

INCEFA-SCALE (INcreasing Safety in NPPs by Covering Gaps in Environmental Fatigue Assessment – Focusing on Gaps between Laboratory Data and Component-SCALE)

S. Arrieta^{1*}, S. Cicero¹, K. Mottershead², R. Cicero³, A. McLennan², S. Courtin⁴, C. Huutilainen⁵

¹ LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

² Jacobs, Faraday Street, Birchwood Park, Warrington WA3 6GA, Reino Unido

³ Inesco Ingenieros, CDTUC, Fase B, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

⁴ EDF R&D MMC, Avenue des Renardières-Ecuelles, 77250 Moret-Loing et Orvanne, Francia

⁵ VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., Nuclear Reactor Materials, Kivimiehentie 3, 02150 Espoo, Finlandia

*Contacto: sergio.arrieta@unican.es

RESUMEN

INCEFA-SCALE es un proyecto de cinco años financiado por el programa Horizonte 2020 de la Comisión Europea, sucesor del proyecto INCEFA-PLUS. El objetivo de este proyecto es mejorar la capacidad para pronosticar la vida útil de los componentes de centrales nucleares sometidos a fatiga asistida por el ambiente. EPRI está llevando a cabo una serie de ensayos de fatiga ambiental a escala de componente, que se espera que avancen significativamente en la disponibilidad de datos. Sin embargo, la capacidad de abordar la aplicabilidad de los datos de ensayos en laboratorio a componentes con geometría y cargas reales sigue estando restringida por el limitado número de datos. Este déficit de conocimiento es abordado por INCEFA-SCALE mediante: 1) la comprensión mecánica mediante un examen detallado de probetas ensayadas a fatiga y análisis de datos (INCEFA-PLUS, USNRC, EPRI, MHI y AdFaM); 2) ensayos centrados en aspectos particulares de las cargas cíclicas aplicadas a componentes. En paralelo, se llevará a cabo una campaña de ensayos para cubrir las necesidades detectadas. Finalmente, el proyecto proporcionará una guía para aplicar en componentes a escala real los datos obtenidos en laboratorio. Este artículo describe los antecedentes del proyecto y los avances realizados en el análisis de datos, comportamiento mecánico y necesidades de ensayo.

PALABRAS CLAVE: fatiga asistida por el ambiente, reactor de agua presurizada, centrales nucleares, operación a largo plazo, acero inoxidable

ABSTRACT

INCEFA-SCALE is a five-year project funded by the EC Horizon2020 programme, successor of the INCEFA-PLUS project. INCEFA-SCALE started in October 2020. The objective of this project is to improve the ability of predicting the lifetime of NPPs components subjected to environmental assisted fatigue. EPRI is developing a series of component-scale environmental fatigue tests, which are expected to significantly advance data availability. However, the ability to address the applicability of laboratory test data to components with real geometry and loads remains restricted by the limited number of data. INCEFA-SCALE addressed this knowledge gap by: 1) developing a comprehensive mechanical understanding through detailed examination of fatigue-tested specimens and data analysis (INCEFA-PLUS, USNRC, EPRI, MHI and AdFaM); 2) conducting tests focused on particular aspects of cyclical loads applied to components. At the same time, a test campaign will be carried out to cover the detected needs. Finally, the project will provide a guidance for using the laboratory data in full-scale components. This article describes the background of the project and the advances made in data analysis, mechanical understanding and testing needs.

KEYWORDS: environmentally assisted fatigue, pressurized water reactor, nuclear power plants, long-term operation, stainless steel

1. INTRODUCCIÓN

INCEFA-SCALE es un proyecto de cinco años de duración financiado por el programa Horizonte 2020 de

la Comisión Europea. Este proyecto es el sucesor del proyecto INCEFA-PLUS, que se desarrolló entre 2015 y 2020. INCEFA-SCALE comenzó en octubre de 2020 y su objetivo es continuar con el estudio de la fatiga asistida

por el ambiente (EAF), avanzando en la capacidad de predecir el tiempo de vida de los componentes de centrales nucleares afectados por este fenómeno.

Los operadores de centrales nucleares han observado que los fallos atribuibles a EAF son menores que los estimados por los métodos de cálculo actuales [1]. Una de las posibles causas de esta discrepancia es la transferibilidad entre los resultados de los ensayos en laboratorio y los componentes reales. Además, la capacidad de abordar la transferibilidad entre las escalas de laboratorio y de componente, tanto en geometría como en cargas, sigue teniendo una limitación en la disponibilidad de datos. Este déficit de conocimiento es el que aborda INCEFA-SCALE. La estrategia del proyecto es, por un lado, el desarrollo de un conocimiento sobre el comportamiento mecánico mediante el análisis exhaustivo de probetas ensayadas y minería de datos, y, por otro lado, la realización de ensayos centrados en aspectos particulares de las condiciones de carga cíclicas de los componentes.

Actualmente, el proyecto se encuentra en la fase de análisis de la gran cantidad de datos existentes en la base de datos MatDB, alojada por el JRC (procedentes del proyecto INCEFA-PLUS y de otras fuentes externas, como USNRC, EPRI, MHI y el proyecto AdFaM). El programa experimental se está definiendo durante este primer año de proyecto y se desarrollará durante tres años. Finalmente, el proyecto generará una guía para aplicar los datos obtenidos en laboratorio a componentes a escala real.

2. NOMENCLATURA

AdFaM	Proyecto Advance Fatigue Methodologies
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
DoE	Diseño de experimentos
EAF	Fatiga asistida por el ambiente
EDF	Electricité de France
EPRI	Electric Power Research Institute
FEA	Análisis por elementos finitos
FAP	Procedimiento para la evaluación de la fatiga
FRF	Framatome (Francia)
INI	Inesco Ingenieros
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
JRC	Joint Research Center (EC)
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
MatDB	Base de datos online de materiales
MHI	Mitsubishi Heavy Industries

NNL	Naval Nuclear Laboratory
NPP	Nuclear Power Plant
NRA	Nuclear Regulation Authority
PSI	Paul Scherrer Institute
PWR	Pressurised Water Reactor
RR	Rolls-Royce
UC	Universidad de Cantabria
UOM	University of Manchester
USNRC	US Nuclear Regulatory Commission
UJV Rez	Nuclear Research Institute Rez
VTT	Technical Research Centre of Finland
WDD	Jacobs
WP	Paquete de trabajo

3. OBJETIVOS

El proyecto INCEFA-SCALE pretende profundizar en el conocimiento de los mecanismos que intervienen en el fenómeno de la fatiga asistida por el ambiente mejorando los métodos para predecir el tiempo de vida de los componentes en centrales nucleares y, más importante aún, completar el déficit de conocimiento respecto a la aplicación de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio al comportamiento y las condiciones reales de carga de los componentes. Este déficit de conocimiento ha sido reconocido internacionalmente y es de gran importancia, por lo que una serie de ensayos de EAF a escala de componente está siendo llevado a cabo por EPRI [2] para proporcionar un avance significativo en el número de datos disponibles. Es de esperar que estos ensayos mejoren la disponibilidad de datos en condiciones de componente, sin embargo, su capacidad de transferibilidad está limitada.

La estrategia del proyecto es:

- 1) Desarrollar un profundo conocimiento del comportamiento mecánico mediante una extensa caracterización de probetas ensayadas en condiciones EAF, junto a una minuciosa minería de datos de los ensayos disponible en MatDB.
- 2) Un programa de ensayos centrado en aspectos característicos de las cargas cíclicas en los componentes. Esta campaña de ensayos será definida durante el primer año, en paralelo a la minería de datos, y se desarrollará durante tres años.

Finalmente, el proyecto facilitará una guía sobre la transferibilidad de los datos obtenidos en laboratorio a escala de componente y condiciones de carga reales.

4. ANTECEDENTES

Los aceros inoxidables austeníticos son el material elegido para muchas de las tuberías de refrigeración del

circuito primario de los reactores de agua a presión (PWR) de las centrales nucleares. Además de su exposición a alta temperatura y presión, y al agua de refrigeración acondicionada químicamente, estos materiales experimentan condiciones de cargas dinámicas no uniformes. Mientras que un importante número de ensayos en laboratorio han sido llevados a cabo para evaluar el efecto de distintos parámetros del material, ambiente y sollicitaciones mecánicas en el límite de vida a fatiga del acero inoxidable en condiciones simuladas de PWR, la transferibilidad de estos resultados al comportamiento a escala de componente en planta continúa siendo un tema de interés e insuficiente conocimiento [1]. Una mejora del conocimiento de los mecanismos involucrados en la fatiga asistida por el ambiente es fundamental para proporcionar una guía que permita aplicar los avances en la transferencia de los datos obtenidos en laboratorio al comportamiento de los componentes. El proyecto INCEFA-SCALE aborda esta cuestión.

El proyecto INCEFA-PLUS, antecesor de INCEFA-SCALE, evaluó el efecto en la vida a fatiga de aceros austeníticos de los siguientes factores: rango de deformación, ambiente, rugosidad superficial, deformación media, tiempos de mantenimiento (*hold time*) y velocidad de deformación, así como sus interacciones. Se realizaron más de 250 ensayos en aire y en ambiente PWR, la Figura 1 muestra el resultado de 170 de ellos, correspondientes al programa principal de ensayos. Se describió un modelo experimental que identificaba como factores significativos el rango de deformación, el ambiente y la rugosidad superficial, así como las interacciones estadísticamente significativas entre el ambiente y la rugosidad superficial, y el ambiente y el rango de deformación [3]. No se observó ningún efecto en la aplicación de deformación media o *hold time*.

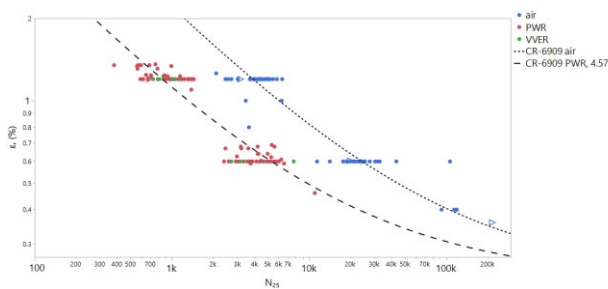


Figura 1. Curvas de referencia del NUREG/CR-6909 [4] y datos experimentales de INCEFA-PLUS [3].

Distintos subprogramas se realizaron en el marco del proyecto:

- Se estudió el efecto de la deformación media sin encontrar sinergia entre esta y el ambiente [5].
- Se modificó de las condiciones iniciales de *hold time*, aunque no se encontró un efecto beneficioso [3], como sí ocurría en otros estudios [6].
- La velocidad de deformación y la temperatura se modificaron, comprobando que el aumento en la

vida a fatiga esperada coincidía con la predicción del NUREG/CR-6909 [3].

- También se realizaron ensayos de fatiga biaxial [7].

Por otro lado, se analizó el efecto del factor de acabado superficial en los procedimientos para la evaluación de la fatiga, concluyendo que se podría reducir el conservadurismo cuanto se aplica a ambientes PWR [8].

Por último, se comprobó que los resultados obtenidos no estaban influenciados ni por la geometría de la probeta empleada ni por el laboratorio que realizó el ensayo [9].

A continuación, se explicarán los objetivos del proyecto INCEFA-SCALE, describiendo el proyecto en detalle y mostrando su estado actual se resumirá el estado del proyecto.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

5.1. Organización del proyecto

El proyecto se compone de seis paquetes de trabajo (WP). Las interrelaciones entre los distintos WP se muestran en la Figura 2. Otra característica de INCEFA-SCALE es su relación con entidades externas, con lo que se quiere garantizar la máxima relevancia para los resultados del proyecto (ver Figura 3). Algunas de estas relaciones ya están consolidadas gracias a los avances llevados a cabo durante el proyecto INCEFA-PLUS.

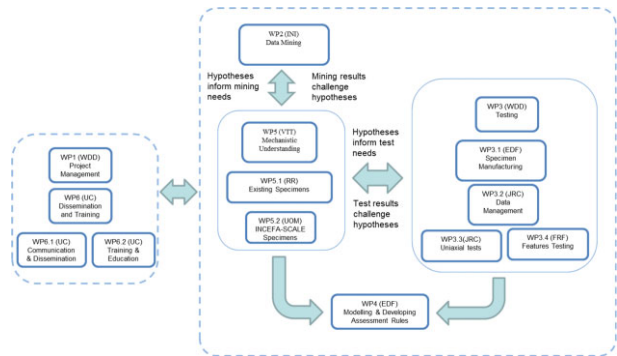


Figura 2. Interacciones entre distintos WPs del proyecto INCEFA-SCALE.

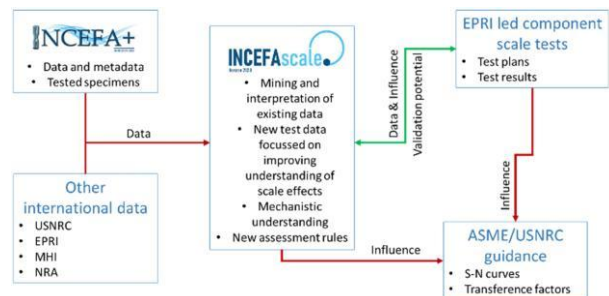


Figura 3. Relaciones externas de INCEFA-SCALE.

5.2. Descripción del proyecto

El consorcio del proyecto INCEFA-SCALE está formado por diecisiete organizaciones, de las que catorce tiene capacidad para realizar ensayos EAF, cubriendo tanto ensayos al aire como ensayos en agua simulada de primario. Las tres organizaciones que no realizaran ensayos, centraran su trabajo en el desarrollo de metodologías para evaluar la fatiga y en la comprensión mecánica mediante la caracterización de alta resolución de materiales. Las organizaciones participantes son las siguientes:

- Jacobs (Reino Unido, coordinador del proyecto)
- PSI (Suiza)
- UJV Rez (República Checa)
- VTT (Finlandia)
- CIEMAT (España)
- IRSN (Francia)
- Universidad de Cantabria (España)
- CEA (Francia)
- JRC (Países Bajos)
- Framatome (Francia)
- EDF (Francia)
- Inesco Ingenieros (España)
- Rolls-Royce (Reino Unido)
- Framatome GmbH (Alemania)
- Universidad Tecnológica de Kaunas (Lituania)
- KAERI (Corea del Sur)
- Universidad de Manchester (Reino Unido)

La mayoría de los ensayos se llevará a cabo en un material común de las centrales, el acero inoxidable 316L, suministrado por EDF. Además, algunos participantes ensayarán un acero inoxidable de la serie 300 concreto por su propio interés nacional. Esto permitirá que la variabilidad entre laboratorios cuantificada durante el proyecto INCEFA-PLUS sea estudiada en más profundidad [9], además de las diferencias entre el anterior material ensayado (304L) y el nuevo material que se va a caracterizar.

Siguiendo la practica desarrollada en INCEFA-PLUS, las organizaciones participantes se organizarán en comités para definir métodos y protocolos de ensayo comunes. Además, hay un comité denominado Panel de Expertos, que revisará los datos generados para definir su calidad. Finalmente, todas las organizaciones siguen comprometidas en acordar un formato común para los datos generados, en la medida de lo posible, ya que INCEFA-SACALE tendrá diversos métodos de ensayo; y en publicar los datos en el sistema MatDB, administrado por el JRC.

Además de los ensayos uniaxiales en probetas cilíndricas sólidas y huecas, habrá un incremento significativo de otros métodos, como ensayos de membrana o carga bidireccional y el uso de probetas entalladas en ensayos uniaxiales o probetas ensayadas con ondas complejas, para explorar respuestas particulares que diferencian el comportamiento entre los ensayos de laboratorio y los

componentes completos frente al fenómeno de EAF. La composición concreta de los ensayos a desarrollar está siendo definida durante este primer año. Estas decisiones serán tomadas en base a las deficiencias encontradas durante el análisis de datos y en el desarrollo, en paralelo, de su comprensión mecánica. Se ha sido cuidadoso durante la redacción del proyecto para asegurar que el consorcio disponga de una gama suficiente de métodos de ensayo que cubran todas las necesidades.

La amplitud y la complejidad de los ensayos disponibles implica que se debe ser cuidadosos para evitar estudiar más fenómenos de los que se puedan abordar desde un punto de vista estadístico. Por otro lado, dado que algunos de los métodos que se desarrollaran no son estándar, es importante comprender cómo se pueden combinar estos resultados con los resultados estandarizados existentes para ampliar el conocimiento; este es un reto que debe abordar el proyecto en su primera etapa.

Tradicionalmente, la evaluación de la EAF ha tenido una base experimental, y esto ha sido así en el trabajo realizado en INCEFA-PLUS. Centrarse en la comprensión mecánica de la fatiga es uno de los atractivos de INCEFA-SCALE. Un mejor conocimiento mecánico es esencial para extrapolar los resultados de laboratorio a la escala de geometría y condiciones de operación de los componentes en condiciones reales de planta. Como el comportamiento de EAF está muy afectado por la condición del material y por la distribución de las cargas, se realizará un análisis de alta resolución de la microestructura, junto con un análisis de elementos finitos (FEA).

La definición y el desarrollo de un modelo de evaluación propio comenzará a finales de 2022. Mientras INCEFA-SCALE avanza hacia la estandarización de los ensayos de fatiga, los resultados se seguirán evaluando según la normativa de fatiga actual, aunque sin dejar de lado las evidencias y la comprensión mecánica adquiridas hasta ahora. Apoyándose en la experiencia adquirida durante INCEFA-PLUS [10], los socios analizaran sus datos individualmente en un primer momento. Durante el anterior proyecto, este fue un excelente método para asegurar la creatividad del análisis. Después, los miembros del Panel de Expertos se reúnen periódicamente para analizar las ideas y conformar un conjunto uniforme de conclusiones. Se desarrollarán nuevas curvas S-N (tensión frente a número de ciclos) de vida a fatiga para diferentes condiciones. Se estudiarán nuevas respuestas, a partir de la comprensión mecánica, y sus efectos serán analizados, incluyendo su influencia en los factores de la fatiga ambiental. Estos son los primeros pasos para conocer la influencia y el peso de estos parámetros en los procesos de envejecimiento por fatiga y, de nuevo, favorecer la transferencia de los resultados de laboratorio a los componentes en planta. Hay que remarcar que para el desarrollo de nuevas curvas S-N se incorporaran al análisis datos provenientes de proyectos diferentes a INCEFA-PLUS e INCEFA-

SCALE. El propósito último es dar un importante paso hacia adelante en la evaluación de la fatiga de los componentes de centrales nucleares en condiciones reales; para ello, los resultados obtenidos en INCEFA-SCALE se usarán para desarrollar un procedimiento de evaluación de la fatiga (FAP).

La buena cooperación y comunicación fue una característica distintiva de INCEFA-PLUS y es muy importante que esta estrecha colaboración continúe en INCEFA-SCALE. Como muestra la Figura 2, hay una importante interdependencia entre las actividades de minería de datos, ensayo, modelado y comprensión mecánica. Esto es especialmente decisivo durante el primer año de proyecto. Durante INCEFA-PLUS, una buena práctica ha sido la realización de reuniones frecuentes, según las necesidades. Estas reuniones se realizaban virtualmente y, cuando era necesario, presencialmente. Esto continuará durante INCEFA-SCALE, en las condiciones que sea posible, y añadiendo las reuniones semestrales del proyecto en su conjunto.

6. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LA FATIGA

Al finalizar el proyecto, todo el conocimiento generado a lo largo del mismo será recogido en el procedimiento de evaluación de la vida a fatiga asistida por el ambiente. El FAP incluirá la siguiente información:

- Parámetros que afectan al envejecimiento de los componentes en comparación con las probetas empleadas en laboratorio.
- Conjunto de curvas de fatiga obtenidas a partir del programa experimental.
- Recopilación de las curvas de fatiga más representativas a partir del análisis de datos existentes.
- Ecuaciones que incluyan los diferentes parámetros analizados.
- Expresiones del factor corrector ambiental.
- Metodología para la evaluación de la fatiga.
- Informe de lecciones aprendidas.

Se pretende redactar un documento que pueda complementar a las normas internacionales de diseño. Este documento se pudiera dividir en los siguientes puntos:

- Introducción.
- Curvas S-N de fatiga.
- Influencia de nuevos parámetros.
- Nuevas expresiones para el factor ambiental.
- Guía para la evaluar la fatiga.

El FAP se aplicará a un componente industrial para comparar su resultado. Un ejemplo de lo que se puede esperar puede encontrarse en el documento de acceso abierto equivalente del proyecto INCEFA-PLUS [11].

7. ESTADO DEL PROYECTO

Originalmente, el proyecto estaba programado para comenzar en junio de 2020, pero se retrasó hasta octubre debido al impacto de la pandemia de Covid-19. Sin embargo, para mantener la inercia positiva de las actividades de INCEFA-PLUS recientemente finalizadas, el consorcio acordó realizar actividades preparatorias antes del inicio formal del proyecto. Por ello, cuando el proyecto comenzó formalmente, fue capaz de beneficiarse de los dispositivos ya disponibles en los laboratorios y de la preparación de ideas sobre la comprensión mecánica, así como planear los ensayos.

Desde que el proyecto comenzó se han celebrado siete reuniones virtuales de subgrupos con intereses en la comprensión mecánica de la fatiga o en el análisis de datos existentes. Como ya se ha mencionado, estas reuniones frecuentes fueron planificadas y se consideran necesarias durante el primer año del proyecto. Los logros hasta el momento (mayo de 2021) han sido:

- Acordar la colaboración con EPRI, bajo acuerdo de confidencialidad (pendiente de firma). La disponibilidad de ensayos a escala de componente para contribuir a INCEFA-SCALE también ha sido confirmada.
- En condiciones similares, se ha establecido la colaboración con NNL, bajo acuerdo de confidencialidad (en preparación). Este laboratorio también dispone la capacidad de ensayar a escala de componente.
- Los miembros del WP sobre comprensión mecánica han intercambiado ideas sobre los mecanismos de interés y su relevancia para los objetivos del proyecto. Esta línea se está desarrollando actualmente.
- A partir de los intereses sobre la comprensión mecánica, ha comenzado análisis de datos existentes. Se ha avanzado en el desarrollo de un *software* que facilite esta minería de datos mediante la extracción y procesamiento de los datos almacenados en MatDB. Además, un importante número de ensayos de colaboradores externos estarán disponibles. Mientras se trabaja para superar los retos del desarrollo un acuerdo comercial para una Base de Datos Internacional de Fatiga, se espera que se incorporen datos provenientes de EPRI, USNRC (EE. UU.) y NRA (Japón).
- Se han comenzado a priorizar los ensayos de acuerdo con su relevancia para alcanzar los objetivos establecidos. Las idas para priorizar los ensayos han estado influenciadas por la necesidad de desarrollar una mejor comprensión mecánica; por otro lado, también se verán influenciadas por las deficiencias identificadas a partir del análisis de datos existente. Se ha acordado que el primer año de ensayos estará dedicado a ensayos de fatiga estándar para dar tiempo a identificar las necesidades a partir del conocimiento mecánico y el


análisis de datos. Por tanto, se ha dado prioridad a la determinación de las necesidades para ensayos estándar del proyecto, permitiendo el comienzo de la fabricación de las probetas en marzo de 2021.

- Las vías de divulgación ya están disponibles: página web pública (<https://incefascale.unican.es>) y perfiles en ResearchGate, Twitter y LinkedIn.

8. RESUMEN

El proyecto INCEFA-SCALE se ha cimentado sobre los satisfactorios resultados del proyecto INCEFA-PLUS. Reuniones virtuales frecuentes y constructivas se están llevando a cabo durante este primer año con el fin de establecer las necesidades de ensayo del proyecto, priorizando las líneas que permitan alcanzar los objetivos establecidos. Se está realizando la tarea de análisis de datos existentes y la definición de las necesidades de estudio para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico. La fabricación de las probetas de ensayo ha comenzado en marzo de 2021, mientras que la campaña experimental comenzará en octubre. Se han establecido colaboraciones con EPRI y NNL (pendientes de la ratificación de sus respectivos acuerdos de confidencialidad) para la realización de ensayos a escala de componente.

AGRADECIMIENTOS

 Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación y formación de Euratom 2019-2020, bajo el acuerdo de subvención nº 945300.

También se reconoce la significativa contribución de los miembros del proyecto INCEFA-SCALE.

REFERENCIAS

- [1] D. Tice, A. McLennan, and P. Gill, “Environmentally assisted fatigue (EAF) knowledge gap analysis: Update and revision of the EAF knowledge gaps,” Palo Alto, CA, Tech. Rep. 3002013214, 2018.
- [2] D. A. Steininger *et al.*, “Component Testing Proposal to Quantify Margins in Existing Environmentally Assisted Fatigue (EAF) Requirements,” Jul. 2017, doi: 10.1115/PVP2017-65995.
- [3] M. Bruchhausen *et al.*, “Characterization of Austenitic Stainless Steels with Regard to Environmentally Assisted Fatigue in Simulated Light Water Reactor Conditions,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 307, Feb. 2021, doi: 10.3390/met11020307.
- [4] O. K. Chopra and G. L. Stevens, “NUREG/CR-6909, Rev.1; Effect of LWR Water Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials. Final Report,” 2018.
- [5] P. Spätig, J.-C. Le Roux, M. Bruchhausen, and K. Mottershead, “Mean Stress Effect on the Fatigue Life of 304L Austenitic Steel in Air and PWR Environments Determined with Strain- and Load-Controlled Experiments,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/met11020221.
- [6] H. E. Karabaki, J. P. Solin, M. Twite, M. Herbst, J. Mann, and G. Burke, “Fatigue with hold times simulating npp normal operation results for stainless steel grades 304L and 347; PVP2017-66097,” *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, vol. 1A-2017, p. V01AT01A031, Jul. 2017, doi: 10.1115/PVP2017-66097.
- [7] C. Gourdin, G. Perez, H. Dhahri, L. De Baglion, and J.-C. Le Roux, “Environmental Effect on Fatigue Crack Initiation under Equi-Biaxial Loading of an Austenitic Stainless Steel,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 203, Jan. 2021, doi: 10.3390/met11020203.
- [8] S. Cuvilliez, A. McLennan, K. Mottershead, J. Mann, and M. Bruchhausen, “Incefa-Plus Project: Lessons Learned From the Project Data and Impact on Existing Fatigue Assessment Procedures,” *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 142, no. 6, Dec. 2020, doi: 10.1115/1.4047273.
- [9] A. McLennan *et al.*, “INCEFA-PLUS Project: The Impact of using Fatigue Data generated from Multiple Specimen Geometries on the Outcome of a Regression Analysis; PVP2020-21422,” *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, 2020.
- [10] M. Vankeerberghen *et al.*, “Ensuring data quality for environmental fatigue – INCEFA-Plus testing procedure and data evaluation; PVP2018-84081,” *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, vol. 1A-2018, 2018, doi: 10.1115/PVP201884081.
- [11] INCEFA-PLUS Consortium *et al.*, *INCEFA-PLUS findings on Environmental Fatigue*. INCEFA-PLUS Project, 2020.