

INFORME DEL PROYECTO REF.SV-24-GIJÓN-1-07

Solar-Bolts: Mejorando la durabilidad y eficiencia de las uniones de las estructuras para la generación solar.

Fechas inicial y final del proyecto:

01 / 07 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Investigador/a Principal:

Miguel Muñiz Calvente

Otros investigadores:

Pelayo Fernández Fernández y Natalia García Fernández

Personal contratado:

Diego Díaz Salamanca

Fechas inicial y final de contratación:

01 / 10 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Empresas o instituciones colaboradoras:

Gonvarri MS R&D

Redes sociales de investigadores y empresas:

En la siguiente tabla se recogen los enlaces a las redes sociales científicas de los investigadores participantes en el proyecto con el fin de facilitar el acceso a los trabajos de estos y a sus líneas de investigación.

Nombre	Enlace a ResearchGate & LinkedIn
Pelayo Fernández Fernández	https://www.researchgate.net/profile/F-Pelayo-2
Miguel Muñiz Calvente	https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Muniz-Calvente https://www.linkedin.com/in/miguel-mu%C3%B1iz-calvente-6ab47861/
Natalia García Fernández	https://www.researchgate.net/profile/Natalia-Garcia-Fernandez https://www.linkedin.com/in/nataliagarcia-ingenieria/
Diego Díaz Salamanca	https://www.researchgate.net/profile/Diego-Diaz-Salamanca-2 https://www.linkedin.com/in/diego-d%C3%ADaz-salamanca-11322817b/

Figura 1. Nombre de los investigadores participantes del proyecto junto con el enlace a sus respectivos perfiles de ResearchGate.

Resumen Gráfico

La Figura 2 recoge de manera gráfica el objetivo a alcanzar en el marco de este proyecto financiado por el IUTA. Partiendo de una situación como la actual, en la que la industria dedicada a la construcción de estructuras para el sector de generación solar desconoce el comportamiento a fatiga de ciertas uniones utilizadas debido a la falta de regulación normativa de estas, el proyecto busca generar conocimiento útil al respecto.

Para ello, se planteó una extensa campaña experimental cuyos resultados se compararán con los de la literatura existente, permitiendo identificar las ventajas y limitaciones de este tipo de uniones y de sus posibles configuraciones. Se espera que el conocimiento generado sienta las bases para el futuro dimensionamiento de estas uniones, lo que contribuirá a un diseño más seguro, optimizando las estructuras y reduciendo el material empleado.

El conocimiento y las metodologías aquí desarrolladas, serán de gran interés no solo científico, si no también industrial. En particular, para la empresa Gonvarri MS R&D, especializada en el diseño de este tipo de estructuras y colaboradora del proyecto.

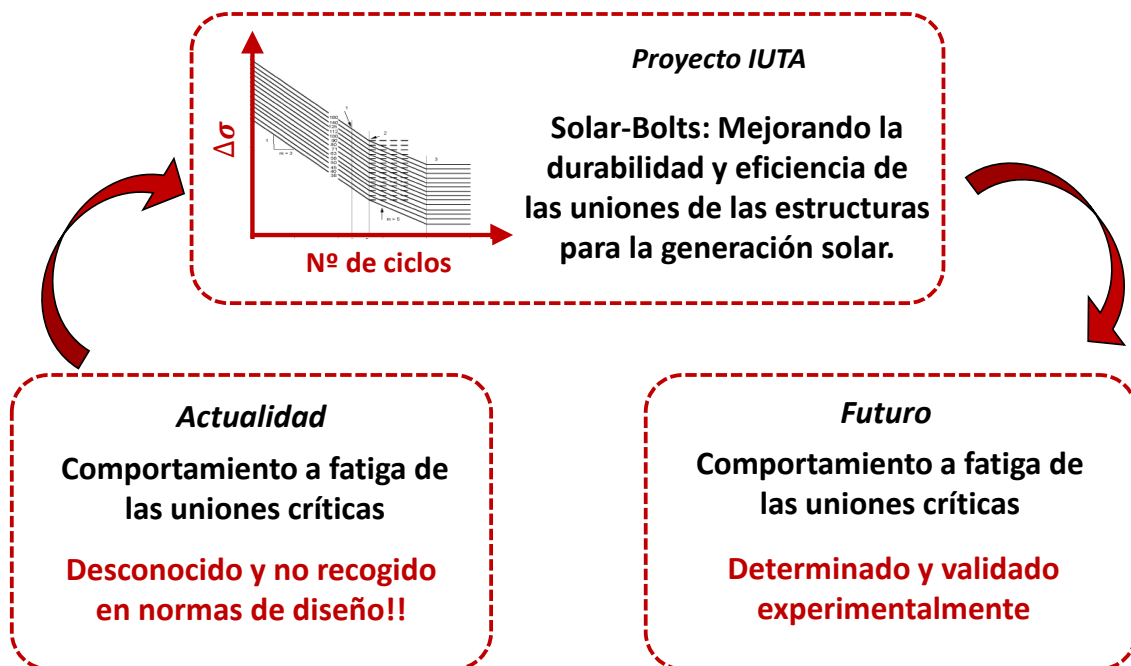


Figura 2. Resumen gráfico del proyecto realizado.

Memoria descriptiva del proyecto

1. Resumen ejecutivo

El proyecto "Solar-Bolts" aborda la caracterización a fatiga de uniones atornilladas pretensadas utilizadas en estructuras de soporte para instalaciones fotovoltaicas. Su objetivo principal es mejorar la eficiencia, durabilidad y sostenibilidad de estas estructuras, garantizando su fiabilidad y seguridad bajo condiciones de carga cíclica. Este trabajo se estructura en cinco fases principales que incluyen diseño experimental, fabricación de probetas, desarrollo de ensayos, análisis de resultados y difusión de los hallazgos.

El proyecto persigue varios objetivos específicos: caracterizar la resistencia a fatiga, optimizar el uso de materiales, actualizar normativas de cálculo y disminuir la huella de carbono. Hasta la fecha, se han cumplido con éxito los objetivos relacionados con la caracterización a fatiga y la mejora del conocimiento científico, mientras que la actualización normativa y la disminución de la huella de carbono son retos aún pendientes.

La metodología empleada comienza con una revisión exhaustiva de la literatura para identificar lagunas en el conocimiento y diseñar experimentos adecuados. Posteriormente, se fabricaron probetas a partir de acero galvanizado en caliente, seleccionado por su amplio uso en el sector. Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo utilizando equipos de alta precisión en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Oviedo. Los resultados obtenidos fueron analizados en comparación con estudios previos y normativas existentes.

Entre los principales resultados se destaca que las uniones evaluadas presentan una resistencia a fatiga elevada, en algunos casos cercana a la resistencia estática. Además, se evidenciaron limitaciones en la aplicabilidad de normativas actuales, como el Eurocódigo 3, en configuraciones específicas. Los hallazgos han sido compartidos con Gonvarri Solar Steel para promover la optimización de materiales y el rediseño estructural en sus productos.

El proyecto también ha generado interés en la comunidad internacional. Investigadores de la Universidad Técnica Checa de Praga colaboran actualmente en aproximaciones numéricas y futuras fases experimentales. Asimismo, se han presentado resultados preliminares en el Congreso del Grupo Español de Fractura y se están preparando publicaciones en revistas indexadas.

A futuro, se plantea extender el estudio a otros parámetros influyentes en la vida a fatiga, como el espesor de la galvanización y la configuración geométrica de las uniones. Además, se buscará incidir en la actualización de normativas europeas para incluir estos resultados, con el fin de mejorar los códigos de diseño aplicables al sector fotovoltaico.

2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Grado de consecución
Principal	Mejorar la eficiencia, durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de soporte en instalaciones fotovoltaicas	100%
Específico 1	Caracterizar la Resistencia a la Fatiga	100%
Específico 2	Aumentar el conocimiento científico	100%
Específico 3	Optimizar el Uso de Materiales	100%
Específico 4	Actualizar Normativas de Cálculo	10%
Específico 5	Disminuir la Huella de Carbono	0%
Específico 6	Garantizar la Fiabilidad y Seguridad de las Estructuras Fovoltaicas	100%

Figura 3. Objetivos principales y específicos del proyecto propuesto.

En el proyecto se ha realizado una caracterización a fatiga de las uniones más comúnmente utilizadas en la industria solar fotovoltaica (Objetivo Específico 1), lo que ha permitido aumentar el conocimiento científico en relación al comportamiento de este tipo de uniones bajo cargas cíclicas (Objetivo Específico 2). Se ha puesto de manifiesto que las uniones estudiadas tienen una resistencia a fatiga elevada y, en algunos casos, muy próxima a la resistencia estática al deslizamiento de la unión. Se espera que los resultados obtenidos conduzcan al sector fotovoltaico a realizar una optimización del uso de materiales (Objetivo Específico 3), para lograr este objetivo se ha puesto en conocimiento de Gonvarri Solar Steel los resultados obtenidos, de cara a que los integren en sus cálculos y realicen un rediseño estructural para sus nuevas líneas de producto garantizando la fiabilidad y seguridad de las estructuras solares fotovoltaicas (Objetivos Específicos 3 y 6)

Se ha contactado con el presidente de la Sociedad Europea de Integridad Estructural (ESIS) con el objetivo de tratar de actualizar el Eurocódigo 3 incluyendo los resultados derivados del proyecto o complementar los mismos con más evidencias experimentales que permitan mejorar las normativas de cálculo (Objetivo Específico 4). Sin embargo, todavía no se ha definido un plan de trabajo específico para lograr alcanzar este objetivo.

3. Tareas realizadas:

A continuación, se detalla la estructura utilizada en este apartado. Primeramente, se presenta la planificación temporal inicial del proyecto, la cual, está reflejada en la Figura 4. Seguidamente, se presenta una breve descripción del trabajo efectuado en cada una de las diferentes Fases y Tareas planteadas en la anteriormente citada Figura.

ID	Descripción	MESES					
		1	2	3	4	5	6
Fase 1	Diseño de Experimentos						
Tarea 1.1	Revisión Bibliográfica sobre la Caracterización a Fatiga de Uniones Atornilladas Pretensadas						
Tarea 1.2	Definición del Tipo de Ensayos a Realizar						
Tarea 1.3	Definición del Plan de Ensayos						
Fase 2	Fabricación de probetas						
Tarea 2.1	Adquisición de Materiales						
Tarea 2.2	Mecanizado de Probetas						
Fase 3	Desarrollo de Ensayos a Fatiga						
Tarea 3.1	Realización de Ensayos a Fatiga						
Fase 4	Análisis de Resultados						
Tarea 4.1	Ajuste de los Campos S-N Obtenidos						
Tarea 4.2	Comparación con los resultados de la literatura						
Tarea 4.3	Cuantificación de la Mejora Obtenida Gracias al Proyecto						
Fase 5	Difusión y Puesta en Valor						
Tarea 5.1	Asistencia a Congresos y Ferias Industriales						
Tarea 5.2	Publicación de Artículos Científicos						

Figura 4. Planificación temporal del proyecto Solar-Bolts dividida en sus principales tareas.

- **Fase 1: Diseño de Experimentos**

En esta fase, se realizó una revisión de la literatura existente en el tema, con el fin de tener una visión global de la problemática y de conocer de forma precisa los esfuerzos realizados por otros autores hasta la fecha (**Tarea 1.1**). Esto permitió, en una tarea posterior, determinar el tipo de uniones sobre las que trabajar y hacer un diseño de experimentos coherente con el fin de responder a aquellas preguntas todavía no resueltas en la bibliografía consultada (**Tarea 1.2** y **Tarea 1.3**).

- **Fase 2: Fabricación de probetas**

Una vez revisado el estado del arte e identificado el tipo de material base y geometrías sobre las que se trabajaría en el proyecto, se realizó el acopio de materiales (**Tarea 2.1**). Hecho esto, el material en bruto fue enviado al taller de mecanizado de precisión de la Universidad de Oviedo donde se llevó a cabo el proceso de mecanizado con arreglo a las dimensiones características seleccionadas (**Tarea 2.2**).

- **Fase 3: Desarrollo de Ensayos de Fatiga**

Recibidas las probetas mecanizadas (**Fin Tarea 2.2**) y conocidos los escenarios de ensayo para la campaña de fatiga (**Fin Tarea 1.2**), se comenzaron a ensayar las probetas a fatiga disponibles haciendo uso del equipamiento disponible en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón de la Universidad de Oviedo (**Tarea 3.1**). En particular, se utilizaron máquinas de ensayo universales de tipo servo-hidráulico.

- **Fase 4: Análisis de Resultados**

Conforme se fueron obteniendo los resultados de fatiga de la anteriormente detallada **Tarea 3.1**, se dio comienzo al análisis crítico de estos. Este análisis de resultados, incluyó la comparativa con los resultados obtenidos por otros autores y las propuestas de las normas de diseño para otro tipo de detalles constructivos similares (**Tarea 4.1** y **Tarea 4.2**). El análisis incluyó también la evaluación de las probetas postfallo con el objetivo de determinar la influencia de los diferentes factores involucrados en el proceso de fallo (nivel de carga, par de apriete, etc) en los resultados obtenidos. El análisis de lo anterior permitió cuantificar la mejora de la aplicación de esta propuesta con respecto a otras metodologías actuales (**Tarea 4.3**).

- **Fase 5: Difusión y Puesta en Valor**

A partir de los resultados obtenidos en las Fases anteriores del trabajo, se preparó el resumen de un artículo científico para ser presentado en el congreso nacional de referencia en integridad estructural, organizado por el Grupo Español de Fractura, el cual tendrá lugar en Abril de 2025 en Vitoria – Euskadi, el cual está pendiente de ser aceptado. En el futuro, se espera extender el trabajo realizado y publicado en una revista del JCR especializada en el campo, contemplándose revistas como *International Journal of Fracture*, *International Journal of Fatigue*, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* y *Fatigue and Fracture of Engineering Structures* (**Tarea 5.2** y **Tarea 5.3**).

4. Resultados obtenidos:

En este apartado se introducirán los resultados siguiendo el esquema planteado anteriormente en el cronograma del proyecto. De este modo se puede tener una visión temporal del trabajo realizado en el marco del proyecto hasta el momento.

- **Fase 1: Diseño de Experimentos**

En esta fase inicial, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura sobre el comportamiento a fatiga de uniones atornilladas pretensadas utilizadas en la industria fotovoltaica, recopilando y actualizando continuamente los artículos más relevantes. Este análisis permitió identificar lagunas en el conocimiento y establecer una base sólida para el diseño experimental. Posteriormente, se definieron los tipos de ensayos necesarios, que incluyeron pruebas estáticas para evaluar el deslizamiento y el coeficiente de rozamiento, así como ensayos de fatiga bajo cargas controladas. Además, se elaboró un plan de ensayos detallado que contempló las principales variables influyentes, como la geometría de los colisos, la fuerza de pretensado y el tipo de arandela. Finalmente, se diseñaron 12 escenarios experimentales (Ver Figura 5) para garantizar la representatividad de las condiciones reales, asegurando que las uniones evaluadas no excedieran los límites de carga que podrían comprometer su integridad estructural.

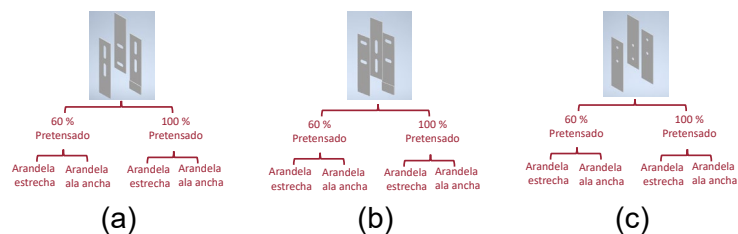


Figura 5. Propuesta de ensayos de deslizamiento y de fatiga realizar. (a) Configuración 1; (b) Configuración 2; y (c) Configuración 3 con agujeros calibrados.

Esta fase del proyecto se considera completamente completada y como resultados tangibles se han generado procedimientos de ensayo, tablas de excel para recoger resultados, programaciones para monitorizar los ensayos, etc.

- **Fase 2: Diseño de Experimentos**

Esta fase estaba compuesta por 2 tareas: Tarea 2.1- Adquisición de Materiales; Tarea 2.2 -Mecanizado de las Probetas.

En primer lugar, se seleccionaron chapas de acero con la denominación S350GD+ZM310, un material ampliamente utilizado en estructuras fotovoltaicas, suministrado por Arcelor Mittal. Estas chapas fueron procesadas y mecanizadas según las especificaciones geométricas previamente definidas, produciendo un total de 60 probetas para cada uno de los tres tipos requeridos (ver geometrías en Figura 6). Este proceso aseguró la disponibilidad de probetas adaptadas a las configuraciones experimentales establecidas en el plan de ensayos. La fabricación de las probetas se ha completado al 100%.

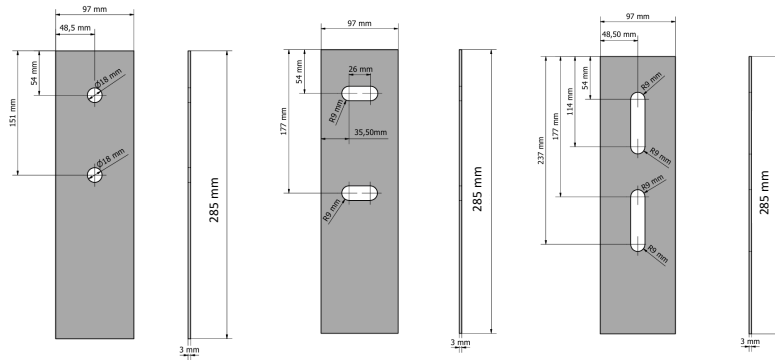


Figura 6. Dimensiones finales de las diferentes probetas mecanizadas para conseguir las configuraciones propuestas en la Figura 7.

● Fase 3: Desarrollo de Ensayos de Fatiga

Antes de iniciar la campaña experimental de fatiga, se llevaron a cabo ensayos de deslizamiento para determinar la carga crítica máxima de deslizamiento en cada configuración. Estos ensayos, mostrados en la Figura 7.a, se realizaron utilizando un equipo de correlación de imágenes para registrar con precisión el desplazamiento de las probetas. Aunque no estaban contemplados inicialmente en la planificación del proyecto, la revisión bibliográfica reveló su importancia esencial para caracterizar adecuadamente el comportamiento a fatiga de las uniones.

La ejecución de estos ensayos presentó una notable complejidad, ya que requirió la adquisición de materiales especializados para sensorización del apriete de los tornillos y el desarrollo de programas personalizados para monitorear de manera continua las variables que influyen en la pérdida de apriete durante el proceso.

Con los datos de deslizamiento obtenidos, se dio inicio a las campañas de caracterización de vida a fatiga. La Figura 7.b muestra el montaje experimental empleado en los ensayos de fatiga.



(a)



(b)

Figura 7. Montaje experimental (a) Ensayos de deslizamiento; (b) Ensayos de fatiga.

- **Fase 4: Análisis de Resultados**

La Figura 8 muestra los resultados de los desplazamientos en dirección Z originados por el apriete de los tornillos sobre las chapas, los cuales serán fundamentales para comprobar la validez de modelos numéricos en el futuro. La Figura 9 muestra los resultados de uno de los ensayos de deslizamiento, en los que se evidenció una pérdida inicial de apriete que, sin una monitorización adecuada, podría haber llevado a un cálculo incorrecto del coeficiente de deslizamiento. Además, antes de los ensayos de deslizamiento, las probetas fueron sometidas a 1000 ciclos de fatiga con cargas inferiores al umbral de deslizamiento, permitiendo evaluar y estabilizar las pérdidas iniciales de apriete (ver Figura 9.b). Estos ensayos, aunque críticos para garantizar la precisión de los resultados, requirieron un esfuerzo significativo en términos de tiempo y recursos, retrasando el inicio de la caracterización de vida a fatiga y la obtención de las curvas S-N de las uniones. Sin embargo, aseguraron una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

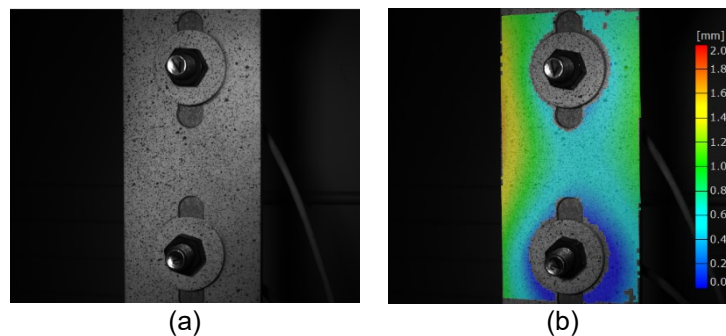


Figura 8. Efecto del apriete sobre el desplazamiento en

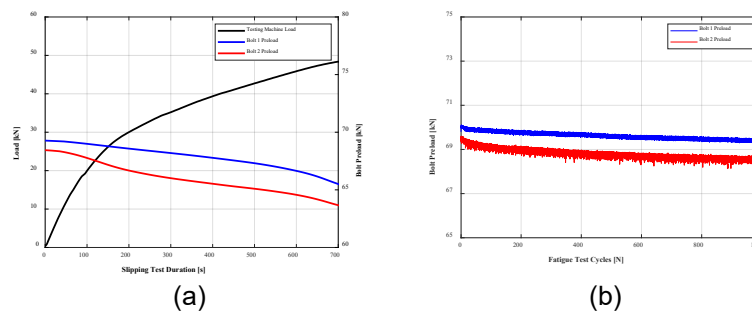


Figura 9. (a) Ensayo de deslizamiento; (b) Pérdida inicial de esfuerzo axial

Finalmente, la figura 10 muestra un ejemplo de los resultados de fatiga obtenidos y la comparativa con la curva S-N del Eurocódigo 3 para uniones con tornillos pretensados sobre agujeros calibrados (CAT 112), que podría considerarse la unión más parecida a la empleada en este proyecto, aunque dista mucho de poder ser aplicable según norma, ya que un coliso no puede considerarse un agujero calibrado. Como se puede observar en dicha figura, la aplicación del Eurocódigo 3 para algunas configuraciones podría incluso conducir a escenarios no conservadores.

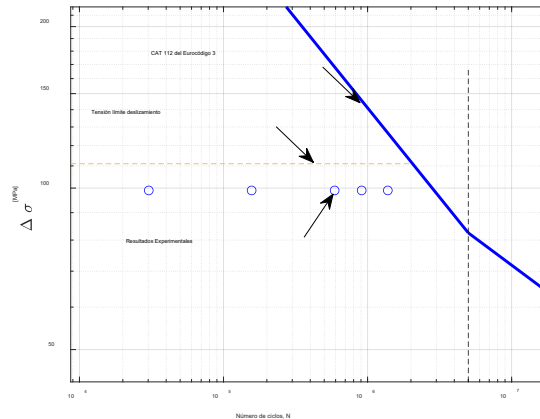


Figura 50. Análisis de los resultados experimentales de fatiga obtenidos

- **Fase 5: Difusión y Puesta en Valor**

Se ha preparado un documento técnico para compartir con la empresa interesada en los resultados del proyecto y se ha enviado un resumen del trabajo realizado para participar en el *41 Congreso del Grupo Español de Fractura*, que tendrá lugar en Vitoria en Abril de 2024.

5. Trabajos o necesidades futuras

Este proyecto de investigación financiado por el IUTA, ha permitido a los investigadores profundizar en el estudio del comportamiento a fatiga de uniones pretensadas y galvanizadas en caliente, utilizando colisos y agujeros calibrados. Estas uniones son ampliamente empleadas en la construcción de detalles estructurales para la industria de generación de energía solar, así como en otros sectores estratégicos, como la energía eólica renovable [2], [3] y en el sector de almacenamiento [4].

El análisis exhaustivo realizado junto con la extensa revisión de la literatura, ha puesto de manifiesto la existencia de discrepancias significativas entre los autores respecto a los enfoques para el dimensionamiento de este tipo de uniones bajo cargas de fatiga. Además, los trabajos analizados muestran la enorme casuística existente en la temática, donde factores tan diversos como el espesor de la capa galvanizada [5], el número y ubicación de los tornillos [4], [6], el proceso de fabricación de los taladros [1], [4], [7], el par de apriete de los pernos [8], [9] o las cargas máximas aplicadas [10], influyen significativamente en la vida a fatiga de la unión atornillada.

Debido a la limitada duración temporal del proyecto, no ha sido posible abordar todos los factores identificados como influyentes en la vida a fatiga de este tipo de componentes. Por ello, los investigadores continuarán el estudio en el futuro, con el objetivo de analizar y evaluar la influencia de otros parámetros que aún no han sido considerados en esta investigación inicial.

6. Divulgación de los resultados

En el corto plazo, tal y como se recoge en la Figura 11, se plantea la asistencia al **41 Congreso del Grupo Español de Fractura** con el fin de presentar los resultados obtenidos hasta la fecha.

Además, cabe destacar que el trabajo realizado ha despertado el interés de un investigador predoctoral y un profesor de la Universidad Técnica Checa de Praga (Czech Technical University in Prague). Ambos realizarán una estancia investigadora de entre 2 y 3 meses, comenzando en Enero de 2025 para abordar la aproximación numérica del problema y colaborar en las siguientes fases experimentales del proyecto. A partir de los resultados que se generen durante dicha colaboración, se prevé la redacción conjunta de un artículo científico destinado a su publicación en una revista indexada en el JCR.

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
1) <i>Fatigue behaviour of hot-dip galvanized preloaded double lap bolted joints: an experimental approach.</i>	Diego Díaz Salamanca, Miguel Muñiz Calvente, Pelayo Fernández Fernández, Natalia García Fernández.	Com. Oral	41 Congreso del Grupo Español de Fractura.	Vitoria (España), Marzo 2025

Figura 11. Divulgación de los resultados.

Memoria económica:

1. Gastos:

En la Figura 12 se presenta un desglose de los diferentes gastos que han aparecido a lo largo del proyecto.

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	3300 €
TOTAL GASTOS	3300 €

Figura 126. Resumen de gastos durante el proyecto.

2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	3300 €
TOTAL INGRESOS		3300 €

Bibliografía:

Indica aquí la bibliografía utilizada para la actividad.

- [1] C. Jiménez-Peña, R. H. Talemi, B. Rossi, and D. Debruyne, "Investigations on the fretting fatigue failure mechanism of bolted joints in high strength steel subjected to different levels of pre-tension," *Tribol. Int.*, vol. 108, pp. 128–140, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2016.11.014.
- [2] F. Öztürk, J. A. F. O. Correia, C. Rebelo, A. M. P. De Jesus, and L. Simões Da Silva, "Fatigue assessment of steel half-pipes bolted connections using local approaches," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2016, pp. 118–125. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.017.
- [3] S. Jovašević *et al.*, "Global Fatigue Life Modelling of Steel Half-pipes Bolted Connections," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 278–284. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.891.
- [4] C. D. S. Souto *et al.*, "Global-local fatigue approaches for snug-tight and preloaded hot-dip galvanized steel bolted joints," *Int. J. Fatigue*, vol. 153, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106486.
- [5] F. Berto, F. Mutignani, and E. Guido, "Effect of hot dip galvanization on the fatigue behaviour of steel bolted connections," *Int. J. Fatigue*, vol. 93, pp. 168–172, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.08.022.
- [6] V. M. G. Gomes, M. Rodrigues, J. A. F. O. Correia, M. A. V. Figueiredo, A. M. P. De Jesus, and A. A. Fernandes, "Monotonic and fracture behaviours of bolted connections with distinct bolt preloads and surface treatments," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 13, no. 48, pp. 304–317, Apr. 2019, doi: 10.3221/IGF-ESIS.48.30.
- [7] C. Jiménez-Peña, C. Goulas, B. Rossi, and D. Debruyne, "Influence of hole-making procedures on fatigue behaviour of high strength steel plates," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 158, pp. 1–14, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.03.005.
- [8] B. Pedrosa *et al.*, "Fatigue resistance curves for single and double shear riveted joints from old portuguese metallic bridges," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 96, pp. 255–273, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.009.
- [9] A. M. P. De Jesus, A. L. L. Da Silva, and J. A. F. O. Correia, "Fatigue of riveted and bolted joints made of puddle iron - An experimental approach," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 104, pp. 81–90, 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.10.012.
- [10] P. Zampieri, A. Curtarello, E. Maiorana, and C. Pellegrino, "A Review of the Fatigue Strength of Shear Bolted Connections," *Int. J. Steel Struct.*, vol. 19, no. 4, pp. 1084–1098, Aug. 2019, doi: 10.1007/s13296-018-0189-5.