

Comportamiento frágil de las armaduras corroídas

Brittle behavior of corroded rebars

Javier Sánchez Montero^{*, a}, Julio E. Torres Martín^b, Nuria Rebolledo Ramos^c

^aInstituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (IETC-CSIC).

^bInstituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (IETC-CSIC).

^cInstituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (IETC-CSIC).

RESUMEN

La corrosión de las armaduras es una de las principales razones de la reducción de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. La corrosión da lugar a la generación de diferentes defectos con geometrías diferentes. El presente estudio se centra en evaluar el comportamiento mecánico de armaduras con diferentes tipos de defectos, desde corrosión generalizada, por picaduras hasta corrosión bajo tensión y fragilización por hidrógeno. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia de los aceros no depende únicamente de la pérdida de material, sino que es muy importante evaluar la geometría de los defectos.

ABSTRACT

Corrosion of reinforcement is one of the main reasons for reducing the durability of structures. Corrosion results in the appearance of different defects of various geometries. This study focuses on evaluating the mechanical behaviour of rebars with different types of defects, from generalised corrosion, pitting to stress corrosion and hydrogen embrittlement. The results obtained show that the strength of steel rebars does not depend only on material loss, but that it is very important to evaluate the geometry of the defects.

PALABRAS CLAVE: armadura, corrosión, fragilización por hidrógeno, corrosión bajo tensión.

KEYWORDS: rebar, corrosion, hydrogen embrittlement, stress corrosion cracking.

1 Introducción

La corrosión de las armaduras puede producir diversos tipos de deterioros en las estructuras, como por ejemplo la pérdida de adherencia de las armaduras [1, 2]. Desde el punto de vista estructural una de las consecuencias de la corrosión es el posible comportamiento frágil de las armaduras [3-8] que puede producir fallos repentinos en componentes.

Existen diversos mecanismos de corrosión que pueden tener lugar en las estructuras de hormigón armado, dando lugar a diferentes tipos

de corrosión: corrosión homogénea, corrosión por picaduras, corrosión bajo tensión, etc. Cada tipo de ataque produce una degradación diferente que conlleva un comportamiento mecánico distinto. Por ejemplo, la aparición de un defecto puede provocar un fallo frágil por concentración de tensiones de forma que a escala microscópica pueda tener un comportamiento dúctil, mientras que en otros casos se puede producir un comportamiento frágil a escala microscópica. Un ejemplo de este

último es el fenómeno de fragilización por hidrógeno [3, 9-12].

Existen resultados experimentales de corrosión de armaduras en condiciones de laboratorio en las que se relaciona el grado de corrosión con su comportamiento a tracción [13-15]. En la figura 1 se muestra la relación entre la reducción de resistencia última (F_u/F_{u0}) y la pérdida de peso por corrosión ($100 \cdot \Delta W/W_0$). Almusallam emplea en su estudio armaduras de dos diámetros diferentes, 6 y 12 mm de diámetro. Los ensayos los realiza en hormigón aplicando una densidad de corriente de 2 mA/cm², inmersas en una disolución de cloruro sódico al 5% [13]. Apostolopoulos emplea armaduras de 8 mm de diámetro embebidas en hormigón expuestas a una disolución de cloruro sódico [14]. En el caso de Muñoz et al. se realizan los ensayos en una disolución 3% de cloruro sódico empleando armaduras de 7, 8, 16 y 20 mm de diámetro, y una densidad de corriente de 0.10 mA/cm² [15]. En todos los casos, el grado de corrosión se ha medido por pérdida gravimétrica después de su decapado. Una vez caracterizada la misma se realizan ensayos de tracción para evaluar su comportamiento mecánico.

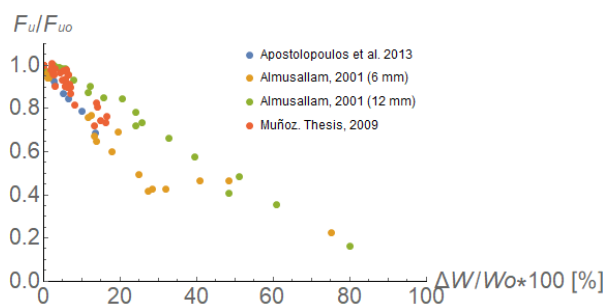


Figura 1. Datos experimentales extraídos de diversos autores [13-15].

2 Metodología

Se ha simulado por elementos finitos el comportamiento de diferentes tipos de daño por corrosión: corrosión localizada y corrosión por picaduras. Para este estudio se ha empleado el

software COMSOL Multiphysics. Se ha simulado un ensayo de tracción aplicando incrementos de carga de $F_{i0}/100$, donde F_{i0} es la carga máxima para la armadura sin defectos. Para evitar que exista una influencia del defecto en el extremo de aplicación de la carga, se realiza la simulación sobre una longitud $l = 5d$. En los casos en los que la geometría del defecto es muy extendida en la dirección del eje de la armadura se emplea una longitud de $l = 7.5d$ [16].

Las ecuaciones características del material son las correspondientes al acero B500 B [17]. Se ha empleado una curva bi-lineal de acuerdo con la Norma EN-1992-1-1. Se toma como límite elástico $f_{yk} = 560$ MPa y módulo elástico $E = 200$ GPa. El comportamiento plástico se simula por el coeficiente de endurecimiento k , que define la relación entre la carga máxima f_{uk} y el límite elástico f_{yk} , $k = 1.12$, para una deformación última de $\epsilon_{uk} = 5.6\%$. Por lo tanto, el valor de carga máxima es $f_{uk} = 605$ MPa.

Se ha tomado el criterio de von Mises como criterio de fallo. Este criterio es el más apropiado en el caso de materiales dúctiles con endurecimiento isotrópico [16].

2.1 Modelos 2D-axisimétricos

En primer lugar se han realizado modelos 2D-axisimétricos que tratan de reproducir la geometría de una corrosión del tipo localizado. La geometría del deterioro por corrosión se ajusta a un elipsoide de profundidad (p_x) y longitud (p_z). En estos modelos se puede simular una corrosión general cuando $p_z \rightarrow \infty$.

La figura 2 muestra una reconstrucción 3D del modelo 2D-axisimétrico de una armadura con un defecto por corrosión definido por los parámetros p_x y p_z .

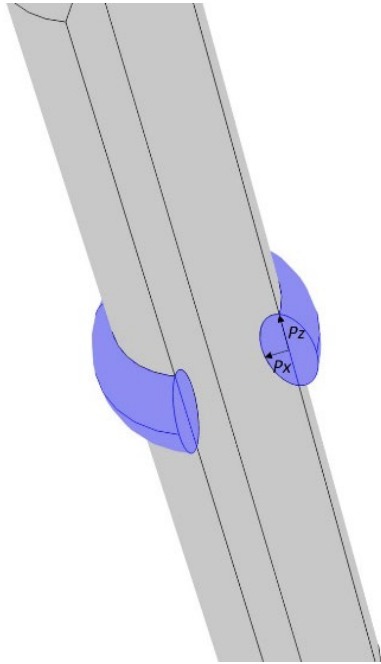


Figura 2. Reconstrucción 3D del modelo 2D-axisimétrico.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se pueden ajustar a una curva definida por los siguientes parámetros: i) la resistencia máxima referida a la armadura sin defecto (f_u/f_{u0}), ii) la relación entre profundidad de corrosión y radio de la armadura (p_x/R), y iii) la relación de aspecto de la corrosión (p_z/p_x). A continuación se muestra la ecuación obtenida para un valor de $R^2 = 0.96$. En la figura 3 se muestra la representación de la ecuación obtenida.

$$\frac{f_u}{f_{u0}} = 1.0 - 0.9276 \left(\frac{p_x}{R}\right) - 0.0157 \left(\frac{p_z}{p_x}\right) - 1.2067 \left(\frac{p_x}{R}\right)^2 + 0.0006 \left(\frac{p_z}{p_x}\right)^2$$

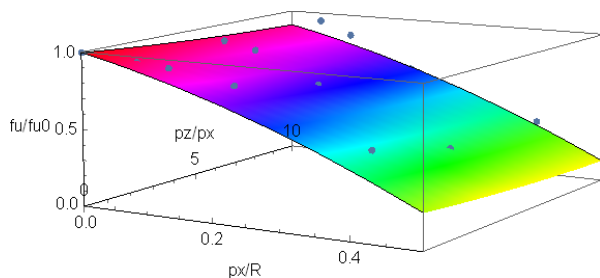


Figura 3. Corrosión localizada. Variación de la carga máxima en función de la geometría de la corrosión y el radio de la armadura.

2.2 Modelo 3D de corrosión por picadura

En el caso de la picadura es necesario recurrir a un modelo 3D donde la picadura se simula por un elipsoide de semi-ejes: p_x para la profundidad de la picadura, p_z para la extensión en el sentido longitudinal y p_y para la extensión en el sentido perpendicular a los otros dos. En la figura 4 se muestra una representación de la armadura con la geometría de la picadura. Este modelo tiene 2 planos de simetría que permiten reducir el número de grados de libertad de forma sustancial [16]. Por otra parte, para reducir el número de variables, se ha supuesto que la extensión de la picadura en las direcciones perpendiculares al crecimiento de la misma es homogénea, $p_y = p_z$.

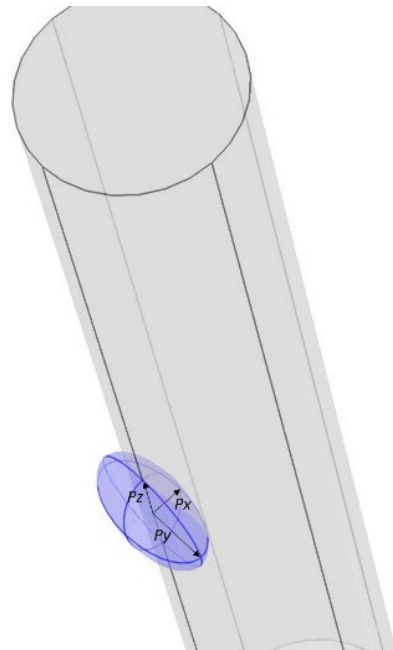


Figura 4. Modelo 3D de corrosión por picaduras.

Como en el caso anterior, se ha obtenido una ecuación que correlaciona la resistencia máxima referida a la armadura sin defecto (f_u/f_{u0}) con la relación entre profundidad de corrosión y radio de la armadura (p_x/R) y la relación de aspecto de la corrosión (p_z/p_x), con un $R^2 = 0.90$.

$$\frac{f_u}{f_{u0}} = 1.0 - 0.0636 \left(\frac{p_x}{R}\right) - 0.0065 \left(\frac{p_z}{p_x}\right) - 1.6050 \left(\frac{p_x}{R}\right)^2 + 0.0004 \left(\frac{p_z}{p_x}\right)^2$$

En la figura 5 se muestra la representación de la ecuación 2.

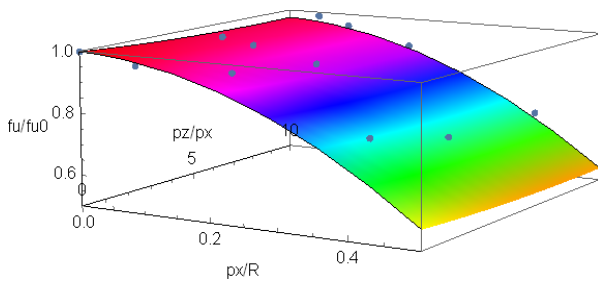


Figura 5. Corrosión por picadura. Variación de la carga máxima en función de la geometría de la corrosión y el radio de la armadura.

2.3 Corrosión bajo tensión y fragilización por hidrógeno

Se contempla un tercer escenario que es el crecimiento de fisuras mediante corrosión bajo tensión (SCC) y/o fragilización por hidrógeno (HE) en los que, al ocurrir en el medio agresivo, se produce una disminución de la tenacidad de fractura del acero (K_{IC}), propiciando en este caso una rotura frágil de la armadura [7, 9, 18-20]. La reducción en la tenacidad de fractura supone que, para un acero sometido a una determinada tensión, la fractura ocurre cuando se alcanza un defecto menor al caso de una armadura sin fragilizar. O lo que es lo mismo, el material se convierte en menos tolerante frente al daño, siendo necesario detectar la presencia de pequeñas fisuras para evitar su fractura. Por otra parte, a nivel microestructural se caracteriza por aparecer facetas de clivaje [6, 21]. Existen numerosos mecanismos que tratan de explicar este efecto considerando el hidrógeno como principal actor [22-27]. Desde el punto de vista experimental se ha encontrado que el efecto del medio corrosivo puede disminuir la tenacidad de fractura hasta un 60% [5, 6, 18].

En el caso de las armaduras es posible calcular el factor de intensidad de tensiones (K_I) de acuerdo con la ecuación propuesta por Astiz, Valiente y Elices [7, 28, 29]. Esta ecuación se ha desarrollado para una fisura superficial semi-

elíptica definida por la profundidad p_x y la extensión p_y :

$$\frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi p_x}} = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 C_{ij} \left(\frac{p_x}{d}\right)^i \left(\frac{p_y}{p_x}\right)^j$$

Donde, σ es la tensión remota, d es el diámetro de la armadura y C_{ij} son constantes.

3 Aplicación a un caso de estudio

Se ha elegido una armadura de 6 mm de radio, coincidiendo con algunos de los casos experimentales, sobre la que se aplicaran los casos de degradación descritos anteriormente.

Se ha empleado la ecuación 1 para simular el caso de una corrosión localizada cuyo comportamiento mecánico se aproxima a una pérdida de sección pura.

La ecuación 2 se ha empleado para simular la corrosión por picadura. Se ha considerado el caso más perjudicial desde el punto de vista mecánico que es el crecimiento de una picadura con geometría esférica, $p_y/p_x = p_z/p_x = 1$.

En cuanto al comportamiento en presencia de fisuras, ecuación 3, se ha tomado una tenacidad de fractura de $K_{IC} = 40 \text{ MPa m}^{0.5}$.

En la figura 6 se muestra la evolución de la carga máxima, referida a la carga máxima para una armadura sin defectos, en función del tamaño de defecto por corrosión. Se puede apreciar de forma clara que la evolución depende del tipo de daño. La corrosión por picaduras y la fisuración provocan una disminución en la resistencia del acero mayor que la corrosión localizada.

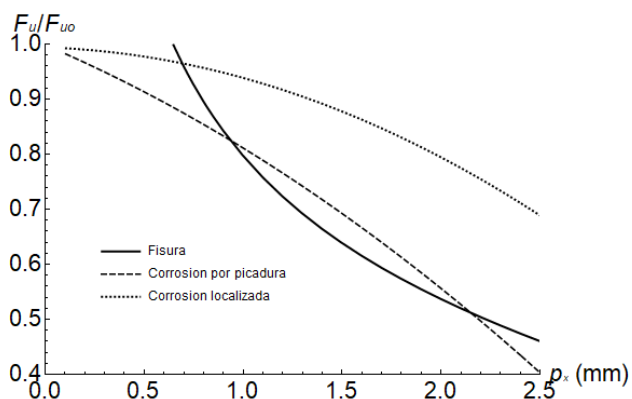


Figura 6. Variación de la resistencia máxima en función del tamaño de defecto por corrosión.

En la figura 7 se muestra la evolución de la carga máxima, referida a la carga máxima para una armadura sin defectos, en función de la pérdida de sección. El tipo de corrosión que es más sensible a la pérdida de resistencia es la que provoca la formación de fisuras, seguido de la corrosión por picaduras y la corrosión localizada. Como se ha comentado, la aparición de fisuras por SCC o HE provoca una elevada concentración de tensiones que pueden conducir a un fallo frágil del componente [7].

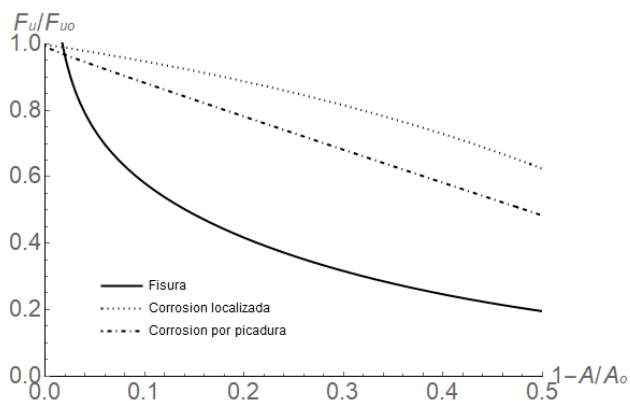


Figura 7. Variación de la resistencia máxima en función de la pérdida de sección.

Por último, es posible cuantificar la pérdida de peso para los casos de corrosión localizada y por picaduras y relacionarla con la variación de resistencia mecánica. Este ejercicio no tiene sentido para el caso de la fisuración puesto que la pérdida de material es mínima y no se puede cuantificar, incluso se puede llegar a producir el crecimiento de una fisura sin pérdida aparente de material. En la figura 8 se comparan los valores

teóricos obtenidos, según lo mostrado anteriormente, con los datos por en la literatura por diversos autores [13-15]. Los datos experimentales se ajustan entre el comportamiento de corrosión localizada (línea negra continua) y el comportamiento por corrosión con picaduras (líneas azules). Los ensayos que se han realizado en disolución dan lugar a comportamientos que se aproximan al comportamiento de corrosión localizada, sobre todo en los casos en los que se realizan ensayos con altas densidades de corriente. Por otra parte, los ensayos realizados en probetas de hormigón o mortero realizados en condiciones de bajas densidades de corriente dan lugar a la formación de picaduras, más o menos localizadas o aisladas.

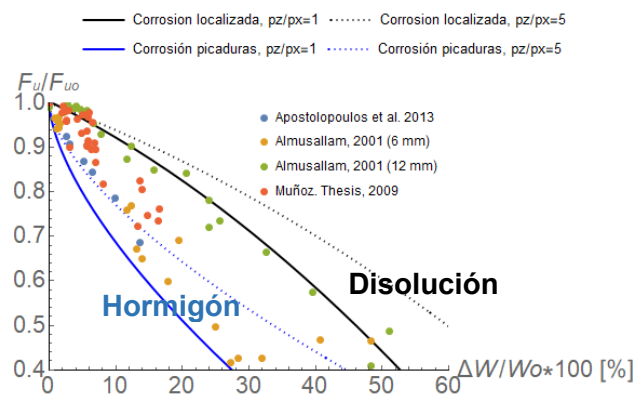


Figura 8. Comparación entre valores experimentales y teóricos.

4 Conclusiones

El comportamiento mecánico de las armaduras depende de la morfología de los defectos generados por corrosión. Dado que la misma pérdida de peso puede dar lugar a diferentes comportamientos mecánicos, es necesario caracterizar la geometría de los propios defectos para poder estimar su comportamiento mecánico.

Existe dos tipos de comportamiento frágil: i) El comportamiento frágil a escala macroscópica, como consecuencia de la concentración de tensiones producida por la aparición de defectos

como picaduras o fisuras. ii) El comportamiento frágil a escala microscópica, en muchos casos relacionado con la fragilización por hidrógeno, que produce una disminución de las propiedades mecánicas a través de la disminución de la tenacidad de fractura, y la aparición de facetas de clivaje en la superficie de fractura.

Por último, desde el punto de vista experimental es fundamental reproducir las condiciones de la corrosión natural en los ensayos acelerados. En función del medio y la intensidad de corrosión se puede llegar a una morfología de ataque por corrosión u otra.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ministerio por la financiación concedida en el Proyecto BIA2013-47892-P.

Referencias

- [1] Prieto, M., P. Tanner, and C. Andrade, *Bond Response in Structural Concrete with Corroded Steel Bars. Experimental Results*, in *Modelling of Corroding Concrete Structures*, C. Andrade and G. Mancini, Editors. 2011. p. 231-241.
- [2] Rodriguez, J., et al., *Calculation of structural degradation due to corrosion of reinforcements*. Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, ed. M.S. KonstaGdoutos. 2006. 527-536.
- [3] de Andres, P.L., J. Sanchez, and A. Ridruejo, *Hydrogen in α -iron: role of phonons in the diffusion of interstitials at high temperature*. Scientific Reports, 2019. **9**(1): p. 12127.
- [4] Sanchez, J., J. Fulla, and C. Andrade, *Fracture surface mobility mechanism in high-strength steel wires*. Engineering Fracture Mechanics, 2017. **186**(Supplement C): p. 410-422.
- [5] Sanchez, J., J. Fulla, and C. Andrade, *Corrosion-induced brittle failure in reinforcing steel*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017. **92**(Supplement C): p. 229-232.
- [6] Sanchez, J., et al., *Measurement of hydrogen and embrittlement of high strength steels*. Engineering Failure Analysis, 2016. **59**: p. 467-477.
- [7] Elices, M., et al., *Failure analysis of prestressed anchor bars*. Engineering Failure Analysis, 2012. **24**(0): p. 57-66.
- [8] Sanchez, J., et al., *Stress corrosion cracking mechanism of prestressing steels in bicarbonate solutions*. Corrosion Science, 2007. **49**(11): p. 4069-4080.
- [9] Sánchez, J., et al., *Cálculo de la velocidad de propagación de la fisura debido a fragilización por hidrógeno*. Hormigón y Acero, 2016. **67**(280): p. 325-332.
- [10] Castedo, A., et al., *Hydrogen induced changes in structural properties of iron: Ab initio calculations*, in *RILEM Bookseries*. 2012. p. 79-84.
- [11] Sanchez, J., et al., *Ab initio molecular dynamics simulation of hydrogen diffusion in α -iron*. Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 2010. **81**(13).
- [12] Sanchez, J., et al., *Hydrogen in α -iron: Stress and diffusion*. Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 2008. **78**(1).
- [13] Almusallam, A.A., *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*. Construction and Building Materials, 2001. **15**(8): p. 361-368.
- [14] Apostolopoulos, C.A., S. Demis, and V.G. Papadakis, *Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth analysis*. Construction and Building Materials, 2013. **38**(0): p. 139-146.
- [15] Muñoz Noval, A., *Comportamiento de vigas hiperestáticas de hormigón armado corroídas y reparadas con mortero. Pérdida de propiedades del acero de refuerzo, y fisuración del recubrimiento de hormigón por corrosión*. 2009, Universidad Politécnica de Madrid.
- [16] Hingorani, R., et al. *Loss of ductility and strength of reinforcing steel due to pitting corrosion*. in *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013*. 2013.
- [17] UNE-ENV-10080, *Acero para armaduras de hormigón armado, Acero corrugado soldable B500, Condiciones técnicas de suministro para barras, rollos y mallas electrosoldadas*. 1996, AENOR.
- [18] Sanchez, J., J. Fulla, and C. Andrade. *Stress corrosion cracking and fracture toughness of High Strength Steels*. in *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013*. 2013.

- [19] Sánchez, J., J. Fulla, and C. Andrade, *High strength steels fracture toughness variation by the media*, in *RILEM Bookseries*. 2011. p. 137-146.
- [20] Sanchez, J., J. Fulla, and C. Andrade, *Fracture toughness variation induced by stress corrosion cracking of prestressing steels*. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, 2008. **59**(2): p. 139-143.
- [21] Valiente, A., J. Ruiz, and M. Elices, *A probabilistic model for the pearlite-induced cleavage of a plain carbon structural steel*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005. **72**(5): p. 709-728.
- [22] Lynch, S., *A review of underlying reasons for intergranular cracking for a variety of failure modes and materials and examples of case histories*. *Engineering Failure Analysis*, 2019. **100**: p. 329-350.
- [23] Barrera, O., et al., *Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum*. *Journal of Materials Science*, 2018. **53**(9): p. 6251-6290.
- [24] Traidia, A., E. Chatzidouros, and M. Jouiad, *Review of hydrogen-assisted cracking models for application to service lifetime prediction and challenges in the oil and gas industry*, in *Corrosion Reviews*. 2018. p. 323.
- [25] Martínez-Pañeda, E., A. Golahmar, and C.F. Niordson, *A phase field formulation for hydrogen assisted cracking*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018.
- [26] Martínez-Pañeda, E. and C.F. Niordson, *On fracture in finite strain gradient plasticity*. *International Journal of Plasticity*, 2016. **80**: p. 154-167.
- [27] Serebrinsky, S., E.A. Carter, and M. Ortiz, *A quantum-mechanically informed continuum model of hydrogen embrittlement*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004. **52**(10): p. 2403-2430.
- [28] Astiz, M.A., *An incompatible singular elastic element for two-dimensional and 3-dimensional crack problems*. *International Journal of Fracture*, 1986. **31**(2): p. 105-124.
- [29] Valiente, A. and M. Elices, *Premature failure of prestressed steel bars*. *Engineering Failure Analysis*, 1998. **5**(3): p. 219-227.