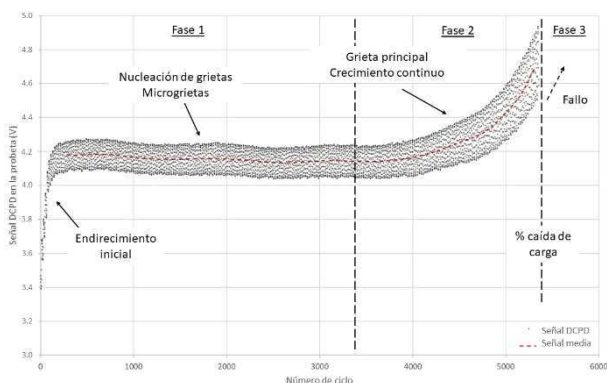


Figura 2. Evolución de la señal DCPD en un ensayo EAF y diferentes regiones de fisura.

La señal DCPD que se muestra en la Figura 2 identifica las diferentes etapas del desarrollo de la grieta. Al inicio del ensayo (Fase 1), se observó un incremento en la señal

debido al aumento en la resistividad de la longitud calibrada, lo que puede estar relacionado con el endurecimiento del material y la aparición microgrietas [9]. Posteriormente, la señal se estabilizó. Esta meseta se puede identificar con la nucleación de grietas. Una vez que una grieta alcanzó la longitud suficiente, la velocidad de crecimiento de grieta se aceleró (Fase 2, según ecuación (2)) y la resistencia de la muestra aumentó debido a la reducción de la sección transversal. El ensayo se detuvo antes de la separación total de la probeta (Fase 3), después de alcanzar cierto porcentaje de caída de carga. Para aplicar la ecuación (2), la señal se suavizó considerando la línea media (línea roja discontinua). La línea resultante, incluyendo la parte estabilizada de la Fase 1 y toda la Fase 2, se ajustó mediante una ley exponencial.

$$\frac{dDCPD_{\text{signal}}}{dN} > 0 \quad (2)$$

A continuación, con el objetivo de establecer una correlación entre la señal DCPD medida y la extensión de la fisura, se requiere un modelo geométrico del frente de grieta durante su propagación. En el modelo propuesto, la fisura es perpendicular a la dirección de la carga y fue definida por la intersección de dos circunferencias. En este análisis, basándonos en la revisión bibliográfica y en las superficies de fractura analizadas, el frente de grieta considerado fue el definido por la intersección de dos circunferencias que se cortan perpendicularmente [14].

El área fisurada (S_c) se estimó de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{R^2}{\sin(\frac{Y}{2a})} - \sqrt{s_1(s_1 - Y)(s_1 - Y)^2} + \frac{a^2}{\sin(\frac{Y}{2a})} - \sqrt{s_2(s_2 - Y)(s_2 - a)^2} \quad (3)$$

$$s_1 = \frac{Y+2R}{2}; s_2 = \frac{Y+2a}{2}$$

$$Y = \frac{\sqrt{a^2(4R^2 - a^2)}}{R}$$

La sección resistente (S_r) se puede derivar fácilmente de la ecuación (4):

$$S_r = \pi R^2 - S_c \quad (4)$$

La estimación de la longitud de grieta mediante este modelo geométrico permite determinar cómo disminuye la sección resistente (S_r) en función de la longitud de grieta.

Finalmente, para completar el modelo de crecimiento de grieta, fue necesario medir la longitud final de la grieta (a_f).

A continuación, se acoplan la variación de la señal DCPD con el tiempo y el modelo geométrico de crecimiento de grieta, permitiendo una estimación de la longitud de grieta en función del del tiempo transcurrido (número de ciclos). Ajustando la curva $1/S_r$ hasta la longitud final de grieta, medida al acabar el ensayo, con el valor máximo de señal de caída de potencial (ΔV), fue posible derivar

una correlación entre la señal DCPD y la longitud instantánea de la grieta fisura.

La relación entre la señal DCPD y la velocidad de crecimiento de grieta instantánea requeriría correcciones adicionales para mejorar la precisión correspondiente [15]. Las correcciones mencionadas requieren de procesos de calibración que no fue posible realizar por las particulares y agresivas condiciones experimentales, por lo que el análisis de CGR realizado se centró en valores medios, no en valores instantáneos. Por tanto, el proceso de calibración se limitó a medir la longitud final de grieta y en asumir un valor razonable para la longitud inicial de grieta: $200 \mu\text{m}$ (a_0 , [16]). Esto es consistente con la estimación de inicio y crecimiento de grieta propuesto en NUREG/CR-6909.

3. RESULTADOS

La Figura 3 muestra un ejemplo de la evolución de la longitud de grieta con el número de ciclos (una vez finalizada la fase de iniciación). La Tabla 4 muestra los resultados de velocidad de crecimiento de grieta calculados a partir de la señal DCPD, combinando la caída de potencial y el modelo de crecimiento de grieta. Estos resultados son valores promedio a lo largo del proceso de propagación, obtenidos como se muestra en la Figura 3 (línea roja discontinua). Es posible validar estas predicciones comparándolas con la CGR obtenida a partir de la separación entre estrías (imágenes SEM, ver Figura 4) y la frecuencia del ciclo. Los diferentes valores medidos de CGR se encuentran todos en el mismo orden de magnitud, siendo consistentes con la dispersión común en estas medidas. Además, tales diferencias aparecieron tanto en las mediciones de SEM como en las de señal DCPD, lo que demuestra la consistencia de la metodología propuesta.

Tabla 4. Parámetros de ensayo y velocidades de crecimiento de grieta, calculadas mediante señal DCPD y fractografía SEM.

Test	Caída de carga (%)	Longitud final de grieta (mm)	CGR medio (DCPD) (mm/s)	CGR medio (SEM) (mm/s)
CI6	100	3,321	$3,79 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$
CI11	31	1,907	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$
CI12	36	2,422	$1,14 \cdot 10^{-5}$	-
CI15	35	3,734	$1,64 \cdot 10^{-5}$	-
CI16	50	2,760	$1,81 \cdot 10^{-5}$	-
CI18	32	2,175	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$
CI19	39	2,366	$3,72 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$
CI20	35	2,033	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
CI22	51	2,727	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$

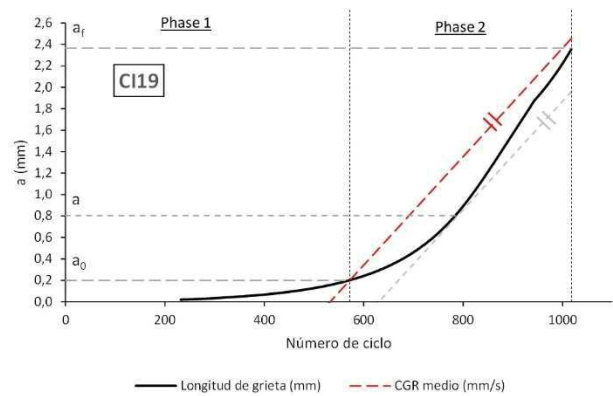


Figura 3. Estimación de la evolución de la grieta a partir de la señal DCPD y del modelo geométrico.

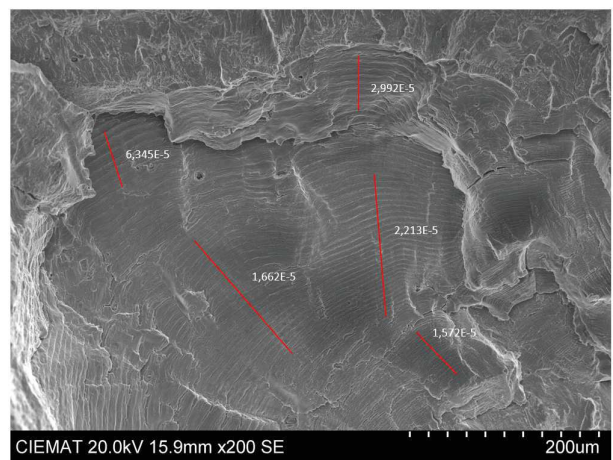


Figura 4. Imágenes SEM de superficies de fractura, medición de separación entre estrías y velocidades de crecimiento de grietas resultantes (CGR, mm/s).

La figura 5 muestra la correlación entre la CGR obtenida de las estimaciones de DCPD y la medición de la separación entre estrías. Los valores de CGR mediante medición de la separación entre estrías representan un valor promedio, obtenido a partir de mediciones en distintas zonas de la superficie de fractura. La correlación entre ambos valores fue buena en la mayoría de los casos, aunque apareció un resultado dispar (CI19), aún fue del mismo orden de magnitud.

Las velocidades instantáneas de crecimiento, estimadas por fractografía SEM son razonables teniendo en cuenta las áreas donde se han medido y los valores recogidos en la literatura [17], dando lugar a los valores medios de CGR que se muestran en la Tabla 4.

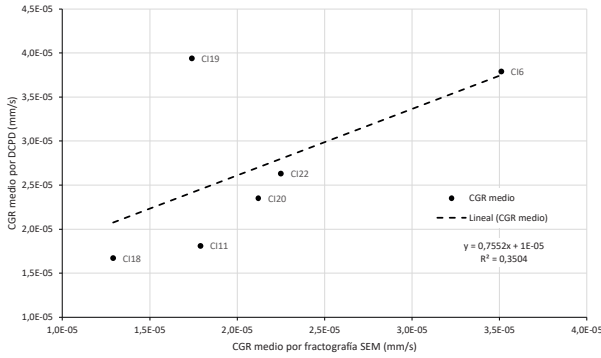


Figura 5. Correlación entre las estimaciones DCPD y la medida de separación entre estrías.

La CGR derivada de la señal DCPD y la fractografía SEM también se compararon con las velocidades de crecimiento de grietas por fatiga en ambiente PWR propuestas en NUREG/CR-6909 (ver Figura 6) para aceros inoxidables austeníticos. Las expresiones para CGR en el aire (ecuación (5)) y CGR en ambiente (ecuación (6)) obtenidas en [8], [9]:

$$CGR_{air} = 3.43 \cdot 10^{-12} S(R) \Delta K^{3.3} / T \quad (5)$$

$$CGR_{env} = CGR_{air} + 4.5 \cdot 10^{-5} (CGR_{air})^{0.5} \quad (6)$$

donde S(R) es función de la relación de carga (S(R) = 1), ΔK es el rango del factor de intensidad de tensiones y T_r es el tiempo de subida de carga en el ciclo de fatiga.

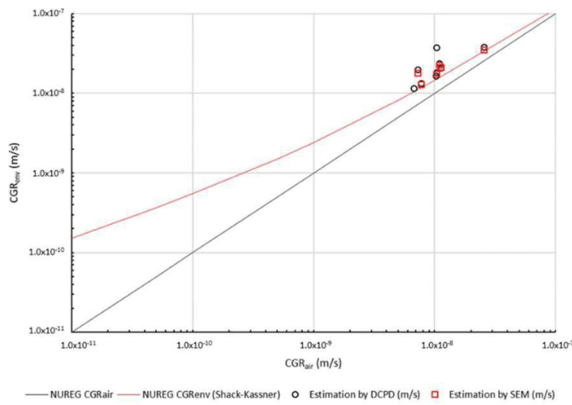


Figura 6. CGRs (obtenidas mediante DCPD y fractografía SEM) comparadas con las curvas propuestas en NUREG/CR-6909 (aire y ambiente PWR).

Para comparar las CGR experimentales obtenidas por DCPD y fractografía con las estimaciones proporcionadas por NUREG/CR-6909, aunque las condiciones de ensayo son elastoplásticas, se realizó una aproximación al factor de intensidad de tensión [18]:

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

donde Δσ es la amplitud de tensiones, a es la longitud de grieta y F es un factor geométrico que depende de las geometrías de la probeta y de la grieta [14]:

$$F = 0.92 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\tan \frac{\pi a}{2D}}{\frac{\pi a}{2D}} \frac{1}{\cos \frac{\pi a}{2D}}} \left[0.752 + 2.02 \frac{a}{D} + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2D} \right)^3 \right] \quad (8)$$

donde a es la longitud de grieta y D el diámetro de la probeta.

Dado que este análisis se enfocó en la velocidad media de crecimiento de grieta, la longitud de grieta (a) utilizada para estimar el factor de intensidad de tensión (ΔK) fue la correspondiente a una CGR instantánea igual a la CGR media (ver Figura 3).

La Figura 6 muestra las estimaciones de CGR obtenidas en las probetas cilíndricas al utilizar la señal DCPD y las fractografías SEM, comparándolas con las predicciones del NUREG/CR-6909 (línea roja para ambiente PWR, línea negra para aire). Se pueden hacer algunas observaciones:

- Existe buena correlación entre los valores medidos por fractografía y los estimados por DCPD.
- Los valores estimados están por encima de la curva Shack-Kassner [8], que corresponde a ambientes con oxígeno. Esto concuerda con el hecho de que la CGR en ambientes con bajo contenido de oxígeno (PWR) aumenta cuando se compara con la CGR en ambientes con mayor contenido de oxígeno (reactor de agua en ebullición, BWR) [19].

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un procedimiento para estimar la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en probetas sólidas (sin entalla o pre-grieta) ensayadas en ambiente PWR mediante la técnica DCPD [20]. Estas condiciones de ensayo están asociadas con problemas específicos, como la incertidumbre sobre los lugares de iniciación de grieta y las dificultades experimentales propias de entornos acuosos y agresivos. El procedimiento experimental propuesto y un modelo analítico permitieron una fácil y rápida determinación de la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga.

La metodología propuesta mide la señal DCPD durante el ensayo de fatiga, determina la longitud final de la grieta, asume una longitud inicial de grieta (200 μm) y relaciona la señal DCPD con un modelo geométrico de grieta. De esta forma se puede obtener tanto la evolución de la longitud de grieta con el número de ciclos, como el valor medio de la velocidad de crecimiento de grieta (CGR). Las estimaciones de velocidad media de crecimiento de grieta se han comparado con las obtenidas mediante la medición del espacio entre estrías de fatiga en la superficie de la fractura y con los valores CGR propuestos en NUREG/CR-6176 y NUREG/CR-6909, proporcionando una precisión razonable en ambos casos. Por lo tanto, se ha demostrado que es posible obtener estimaciones prácticas de CGR medio en ambiente PWR.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación y formación de Euratom 2014-2018 bajo el acuerdo de subvención nº 662320 (INCEFA-PLUS) y el Programa de Investigación y Capacitación de Euratom 2019-2020 bajo el acuerdo de subvención No. 945300 (INCEFA-SCALE).

Los autores desean agradecer a la División de Materiales de Interés Energético (CIEMAT) involucrado en la realización de análisis y caracterización SEM.

REFERENCIAS

[1] ASTM, “E647-00, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates,” *ASTM International*. ASTM International, 2000.

[2] R. O. Ritchie, G. G. Garrett, and J. P. Knott, “Crack-growth monitoring: Optimisation of the electrical potential technique using an analogue method,” *Int. J. Fract. Mech.*, vol. 7, no. 4, p. 462, 1971, doi: 10.1007/BF00189118.

[3] L. Doremus, Y. Nadot, G. Henaff, C. Mary, and S. Pierret, “Calibration of the potential drop method for monitoring small crack growth from surface anomalies – Crack front marking technique and finite element simulations,” *Int. J. Fatigue*, vol. 70, pp. 178–185, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.003.

[4] ASM International, *ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture*. USA: ASM International, 1997.

[5] G. J. Deng, S. T. Tu, Q. Q. Wang, X. C. Zhang, and F. Z. Xuan, “Small fatigue crack growth mechanisms of 304 stainless steel under different stress levels,” *Int. J. Fatigue*, vol. 64, pp. 14–21, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.027.

[6] A. Carpinteri, “Shape change of surface cracks in round bars under cyclic axial loading,” *Int. J. Fatigue*, vol. 15, no. 1, pp. 21–26, 1993, doi: 10.1016/0142-1123(93)90072-X.

[7] C. Laird and G. C. Smith, “Crack propagation in high stress fatigue,” *Philos. Mag. A J. Theor. Exp. Appl. Phys.*, vol. 7, no. 77, pp. 847–857, 1962, doi: 10.1080/14786436208212674.

[8] W. J. Shack, T. F. Kassner, and E. Technology, “NUREG/CR-6176; ANL-94/1; Review of environmental effects on fatigue crack growth of austenitic stainless steels.” 1994, doi: 10.2172/985102.

[9] O. K. Chopra and G. L. Stevens, “NUREG/CR-6909, Rev.1; Effect of LWR Water Environments on the Fatigue Life of Reactor

Materials. Final Report,” 2018.

[10] ASTM, “Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing,” *E606/E606M-12*, 2004, doi: 10.1520/E0606-04E01.Copyright.

[11] ISO, “Metallic materials - Fatigue testing - Axial-strain-controlled method; ISO/FDIS 12106:2016(E),” vol. 2016, 2016.

[12] INCEFA-PLUS Consortium *et al.*, *INCEFA-PLUS findings on Environmental Fatigue*. INCEFA-PLUS Project, 2020.

[13] M. B. Toloczko, M. J. Olszta, Z. Zhai, and S. M. Bruemmer, “Stress Corrosion Crack Initiation Measurements of Alloy 600 in PWR Primary Water,” in *17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors*, 2015, pp. 1–20.

[14] A. Levan and J. Royer, “Part-circular surface cracks in round bars under tension, bending and twisting,” *Int. J. Fract.*, vol. 61, no. 1, pp. 71–99, 1993, doi: 10.1007/BF00032340.

[15] H. Johnson, “Calibrating the Electric Potential for Studying Slow Crack Growth,” *Mater. Res. Stand.*, vol. 5, pp. 442–445, 1965.

[16] O. K. Chopra, W. J. Shack, and J. Muscara, “Mechanism of Fatigue Crack Initiation in Austenitic Stainless Steels in Light Water Reactor Environments,” in *17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT17)*, 2003, p. 8.

[17] D. Tice, N. Platts, K. Rigby, J. Stairmand, and D. Swan, “Influence of PWR Primary Coolant Environment on Corrosion Fatigue Crack Growth of Austenitic Stainless Steel,” in *Volume 1: Codes and Standards*, Jan. 2005, pp. 193–205, doi: 10.1115/PVP2005-71563.

[18] I. S. Raju and J. C. Newman Jr., “Stress-Intensity Factors for circumferential surface cracks in pipes and rods under tension and bending loads,” Hampton, VA, USA, 1985.

[19] W. J. Mills, “Accelerated and retarded corrosion fatigue crack growth rates for 304 stainless steel in an elevated temperature aqueous environment,” 2013.

[20] S. Arrieta, F. J. Perosanz, J. M. Barcala, M. L. Ruiz, and S. Cicero, “Using Direct Current Potential Drop Technique to Estimate Fatigue Crack Growth Rates in Solid Bar Specimens under Environmental Assisted Fatigue in Simulated Pressurized Water Reactor Conditions,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 12, p. 2091, Dec. 2022, doi: 10.3390/met12122091.