

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN UN ACERO X60 Y MODELADO PHASE FIELD DEL CRECIMIENTO APARENTE DE GRIETA MEDIDO MEDIANTE DCPD

R. Rodríguez-Aparicio^{1*}, I.I. Cuesta¹, J. M. Alegre¹, A. Díaz¹.

¹Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Av Cantabria s/n, 09006, Burgos, Spain.

* Persona de contacto: rraparicio@ubu.es

RESUMEN

La medición del crecimiento de grieta en ensayos de tenacidad a fractura mediante el método del *Direct Current Potential Drop* (DCPD) es una técnica comúnmente empleada, especialmente cuando el uso de extensometría convencional está limitado o cuando se requiere monitorizar la grieta continuamente. No obstante, la señal eléctrica registrada mediante DCPD se ve influenciada por la deformación del material, introduciendo un incremento aparente que no está asociado a un avance real de la grieta.

Con el objetivo de cuantificar ese incremento, se ha caracterizado experimentalmente la influencia de la deformación (elástica y plástica) sobre la conductividad eléctrica de un acero X60. Estos resultados se han implementado en un novedoso modelo numérico que permite simular de forma acoplada plasticidad, crecimiento de grieta mediante phase field y la evolución del potencial eléctrico. Una nueva contribución es el uso de funciones de degradación para la conductividad en función del phase field. Las simulaciones realizadas permiten identificar exactamente el inicio del crecimiento real de grieta mediante un criterio cuantitativo, en contraste con los métodos gráficos propuestos en la norma ASTM E1820. Asimismo, se concluye que el incremento aparente del DCPD está dominado principalmente por el efecto de la deformación elástica sobre la conductividad eléctrica.

PALABRAS CLAVE: DCPD, conductividad eléctrica, deformación elástica, deformación plástica, phase field

ABSTRACT

Crack growth measurement in fracture toughness tests using the Direct Current Potential Drop (DCPD) method is a commonly used technique, especially when the use of conventional extensometry is limited or when continuous crack monitoring is required. However, the electrical signal recorded by DCPD is influenced by the deformation of the material, introducing an apparent increase that is not associated with a real advance of the crack.

In order to quantify this increase, the influence of deformation (elastic and plastic) on the electrical conductivity of an X60 steel has been experimentally characterized. These results have been implemented in a novel numerical model that allows simulating plasticity, crack growth by phase field and the evolution of the electric potential. A new contribution is the use of degradation functions for conductivity as a function of the phase field. The simulations carried out allow to identify exactly the beginning of the real crack growth by means of a quantitative criterion, in contrast to the graphic methods proposed in the ASTM E1820 standard. Likewise, it is concluded that the apparent increase in DCPD is mainly dominated by the effect of elastic deformation on electrical conductivity.

KEYWORDS: DCPD, electrical conductivity, plastic deformation, elastic deformation, phase field

1. INTRODUCCIÓN

Para comprobar la integridad estructural de los materiales, el método de caída de potencial de corriente continua (Direct Current Potential Drop, DCPD) es una opción ampliamente utilizada para medir el crecimiento de grietas [1]. Además, este método puede emplearse en entornos extremos como hidrógeno a altas presiones, ambientes corrosivos y altas temperaturas donde el uso de un extensómetro está restringido.

Este método consiste en una técnica no destructiva utilizada para detectar y monitorizar grietas en materiales conductores, midiendo los cambios en el potencial eléctrico causados por discontinuidades (grietas) en diferentes tipos de muestras. La revisión de Y. Si, et al [1] menciona numerosas ventajas sobre el uso de esta técnica, como alta precisión, capacidad de medición continua, facilidad de instalación y su uso en entornos extremos sin necesidad de acceso visual. También se analiza el uso de los tres métodos principales para

obtener curvas de calibración; analítico como la fórmula de Johnson [2], numérico (desarrollado a partir de análisis por elementos finitos) [3] y experimental. Estas curvas se utilizan para traducir la diferencia de potencial en tamaño de grieta.

La norma ASTM E1820 [4], centrada en determinar la tenacidad a la fractura en materiales metálicos, utiliza el DCPD como técnica complementaria para detectar la iniciación y posterior propagación de grietas. Uno de los retos en la aplicación de esta norma es la determinación fiable del inicio del crecimiento de grietas. Según Tarnowski et al. [5], un problema crítico del DCPD es la generación de una aparente extensión de grietas debido a una deformación plástica antes de que ocurra una fractura real.

Solo un número limitado de estudios ha abordado cómo la deformación plástica reduce la conductividad eléctrica. W. Cai et al. [6] obtuvieron experimentalmente cómo cambiaba la conductividad para diferentes probetas deformadas plásticamente en un acero al carbono. Los resultados de las conductividades eléctricas no cambiaron significativamente con el aumento de la deformación plástica en ese determinado material.

Estas observaciones subrayan la necesidad de estudiar la influencia de la deformación plástica en la respuesta eléctrica. Las simulaciones multifísicas ofrecen una herramienta eficaz para afrontar este desafío. Quinteros et al. [7] propusieron una formulación que integra enfoques de fractura de campo de fase (phase-field) en modelos mecánicos-eléctricos acoplados. Se incluyó una función exponencial de dos parámetros para aumentar la resistividad local a medida que el material se fractura.

El objetivo de esta investigación es distinguir entre el crecimiento real de grietas y lo que el DCPD está efectivamente detectando. Se realizó un conjunto de simulaciones en las que mediante phase-field se acoplaron las físicas de mecánica, fractura y eléctrica. El modelo de fractura de phase-field se calibró utilizando la curva experimental de un ensayo de fractura realizado una probeta CT. Se obtuvieron datos empíricos sobre cómo la deformación elástica y plástica afecta a la conductividad eléctrica. Estos datos se incluyeron en las simulaciones para diferenciar entre la señal del crecimiento real de la grieta y la disminución de la conductividad eléctrica debido a la deformación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material

El material utilizado es un acero X60 de un tramo de tubería que ha estado en servicio facilitado por Enagás. Solo el material base se ha considerado en el estudio. Las probetas de tracción y de fractura (CT) se extrajeron de la orientación crítica de la tubería, es decir, de la circunferencial. Las probetas planas, sin embargo, se extrajeron de la orientación longitudinal de la tubería

debido a que se necesitaban muestras más largas para las mediciones de conductividad (Figura 1).

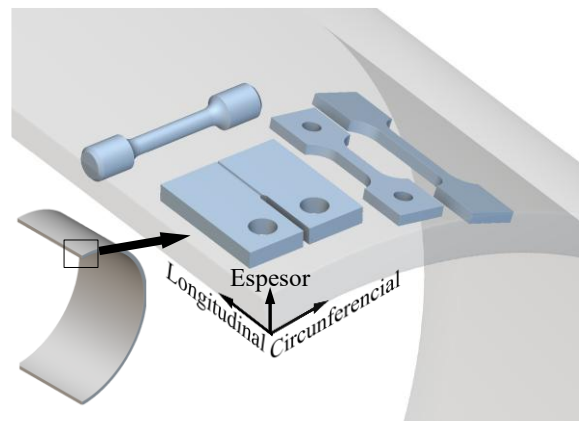


Figura 1. Orientación de las probetas en la tubería.

2.2. Preparación de probetas

Se prepararon 4 tipos de probetas para los ensayos:

- Ensayo de tracción, probeta cilíndrica de 6 mm de diámetro.
- Medidas de conductividad con niveles de deformación plástica, 5 probetas planas con una sección inicial de 5 mm de ancho y 4 mm de espesor, y una zona plana de 30 mm.
- Medidas de conductividad con niveles de deformación elástica, 1 probeta plana con una sección inicial de 5 mm de ancho y 4 mm de espesor, y una zona plana de 15 mm. Se mecanizaron 4 agujeros para introducir cables de plata. 2 de ellos de 0.8 mm de diámetro para introducir corriente y otros 2 agujeros de 0.5 mm para medir el voltaje. Esta probeta es más pequeña debido a que tiene que caber en un autoclave.
- Ensayo de fractura, una probeta CT de $W = 25.4$ mm y $B = 6.35$ mm con entallas laterales de 60° y radio 0.2 mm. Se prefisuró a 12.7 mm según la norma ASTM E1820. Se mecanizaron 4 agujeros para introducir corriente y medir voltaje.

2.3. Tracción y probetas deformadas plásticamente

Se ha utilizado una MTS 820 con una célula de carga de 250 kN y un extensómetro para obtener la curva tensión-deformación del material. La misma configuración se ha utilizado para deformar plásticamente las probetas hasta un 5%, 10%, 15% y 20%.

2.4. Método de medida de conductividad

La conductividad eléctrica σ_e de un metal cambia en función de su deformación. El objetivo de este artículo es cuantificar cuánto se modifica la conductividad frente a la deformación elástica $\sigma_e(\epsilon_{elas})$ y plástica $\sigma_e(\epsilon_{plas})$. La combinación de estos dos efectos proporciona la variación global de la conductividad en función de la deformación total, eq. (1).

$$\sigma_e(\epsilon) = \sigma_e(\epsilon_{elas}) + \sigma_e(\epsilon_{plas}) \quad (1)$$

Para las medidas de conductividad, se ha utilizado el método de las sondas en 4 puntos (4-point probe) con una fuente de corriente KEYSIGHT N5744A y un nanovoltímetro KEITHLEY 2182A. Este método, también conocido como el método de Kelvin (Figura 2), consiste en introducir una corriente continua conocida, I , en los dos extremos de una probeta y medir el voltaje, V , en la zona central con otras dos sondas midiendo la distancia, L , que las separa. El área central debe ser constante para que las líneas de corriente sean paralelas y no haya efectos geométricos sobre la medida.

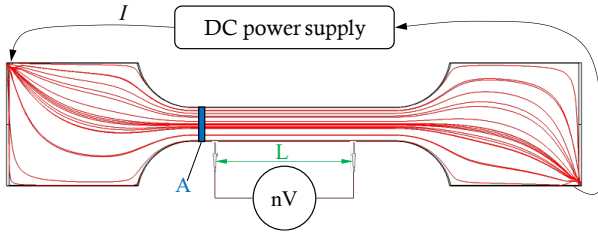


Figura 2. Diagrama para la medida de conductividad. Las líneas rojas representan la corriente eléctrica.

Para el cálculo de la conductividad, se parte de la ley de Ohm (2) para calcular la resistencia, R medida en Ω , a partir de la corriente introducida, I en A, y del voltaje medido, V en V.

$$V = I \cdot R \quad (2)$$

Para calcular la resistividad eléctrica del material ρ según la expresión (3), hay que considerar la sección A del área medida, la longitud L que separa las sondas de tensión y la resistencia previamente calculada R .

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (3)$$

La resistividad, ρ , se mide en $\Omega \cdot m$ y su inversa, es la conductividad eléctrica, σ_e , medida en S/m (4).

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

2.4.1. Medidas de conductividad con diferentes niveles de deformación plástica

Para estas medidas solo se necesitó la fuente de corriente y el nanovoltímetro. Se utilizó una cámara climática para mantener la temperatura constante a 24°C durante las medidas. Con los valores de voltaje para una intensidad de 1A, la longitud entre sondas y el área de cada muestra, la conductividad eléctrica se obtuvo mediante las ecuaciones (2), (3) y (4).

2.4.2. Medidas de conductividad con diferentes niveles de deformación elástica

En este caso, a parte de la fuente de corriente y el nanovoltímetro, una máquina de tracción de Cortest se utilizó para aplicar una carga mientras se medía la conductividad. Esta máquina tiene una célula de carga de

44 kN y un autoclave para mantener la temperatura constante hasta 300°C. La probeta fue aislada del utillaje con casquillos cerámicos y los cables de plata se aseguraron en los agujeros mediante un punzón que deforma el agujero para anclar el cable sin necesidad de soldar.

El ensayo consistía en escalonar la fuerza, es decir, la fuerza se mantenía constante durante 3 min mientras el DCPD registraba datos, después se aplicaba una fuerza mayor. Todas las medidas se realizaron por debajo del límite elástico. En esta máquina solo se medía la fuerza, por lo tanto, la deformación se obtuvo relacionando el ensayo de tracción (5) realizado con extensómetro en la sección 2.3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow \sigma(\epsilon) \rightarrow \epsilon \quad (5)$$

Para el cálculo de conductividad eléctrica en función de la deformación elástica, se tuvo en cuenta el coeficiente de Poisson y la deformación axial. Para calcular la longitud real entre los cables de DCPD (L), se multiplicó la longitud inicial (L_0) por la deformación axial (ϵ) (la deducida de la curva tensión-deformación) según (6).

$$L = L_0 + L_0 \cdot \epsilon \rightarrow L = L_0 \cdot (1 + \epsilon) \quad (6)$$

Para calcular el área real (A) de la probeta a cualquier nivel de deformación, se calculó la deformación transversal usando el coeficiente de Poisson según (7). Para este acero, se asumió un coeficiente $\nu = 0.3$. El área se afecta de forma cuadrática por la deformación transversal al estar compuesta de dos longitudes (8).

$$\nu = -\frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon} \quad (7)$$

$$A = A_0 \cdot (1 + \epsilon_{transversal})^2 \quad (8)$$

Luego, la resistividad eléctrica y la conductividad se calculan como las ecuaciones (3) y (4) con la longitud y área modificadas, L y A , respectivamente

2.5. Simulaciones

Las simulaciones se realizaron en el entorno de COMSOL Multiphysics versión 6.3. Se realizó un estudio dependiente del tiempo para un mejor control de la solución de salida. El modelo queda definido en [8]. Las propiedades de fractura que se obtuvieron calibrando el modelo con el ensayo de fractura experimental son: $G_c^0 = 30 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$; $\beta_p = 0.1$; $\ell_c = 0.13 \text{ mm}$.

2.5.1. Propiedades mecánicas y de fractura

Por simplicidad, se utilizó un modelo isotrópico de material. Para la parte mecánica, se incluyó un modelo de plasticidad introduciendo la curva tensión-deformación experimental obtenida del ensayo de tracción. Las propiedades de fractura se ajustaron para que la curva simulada del ensayo de fractura fuera igual que la

experimental. El avance de grieta se midió considerando que un elemento está completamente dañado a partir de un valor de $\phi = 0.95$.

2.5.2. Propiedades eléctricas

La novedad de este artículo reside en combinar y degradar las propiedades eléctricas con el avance de grieta mediante phase field. Para ello, se adoptó una función sigmoideal como función de degradación (9). El objetivo de esta función es reducir la conductividad eléctrica una vez superado un umbral de daño, asegurando una transición suave y físicamente consistente entre los estados no dañados y completamente dañados.

$$g_{el} = \frac{1}{1 + e^{\alpha(\phi - \phi_0)}} \quad (9)$$

Los parámetros α y ϕ_0 controlan la forma de la función de degradación (Figura 3). La variable α define la pendiente de la curva, cuanto mayor es el valor, mayor es la pendiente. El umbral donde la función se hace 0.5 es definido por ϕ_0 .

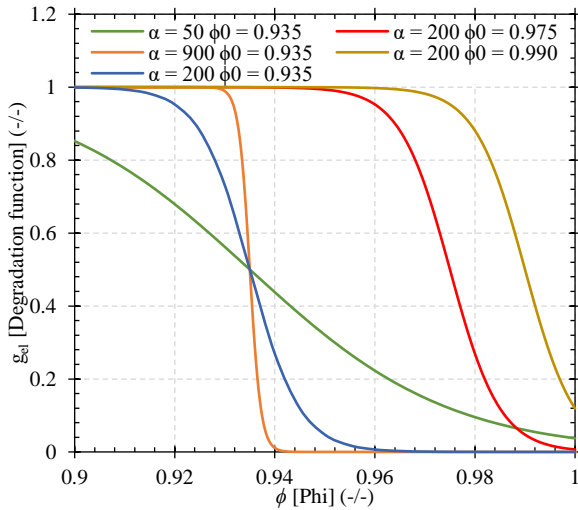


Figura 3. Función de degradación de la conductividad eléctrica con diferentes parámetros α and ϕ_0 .

La Figura 4 muestra como las líneas de corriente bordean la zona de la grieta gracias a la función de degradación.

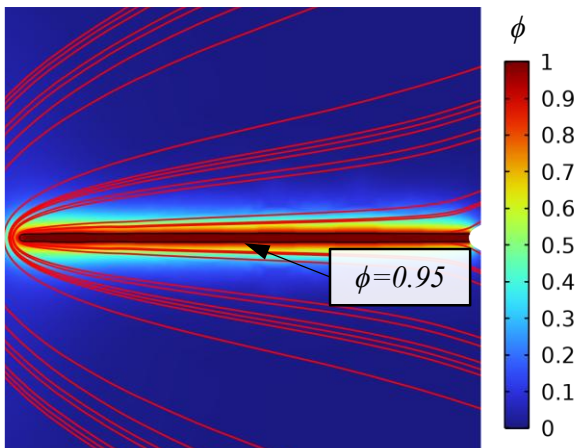


Figura 4. Líneas de corriente alrededor de la grieta.

Para calibrar estos parámetros, se realizaron 2 tipos de simulaciones en 2D. En la primera simulación se hacía crecer la grieta de forma paramétrica (en la geometría) y se media la señal del DCPD para diferentes tamaños. En la segunda simulación se implementó la fractura mediante phase-field con la aproximación de deformación plana y sin introducir ningún efecto de la deformación en la conductividad. Debido a que tampoco hay deformaciones fuera del plano, todo el incremento de señal en el DCPD se debe al crecimiento de grieta. Se graficó la señal del DCPD frente al crecimiento de grieta como en la Figura 5 y se obtuvo como mejor configuración que $\alpha = 200$ y $\phi_0 = 0.935$.

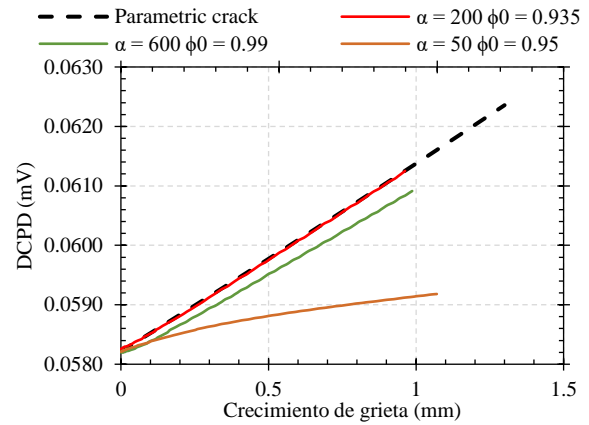


Figura 5. DCPD en función del crecimiento de grieta en una simulación 2D paramétrica y en phase-field.

Una vez calibrado el modelo, se llevaron a cabo 4 simulaciones diferentes en 3D variando el efecto de la deformación sobre la conductividad:

- Sim 1: La deformación no afecta la conductividad
- Sim 2: Deformación plástica afecta la conductividad
- Sim 3: Deformación elástica afecta la conductividad
- Sim 4: Deformación elástica y plástica afectan a la conductividad.

3. RESULTADOS

3.1. Ensayo de tracción

Del ensayo de tracción se obtuvo la curva tensión-deformación ingenieril. La curva real se determinó a partir de la curva ingenieril y se utilizó posteriormente en la simulación.

3.2. Resultados de conductividad eléctrica

3.2.1. Conductividad vs deformación plástica

La Figura 6 ilustra los resultados de las mediciones de conductividad normalizadas con el efecto de la tensión plástica. La conductividad del acero X60 sin deformación a 24°C es de 4.861×10^{-6} S/m. Se observa una disminución lineal a medida que aumenta la

deformación plástica. Se ha tomado la ecuación de la línea de tendencia para introducir en la simulación el efecto de la deformación sobre la conductividad.

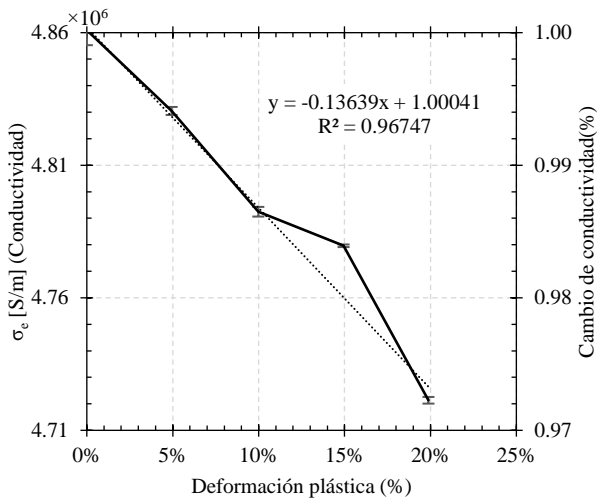


Figura 6. Conductividad vs deformación plástica.

3.2.2. Conductividad vs deformación elástica

La Figura 7 presenta los resultados de las mediciones de conductividad con el efecto de la deformación elástica. El efecto de la contracción geométrica ha sido tenido en cuenta ya que se ha considerado el cambio de sección y longitud en los cálculos de la conductividad, (6) y (8). Los valores representados se normalizan porque la muestra es más pequeña y el valor absoluto puede verse afectado por los agujeros usados para conectar los hilos de plata. Las mediciones se realizaron por debajo del límite elástico, asegurando que la probeta permaneciera dentro del régimen elástico. Se realizó la media de dos ensayos y se ajustó un polinomio de segundo orden para extrapolar los resultados a niveles de deformación elástica más altos en la simulación.

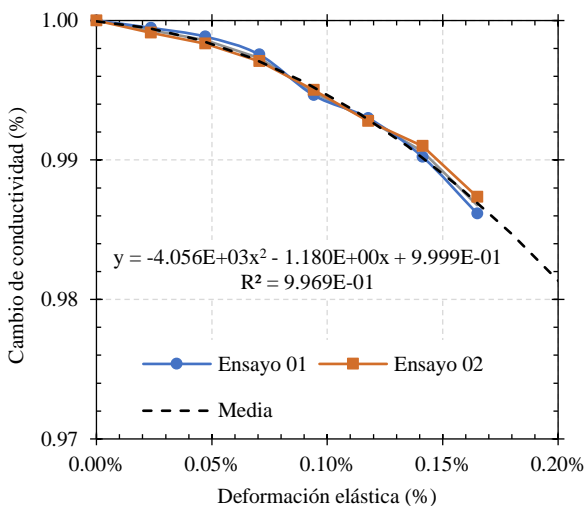


Figura 7. Conductividad vs deformación elástica.

3.2.3. Conductividad vs deformación total

Tomando las ecuaciones de las líneas de tendencia de los resultados de la deformación plástica y elástica y

sumándolas, se obtiene un nuevo conjunto de datos de conductividad frente a la deformación total. Esos datos se representan gráficamente en la Figura 8.

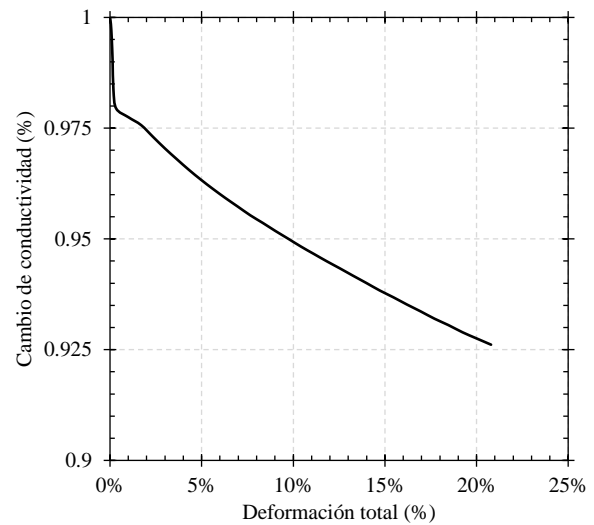


Figura 8. Cambio de conductividad vs deformación total.

3.3. Ensayo experimental y simulación

3.3.1. Comparación entre ensayo y simulación

La Figura 9 muestra la carga frente al desplazamiento de la línea de carga (load line displacement, LLD) de la prueba experimental y las simulaciones. Un valor de ℓ_c menor supone un comportamiento más dúctil. La comparación muestra que los parámetros de fractura se ajustaron para simular el mismo comportamiento mecánico que en el ensayo experimental.

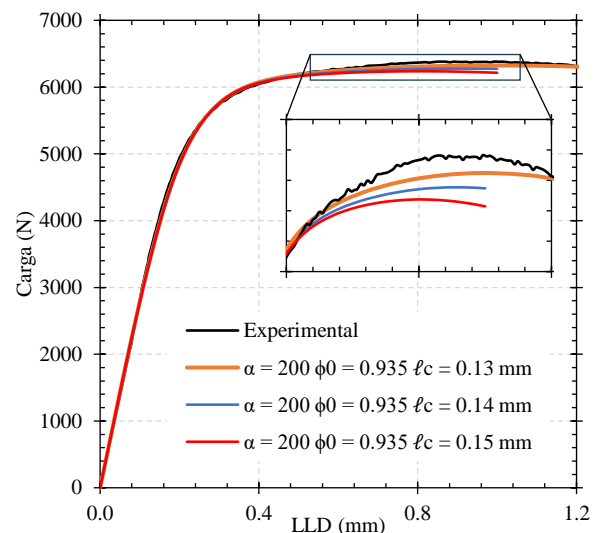


Figura 9. Carga vs LLD simulado frente a experimental.

3.3.2. Simulaciones de la señal del DCPD

En la Figura 10 se comparan las 4 curvas de las simulaciones que se han realizado y una más del ensayo experimental. Se presenta el crecimiento de la señal del

DCPD frente al LLD y se observa cómo hay una gran influencia de la deformación en el DCPD.

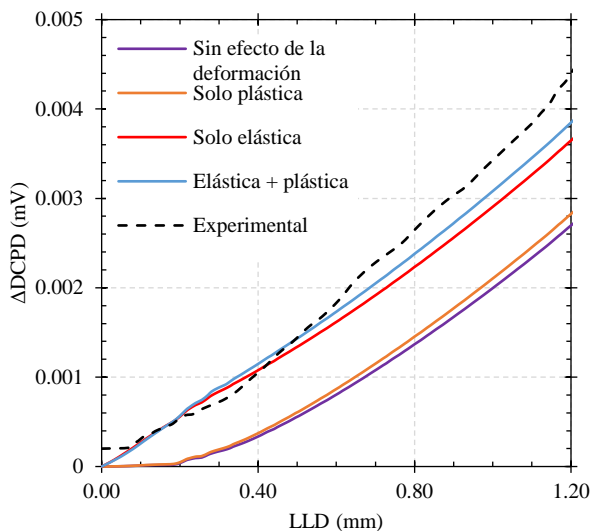


Figura 10. Simulaciones con diferentes efectos de la deformación sobre la conductividad.

La curva negra es la simulación del ensayo de fractura sin que la deformación afecte al valor de la conductividad, por lo tanto, la mayor parte del incremento de la señal del DCPD es debido al crecimiento de grieta, el cual comienza en un LLD = 0.2 mm. Hay que tener en cuenta que una pequeña parte del incremento del DCPD también es debido a la contracción geométrica, por lo tanto, al reducirse la sección debido a la deformación, el DCPD también aumenta. La curva naranja se corresponde con la simulación en la que solo la deformación plástica modifica el valor de la conductividad, se observa un pequeño incremento del DCPD cuando la grieta ya ha comenzado a crecer comparándolo con la curva negra, sin embargo, no hay un incremento apreciable antes de que la grieta comience a crecer. La curva roja es la simulación en la que solo la deformación elástica modifica el valor de la conductividad. Como se puede apreciar, la señal del DCPD va aumentando desde el inicio, al igual que en el ensayo experimental. Por lo tanto, es evidente que hay una gran influencia de la deformación elástica sobre la señal del DCPD. Por último, la curva azul es la simulación en la que la conductividad se ve afectada por la deformación total (elástica y plástica). La señal del DCPD crece ligeramente más que la simulación con el efecto de la deformación solo elástica. Esta última curva es la más cercana al ensayo experimental.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones son:

- El efecto de la deformación plástica y elástica en la conductividad eléctrica ha sido cuantificado experimentalmente.
- La conductividad se reduce de forma lineal a medida que la deformación plástica aumenta.

- La conductividad se reduce de forma cuadrática cuando la deformación elástica aumenta.
- Se ha desarrollado un modelo numérico que acopla mecánica, fractura mediante phase-field y corrientes eléctricas.
- La simulación concluye que el crecimiento inicial de la señal del DCPD es debido al efecto de la deformación elástica sobre la conductividad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la Unión Europea (ERC-StG-2024, HELMet, 101165414). Este trabajo también ha sido financiado por la Junta de Castilla y León a través del proyecto Safe H2 (BU-040-P23) cofinanciados con fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] Y. Si, J.P. Rouse, C.J. Hyde, Potential difference methods for measuring crack growth: A review, *Int. J. Fatigue* 136 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105624>.
- [2] H.H. Johnson, Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth, *Materials Research and Standards* 5 (1965) 442–445. <https://doi.org/https://ci.nii.ac.jp/naid/10029758676>.
- [3] M.A. Hicks, A.C. Pickard, A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical potential drop technique for crack length determination, 1982.
- [4] ASTM, ASTM E1820, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2020.
- [5] K.M. Tarnowski, D.W. Dean, K.M. Nikbin, C.M. Davies, Predicting the influence of strain on crack length measurements performed using the potential drop method, *Eng. Fract. Mech.* 182 (2017) 635–657. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.008>.
- [6] W. Cai, H.E. Chen, S. Xie, Y. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi, Y. Kensuke, A study on influence of plastic deformation on the global conductivity and permeability of carbon steel, in: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, IOS Press, 2014: pp. 371–378. <https://doi.org/10.3233/JAE-141853>.
- [7] L. Quinteros, E. García-Macías, E. Martínez-Pañeda, Electromechanical phase-field fracture modelling of piezoresistive CNT-based composites, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 407 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115941>.
- [8] A. Díaz, J.M. Alegre, I.I. Cuesta, E. Martínez-Pañeda, A COMSOL framework for predicting hydrogen embrittlement, Part II: Phase field fracture, *Eng. Fract. Mech.* 319 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111008>.