

EVALUACIÓN DE LA ZONA PLÁSTICA EN FATIGA PARA UN ACERO BAINITICO MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

M.Carrera*, P. Lopez-Crespo, D. Camas, J. Zapatero, B. Moreno

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación.
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Málaga.
D/Doctor Ortiz Ramos, s/n, 29071. Málaga, España
* Persona de contacto: m.carrera@uma.es

RESUMEN

En este artículo se presenta una nueva metodología para medir la zona plástica de una grieta en fatiga. Se han adquirido datos de difracción de rayos X sincrotrón para una probeta *Compact Tension* de acero bainítico, en el plano medio a través del espesor. Estos datos han sido traducidos a campos 2D de deformación en torno al vértice. Se ha generado un campo de deformación angular artificial para, en consonancia con los anteriores, obtener el campo de deformación equivalente de Von Mises. La aplicación de la ley de comportamiento elástico ha permitido hallar campos de tensión equivalente entorno al vértice de grieta. Así, se permite estimar la zona plástica y sus dimensiones. Finalmente se estudia la precisión de la metodología a través de una comparación con los modelos de zona plástica de Irwin y de Dugdale.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Fatiga, Micro-ensayos, Entallas

ABSTRACT

A new methodology is presented in this work to measure the plastic zone of a fatigue crack. Experimental data were acquired by synchrotron X-ray diffraction from a Compact Tension specimen made of bainitic steel, at the mid-plane of the specimen through the thickness. These data were translated to 2D strain maps surrounding the crack tip. An artificially generated shear strain component was used in consonance with those, to obtain the Von Mises equivalent strain field. The elastic behavior law was used, so equivalent stress maps around the crack tip are obtained. This allows the estimation plastic zone shape and dimensions. The efficacy of the new methodology is checked against Irwin and Dugdale plastic zone models.

KEYWORDS: Plastic zone in fatigue; Synchrotron X-ray diffraction; bainitic steel;

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de grietas es una de las causas más importantes de fallos catastróficos en la industria moderna. Para entender mejor dichos fallos, y aprovechar en mayor medida la capacidad resistente de los materiales, se hace necesario un estudio enfocado en la plasticidad de estos [1], y en cómo esa región plástica se desarrolla en el frente de una grieta creciente.

El estudio de la zona plástica en torno al vértice de grieta ha recorrido un largo camino. Si bien la ley de Paris [2] ya sentó las bases del crecimiento de grietas, validándola mediante su aplicación en diversos conjuntos de datos experimentales, fue Hutchinson [3] quien esbozó ciertos resultados sobre campos de deformación y tensión plana en régimen plástico, tanto en los campos cercanos como lejanos al vértice de grieta.

Ambos estudios sirvieron como punto de inicio para otros muchos. Algunos de ellos se centraron en encontrar relaciones entre la geometría de la zona circundante y la propia grieta. Banerjee [4] analizó la influencia de la geometría de la probeta CT en el tamaño de la zona plástica, destacando como el tamaño de esta disminuye al aumentar el ancho (W) de la probeta. Así mismo, Park [5] demostró que en muestras de acero inoxidable 304 e Inconel 718, la tasa de crecimiento de grieta o *FCGR* es función del espesor t de la probeta CT, disminuyendo esta al aumentar t . Consideraron entonces que el tamaño de la zona plástica es un parámetro importante, en conjunción con el nivel de tensión aplicado, el espesor y los fenómenos de cierre de grieta [6].

Con las bases implantadas por los trabajos antes citados, otros investigadores buscaron analizar como las propiedades del material o las condiciones de carga podían afectar al crecimiento de la propia grieta y la zona plástica generada. Por ejemplo, Xin [7] propuso

soluciones analíticas para la zona plástica en tensión plana, con la consideración de que el material fuese isótropo y ortotrópico, y llegando a vislumbrar la influencia del ángulo de la grieta y sus condiciones de carga en su crecimiento. Así mismo, Banks y Garlick [8] estudiaron las diferencias de tamaño existentes en la zona plástica ante condiciones de tensión y deformación plana. Así, determinaron la influencia del coeficiente de Poisson y como la anisotropía del material puede afectar también a dicho tamaño.

Imad et al [9] también estudiaron la *FCGR* y su influencia en el tamaño de la zona plástica, para una muestra de acero 12NC6, encontrando cierta relación entre esta y la energía de absorción en dicha zona. En la misma tónica, Tekin y Martin [10] midieron la zona plástica en una aleación de Ni, usando *Selected Area Channelling Patterns*, determinando así que el tamaño de la zona plástica para cierto valor de ΔK varía con la raíz cuadrada de la *FCGR*. También es destacable reseñar el trabajo de Uguz y Martin [11], al establecer que el tamaño de zona plástica en el extremo de grieta está relacionado con su resistencia a la fractura y revisando los factores que determinan dicho tamaño tanto en cargas monotónicas como en fatiga.

Si bien los inicios de estos estudios tenían un enfoque más teórico, en la actualidad se hace necesaria una caracterización específica del comportamiento de los materiales que más se usan en la industria hoy en día. Dicha caracterización puede estimarse mediante la aplicación de métodos de diversa índole. La mayoría de ellos hasta la actualidad, se han centrado en el comportamiento en la superficie del material. Ejemplo de ello son los estudios de fotoelasticidad de Brinson [12], Mishra [13] o Theocaris [14]. Si bien los resultados obtenidos por dichos estudios son coherentes, la utilidad del método es restringida al poder usar solo ciertos materiales, como el policarbonato. Otros autores como Lino [15] han estudiado la zona plástica mediante observación directa, aprovechando los fenómenos de recristalización. En la misma tónica de estudios de superficie, cabe destacar, por ejemplo, los trabajos de Díaz [16,17] y Patterson [18,19] a partir de datos obtenidos con termoelasticidad, viendo como el factor de intensidad de tensiones obtenido con este método de estudio se determina a partir del campo de tensiones cíclico, y observando que la técnica es sensible a los efectos del cierre de grieta y a la presencia de esfuerzos de tensión residuales por soldadura. Dicha metodología se pudo aplicar también a la técnica de correlación de imágenes [20] y analizar la influencia del nivel de carga [21].

Otros métodos superficiales para estudiar la zona plástica están basados en tecnología de interferometría. Muestra de ello son los trabajos de Tay [22] mediante interferometría láser, los de Nicoletto [23] y Sivaneri [24] mediante interferometría de Moiré, o los de Vasco-Olmo

[25] y Herbert [26] con interferometría electrónica de patrones de moteado o *ESPI*.

La tecnología de correlación de imágenes digitales o *DIC* es otra de las técnicas de estudio superficial para comprender como funciona el crecimiento de grieta. Por ejemplo, Vasco-Olmo [27], plasmó los mapas de deformación en torno al vértice de grieta de fatiga en probetas CT, a partir de mapas de desplazamientos captados con *DIC*. De este modo validó diferentes modelos analíticos existentes, como el de Westergaard o Christopher-James-Patterson (CJP). Hosdez [28], por su parte, comparó los resultados de *DIC* con medidas de caída de corriente o *DCPD*, poniendo de manifiesto la similitud de resultados obtenidos mediante ambos métodos.

Los modelos de elementos finitos o *FEM* conforman la primera aproximación de lo que ocurre en el interior de una pieza sometida a fatiga, cuando una grieta crece [29]. Su conjunción con otras técnicas de carácter experimental que permitan validar sus resultados forman un pilar base en las tendencias de investigación actuales. Existen numerosos ejemplos de estudios con estas combinaciones, como el realizado por Camas [30,31], en el que se modelaba el crecimiento de una grieta para un aluminio 2024 mediante *FEM*, y cuyos resultados se validaron mediante ensayo experimental por *DIC*. Besel y Breitbarth [32] también usaron esta pareja de técnicas sobre el mismo tipo de aluminio, y así estudiar los diferentes tipos de zona plástica en torno al vértice de grieta. Otra técnica usada para la validación de modelos *FEM* es la correlación con resultados experimentales directos, como los de Zhang [33], quien denotó la similitud de la *FCGR* y el tamaño de zona plástica de su modelo con los resultados obtenidos.

De manera alternativa, autores como McClung [34] han usado *FEM* para estudiar los tamaños de zona plástica otorgados por los modelos bajo diferentes configuraciones, validando estos con los modelos teóricos aceptados de Irwin y Dugdale.

No obstante, ninguna de las técnicas anteriores permite conocer a ciencia cierta lo que ocurre en el interior del material, a cierta profundidad de la superficie. Es ahí donde las técnicas basadas en difracción y tomografía se hacen relevantes. Destacan trabajos como el de Lopez-Crespo [35], en el que se miden los efectos de la sobrecarga en una muestra CT de acero bainítico, consiguiendo resoluciones bastante buenas entorno al vértice de grieta, y revelando además los efectos de la zona plástica en el endurecimiento de la grieta.

Algunos estudios como el de Davidson [36] usan varias técnicas de alta energía en consonancia. Así, se compararon dos técnicas experimentales como *x-ray micro beam* y *electronic channeling contrast* en un acero bajo en carbono, de forma que pudiese medir propiedades microscópicas en la zona plástica. Un enfoque similar fue

adoptado por Steuerer [37], aplicando tomografía y difracción de rayos X en una probeta de Al-Li similar al AA5091, para visualizar grietas y campos de tensiones y deformaciones, que permitiesen validar sus resultados predichos con FEM. Recientemente se ha podido aplicar la técnica para la estimación del factor de intensidad de tensiones en el interior del material [38]. El uso de estas técnicas es especialmente relevante para conocer el fenómeno de cierre de grieta, como ocurre en el estudio de Khor [39]. Mediante el uso de microtomografía, para un aluminio 2024, se estudió la orientación de granos y el crecimiento de la grieta, logrando un estudio micromecánico efectivo. Barabash [40] es otro ejemplo, en el que el uso de difracción de neutrones permite el estudio efectivo del cierre de grieta.

Las casuísticas que rodean a la tomografía de rayos X sincrotrón in situ quedan reflejadas en el artículo de Buffiere [41], quien recoge las ventajas, oportunidades, material y limitaciones de esta técnica. En el contexto que se ha presentado se plantea este estudio, a fin de aportar información relevante con el uso combinado de técnicas de alta energía, como es el ensayo por difracción de rayos X, y apoyado por técnicas experimentales como los ensayos de tracción y FEM. Además, se tendrán en cuenta las mecánicas de la fractura elastoplástica, y diferentes modelos de distribución de tensiones en torno al vértice de grieta, como los sugeridos por Irwin y Dugdale.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material, y ensayo de fatiga.

El material en cuestión es un acero bainítico templado y recocido, similar al Q1N (HY80) [42], cuya composición química es la siguiente, referido a la masa de Fe: 16% C, 25% Si, 31% Mn, 1% P, 0.8% S, 142% Cr, 271% Ni, 41% Mo, 10% Cu. Las propiedades relativas al ensayo de tracción son las siguientes: límite elástico $\sigma_y = 699\text{MPa}$ y límite de rotura $\sigma_u = 858\text{MPa}$. Se mecanizó una probeta CT del material antes mencionado, de dimensiones $W = 62.5\text{mm}$ y $B = 12\text{mm}$.

El ensayo se realizó usando la misma configuración que la descrita en [43]. Las aberturas del rayo incidente se abrieron a $60 \times 60 \mu\text{m}$, aportando una resolución lateral (x, y) de $60 \mu\text{m}$. Dicha resolución fue posible gracias al pequeño tamaño de grano del acero bainítico usado. La penetración a través del espesor del material es de aproximadamente 1.4 mm. Si bien dicha penetración hace posible suponer condiciones de deformación plana, la situación real es distinta, al obtenerse datos volumétricos y no superficiales.

Se tuvo especial cuidado a la hora de corregir los ligeros movimientos de la muestra que tenían lugar durante los ciclos de fatiga, así como para las situaciones de carga en $K_{\text{max}} = 46.6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. De este modo, se aseguró que todos los mapas de deformación se tomaban tomando como

referencia la muestra y no al equipo usado en el laboratorio. Se estimó que la posición de la muestra podía ser corregida $\pm 50 \mu\text{m}$.

Se generó una grieta de fatiga mediante la aplicación de 51.000 ciclos a una frecuencia de 10Hz, y un rango de intensidad de tensiones $\Delta K = 28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ con $K_{\text{min}}/K_{\text{max}} = 0.03$. Una vez que la grieta de fatiga hubo crecido hasta una longitud de 12.75 mm, se realizó la medida de los campos de deformaciones en el interior del material mediante difracción de rayos X sincrotrón.

2.2. Posprocesado. Obtención de la zona plástica

El proceso aplicado para la obtención de la zona plástica queda reflejado en la Figura 1.

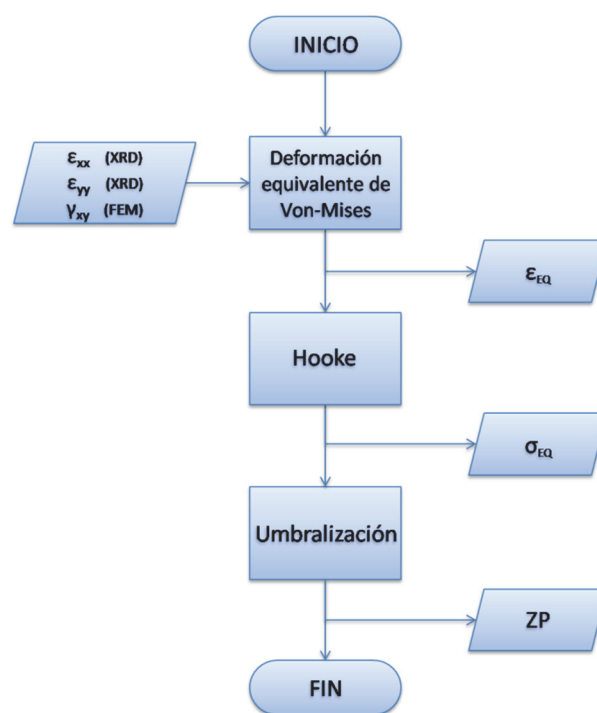


Figura 1. Proceso de obtención de zona plástica a partir de campos de deformación entorno al vértice de grieta.

Los campos de deformación en dirección de crecimiento de grieta y apertura de grieta son obtenidos del ensayo de XRD antes mencionado. Pueden observarse en la Figura 2. A partir de un modelo FEM, se pueden estimar los campos de deformación angular γ_{xy} . De este modo, bajo condiciones de deformación plana, es posible hallar un campo de deformación elástica equivalente entorno al vértice de grieta. Dicho campo viene dado por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{3}{4\sqrt{2}} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 6 \cdot \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

La aplicación de la ley de Hooke permite la obtención de campos de tensiones entorno al vértice de grieta. Una

sencilla umbralización para valores superiores al límite elástico permite visualizar la zona plástica entorno al vértice. Los resultados obtenidos son comparados con modelos teóricos aceptados para deformación plana como el de Irwin o Dugdale.

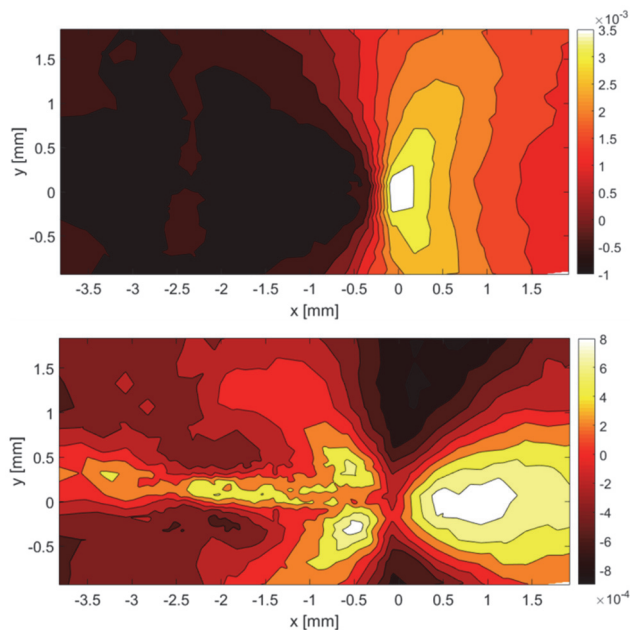


Figura 2. Arriba, campo de deformación en la dirección de apertura de grieta. Abajo, campo de deformación en la dirección de crecimiento de grieta. Ambos obtenidos mediante XRD.

3. RESULTADOS. ZONA PLÁSTICA OBTENIDA

En la Figura 3 se observa la zona plástica obtenida con el método, 8000 ciclos después del estado descrito en la sección 2.1. La zona plástica obtenida presenta un tamaño rectangular aproximado de 0.2×1.1 mm. El modelo de Irwin para la casuística de este problema presenta un radio corregido de 0.47 mm. Así mismo, el modelo de Dugdale marca 0.58 mm. Puede observarse como los datos experimentales casan con los modelos antes mencionados, situándose su medida real entre ambos límites. La forma aproximada es la esperada, teniendo en cuenta las condiciones mayoritarias de deformación plana inherentes al propio experimento y medición. Así mismo, se observa que dicha zona es simétrica respecto a $Y=0$, por donde discurre la grieta.

4. CONCLUSIONES

Se ha planteado un método para la obtención de la zona plástica en torno al vértice de grietas de fatiga. Dicho método requiere de datos de deformación en la dirección de crecimiento de grieta y en dirección de apertura de grieta. Si bien el método presenta resultados factibles, presenta las siguientes limitaciones:

- Se hace necesaria la adición de un campo de deformación angular. Dicho campo se ha

obtenido mediante FEM para el caso actual. Si bien dicho modelo permite la aplicación del método, los resultados obtenidos no dejan de ser aproximados. Se requerirían datos experimentales de deformación angular para obtener resultados más correctos.

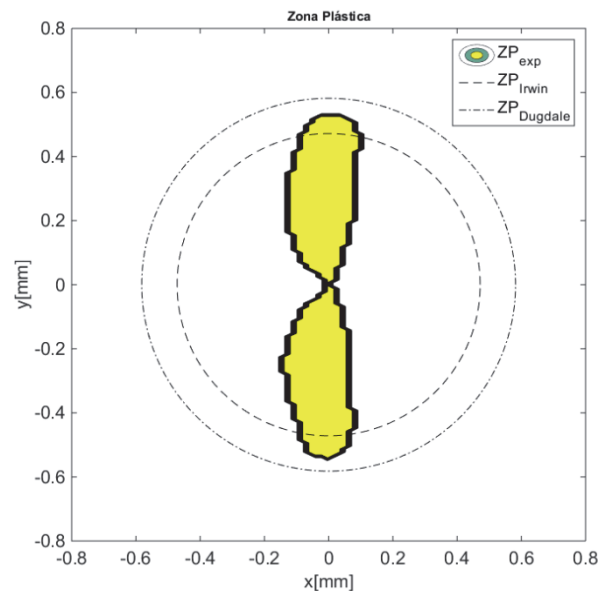


Figura 3. Zona Plástica (ZP) umbralizada obtenida a partir del campo de tensiones en torno al vértice de grieta. Comparativa con otros modelos.

- Las medidas de XRD están referidas a un volumen. Si bien dicha técnica asegura la penetración a través de la muestra, las medidas obtenidas no corresponden a un plano concreto del interior de esta, sino a una medida volumétrica referente a cierto espesor penetrado. Si bien la asunción de condiciones de deformación plana es útil para la aplicación del método, la medida real debería asumir unas condiciones intermedias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación aportada para la realización de este trabajo al Ministerio de Economía y Competitividad (referencia MAT2016-76951-C2-2-P) y al Fondo Social Europeo a través de la Iniciativa de Empleo Juvenil (referencia UMAJI84). Los autores agradecen también el apoyo del profesor Philip J Withers de la Universidad de Manchester (RU).

REFERENCIAS

- [1] Lopez-Crespo, P., Pommier, S. (2008). Numerical Analysis of Crack Tip Plasticity and History Effects under Mixed Mode Conditions, *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, 2(12), pp. 1567–76.

- [2] Paris, P., Erdogan, F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *J. Basic Eng.*, 85(4), pp. 528–33.
- [3] Hutchinson, J.W. (1968). Plastic stress and strain fields at a crack tip, *J. Mech. Phys. Solids*, 16, pp. 337–47.
- [4] Banerjee, S. (1981). Influence of specimen size and configuration on the plastic zone size, toughness and crack growth, *Eng. Fract. Mech.*, 15(3–4), pp. 343–90.
- [5] Park, H.B., Kim, K.M., Lee, B.W. (1996). Plastic zone size in fatigue cracking, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 68, pp. 279–85.
- [6] Moreno, B., Martin, A., Lopez-Crespo, P., Zapatero, J., Dominguez, J. (2016). Estimations of fatigue life and variability under random loading in aluminum Al-2024T351 using strip yield models from NASGRO, *Int. J. Fatigue*, 91, pp. 414–22.
- [7] Xin, G., Hangong, W., Xingwu, K., Liangzhou, J. (2010). Analytic solutions to crack tip plastic zone under various loading conditions, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 29, pp. 738–45.
- [8] Banks, T.M., Garlick, A. (1984). The form of crack tip plastic zones, *Eng. Fract. Mech.*, 19(3), pp. 571–81.
- [9] Ould Chikh, B., Imad, A., Benguediab, M. (2008). Influence of the cyclic plastic zone size on the propagation of the fatigue crack in case of 12NC6 steel, *Comput. Mater. Sci.*, 43, pp. 1010–7.
- [10] Tekin, A., Martin, J.W. (1989). High-resolution measurement of crack-tip plastic zone sizes by selected area channelling patterns, *Metallography*, 22, pp. 1–14.
- [11] Uguz, A., Martin, J.W. (1996). Plastic Zone Size Measurement Techniques for Metallic Materials, *Mater. Charact.*, 37(2–3), pp. 105–18.
- [12] Brinson, H.F. (1970). The Ductile Fracture of Polycarbonate Paper indicates that polycarbonate obeys the model of ductile yielding by comparing measured plastic-zone sizes and displacements to the theoretical predictions, *Exp. Mech.*, 10(2), pp. 72–7.
- [13] Mishra, S.C., Parida, B.K. (1985). Determination of the size of crack-tip plastic zone in a thin sheet under uniaxial loading, *Eng. Fract. Mech.*, 22(3), pp. 351–7.
- [14] Theocaris, P.S., Gdoutos, E.E. (1975). The Size of Plastic Zones in Cracked Plates Made of Polycarbonate, *Exp. Mech.*, 15(5), pp. 169–76.
- [15] Lino, V. (2013). Accumulated plastic zone around fatigue crack in Type 304 stainless steel, *Met. Sci.*, 10(5), pp. 159–64.
- [16] Díaz, F.A., Patterson, E.A., Tomlinson, R.A., Yates, J.R. (2004). Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 27, pp. 571–83.
- [17] Díaz, F.A., Yates, J.R., Patterson, E.A. (2004). Some improvements in the analysis of fatigue cracks using thermoelasticity, *Int. J. Fatigue*, 26, pp. 365–76.
- [18] Tomlinson, R.A., Patterson, E.A. (2011). Examination of Crack Tip Plasticity Using Thermoelastic Stress Analysis. In: *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, (Ed.), *Thermomechanics and Infra-Red Imaging*, vol. 7, Springer, pp. 123–9.
- [19] Patki, A.S., Patterson, E.A. (2010). Thermoelastic stress analysis of fatigue cracks subject to overloads, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 33, pp. 809–21.
- [20] Lopez-Crespo, P., Shterenlikht, A., Yates, J.R., Patterson, E.A., Withers, P.J. (2009). Some experimental observations on crack closure and crack-tip plasticity, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 32(5), pp. 418–29.
- [21] Mokhtarishirazabad, M., Lopez-Crespo, P., Zanganeh, M. (2018). Stress intensity factor monitoring under cyclic loading by digital image correlation, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 41(10), pp. 2162–71.
- [22] Tay, T.E., Yap, C.M., Tay, C.J. (1995). Crack tip and notch tip plastic zone size measurement by the laser speckle technique, *Eng. Fract. Mech.*, 52(5), pp. 879–93.
- [23] Nicoletto, G. (1989). Plastic zones about fatigue cracks in metals, *Int. J. Fatigue*, 11(2), pp. 107–15.
- [24] Sivaneri, N.T., Xie, Y.P., Kang, B.S.J. (1991). Elastic-plastic crack-tip-field numerical analysis integrated with moire interferometry, *Int. J. Fract.*, 49, pp. 291–303.
- [25] Vasco-Olmo, J.M., Díaz, F.A., Patterson, E.A. (2016). Experimental evaluation of shielding

effect on growing fatigue cracks under overloads using ESPI, *Int. J. Fatigue*, 83, pp. 117–26.

- [26] Herbert, D.P., Al-Hassani, A.H.M., Richardson, M.O.W. (1984). The use of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) in the crack propagation analysis of epoxy resins, *Opt. Lasers Eng.*, 5, pp. 249–62.
- [27] Vasco-Olmo, J.M., James, M.N., Christopher, C.J., Patterson, E.A., Díaz, F.A. (2016). Assessment of crack tip plastic zone size and shape and its influence on crack tip shielding, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 39(8), pp. 969–81.
- [28] Hosdez, J., Witz, J.-F., Martel, C., Limodin, N., Najjar, D., Charkaluk, E., Osmond, P., Szymtka, F. (2017). Fatigue crack growth law identification by Digital Image Correlation and electrical potential method for ductile cast iron, *Eng. Fract. Mech.*, 182, pp. 577–94.
- [29] Pommier, S., Lopez-Crespo, P., Decreuse, P.Y. (2009). A multi-scale approach to condense the cyclic elastic-plastic behaviour of the crack tip region into an extended constitutive model, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 32(11), pp. 899–915.
- [30] Camas, D., Lopez-Crespo, P., Gonzalez-Herrera, A., Moreno, B. (2017). Numerical and experimental study of the plastic zone in cracked specimens, *Eng. Fract. Mech.*, 185, pp. 20–32.
- [31] Lopez-Crespo, P., Camas, D., Antunes, F. V., Yates, J.R. (2018). A study of the evolution of crack tip plasticity along a crack front, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 98, pp. 59–66.
- [32] Besel, M., Breitbarth, E. (2016). Advanced analysis of crack tip plastic zone under cyclic loading, *Int. J. Fatigue*, 93(1), pp. 92–108.
- [33] Zhang, J.Z., Zhang, J.Z., Yi Du, S. (2001). Elastic-plastic finite element analysis and experimental study of short and long fatigue crack growth, *Eng. Fract. Mech.*, 68, pp. 1591–605.
- [34] McClung, R.C. (1991). Crack closure and plastic zone sizes in fatigue, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 14(4), pp. 455–68.
- [35] Lopez-Crespo, P., Steuwer, A., Buslaps, T., Tai, Y.H., Lopez-Moreno, A., Yates, J.R., Withers, P.J. (2015). Measuring overload effects during fatigue crack growth in bainitic steel by synchrotron X-ray diffraction, *Int. J. Fatigue*, 71, pp. 11–6.
- [36] Davidson, D.L., Lankford, J., Yokobori, T., Sato, K. (1976). Fatigue crack tip plastic zones in low carbon steel, *Int. J. Fract.*, 12(4), pp. 579–85.
- [37] Steuwer, A., Edwards, L., Pratihari, S., Ganguly, S., Peel, M., Fitzpatrick, M.E., Marrow, T.J., Withers, P.J., Sinclair, I., Singh, K.D., Gao, N., Buslaps, T., Buffière, J.Y. (2006). In situ analysis of cracks in structural materials using synchrotron X-ray tomography and diffraction, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 246, pp. 217–25.
- [38] Lopez-Crespo, P., Peralta, J. V., Withers, P.J. (2018). Synchrotron X-ray diffraction based method for stress intensity factor evaluation in the bulk of materials, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 98, pp. 72–7.
- [39] Khor, K.H., Buffière, J.Y., Ludwig, W., Sinclair, I. (2006). High resolution X-ray tomography of micromechanisms of fatigue crack closure, *Scr. Mater.*, 55, pp. 47–50.
- [40] Barabash, R., Gao, Y., Sun, Y., Lee, S.Y., Choo, H., Liaw, P.K., Brown, D.W., Ice, G.E. (2008). Neutron and X-ray diffraction studies and cohesive interface model of the fatigue crack deformation behavior, *Philos. Mag. Lett.*, 88(8), pp. 553–65.
- [41] Buffiere, J.Y., Maire, E., Adrien, J., Masse, J.P., Boller, E. (2010). In situ experiments with X ray tomography: An attractive tool for experimental mechanics, *Proc. Soc. Exp. Mech. Inc.*, 50, pp. 289–305.
- [42] Robertson, I.M. (1994). Measurement of the effects of stress ratio and changes of stress ratio on fatigue crack growth rate in a quenched and tempered steel, *Int. J. Fatigue*, 16(3), pp. 216–20.
- [43] Steuwer, A., Rahman, M., Shterenlikht, A., Fitzpatrick, M.E., Edwards, L., Withers, P.J. (2010). The evolution of crack-tip stresses during a fatigue overload event, *Acta Mater.*, 58(11), pp. 4039–52.