

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

**S. Arrieta<sup>1\*</sup>, S. Cicero<sup>1</sup>, K. Mottershead<sup>2</sup>, R. Cicero<sup>3</sup>, A. McLennan<sup>2</sup>, S. Courtin<sup>4</sup>, Z. Que<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Jacobs, Faraday Street, Birchwood Park, Warrington WA3 6GA, Reino Unido

<sup>3</sup> Inesco Ingenieros, CDTUC, Fase B, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

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

<sup>5</sup> 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. El proyecto avanza en el análisis de datos existentes y en la generación de nuevos datos de fatiga asistida por ambiente que permitan aplicar los resultados de los ensayos en laboratorio a componentes con geometría y cargas reales. En este aspecto, se ha llevado a cabo la minería de datos de distintos proyectos anteriores (INCEFA-PLUS, USNRC, EPRI, MHI y AdFaM) y se han definido los tipos de ensayos que cubren los déficits de información encontrados. Además, se ha definido la matriz de ensayos planeados para realizar durante 2022. Los ensayos de esta primera fase se centran en generar datos de referencia, y en analizar el efecto de ondas complejas (amplitud variable) y del acabado superficial de las probetas. En las siguientes fases, los ensayos se centrarán en condiciones particulares: ensayos multiaxiales, entallas, gradientes de tensión-deformación, efecto del tamaño. Por otro lado, se está llevando a cabo el análisis microestructural del material común de ensayos y el desarrollo de un procedimiento conjunto que permita el análisis de las estriaciones por fatiga de la superficie de fractura. Este artículo proporciona una actualización del estado del proyecto y de los trabajos realizados en el análisis de datos, comportamiento mecánico y condiciones 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 Nuclear Power Plants (NPPs) components subjected to environmental assisted fatigue. The project progresses in the analysis of existing data and producing new environmentally assisted fatigue data which allow to apply the laboratory test outcomes to components with real geometry and loads. So far, the data mining of different finished projects (INCEFA-PLUS, USNRC, EPRI, MHI and AdFaM) has been carried out, and test conditions for filling the knowledge gaps have been established. Moreover, the test matrix for 2022 has been defined. In this first phase, tests are focused on producing reference data, analysing complex waveforms (variable amplitude) and the effect of the surface finish. Next testing phases will focus on particular conditions: multi-axial tests, notches, stress/strain gradient effect and size effect. Furthermore, the microstructural analysis of common material and a guideline for fatigue striations measurement on the fracture surface have been developed. This article provides an update to the project status and the advances made in data analysis, mechanical understanding and testing conditions.

**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 INCEFA-PUS, proyecto 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), progresando en la capacidad de predecir el tiempo de vida de los componentes afectados por este fenómeno instalados en centrales nucleares.

Los operadores de centrales nucleares han observado que los fallos atribuibles a EAF son menores que los estimados por los métodos de cálculo empleados hasta ahora [1]. Una de las posibles causas de esta discrepancia es la transferencia de los resultados de los ensayos de laboratorio a 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 estando limitada por 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 reales.

Actualmente, se ha finalizado la fase de análisis de gran cantidad de datos previos recopilados en la base de datos MatDB, gestionada por el JRC (procedentes del proyecto INCEFA-PLUS [2] y de otras fuentes externas, como USNRC, EPRI, MHI y el proyecto AdFaM). El programa experimental ha sido definiendo y se desarrollará durante los próximos tres años. Además, se han establecido una serie de protocolos para la gestión de datos experimentales, ejecución de ensayos y análisis de las probetas ensayadas. 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
SEM	Microscopía óptica de barrido
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 la aplicación de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio al comportamiento y las condiciones reales de carga de los componentes en centrales nucleares para predecir su tiempo de vida a fatiga. El déficit de conocimiento al respecto ha sido reconocido internacionalmente y es de gran importancia, por lo que una serie ensayos de EAF a escala de componente está siendo llevando a cabo por EPRI [3] 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 (o reales) y que puedan ser relacionados con los datos obtenidos en laboratorio.

La estrategia de INCEFA-SCALE 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.
- 2) Un programa de ensayos centrado en aspectos característicos de las cargas cíclicas en los componentes reales.

Finalmente, el proyecto facilitará una guía para el uso de los datos obtenidos en laboratorio en condiciones de carga y componentes 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. En servicio, se exponen a alta temperatura y presión, así como al agua de refrigeración acondicionada químicamente. Estos materiales experimentan condiciones de cargas dinámicas no uniformes.

Los códigos de diseño [4] y los métodos experimentales empleados en laboratorio para calcular las curvas de vida a fatiga de los componentes emplean datos simplificados para proporcionar factores ambientales que definen la fatiga acumulada [5]. La comparación de estos métodos con las pruebas realizadas en componentes a escala sugiere que estos factores pueden ser conservadores debido, probablemente, a la transferencia de los datos de laboratorio a cargas y componentes reales. La transferibilidad de estos resultados al comportamiento a escala de componente en planta continúa siendo un tema de interés e insuficiente conocido [1].

Recientemente, distintos estudios han proporcionado una mejor predicción de la vida a fatiga de probetas de acero inoxidable sometidas a transitorios térmicos [6], o han definido la influencia de los acabados superficiales característicos de los componentes [7]. De este modo, se reduce el conservadurismo reproduciendo más fielmente las condiciones reales de operación. Sin embargo, sigue siendo necesario aumentar el conocimiento del comportamiento del acero inoxidable sometido a EAF y avanzar en la transferencia de los datos obtenidos en laboratorio al comportamiento de los componentes. El proyecto INCEFA-SCALE aborda esta cuestión.

El antecesor de INCEFA-SCALE, el proyecto INCEFA-PLUS, 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 de carga (*hold times*) y velocidad de deformación, así como sus interacciones. Se realizaron más de 250 ensayos en aire y en ambiente PWR. Como resultado de este proyecto, 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 [8]. No se observó ningún efecto en la aplicación de deformación media o de *hold times*.

A continuación, se explicarán los objetivos del proyecto INCEFA-SCALE, describiendo el proyecto y haciendo una revisión del estado actual del mismo.

#### 5. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se compone de seis paquetes de trabajo (WPs): WP1: Gestión del Proyecto; WP2: Minería e interpretación de datos; WP3: Ensayos; WP4: Modelado; WP5: Comprensión mecánica; y WP6: Difusión y formación.

El consorcio del proyecto INCEFA-SCALE está formado por diecisiete organizaciones: 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), y Universidad de Manchester (Reino Unido).

La buena cooperación y comunicación entre organizaciones, que caracterizó el proyecto INCEFA-PLUS, es muy importante que se desarrolle en INCEFA-SCALE, ya que hay una importante interdependencia entre las actividades de minería de datos, ensayo, modelado y comprensión mecánica.

Otra característica de INCEFA-SCALE es su relación con entidades externas (USNRC, EPRI, MHI, NRA y NNL), con lo que se quiere garantizar la máxima relevancia para los resultados del proyecto.

#### 6. DETALLES DEL PROYECTO

La mayoría de los ensayos se llevarán 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 específico por su propio interés nacional. Esto permitirá estudiar las diferencias entre el anterior material ensayado en el proyecto INCEFA-PLUS (304L) y el nuevo material que se va a caracterizar.

Siguiendo la práctica 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-SCALE tendrá diversos métodos de ensayo, así como en publicar los datos en el sistema MatDB, administrado por el JRC. Como resultado de este compromiso, ya han sido acordados cuatro procedimientos comunes para todas las organizaciones: plan de gestión de datos, protocolo de ensayos, procedimiento para la evaluación del espaciado entre estrías, procedimiento para la publicación en acceso abierto.

### 6.1. Minería de datos

Se ha completado el análisis de los datos de ensayos realizados previamente. Las fuentes de estos datos han sido: el proyecto INCEFA-PLUS, los distintos materiales de programas nacionales y MHI (todos ellos disponibles en la base de datos MatDB), además de datos provenientes del VTT, USNRC, ANL y EPRI. Estos datos provienen tanto de ensayos de fatiga en aire como en ambiente PWR. La Figura 1 muestra una selección de los datos de ensayos a fatiga en condiciones PWR provenientes de las distintas fuentes.

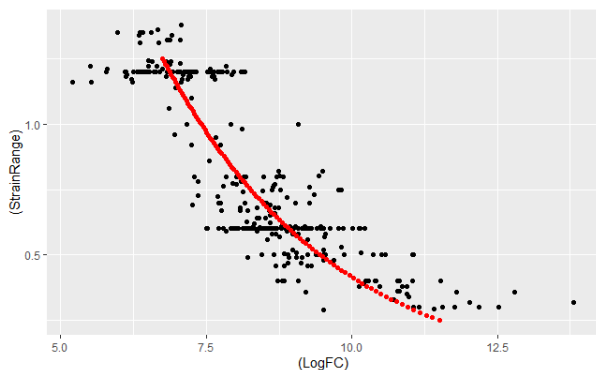


Figura 1. Selección de datos de ensayos a fatiga en ambiente PWR (en rojo, modelo teórico).

De los análisis realizados, se ha identificado una falta de datos a bajas deformaciones y un efecto de la forma de onda en la vida a fatiga.

### 6.2. Campaña experimental

Además de los ensayos uniaxiales en probetas cilíndricas sólidas y huecas, en este proyecto habrá un incremento de métodos experimentales, como por ejemplo el ensayo en probetas tipo membrana, el uso de carga biaxiales, el uso de probetas entalladas en ensayos uniaxiales, o probetas ensayadas con ondas complejas. El objetivo es explorar respuestas particulares que diferencian el comportamiento entre los ensayos de laboratorio y los componentes reales frente al fenómeno de EAF. La composición concreta de los ensayos a desarrollar ha sido definida en el WP3:

- WP3.3: define ensayos con geometrías de probetas estándar (sólidas y huecas). Estudiarán los efectos del acabado superficial, la carga de amplitud variable y el ambiente. Estos ensayos comenzaron en noviembre de 2021.
- WP3.4: define ensayos con probetas no estándar. Estudiará el efecto de la carga en la vida a fatiga a través de particularidades incorporadas al diseño de la probeta, tanto en aire como en PWR. Por ejemplo, probetas tipo membrana en ambiente PWR [9], cruciforme [10] y probetas sólidas con entallas. Los ensayos de este tipo comenzarán en noviembre de 2022.

En esta primera fase, los ensayos se centran en definir los efectos de la amplitud variable y el acabado superficial en la vida a fatiga del acero inoxidable 316L. Los ensayos de amplitud variable presentan sobrecargas periódicas respecto a una línea base de ciclos de amplitud constante, como muestra la Figura 2.

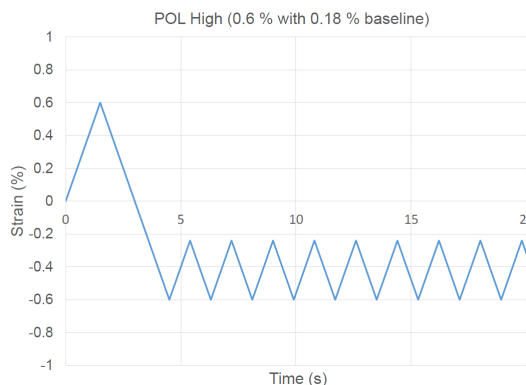


Figura 2. Ensayo de fatiga de amplitud variable.

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 con los recursos disponibles y que los resultados sean relevantes desde un punto de vista estadístico. Por otro lado, dado que algunos de los métodos que se emplearán no son estándar, es importante comprender cómo se pueden combinar estos resultados con los obtenidos de forma estandarizada. Para mitigar estos riesgos, se realizó una evaluación de los temas de estudio por dificultad y beneficio potencial. Además, un Panel de Expertos y un Consejo Asesor independiente asesoran y evalúan los ensayos del proyecto. Estas medidas mantendrán el control sobre el alcance y la calidad de los ensayos.

### 6.3. Comprensión mecánica

Tradicionalmente, la evaluación de la EAF ha tenido una base experimental, simplificando las relaciones experimentales para desarrollar las curvas de vida a fatiga y calcular los factores de uso acumulado. Una razón para estas simplificaciones en la evaluación de la fatiga es que obtener los datos con los que desarrollar un modelo mecánico sería excesivamente complejo y costoso. Aunque los modelos mecánicos pueden no ser ampliamente aceptables desde la perspectiva de una aplicación ingenieril, se requieren para respaldar el uso de modelos simplificados en las evaluaciones y pueden llevar a nuevos enfoques, menos conservadores, que pueden ser beneficiosos para limitar las ubicaciones críticas en planta. Por tanto, un objetivo de INCEFA-SCALE será el avanzar en el desarrollo de modelos mecánicos para EAF y su aplicación en ingeniería.

Para respaldar el desarrollo de modelos mecánicos de fatiga es esencial una mejor comprensión del mecanismo de EAF. Dado que la fatiga asistida por el ambiente se ve muy afectada por la condición del material y por la

distribución de las cargas, se realizará un análisis de la microestructura, junto con un análisis de elementos finitos (FEA). Estas actividades se realizarán mediante métodos comúnmente acordados para el análisis microestructural. En el marco del WP5 ha finalizado uno de estos procedimientos para calcular de forma coordinada el espacio entre estrías causadas por fatiga (ver Figura 3, [11]). La caracterización incluirá el examen de probetas antes y después de los ensayos. Se intentará definir el daño causado durante la fabricación de las probetas y su evolución durante el ensayo de fatiga. Esto proporcionará información sobre aspectos mecánicamente relevantes de la fatiga, como el espaciado entre estrías o la acumulación de daño. La caracterización microestructural, en combinación con los distintos tipos de ensayo de fatiga, mejorará la comprensión mecánica de la fatiga para una carga característica de las plantas nucleares.

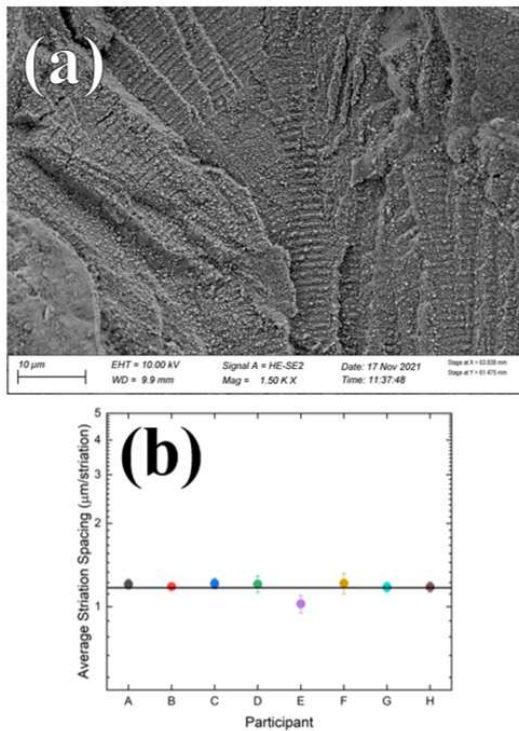


Figura 3. Imagen SEM de superficie de fractura por fatiga. a) Área analizada con estrías por fatiga; b) Medidas realizadas por los distintos laboratorios.

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 [12], los socios analizarán 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. A partir de los datos generados en los proyectos INCEFA-PLUS e INCEFA-SCALE, junto con la incorporación de datos externos, se desarrollarán nuevas curvas S-N (tensión frente a número de ciclos) de vida a fatiga para diferentes condiciones. La comprensión mecánica incluirá el efecto de los factores de la fatiga ambiental. 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).

## 6. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LA FATIGA

Al finalizar el proyecto, el conocimiento obtenido permitirá desarrollar un procedimiento de evaluación de la vida a fatiga asistida por el ambiente, que incluirá la siguiente información:

- Parámetros que afectan al envejecimiento de los componentes en comparación con las probetas empleadas en laboratorio.
- Curvas de fatiga obtenidas a partir del programa experimental y del análisis de datos existentes.
- Ecuaciones que incluyan los diferentes parámetros analizados y 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. 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 [2].

## 7. ESTADO DEL PROYECTO

El proyecto comenzó en octubre de 2020. Desde su inicio se han celebrado cuatro reuniones virtuales con los miembros del proyecto por completo, y multitud de reuniones virtuales de distintos subgrupos con intereses en la comprensión mecánica de la fatiga, en las tareas experimentales, en análisis de datos existentes y en el modelado. Los logros hasta el momento (marzo de 2022) han sido:


- Se ha acordado la colaboración con EPRI, bajo acuerdo de confidencialidad (en desarrollo).
- WP2 ha completado el desarrollo de un *software* que facilitará las actividades de minería de datos utilizando la información almacenada en MatDB. Además, datos externos estarán disponibles para su examen (EPRI, USNRC y NRA).
- Los miembros de los WP3, WP4 y WP5 han compartido ideas sobre los objetivos de los respectivos WPs y la prioridad de estudio.

- Los ensayos uniaxiales pertenecientes al WP3 han comenzado, con el apoyo del Panel de Expertos.
- Los ensayos en condiciones particulares del WP3 están siendo definidos por un grupo de trabajo.
- El modelado y la evaluación contenidos en el WP4 se han iniciado y se ha definido su alcance.
- Los trabajos de caracterización propios del WP5 continúan. Se ha completado una colaboración para el recuento de estrías por fatiga y se ha definido un método común para calcular su espaciado. Un subgrupo de este WP está en proceso de analizar el estado del material en muestras sin ensayar.
- 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. Frecuentes reuniones virtuales se están llevando a cabo con el fin de planificar y gestionar el desarrollo de los distintivos paquetes de trabajo, así como seguir la evolución de la campaña experimental, con el fin de alcanzar los objetivos establecidos en el proyecto. Se han realizado tareas 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, su distribución entre los socios y los ensayos comenzaron a finales de 2021. Se han establecido colaboraciones con EPRI y NNL (pendientes de la ratificación) 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] INCEFA-PLUS Consortium *et al.*, *INCEFA-PLUS findings on Environmental Fatigue*. INCEFA-PLUS Project, 2020.
- [3] D. A. Steininger *et al.*, "Component Testing Proposal to Quantify Margins in Existing Environmentally Assisted Fatigue (EAF) Requirements," in *Volume 3B: Design and Analysis*, 2017, doi: 10.1115/PVP2017-65995.
- [4] ASME, "Section III Division 1, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," in *Boiler and Pressure Vessel Code*, New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [5] 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.
- [6] C. Currie, A. Morley, D. Leary, N. Platts, M. Twite, and K. Wright, "Further Validation of the Strain-Life Weighted (SNW) Fen Method for Plant Realistic Strain and Temperature Waveforms," in *Volume 1A: Codes and Standards*, 2018, doi: 10.1115/PVP2018-84879.
- [7] A. McLennan, A. Morley, and S. Cuvilliez, "Further Evidence of Margin for Environmental Effects, Termed Fen-Threshold, in the ASME Section III Design Fatigue Curve for Austenitic Stainless Steels Through the Interaction Between the PWR Environment and Surface Finish," in *Volume 1: Codes and Standards*, 2020, doi: 10.1115/PVP2020-21262.
- [8] 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.
- [9] H. Dhahri, C. Gourdin, G. Perez, S. Courtin, J.-C. Le Roux, and H. Maitournam, "PWR effect on crack initiation under equi-biaxial loading: Development of the experiment," *Procedia Eng.*, vol. 213, pp. 571–580, 2018, doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.052.
- [10] P. Gill *et al.*, "A Method for Investigating Multi-Axial Fatigue in a PWR Environment," in *Volume 1: Codes and Standards*, 2021, no. PVP2021-62429, doi: 10.1115/PVP2021-62429.
- [11] B. Howe, J. Mann, Z. Que, C. Houtilainen, F. Scenini, and G. Burke, "Development of a robust Procedure for the Evaluation of Striation Spacings in Low Cycle Fatigue Specimens tested in a simulated PWR environment," in *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2022, no. PVP2022-84027, doi: 10.1115/PVP2022-84027.
- [12] 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.