

EVALUACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UNIONES ATORNILLADAS DE ALTA RESISTENCIA CONSIDERANDO EL EFECTO DE LAS TENSIONES RESIDUALES Y LA CAPA PLÁSTICA DERIVADAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

J. Mendiola^{1,2}, I. Llavori², M. Larrañaga², N. Otegi², X. Telleria², A. Etxezarreta¹, J.A. Esnaola^{2,*}

¹Matz-Erreka S. Coop., B. Ibarreta S/N, 20577 Antzuola, Spain

²Mondragon Unibertsitatea, Faculty of Engineering, Mecánica y Producción Industrial, Arrasate-Mondragón 20500, Gipuzkoa, España

* Persona de contacto: jaesnaola@mondragon.edu

RESUMEN

Las uniones atornilladas de alta resistencia se utilizan ampliamente en aplicaciones críticas de seguridad sometidas a cargas de fatiga. Los tornillos empleados en este tipo de uniones suelen fabricarse mediante laminación en frío, ya que este proceso genera tensiones residuales compresivas e incrementa las propiedades mecánicas superficiales, aumentando así la vida a fatiga. No obstante, este efecto suele ser ignorado a la hora de evaluar la vida a fatiga de dichas uniones. Este estudio presenta un marco combinado numérico-experimental para la evaluación de la vida a fatiga de tornillos M30 de alta resistencia, teniendo en cuenta explícitamente las tensiones residuales y la capa endurecida generadas durante el laminado en frío de la rosca. La comparación entre los resultados numéricos y experimentales demuestra que la incorporación de las tensiones residuales mejora de forma significativa la precisión en la predicción de la vida a fatiga, poniendo de manifiesto el efecto beneficioso de las tensiones residuales y de la capa plásticamente deformada generadas durante el proceso de fabricación. La metodología desarrollada proporciona una base sólida para integrar los efectos de fabricación en el diseño a fatiga de elementos de fijación de alta resistencia empleados en aplicaciones reales.

PALABRAS CLAVE: Tornillos de alta resistencia, simulación de laminación en frío, tensiones residuales, fatiga multiaxial

ABSTRACT

High resistance bolted joints are widely used in safety-critical applications subjected to fatigue loads. The bolts used in this type of joints are usually manufactured by cold rolling, since this process generates compressive residual stresses and increases the surface mechanical properties, thus increasing fatigue life. However, this effect is often ignored when assessing the fatigue life of this type of joints. This study presents a combined numerical-experimental framework for the evaluation of the fatigue life of high-strength M30 bolts, explicitly taking into account the residual stresses and hardened layer generated during cold rolling of the thread. Comparison between numerical and experimental results shows that the incorporation of residual stresses significantly improves the accuracy in predicting fatigue life, highlighting the beneficial effect of residual stresses and cold worked layer generated during the manufacturing process. The developed methodology provides a solid basis for integrating manufacturing effects into the fatigue design of high-strength fasteners used in real-world applications.

KEYWORDS: High strength bolt, cold Rolling modelling, residual stresses, multiaxial fatigue

1. INTRODUCCIÓN

Los tornillos de alta resistencia laminados en frío se utilizan ampliamente en uniones críticas expuestas a elevados espectros de carga en ambientes hostiles. El modo tipo de fallo de este tipo de uniones suele ser a fatiga y puede tener consecuencias catastróficas [1]. Por ello, su correcto dimensionamiento a fatiga a altos ciclos (HCF) resulta esencial.

Los tornillos de alta resistencia, se suelen laminar en frío ya que dicho proceso genera una capa superficial endurecida por acritud que incrementa las propiedades mecánicas superficiales e induce tensiones residuales en el fondo de rosca que dificultan la iniciación de grietas y frena su propagación, incrementando considerablemente su vida a fatiga. Sin embargo, la mayoría métodos y

estudios en la literatura no consideran la influencia del proceso de fabricación a la hora de evaluar su desempeño a fatiga debido a la complejidad tanto de modelarlas numéricamente como de medirlas experimentalmente [2-4].

Por ello, en el presente estudio se propone una metodología para la evaluación de comportamiento a fatiga de uniones atornilladas de alta resistencia considerando explícitamente las tensiones residuales y la capa plástica resultantes del proceso de fabricación. El caso de estudio sobre el que se evalúa dicha metodología se centra en el caso de espárragos de M30 calidad 10.9 laminados en frío a partir de barra bonificada utilizados en la unión pala-buje de aerogeneradores marinos.

2. METODOLOGÍA NUMÉRICA

La predicción precisa de la vida a fatiga de uniones atornilladas de alta resistencia requiere considerar tanto las tensiones residuales como el incremento de las propiedades mecánicas generado durante el laminado de rosca en la respuesta estructural. Para ello, se ha desarrollado una arquitectura numérica que integra el estado tensorial final (tensión-deformación) del proceso de laminación en el modelado del comportamiento a fatiga mediante un flujo de trabajo unificado. Esta arquitectura permite potencialmente la transferencia de información a través de diferentes escalas de modelado y entornos de software, proporcionando así una base sólida para evaluar la influencia de las tensiones residuales en la vida útil de fatiga de las uniones pretensadas. La figura 1 muestra la arquitectura numérica del procedimiento de simulación y evaluación a fatiga propuesto.

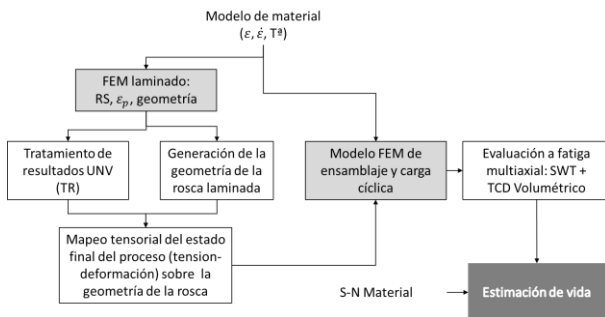


Figura 1. Arquitectura de la metodología propuesta

En primer lugar, se estiman las tensiones residuales y la capa de endurecida generada durante el proceso de laminado de la rosca mediante simulación numérica (Forge®) donde el modelo de material considera el efecto tanto de la temperatura como de la velocidad de deformación. A continuación, se mapea el estado tensorial final (tensión-deformación) así como la geometría conformada de la rosca en el modelo numérico de ensamblaje y carga (ANSYS Mechanical®) para evaluar su comportamiento en servicio. Finalmente, la evaluación del comportamiento a fatiga multiaxial se realiza mediante la teoría de la distancia crítica de Taylor (TCD) y el parámetro multiaxial para modo I de SWT.

2.1. Modelización numérica de laminado de rosca

El modelo numérico desarrollado en Forge® reproduce el proceso de laminado de roscas usando la técnica plongeé [5]. El proceso se realiza mediante la rotación sincronizada de dos rodillos dispuestos axialmente en paralelo respecto al tornillo y la rosca se conforma mediante el desplazamiento radial de los rodillos hacia la pieza. Cuando se produce el contacto entre los rodillos y la pieza, la pieza gira en dirección opuesta debido al efecto de rodadura. Debido a la elevada deformación superficial y al elevado gradiente de tensión que se genera durante la laminación se requiere una malla refinada para permitir la posterior evaluación de fatiga multiaxial. Tal y como se detalla en la sección 2.2. el

tamaño mínimo de elemento para la utilización del TCD volumétrico es aproximadamente 50 μm. Se ha estimado un coeficiente de fricción de Coulomb de 0,15 en base al trabajo de Groche y Kramer [6]. La figura 2 muestra (a) la distribución de la malla en superficie y profundidad y (b) el modelo completo de laminado.

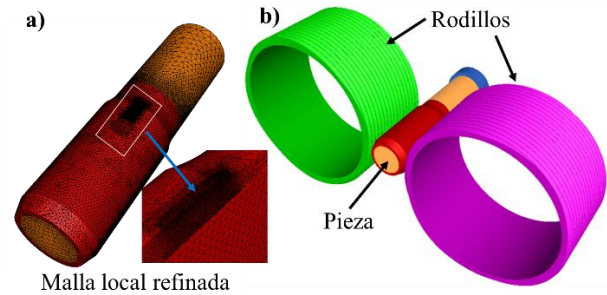


Figura 2. a) Malla refinada en la pieza y b) modelo completo de laminado

El comportamiento plástico del material se ha modelado mediante la versión simplificada del modelo constitutivo de Hensel–Spittel [7] adaptado por Chadha et al. [8] (1), ampliamente utilizado en simulaciones de conformado y forja debido a su flexibilidad y capacidad predictiva para un rango amplio de grado de deformación, velocidad de deformación y temperatura.

$$\bar{\sigma} = A e^{m_1 T} \left(\bar{\epsilon}_p + \epsilon_0 \right)^{m_2} \dot{\bar{\epsilon}}_p^{m_3} \quad (1)$$

2.2. Modelo numérico de ensamblaje y carga

El modelo de EF de ensamblaje y carga de los espárragos de M30 se ha desarrollado para casos de carga puramente axial de acuerdo a la norma ISO 3800 [9]. En este caso particular, la posición circunferencial del área de malla refinada donde se mapea el estado final tensorial (tensión-deformación) de proceso no es crítica, ya que cualquier ubicación angular está sometida a la misma carga axial. La figura 3 muestra el modelo de EF de ensamblaje y carga implementado en ANSYS 2019 R2. El modelo incluye el montante, la tuerca larga y la placa de soporte.

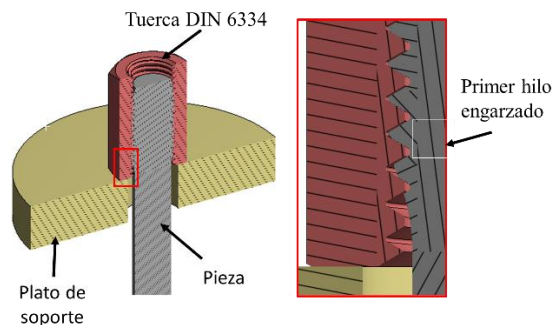


Figura 3. Detalle del modelo EF de ensamblaje y carga

El modelo es simétrico con respecto al plano longitudinal dado que el montaje experimental implica carga puramente axial. No se tuvo en cuenta la simetría [7]

longitudinal, ya que la geometría helicoidal del hilo impide tal simplificación. Se han definido dos tipos de contactos por fricción: el primero entre la rosca del tornillo y la tuerca, y el segundo entre la placa de soporte y la tuerca. Los coeficientes de fricción se definieron basándose en la experiencia de fabricación de Matz-Erreka $\mu = 0,12$ para la interfaz rosca-tuerca y $\mu = 0,15$ para el contacto tuerca-arandela. La figura 4 muestra la secuencia de precarga y carga cíclica consideradas en el modelo. En el step 1 se aplica el valor de precarga F_p que representa la fuerza media del Sistema. En el step 2 la fuerza se incrementa hasta el valor máximo F_{max} del caso de carga modelado. Finalmente, en los steps 3 y 4 se aplica el ciclo de carga entre F_{max} y F_{min} .

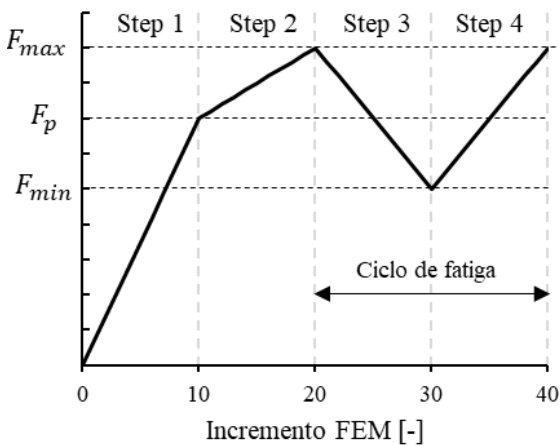


Figura 4. Secuencia de ensamblaje y carga

El estado tensorial final (tensión-deformación) del proceso se realiza mediante el módulo External Data de Ansys Workbench. La figura 5 muestra la distribución de TRs mapeado en la zona crítica del modelo EF de ensamblaje y carga.

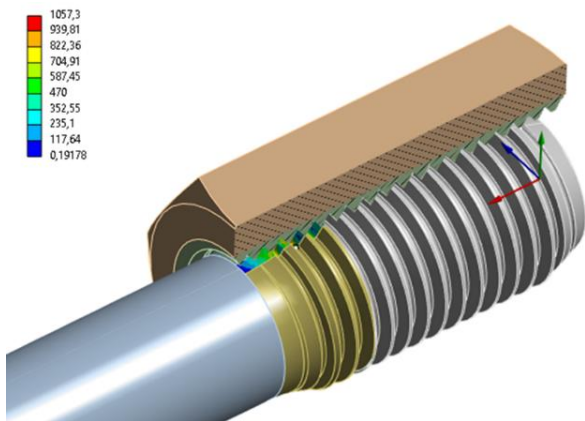


Figura 5. Distribución de TR mapeado en la zona crítica del modelo EF de ensamblaje y carga

Tras completar la simulación, los campos de tensión y deformación de los steps 3 y 4 se postprocesan en base al parámetro multiaxial Smith–Watson–Topper (SWT) para modo I (2) [10] en el plano crítico, para lo que se evalúan todos los planos posibles como en Llavori et al..

Para considerar el efecto del gradiente de tensión inherente a este tipo de problemas se ha utilizado el método TCD volumétrico [11], donde la distancia crítica (L) se estima como (3) donde el umbral de propagación se define como ΔK_{th} y $\Delta\sigma_0$ es el rango de tensión.

$$SWT = \sigma_{n,max} \varepsilon_{n,a} = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N_f)^{2b} \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0} \right)^2 \quad (3)$$

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La campaña experimental realizada para validar la arquitectura numérica propuesta es extensa y se estructura en tres etapas.

En la primera etapa se ha llevado a cabo la caracterización del material 32CrB4 bonificado, correspondiente a la clase 10.9 de acuerdo a la norma ISO 898-1, utilizado como materia prima de partida para grados de deformación extremos ($>200\%$) y elevadas velocidades de deformación (hasta $100s^{-1}$) inherentes al proceso de deformación en frío para la correcta calibración del modelo de material, lo cual es indispensable para predecir con precisión la capa plástica y las TR generadas durante el proceso. Dicha caracterización de material es compleja y se ha llevado a cabo mediante ensayos complementarios de (i) torsión quasi-estática para alcanzar grados de deformación elevados (figura 6) y ii) hammer para elevadas velocidades de deformación a alargamiento limitado (figura 7).

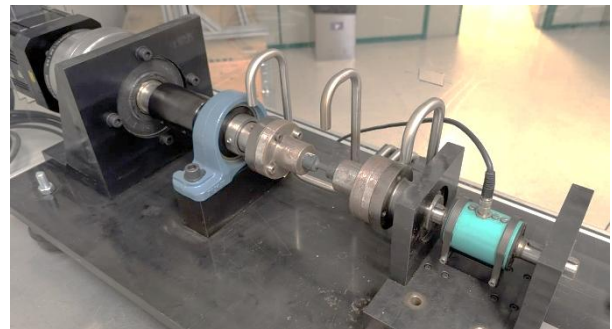


Figura 6. Caracterización a torsión del material base 32CrB4 bonificado

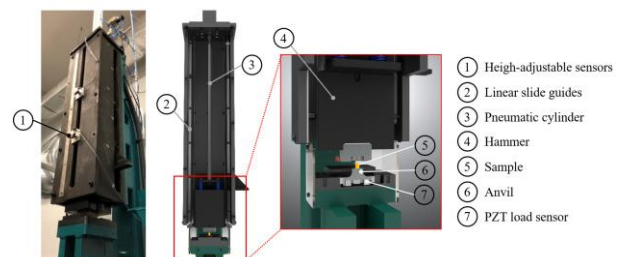


Figura 7. Banco de ensayo hammer

En la segunda etapa se realizaron ensayos convencionales de fatiga para la obtención de la curva S-N del material en una máquina servohidráulica MTS810 de 100kN. Finalmente, en la tercera etapa, se realizaron ensayos a fatiga uniaxial de componentes en una máquina servohidráulica Losenhausen de 1.5 MN para validar la metodología numérica propuesta.

4. RESULTADOS: CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

La validación de la metodología numérica propuesta se estructura en dos partes. Primero, se han validado las TR y la capa endurecida plásticamente generadas durante el proceso de laminado en frío. Después, se ha evaluado la vida a fatiga tanto considerando como sin considerar las TRs y capa plástica. Este enfoque permitió evaluar, por un lado, la influencia de las TR y la capa plástica en la vida a fatiga y, por otro, cuantificar precisión de la metodología numérica desarrollada.

4.1. Correlación de TRs y capa plástica

La validación del modelo numérico de proceso desarrollado se ha realizado utilizando tres estrategias complementarias. Primero, se ha realizado una correlación geométrico-microestructural comparando la profundidad y morfología de la capa plástica del modelo con resultados experimentales de mediciones de microdurezas y análisis metalográficos (flujo de fibras). La figura 8 muestra la comparativa teórico-experimental de las líneas de fibrado en la raíz de la rosca de un hilo laminado onde se puede observar que tanto la forma como la disposición del fibrado son similares.

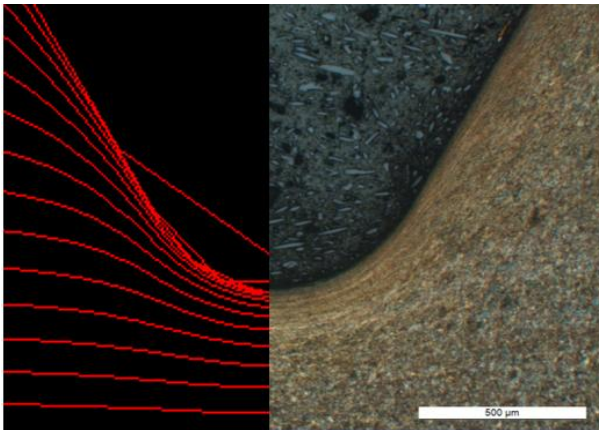


Figura 8. Comparativa de numérico-experimental del fibrado de laminación

Asimismo, se ha realizado la correlación numérico-experimental de la profundidad de la capa plástica mediante la comparación del grado de deformación plástica estimada numéricamente y lo mediciones de microdurezas HV en el fondo de rosca. La figura 9 muestra el patrón de deformación plástica estimado numéricamente. La figura 10 realiza la comparación numérico-experimental de la profundidad de la capa plástica mediante la comparación de la evolución de las

mediciones de microdurezas y los valores de deformación plástica numéricos en profundidad.

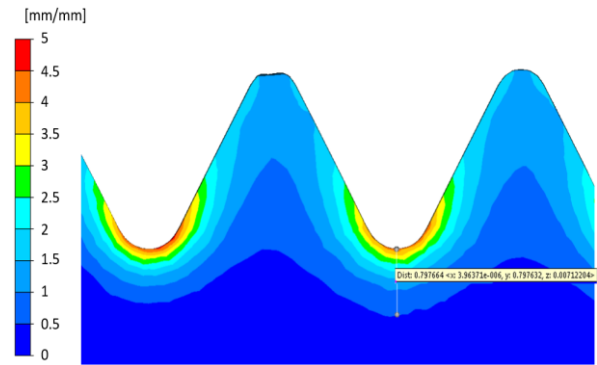


Figura 9. Estimación numérica del patrón de deformaciones plásticas

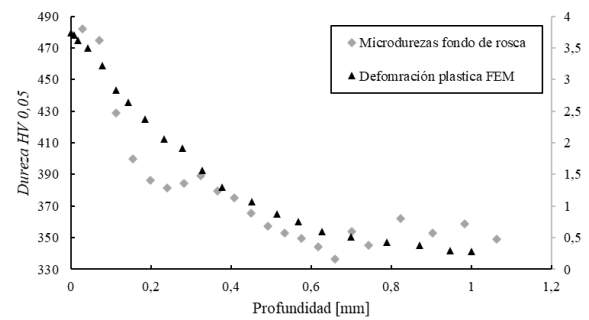


Figura 10. Comparación numérico-experimental de la profundidad de la capa plástica

En Segundo lugar, se ha realizado la correlación numérico-experimental de la magnitud de TRs circunferenciales en el fondo de rosca mediante DRX. No ha sido posible medir en la dirección axial debido a limitaciones geométricas de espacio en el fondo de rosca. La figura 11 muestra la distribución detallada del patrón de tensiones residuales circunferenciales en el fondo de rosca. Se puede observar que en función del punto de medición, el rango de TRs circunferenciales numérico varía de -101 MPa a -408MPa acorde con el rango experimental medido mediante DRX de -61,8 MPa a -472,4 MPa.

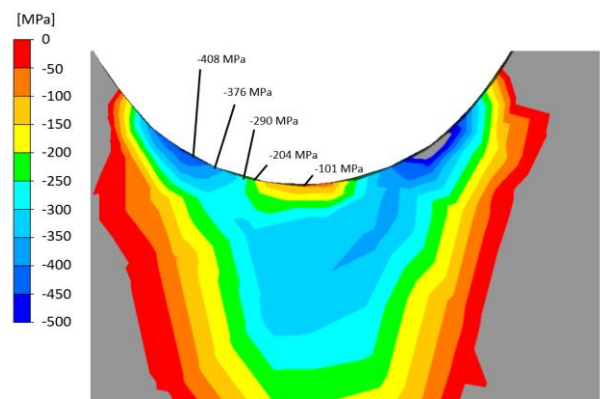


Figura 11. TR circunferenciales en el fondo de rosca

Finalmente, se a realizado la correlación numérico-experimental del valor de TR de Von Mises en profundidad. Dicha correlación se ha llevado bajo la hipótesis de que considerando el elevado grado de plastificación y la elevada inercia geométrica en el fondo de rosca la magnitud de TRs será cercano al valor del límite elástico modificado por acritud. De este modo la estimación de TRs se puede realizar de forma indirecta mediante el método de Tekkaya, que permite estimar el límite elástico modificado por acritud a partir de mediciones de microdurezas. La figura 12 muestra la comparativa entre los valores numéricos de TR de Von Mises en profundidad en el fondo de rosca y los valores de TR estimados a partir de microdurezas mediante el método de Tekkaya. Ambos métodos muestran valores de TR entorno a 2000MPa en superficie que decrecen rápidamente a valores entorno a 1200MPa a 0,6mm de profundidad. A partir de este límite, tanto el modelo numérico como las medidas experimentales predicen tensiones superiores al límite elástico original de 900MPa, lo cual está en concordancia con la región de deformación plástica moderada observada en la figura 10. Los resultados muestran que tanto las estimaciones numéricas como las mediciones experimentales presentan valores y tendencias de TR similares.

4.2. Correlación numérico-experimental a fatiga

Como se ha explicado en el apartado de metodología, se han considerado dos modelos numéricos: M1, modelo elástico; y M2, modelo elastoplástico acoplado con tensiones residuales y capa plástica. La figura 12 muestra la estimación del parámetro SWT para ambos modelos donde se identifica la zona de iniciación de grieta. Amos modelos presentan los valores máximos de SWT en la zona de nucleación identificada experimentalmente, es decir, la zona de transición entre la raíz del hilo y el flanco. Esto confirma que los métodos son capaces de predecir con precisión el lugar de inicio de la grieta.

Por otro lado, se observa que el modelo M2 que sigue la metodología propuesta en este trabajo presenta valores de SWT significativamente menores que resalta el efecto beneficioso de las TR y la capa plástica, confirmando el resultado esperado.

La figura 13 muestra la correlación numérico-experimental para cada modelo. El análisis de los resultados numéricos obtenidos de ambos modelos ha revelado diferencias significativas según el enfoque adoptado. Por un lado, el modelo elástico (M1) ha resultado ser excesivamente conservador al no incorporar el efecto del proceso. En contraste, el modelo acoplado elasto-plástico (M2) que considera tanto las TR como la capa plástica de proceso presenta predicciones de vida cercanas a los valores experimentales en todos los rangos de tensiones analizados. Estos hallazgos confirman que las tensiones residuales y la capa plástica generadas durante la fabricación de tornillos y espárragos de alta resistencia juegan un papel decisivo en su vida a fatiga y deben considerarse para lograr un modelo fiable.

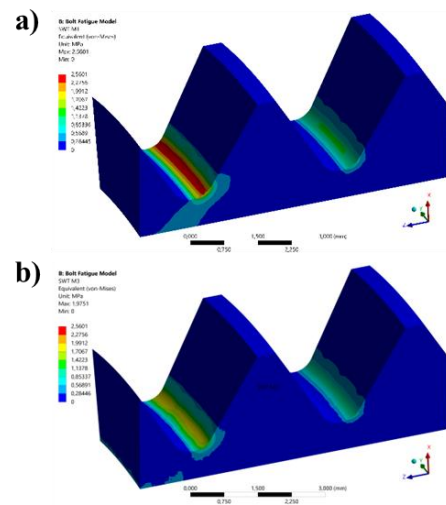


Figura 12. Valores de SWT a) modelo M1:elástico y b) M2: elasto-plástico considerando TR y capa plástica

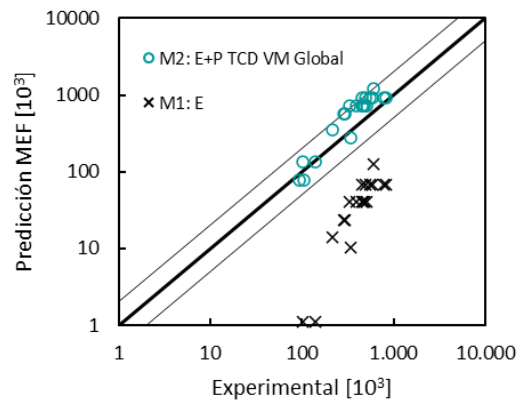


Figura 13. Correlación numérico-experimental de la estimación de vida a fatiga de los modelos M1: Elástico y M2: Elasto-plástico considerando las TR y la capa plástica de fabricación

5. CONCLUSIONES

El presente estudio propone y valida una metodología numérico-experimental integral para evaluar el efecto de las tensiones residuales ya la capa plástica inducidas en el proceso de laminación en frío en el comportamiento a la fatiga de tornillos y espárragos de alta resistencia. Los principales hallazgos son:

- La metodología captura con éxito las tensiones residuales y la capa endurecida por acritud generadas durante el laminado en frío de espárragos de 32CrB4 bonificado.
- La distribución de TR numéricas muestran buena correlación con las medidas experimentales de DRX y basadas en Tekkaya, tanto en magnitud como en profundidad.
- Incorporar la TR y capa plástica en el modelo de fatiga reduce significativamente el parámetro

SWT previsto en la raíz del hilo, confirmando su efecto compresivo beneficioso en el rendimiento de la fatiga.

- El modelo acoplado elasto-plástico que considera tanto las TR como la capa plástica proporciona predicciones de vida a fatiga consistentes con los resultados experimentales, mientras que los modelos puramente elásticos utilizados habitualmente subestiman son excesivamente conservadores.
- La metodología propuesta permite una evaluación fiable de la fatiga de las uniones precargadas al vincular explícitamente las tensiones residuales inducidas por la fabricación con el comportamiento de fatiga en servicio, ofreciendo un enfoque transferible para el diseño y optimización de uniones críticas de seguridad. Además, la metodología puede extenderse fácilmente a otros componentes conformados donde el proceso de fabricación juega un papel decisivo en el comportamiento a fatiga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el soporte brindado por la Ayuda europea No. 101235022 HORIZON-CL5-2024-D3-02, al Gobierno de España por la ayuda No. PID2021-124245OA-I00 (MINECO/FEDER, UE), al Gobierno Vasco por la ayuda (KK-2024/00048, PIBA_2023_1_0052, ZE-2018/00003 y (BI-0018-2021) y a la Diputación de Guipúzcoa por la ayuda (2021-I40P-000008-01).

REFERENCIAS

- [1] F. Casanova, C. Mantilla, Fatigue failure of the bolts connecting a Francis turbine with the shaft. *Engineering Failure Analysis*, 90:1–13 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.015>.
- [2] R. Schneider, U. Wuttke, C. Berger, Fatigue analysis of threaded connections using the local strain approach. *Procedia Engineering*, 2: 2357–66 (2010) <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.252>.
- [3] G. H. Majzoobi, G. H. Farrahi, N. Habibi, Experimental evaluation of the effect of thread pitch on fatigue life of bolts, *International Journal of Fatigue* 27:189–96, (2005) <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.06.011>
- [4] A. Sorg, J. Utzinger, B. Seufert, M. Oechsner, Fatigue life estimation of screws under multiaxial loading using a local approach. *International Journal of Fatigue*, 104:43–51, (2017) <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.034>.
- [5] D. B. Miracle, S. L. Donaldson, S. D. Henry, C. Moosbrugger, G. J. Anton, N. Hrivnak et al., *ASM Handbook Volume 16: Machining*. ASM international Materials Park (2001)
- [6] P. Groche, P. Kramer, Numerical investigation of the influence of frictional conditions in thread rolling operations with flat dies, *International Journal of Material Forming*, 11:687–703, (2018). <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1383-2>
- [7] I. Llavori, A. Zabala, J. Mendiguren, X. Gómez, A coupled 3D wear and fatigue numerical procedure: Application to fretting problems in ultra-high strength steel wires, *International Journal of Fatigue* (2021);143:106012. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106012>
- [8] K. Chadha, D. Shahriari, M. Jahazi, An Approach to Develop Hansel–Spittel Constitutive Equation during Ingot Breakdown Operation of Low Alloy Steels, *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*, Singapore: Springer Singapore; (2018), p. 239–46. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_20
- [9] ISO 3800: Threaded fasteners — Axial load fatigue testing — Test methods and evaluation of results (1993)
- [10] K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper, A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals., *Journal of Materials*, 5:767–78 (1970).
- [11] D. Taylor, *The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics*. Elsevier; (2010).