

CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA DE ACEROS DE VASIJAS MEDIANTE PROBETAS MINI-CT Y SMALL PUNCH. PRIMEROS PASOS DEL PROYECTO EUROPEO FRACTESUS

B. Arroyo^{1,*}, S. Cicero¹, M. Lambrecht², H. Swan³, P. Arffman⁴, E. Altstadt⁵, T. Petit⁶, F. Obermeier⁷,

^{1,*} Universidad de Cantabria, LADICIM, Depto. de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Avda. de los Castros 44, 39005, Santander, España

² Studiecentrum voor Kernenergie /Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire- SCK CEN, Bélgica

³ National Nuclear Laboratory Limited-NNL, Reino Unido

⁴ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Finlandia

⁵ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf eV, HZDR, Alemania

⁶ Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Étude des Matériaux Irradiés, Francia

⁷ Framatome GmbH, Alemania

RESUMEN

El presente trabajo pretende dar difusión al proyecto europeo FRACTESUS, que se desarrollará entre 2020 y 2024 con la colaboración de 22 socios de dentro y fuera de Europa. Se encuadra en el Euratom work programme 2019-2020 (H2020), en busca de una energía sostenible y una economía neutral con el clima en 2050, donde la integridad estructural de los materiales empleados en la industria nuclear es esencial.

El uso de probetas miniatura es imprescindible para poder cumplir con las directivas de seguridad nucleares en la caracterización de materiales de vasija (RPV), ya sea por la irradiación o la escasez de los mismos. Pese a que su empleo para la determinación de las propiedades en fractura de forma fiable ha sido probado, aún queda un largo camino para conseguir su aprobación por los organismos reguladores europeos.

El objetivo de FRACTESUS es determinar el comportamiento en fractura de aceros RPV, tanto irradiados como no irradiados, en base a ensayos sobre probetas 0.16T C(T) (mini-CT), y probetas Small Punch, empleando la Curva Patrón para su análisis, y comparándolos con ensayos de fractura normalizados. El fin último será sentar las bases para la inclusión de estas técnicas miniatura por los organismos reguladores europeos.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Mini-CT, Small Punch, FRACTESUS

ABSTRACT

This work aims to disseminate the European project FRACTESUS, which will be developed between 2020 and 2024 with the collaboration of 22 partners, European and non-European. It is part of the Euratom work programme 2019-2020 (H2020), in search of sustainable energy and a climate-neutral economy by 2050, where the structural integrity of the materials used in the nuclear industry is essential.

The use of miniature specimens is imperative to comply with nuclear safety directives in the characterization of reactor pressure vessel (RPV) steels, either by irradiation or shortage. Although its reliability for fracture properties determination has been proved, there is still a long way to go to get its approval by the European regulatory bodies.

The objective of FRACTESUS is to determine the fracture behaviour of RPV steels, both irradiated and non-irradiated, based on 0.16T C(T) (mini-CT) specimens and Small Punch tests, together with their analysis by means of the Master Curve, and its comparison with standardized fracture tests. The ultimate goal will be to lay the groundwork for the inclusion of these miniature techniques by European regulatory bodies.

KEYWORDS: Fracture, Mini-CT, Small Punch, FRACTESUS

INTRODUCCIÓN

El proyecto FRACTESUS [1] fue presentado para su evaluación en septiembre de 2019 en el Programa de Trabajo de EURATOM 2019-2020, sección NFRP-04: Innovación para reactores de Generación II y III.

FRACTESUS fue evaluado positivamente y posteriormente se llevó a cabo la preparación del acuerdo de subvención, Gran Acuerdo (GA) [2], a partir de febrero de 2020. El proyecto finalmente comenzó de oficialmente mediante la reunión inicial (kick-off meeting) en octubre de 2020 y con una duración de 48

meses. El marco del proyecto en el programa general H2020 tiene el objetivo de mejorar continuamente la seguridad nuclear, así como la seguridad y protección radiológica, contribuyendo notablemente a la descarbonización a largo plazo del sistema energético de una manera segura, eficiente y asegurada. FRACTESUS sigue también la línea de las tres prioridades de H2020, que son: "Ciencia excelente" ("Excellent Science"), "Liderazgo industrial" ("Industrial Leadership") y "Desafíos sociales" ("Societal Challenges").

El interés de este proyecto nace del hecho de que la mayoría de las centrales nucleares en funcionamiento en Europa se encuentran en la segunda mitad de su vida operativa, y deben cumplir con mayores niveles de seguridad tal como se define en la Directiva de seguridad nuclear. En la mayoría de los manuales sobre gestión del envejecimiento de las centrales nucleares, el envejecimiento de la vasija ocupa el primer lugar en la lista de problemas de seguridad por las siguientes razones [3]:

- La vasija es la principal barrera contra la liberación de material radiactivo al medio ambiente.
- El fallo de la vasija en escenarios normales y de accidente está excluida por diseño.
- La vasija no se puede reemplazar.
- La vasija sufre endurecimiento y degradación de la tenacidad como resultado del envejecimiento térmico y la exposición a la radiación.

La degradación de la vasija ha sido reconocida como un área de estudio esencial desde el comienzo del Programa Nuclear. En consecuencia, se pusieron en marcha programas de vigilancia para controlar la fragilización del material debido a la irradiación, por lo general utilizando muestras Charpy o de tamaño equivalente ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$) fabricadas con materiales representativos para ser irradiados en condiciones realistas en cápsulas de vigilancia. Aunque las pruebas de impacto Charpy no pueden proporcionar una medición directa de la tenacidad a la fractura, la tecnología Charpy se eligió originalmente debido a las limitaciones de espacio y al conocimiento de la mecánica de la fractura de que se disponía en la década de 1960. Con las prórrogas de vida de las centrales nucleares más allá de los 40 años para los que inicialmente se introdujo material en las cápsulas de vigilancia, muchas de ellas están prácticamente agotadas, y muchos reactores no tienen más material de vigilancia dentro del reactor, o ya bien carecen de material de archivo para ampliar sus programas de vigilancia y, por lo tanto, no tienen capacidad para llevar a cabo los ensayos de vigilancia adecuados para respaldar el funcionamiento a largo plazo. En vista de ello, algunos trabajos recientes propusieron como alternativa el uso de probetas reconstruidas [4], en base a injertar mediante soldadura mitades de probetas Charpy ya ensayadas en la zona de

avance de grieta de probetas de mecánica de la fractura convencional, con las peculiaridades que ello conlleva.

Por otra parte, debido a la caracterización mejorada y las técnicas no destructivas, se ha identificado la presencia de heterogeneidad local de material y pequeños defectos en grandes piezas forjadas como la cabeza del reactor, la vasija del reactor, los generadores de vapor o el presurizador. Tales problemas han generado grandes preocupaciones para los operadores y los organismos reguladores, lo que ha provocado interrupciones muy prolongadas de las centrales nucleares existentes o retrasos graves en la construcción de nuevas centrales nucleares [5,6]. Para abordar el problema de las propiedades locales de los materiales, es esencial el uso de muestras aceptadas de tamaño pequeño [7-9].

En este contexto, el consorcio FRACTESUS propone un enfoque innovador que utiliza probetas miniatura para medir directamente la tenacidad a la fractura. La probeta adoptada como referencia es la Mini C(T), o "miniature Compact Tension specimen" ($10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$), que con un espesor de tan sólo 4mm permite mecanizar hasta ocho muestras a partir de una sola probeta Charpy rota tras su ensayo. Además, como herramienta de evaluación se emplea la Curva Patrón (Master Curve) [10]. Aunque la geometría principal del proyecto FRACTESUS es la probeta Mini-C(T), algunas de sus actividades contemplan también el uso de otras geometrías miniatura (Figura 1), como es el caso de probetas Small Punch modificadas mediante una entalla lateral pasante (orientación de la fractura), que ya han sido empleadas en el pasado para la determinación de la tenacidad a fractura [11] y de la temperatura de transición en base a la aplicación de la curva patrón [12,13]. Esta geometría de probeta de dimensiones aún más reducidas que las Mini-C(T) ($10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$), con un espesor de 0,5mm permite mecanizar más de 35 muestras a partir de una sola probeta Charpy rota tras su ensayo.

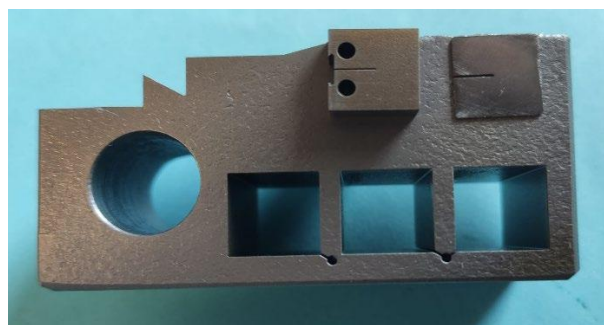


Figura 1. Probetas Mini-C(T) (izda) y Small Punch (dcha) obtenidas a partir de una probeta C(T) convencional de 20mm de espesor.

De este modo, el proyecto permitirá una completa comparación de las dos citadas técnicas miniatura, junto con ensayos de fractura normalizados, pudiendo así sentar las bases para la inclusión de estas técnicas miniatura por los organismos reguladores europeos. Este

enfoque de caracterización miniaturizada está diseñado para aumentar el nivel de seguridad [14-16], y reducir las incertidumbres, de manera significativa a través de:

- La evaluación directa de la tenacidad a la fractura en lugar de un enfoque semi-empírico basado en mediciones de Charpy.
- Incrementar significativamente la base de datos de vigilancia, proporcionando una mayor confianza en los datos.
- Caracterización de las propiedades locales del material en caso de falta de homogeneidad del material.

El funcionamiento a largo plazo de una central nuclear sólo es posible si puede ser apoyado por programas de vigilancia ampliados. El desarrollo de tales programas incorpora muestras de Charpy previamente irradiadas y rotas en las cápsulas de vigilancia, que son empleadas para analizar la fragilización de la vasija utilizando probetas Mini-C(T). La extensión de operación de una central nuclear permite la retención de un suministro de energía seguro mientras se mantienen bajas emisiones de carbono, por ello este enfoque innovador también aborda los requisitos de descarbonización, seguridad del suministro de energía y mayor competitividad de la energía nuclear europea.

Dicho esto, el proyecto FRANCESUS también beneficiará a Gen III + y a los futuros sistemas nucleares. Los materiales estructurales de los futuros sistemas nucleares y, en particular, los de Gen IV y los sistemas de fusión, deberán hacer frente a duras condiciones de irradiación. Los programas de calificación suponen una limitación importante en el despliegue de nuevos materiales y tecnologías. Estos programas de calificación deben realizarse en máquinas de irradiación dedicadas (reactores de prueba de materiales o dispositivos de irradiación basados en aceleradores, por ejemplo, MINERVA, MYRRHA, DONES) y ser completamente representativos de las condiciones operativas definidas. El espacio de irradiación en estos dispositivos es generalmente limitado, por lo que los programas de calificación pueden también beneficiarse del proyecto FRANCESUS.

Los siguientes apartados describen el enfoque del proyecto, extrayendo parte del contenido de la propuesta de proyecto original [1], del grant agreement [2], de los documentos públicos [17-19] y de las publicaciones [20, 21] que se han ido generando durante los primeros seis meses de vida del proyecto.

MATERIALES Y MÉTODOS

22 organizaciones de Europa (19), Japón (1), USA (1) y Canadá (1) participan en FRANCESUS, como se presenta en la Tabla 1. Para estructurar el proyecto, el trabajo se desglosa en paquetes de trabajo “Work

Packages” (WP). La metodología descrita en el presente trabajo también sigue esta estructura en WP (Figura 2).

Tabla 1. Lista de participantes del proyecto FRANCESUS.

Participante	Acrónimo	País
1	SCK CEN	Bélgica
2	NRI	República Checa
3	VTT	Finlandia
4	CEA	Francia
5	IRSN	Francia
6	FRA-G	Alemania
7	HZDR	Alemania
8	KIT	Alemania
9	BZN	Hungría
10	MTA EK	Hungría
11	KTU	Lituania
12	NRG	Holanda
13	STUBA	Eslovaquia
14	CIEMAT	España
15	UC	España
16	PSI	Suiza
17	NNL	Reino Unido
18	UoB	Reino Unido
19	CCFE	Reino Unido
20	CRIEPI	Japón
21	ORNL	Estados Unidos
22	CNL	Canadá

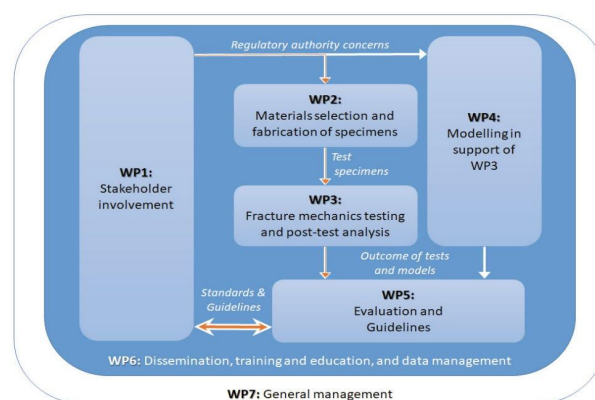


Figura 2. Organización del Proyecto FRANCESUS, con los diferentes WP involucrados.

Para garantizar un resultado valioso del proyecto, se pretende hacer un esfuerzo continuo para abordar la preocupación de las partes interesadas involucrando regularmente a los organismos reguladores, los comités de código y estandarización, el Grupo de Usuarios

Finales y el Comité Asesor Científico (ver más abajo para obtener detalles). Esta actividad encaja en WP1, que está liderado por NNL.

VTT lidera el WP2, que está a cargo de la selección de materiales y desarrollo de la matriz de ensayos [21]. Aceros de vasija irradiados y no irradiados han sido cuidadosamente seleccionados priorizando:

- Material bien caracterizado en condiciones de referencia e irradiado (normalmente más de 400 datos disponibles).
- Datos abiertos disponibles,
- Sensibilidad significativa a la irradiación y disponibilidad de material.

La coordinación de los trabajos de ensayo se está desarrollando dentro del marco del WP3, liderado por HZDR. Consisten en ensayos de mecánica de la fractura en la zona de transición empleando probetas 0.16C(T), o Mini-C(T), en los aceros RPV irradiados y no irradiados a diferentes temperaturas seleccionados por el WP2 y sus análisis fractográficos; la Figura 3, extraída del protocolo de ensayo [17] preparado por el WP6, muestra el montaje de ensayos propuesto. Asimismo, el WP3 coordina también otras técnicas de ensayos miniatura, principalmente las citadas Small Punch, o ensayos de microdureza con detección de profundidad entre otras actividades.

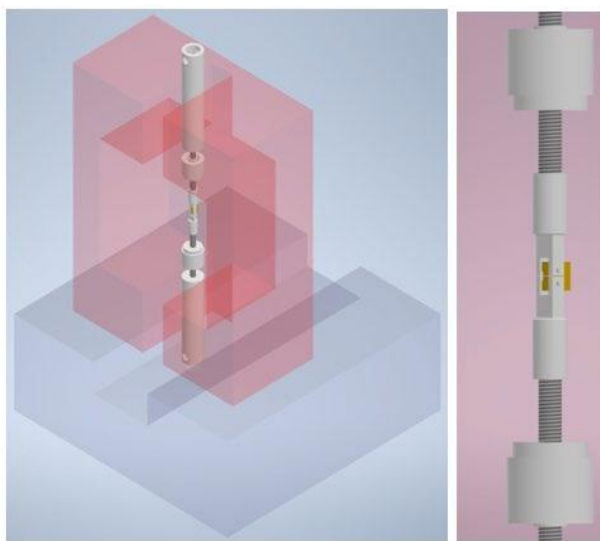


Figura 3. Montaje para ensayos de probetas Mini-C(T) a diferentes temperaturas [17].

El mecanizado (a cargo del WP2) y los ensayos (coordinados por el WP3) del material irradiado están siendo compartidos por diferentes laboratorios para repartir su impacto económico y evaluar la repetitividad y reproducibilidad. La geometría de probeta (Figura 4), ha sido consensuada y recogida el entregable sobre el protocolo de ensayo [17, 22], desarrollado dentro del WP6, siendo evaluada cuidadosamente cualquier modificación que pudiera producirse.

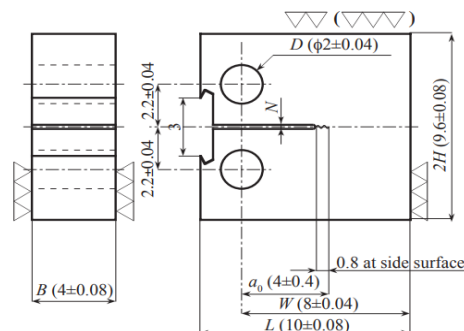


Figura 4. Geometría de probeta Mini-C(T), 0.16T, propuesta para el proyecto [17, 22].

La actividad de modelado (WP4) se realizará como apoyo a los ensayos, y es liderada por CEA. También será de gran interés abordar las limitaciones actuales en el código y los estándares cuando se trata de muestras pequeñas. Los datos experimentales racionalizados respaldados por la actividad de modelado se utilizarán en el diálogo con los comités de códigos y estándares para implementar cambios que facilitarán el uso de muestras pequeñas, mientras se mantienen o mejoran los niveles de confianza en los resultados. Esta última actividad pertenece al WP5 y está liderada por FRA-G.

Siempre hay que tener en cuenta que el proyecto solo es posible gracias al contribuyente de la UE y, por lo tanto, es necesario maximizar el beneficio del proyecto para toda Europa. En este sentido, el proyecto está planificando las actividades de comunicación y difusión (WP6, liderado por la Universidad de Cantabria) para llegar al público en general mediante la difusión en acceso abierto. Las actividades de formación y educación se anunciarán mucho más allá de la comunidad del proyecto gracias a una red bien establecida. Teniendo en cuenta el inicio de la era digital con big data, inteligencia artificial y acceso descentralizado a la información, el proyecto emplea un plan de gestión de datos [18], tal como se recoge en el procedimiento de publicación en acceso abierto [19], que garantiza los principios FAIR (“Findable, Accesible, Interoperable, Reproducible”) que marca la Unión Europea. Todo ello con el objetivo de maximizar los datos de investigación abiertos y garantizar su sostenibilidad mucho más allá del final del proyecto, para que permanezcan localizables, accesibles, interoperables y reutilizables independientemente del repositorio empleado. Además de ello, el WP6 será el encargado, junto al WP1 y el WP7 (gestión general) de la gestión de los datos experimentales generados durante el proyecto, así como la exposición pública de los mismos y de las publicaciones generadas en repositorios abiertos. Para ello, así como para su custodia más allá del fin del proyecto, el WP6 redactó en marzo de 2021 una primera versión del plan de gestión de datos que regula todo ello, “Data Management Plan” (DMP), que tendrá revisiones anuales, tal como marca el programa H2020.

Finalmente, la gestión global del proyecto está liderada por SCK CEN, a través de WP7. El proyecto cuenta,

además, con tres entidades transversales: el Grupo de Usuario Final, el Comité Asesor Científico y el Comité de Normalización. El Grupo de Usuario Final está compuesto por personal que trabaja en una empresa con interés en el programa FRACTESUS, pero que no forma parte del consorcio FRACTESUS. Estas personas actuarán como punto de contacto para su empresa y proporcionarán comentarios sobre los resultados de FRACTESUS. La lista de empresas en las que trabajan sus miembros es: EDF SA (Francia), Westinghouse (EE. UU.), EDF Energy (Reino Unido), PAKS Nuclear Power Plant (Hungría), Tractebel (ENGIE) (Bélgica), Ringhals AB -Vattenfall (Suecia) y Rolls-Royce (Reino Unido). El Comité Asesor Científico está compuesto por expertos en la materia, que actúan con independencia de su empresa. Su membresía es nombrada (es decir, no pueden ser reemplazados por otro empleado en su empresa). Ellos serán responsables de revisar el plan FRACTESUS, revisar los resultados del programa y brindar asesoramiento al grupo. Los miembros del CAC son consultores independientes o empleados de las siguientes organizaciones: PEA Consulting (EE. UU.), ATI Consulting (EE. UU.), Ringhals AB-Vattenfalls (Suecia) y la Inspección Federal de Seguridad Nuclear de Suiza (Suiza). Finalmente, el Comité de Normalización está compuesto por miembros del consorcio FRACTESUS que también tienen alguna participación externa en comités de normas como ASTM e ISO. Participarán en el trabajo inicial del WP1 en el que se describen los estándares actuales e identificando cualquier deficiencia de esos estándares en relación con las pruebas de resistencia a la fractura de muestras pequeñas. Además, el STC será responsable de asesorar a los comités de ASTM / ISO sobre la mejor manera de implementar los resultados de FRACTESUS en las normas actuales, siguiendo los resultados de FRACTESUS y, en particular, WP5: Evaluación y directrices.

RESULTADOS

El proyecto FRACTESUS demostrará la fiabilidad del empleo de muestras miniatura, concretamente Mini-C(T), para medir la resistencia a la fractura de materiales estructurales (particularmente nucleares). Además, confrontará los resultados con los aportados por la técnica Small Punch mediante el empleo de probetas dotadas de entalla lateral pasante, posicionándola como una alternativa viable. Esto permitirá que la industria nuclear europea opere en condiciones más seguras y eficientes, especialmente en el caso de los reactores de generación II en funcionamiento (en relación con cuestiones de LTO) y futuros reactores de GEN III (tanto en las etapas de diseño como de operación). Además, una vez demostrado lo anterior, los organismos reguladores y de normalización también podrán incorporar esta innovación en los reglamentos, normas y procedimientos nucleares.

El alto nivel de conocimiento desarrollado durante el proyecto tiene otro impacto final importante, la generación de una comunidad científica experta en la

caracterización en mecánica de la fractura altamente capacitada, que proporcionará experiencia en el campo a la industria nuclear europea, y liderará el tema a nivel internacional. FRACTESUS también generará una importante base de datos de comportamiento en fractura de alta calidad, según indicado por el DMP [18] que será FAIR y de Acceso Abierto. Los principales resultados del proyecto (correspondientes a parte de los entregables) se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Algunos resultados del proyecto de acuerdo con la lista de entregables de FRACTESUS.

Resultado	Entr.	WP
Estado del arte sobre probetas miniatura y su ensayo.	D.1.1	1
Estimación de propiedades mecánicas en base a otros ensayos miniatura.	D.3.2	3
Cualificación del ensayo de 0.16T C(T) en material irradiado ya caracterizado.	D.3.3	3
Simulación por EF para comparar 0.16T CT(T) y C(T).	D.4.1	4
Comparación de resultados de tenacidad con probetas estándar y miniatura.	D.5.4	5
Orientaciones para el ensayo con Mini-C(T) en base a la Curva Patrón.	D.5.7	5
Sesiones especiales sobre FRACTESUS y conferencias internacionales.	D.6.4 D.6.6	6
Seminario sobre el proyecto FRACTESUS	D.6.5	6

CONCLUSIONES

Las probetas miniatura ofrecen una amplia gama de posibilidades y ventajas para la caracterización en fractura de aceros de vasija. Algunas de ellas son la multiplicación de datos experimentales, la (re)utilización y posterior valorización de probetas ya ensayadas (Charpy, principalmente), la reducción del volumen de material irradiante en futuros programas de vigilancia, y la posibilidad de medir la tenacidad local para detectar heterogeneidades y/o gradientes de tenacidad (por ejemplo en soldaduras), entre otros. A pesar de su gran potencial para la caracterización en fractura, el uso de probetas miniatura, y en particular Mini-C(T) y Small Punch, encuentra una serie de obstáculos para su aceptación por parte de los organismos reguladores nacionales e internacionales como herramienta de evaluación y diseño de componentes estructurales en centrales nucleares.

Con el objetivo de demostrar las capacidades y la solidez de estas técnicas de caracterización, el proyecto FRACTESUS, ha comenzado en octubre de 2020, y se extenderá durante los siguientes 48 meses. El objetivo de este proyecto es unir los esfuerzos europeos e internacionales para establecer las bases de la validación de probetas miniatura para la obtención de la tenacidad a la fractura, pudiendo ello permitir en última instancia los cambios en los códigos y normativas necesarios para

abordar las diversas preocupaciones de las autoridades reguladoras nacionales. FRACTESUS está involucrando a los organismos reguladores, los comités de estandarización, la industria y la comunidad internacional desde una etapa muy temprana, para que el consorcio de 22 socios europeos e internacionales pueda optimizar todos los recursos y la experiencia disponibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación prestada al programa Euratom 2020-2024, Grant Agreement N° 900014. También a los socios del proyecto FRACTESUS.

REFERENCIAS

- [1] M. Lambrecht. Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens, Proposal Acronym: FRACTESUS, Euratom work programme 2019-2020, Topic Identifier: NFRP-04: Innovation for Generation II and III reactors, Types of Action: Innovation actions (2019).
- [2] Grant Agreement number 9400014 - FRACTESUS, NFRP-2019-2020, 2020.
- [3] V. N. Shah, P.E. MacDonald. Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components, 1st ed. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands (1993).
- [4] F. de Backer, F. Gutiérrez-Solana. The Effects of the Configuration of a Weld-Reconstituted Compact Tension Specimen on Fracture Toughness Determination*, Small Specimen Test Techniques, ASTM SPT 1329, W.R. Corwing, S.T. Rosinski and E. van Walle, Eds., American Society for Testing and Materials (1998).
- [5] ASN. L'ASN présente sa position sur l'anomalie de la cuve du réacteur EPR de Flamanville (2017). <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/L-ASN-presente-sa-position-sur-l-anomalie-de-la-cuve-du-reacteur-EPR-de-Flamanville> (consultado 10-05-2020).
- [6] ASN. Anomalie de la concentration en carbone de l'acier: après contrôle, l'ASN a autorisé les réacteurs concernés à redémarrer (2017). <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Anomalie-de-la-concentration-en-carbone-de-l-acier-redemarrage-des-reacteurs> (consultado 10-05-2020).
- [7] ENSI. Assessment of the safety case for the reactor pressure vessel of the Beznau unit 1 nuclear power plant (2018). <https://www.ensi.ch/en/documents/assessment-of-the-safety-case-for-the-reactor-pressure-vessel-of-the-beznau-unit-1-nuclear-power-plant/> (consultado el 10-05-2020).
- [8] R. Gérard, M. De Smet, R. Chaouadi. Materials properties of reactor pressure vessel shells affected by hydrogen flaking. Proceedings of ASME PVP2016-63901. Vancouver, British Columbia, Canada (2016).
- [9] M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling. The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Postirradiation Mechanical Properties. Journal of Nuclear Materials 103-104 pp. 1545-1550 (1981).
- [10] ASTM E1921 – 20. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM International, Subcommittee E08.07 (2020).
- [11] R. Lacalle, J.A. Álvarez, B. Arroyo, F. Gutiérrez-Solana. Methodology for fracture toughness estimation based on the use of Small Punch notched specimens and the CTOD concept. Proceeding 2nd International conference SSTT (2012).
- [12] D. Andres, R. Lacalle, S. Cicero, J.A. Álvarez. Application of the small punch test in combination with the master curve approach for the characterisation of the ductile to brittle transition region. Journal of nuclear materials 518 pp. 409-418 (2019).
- [13] E. Altstadt, F. Bergner, M. Houska. Use of the small punch test for the estimation of ductile-to-brittle transition temperature shift of irradiated steels. Nuclear materials and energy 26, 100918 (2021).
- [14] M. Yamamoto, A. Kimura, K. Onizawa, K. Yoshimoto, T. Ogawa, Y. Mabuchi, H.W. Viehrig, N. Miura, N. Soneda. A round robin program of Master Curve evaluation using miniature C(T) specimens - 3rd report: Comparison of T₀ under various selections of temperature conditions, Proceedings of ASME PVP2014-28898, Anaheim, California, USA, (2014).
- [15] R. Chaouadi, E. van Walle, M. Scibetta, R. Gérard. On the use of miniaturized CT specimens for fracture toughness characterization of RPV materials. Proceedings of ASME PVP2016-63607, Vancouver, British Columbia, Canada (2016).
- [16] W. Server, M. Sokolov, M. Yamamoto, R. Carter. Inter-Laboratory Results and Analyses of Mini-C(T) Specimen Testing of an Irradiated Linde 80 Weld Metal, Proceedings of ASME PVP2018-84950 (2018).
- [17] S. Cicero, B. Arroyo, G. Díaz. Testing protocols and reporting formats. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Deliverable D6.9, WP6, UC/PR N°15 (2021).
- [18] S. Cicero, B. Arroyo, S. Arrieta. Data Management Plan (DMP) – 1st version. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Deliverable D6.8, WP6, UC/PR N°15 (2021).
- [19] B. Arroyo, S. Cicero, M. Sánchez, G. Díaz. How to publish in FRACTESUS project - Open Access Procedure. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Work package leader report, WP6, UC/PR N°15 (2020).
- [20] S. Cicero, M. Lambrecht, H. Swan, P. Arffman, E. Altstadt, T. Petit, F. Obermeier, B. Arroyo, J.A. Álvarez, R. Lacalle. Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens: FRACTESUS project. Procedia Structural Integrity 28, pp. 61-66 (2020).
- [21] B. Tomasz et. al. Fractesrus Project: General Framework of Materials Selection and Testing Processes. Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2021-61906 (2021).
- [22] M. Yamamoto, K. Onizawa, K. Yoshimoto, T. Ogawa, Y. Mabuchi, N. Miura. A round robin program of master curve evaluation using miniature C(T) specimens - 2nd report: fracture toughness comparison in specified loading rate condition. Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2013-97936 (2013).