

FRACTESUS: FRACTURE MECHANICS TESTING OF IRRADIATED RPV STEELS BY MEANS OF SUB-SIZED SPECIMENS

M. Sánchez*, S. Cicero, B. Arroyo

University of Cantabria, LADICIM (Laboratory of Materials Science and Engineering), Spain.

* E-mail: sanchezmam@unican.es

RESUMEN

El proyecto FRACTESUS (programa H2020, convocatoria Euratom) está alineado con los objetivos de transición energética hacia un sistema más eficiente y sostenible establecidos por la Unión Europea, en los cuales la energía nuclear juega un papel importante en la descarbonización del sector industrial. En este sentido, el proyecto aborda un aspecto fundamental para la seguridad y operabilidad del sector nuclear: la integridad estructural de los materiales de vasija.

El objetivo del proyecto es demostrar la aplicabilidad de probetas mini-CT para la caracterización a fractura de aceros de vasija. La aceptación de esta metodología por las autoridades reguladoras y su posterior implementación permitirá, entre otras cosas, extender los programas de vigilancia y por consiguiente la vida útil de las centrales nucleares.

El presente trabajo muestra la estructura general del proyecto FRACTESUS y sus principales avances hasta ahora, incluyendo los primeros resultados de la campaña experimental. La tenacidad a fractura fue obtenida mediante probetas mini-CT de acero no irradiado, y los resultados fueron analizados posteriormente mediante la metodología de la curva maestra.

PALABRAS CLAVE: FRACTESUS, probetas en miniatura, tenacidad a fractura, curva maestra, acero de vasija.

ABSTRACT

The FRACTESUS project (H2020 program, Euratom call) is in accordance with the energy transition objectives towards a more efficient and sustainable system set by the European Union, with nuclear energy playing an important role in the decarbonization of the industrial sector. In this sense, the project addresses a fundamental aspect for the safety and operability of the nuclear sector, which is the structural integrity of reactor pressure vessel materials.

The project aims to demonstrate the applicability of miniaturized compact tension (Mini-CT) specimens to determine the fracture behaviour of reactor pressure vessel steels. The acceptance of this methodology by the regulatory authorities and its subsequent implementation will allow, among other things, to extend the surveillance programs and consequently the lifespan of the nuclear power plants.

This work shows the general structure of the FRACTESUS project and its main advances until now, including the first results of the testing campaign. The fracture toughness was obtained using Mini-CT specimens with non-irradiated steels, with the results being subsequently analyzed using the master curve approach.

KEYWORDS: FRACTESUS, miniature compact tension, fracture toughness, Master Curve, reactor pressure vessel steel.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las centrales nucleares en funcionamiento en Europa se encuentran en la segunda mitad de su vida útil y necesitan cumplir con mayores niveles de seguridad, tal y como se define en la Directiva de Seguridad Nuclear. La vasija del reactor es uno de los componentes más grandes y difíciles de remplazar del reactor nuclear, quedando excluido su fallo bajo escenarios normales o accidentales por diseño. Además, es la principal barrera contra la liberación de material radiactivo al medio ambiente. Por todo ello, asegurar la integridad estructural de la vasija es de crucial importancia para la operación segura de las centrales nucleares [1]. Como resultado, desde los orígenes de las plantas nucleares se establecieron programas de vigilancia para controlar periódicamente la tenacidad del acero de vasija, usando generalmente probetas Charpy ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$) ubicadas en una cápsula de vigilancia dentro de la propia vasija. Por razones históricas, el ensayo de impacto Charpy es el más común dentro de la industria nuclear, por lo que la tenacidad a fractura se calcula de manera indirecta. Además, para muchos reactores actualmente en operación las cantidades de material disponible en las capsulas de vigilancia puede no ser suficiente para la continuación de los programas de vigilancia y por lo tanto para el funcionamiento a largo plazo de dichas centrales nucleares.

En este contexto, el proyecto FRACTESUS propone un enfoque innovador para utilizar probetas de fractura miniatura obtenidas de probetas Charpy que permitan medir directamente la resistencia a la fractura, reduciendo así el material necesario en las pruebas de vigilancia. FRACTESUS [2] comenzó su andadura el pasado octubre de 2020, tras su aprobación dentro del programa EURATOM 2019-2020, sección NFRP-04: Innovación para los reactores de segunda y tercera generación. FRACTESUS, que cuenta con financiación para 48 meses, se encuentra alineado con los objetivos perseguidos por el programa marco europeo H2020, como es la mejora continua de la seguridad nuclear, la seguridad física y la protección contra la radiación, y la contribución a la descarbonización a largo plazo del sistema energético europeo de forma segura y eficiente. Además, FRACTESUS también se une a las tres prioridades de H2020: "Ciencia excelente", "Liderazgo industrial" y "Retos de la sociedad".

La probeta de referencia seleccionada por el consorcio es la probeta de tensión compacta en miniatura (puede encontrarse abreviada como mini-CT, 0.16 CT o MCT) ($10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$), que permite mecanizar hasta ocho probetas a partir de una sola probeta Charpy rota. El objetivo final radica en la determinación de la temperatura de transición (T_0), a partir de esta geometría, que ya ha sido aplicada en trabajos previos [3,4]. Además, se contempla el uso de otras probetas miniatura (Figura 1), como es el caso de probetas Small Punch (SPT) [5,6], cuya geometría tiene dimensiones aún más reducidas ($10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$) y permite mecanizar más de

35 muestras a partir de una sola probeta Charpy rota tras su ensayo.

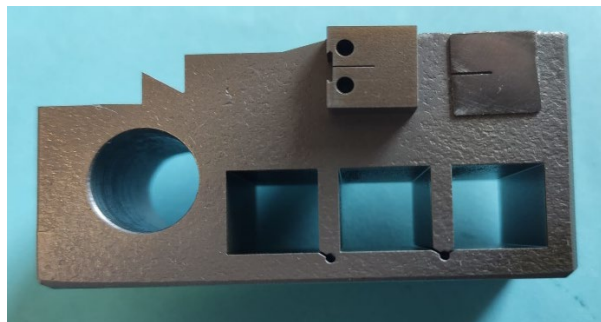


Figura 1. Probetas Mini-C(T) (izda.) y Small Punch (dcha.) obtenidas a partir de una probeta C(T) convencional 1T.

De este modo, el proyecto comparará los resultados obtenidos mediante probetas MCT, y SPT en su caso, con las bases de datos de ensayo realizados con probetas normalizadas de fractura. Este enfoque de caracterización miniaturizada trae una serie de beneficios tales como: la evaluación directa de la tenacidad a la fractura en lugar de un enfoque semi-empírico basado en mediciones de Charpy; la capacidad de caracterizar las propiedades locales de un material heterogéneo; el incremento significativo de la base de datos de vigilancia, proporcionando una mayor confianza en los datos.

Por otra parte, el proyecto FRACTESUS 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 FRACTESUS.

Con todo esto, el proyecto FRACTESUS tiene como objetivo demostrar la aplicabilidad y la fiabilidad, ante las autoridades y reguladores nucleares, del uso de probetas MCT para caracterizar el comportamiento a fractura de material de vasija irradiado. En los siguientes apartados se presentará una breve descripción del proyecto y se presentarán los principales avances del proyecto hasta la fecha.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

22 organizaciones de Europa (19), Japón (1), USA (1) y Canadá (1) participan en FRACTESUS, como se presenta en la Tabla 1. Para estructurar el proyecto, el trabajo se desglosa en seis paquetes de trabajo (WPs), cuyo esquema de trabajo viene descrito por el diagrama mostrado en la Figura 2.

Un importante paso es la aceptación de los datos derivados de muestras en miniatura dentro de los procedimientos o normativas que actúen como garantía de las propiedades del material que arrojan los ensayos. Para ello, el WP1 (liderado por NNL) tiene como objetivo identificar y recoger las diversas preocupaciones de las autoridades reguladoras con respecto a la utilización de probetas MCT en los programas de vigilancia de los reactores. De igual manera, se han de identificar posibles limitaciones en las actuales normativas.

VTT lidera el WP2, que está a cargo de la selección de materiales y la fabricación de las probetas [7]. Los aceros seleccionados en el proyecto cumplen una serie de requisitos como la disponibilidad de una amplia base de datos de material caracterizado en condiciones de referencia e irradiado (normalmente más de 400 datos disponibles), una base de datos sea abierta, un material sensible a la irradiación y con una alta disponibilidad. Por otro lado, la geometría de probeta MCT, siendo las dimensiones estándar las mostradas en la Figura 3, cabe destacar que algunos socios usarán dimensiones ligeramente superiores.

Tabla 1. Lista de participantes del proyecto FRACTESUS.

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

La coordinación de la campaña experimental se desarrolla dentro del WP3, liderado por HZDR. En ella se realizarán ensayos de mecánica de fractura con probetas MCT de material irradiados y no irradiados a diferentes temperaturas, para posteriormente realizar un análisis fractográfico de las superficies de fractura. Asimismo, el WP3 será complementado con otros ensayos basados en probetas miniaturizadas, como son el SPT o la microdureza.

La actividad de modelado (WP4) se realizará como apoyo a los ensayos, y es liderada por CEA. En este paquete de trabajo de modelización numérica, el objetivo final es proporcionar una estrategia de modelización sólida para la interpretación de los datos experimentales y recomendaciones/limitaciones en apoyo del uso de las probetas MCT para evaluar la tenacidad a la fractura de los aceros de vasija.

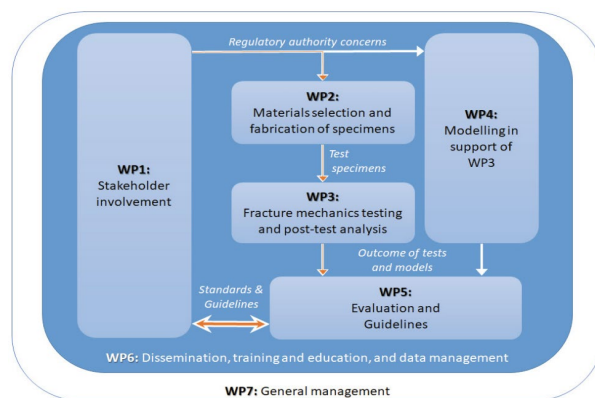


Figura 2. Organización del Proyecto FRACTESUS, con los diferentes WP involucrados.

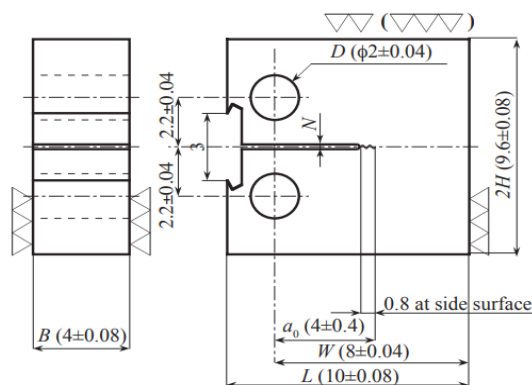


Figura 3. Geometría de probeta Mini-C(T), 0.16T, propuesta para el proyecto.

Todos los resultados (ensayo y simulaciones) serán posteriormente resumidos, discutidos y evaluados por el WP5, actividad liderada por FRA-G. Se realizará una detallada comparativa entre los resultados arrojados por las MCT y las probetas de tamaño estándar, con el objetivo de desarrollar unas directrices de buenas prácticas, que puedan ser en el futuro incluidas en las actuales códigos o normas. Dentro de esta actividad se busca también crear sinergias con otro proyectos nacionales o internacionales en desarrollo.

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. Además de ello, el WP6 será el encargado, junto al WP1 y el WP7 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.

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

3. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Uno de puntos clave del proyecto durante los primeros meses del mismo ha sido la selección del material para la obtención de probetas MCT y su caracterización con geometrías convencionales. En la Tabla 2 se recogen los 14 aceros que serán estudiados en el proyecto, siendo todos ellos de gran relevancia para la industria de la energía nuclear. Además de cumplir los criterios anteriormente expuestos en el WP2, los aceros fueron seleccionados con el fin de abarcar el mayor rango de variabilidad posible dentro de la aplicación descrita. Con este fin se buscaron aceros con diferente composición química, poniendo énfasis en las cantidades de Cu, P, Ni o Mn, método de fabricación (F, forjado o S, soldado) y tratamiento/envejecimiento del acero, ya sea de carácter térmico o por irradiación neutrónica. Además, la matriz de aceros preparada cubre un amplio espectro de temperaturas de referencia (T_0), que va desde -134°C hasta +8°C, pudiendo ser incluso mayores para materiales irradiados.

Tabla 2. Lista de materiales estudiados junto con las principales propiedades buscadas.

Material	Tipo	Cu (%)	P (%)	Ni (%)	Mn (%)	Fluencia neutrónica [E19 n/cm²]	T_0 (°C)
15Kh2MFAA	F	0.05	0.01	0.1	0.49	0	-104
15Kh2MFAA	F	0.05	0.01	0.1	0.49	$I_1 = 20$ (E>0.5MV) (at 270°C)	TBD
15Kh2MFAA	F	0.05	0.01	0.1	0.49	$I_1 A$ (Annealed at 470°C)	TBD

15Kh2MFAA	F	0.05	0.01	0.1	0.49	$I_1 A I_2 = 20$ (E > 0.5MeV) (at 270°C)	TBD
A533B (JRQ)	F	0.14	0.018	0.83	1.39	0	-71
A533B LUS (JSPS)	F	0.24	0.028	0.43	1.52	0	+8
ANP-4	F	0.05	0.006	0.84	0.85	4 (at 280°C-286°C)	-78
SA 533 B1 (MVE)	F	0.041	0.005	0.632	1.42	0	-119
SA508 Cl3	F	0.04	0.008	0.93	1.37	0	-43
10KhMFT	S	0.11	0.047	0.14	1.16	IA	-11.6
10KhMFT	S	0.11	0.047	0.14	1.16	1.6 (I) (at 270°C)	74.4
73W	S	0.31	0.005	0.6	1.55	0	-64
73W	S	0.31	0.005	0.6	1.55	1.5 (E>1MeV) (at ~288°C)	34
ANP-5	S	0.22	0.015	1.11	1.14	0	-38

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Una gran parte del proyecto, casi 2 años, será dedicado a ensayo de fractura con probetas MCT en condiciones tanto irradiadas como no irradiadas, con la única diferencia que éstas últimas deben ser llevadas a cabo en celdas calientes. La caracterización a fractura de los aceros del proyecto en el régimen de transición va a determinarse mediante la metodología de la curva maestra, cuyas principales directrices se recogen en la ASTM E1921 [8].

El primer paso en la campaña experimental es detectar posibles problemas o inconsistencias derivadas del ensayo de probetas miniaturizadas. En este sentido se están llevando a cabo ejercicios de Round Robin (RR), donde un mismo material es ensayado por diferentes laboratorios con fines comparativos. La Tabla 3 presenta la matriz de ensayos preparada para el RR de material no irradiado. La cantidad nominal de ensayos a realizar por cada material y laboratorio es 16, lo que permite la determinación de T_0 con suficiente precisión, para lo que se emplearán los métodos de temperatura única o multi-temperatura recogidos en ASTM E1921. Como ejemplo de lo anterior, la Figura 4 se muestra el montaje experimental utilizado por la Universidad de Cantabria (UC).

Tabla 3. Matriz de ensayos preparada para el RR de material no irradiado.

RR No.	Material	T_0 (°C)	Testing participant				
			1	2	3	4	5
1	15Kh2MFAA	-104	SCK CEN	CRIEPI	HZDR	VTT	
2	A533B (JRQ)	-71	NRI	CRIEPI	PSI	CCFE	MTA-EK

3	73W	-64	SCK CEN	CIEMAT	HZDR	VTT	UoB
4	SA508 CL3	-43	SCK CEN	CIEMAT	KIT	NRG	UoB
5	ANP-5	-38	SCK CEN	FRA-G	HZDR	CCFE	UC
6	A533B LUS (JSPS)	+8	SCK CEN	CRIEPI	UC		

De igual manera, se realizará un RR con material irradiado en el que participarán 7 laboratorios, en este caso únicamente se utilizara el acero 73W. Complementario al ejercicio del RR, algunos laboratorios participantes realizarán ensayos adicionales. En total, se estima la realización de 656 ensayos de tenacidad a la fractura con MCT en FRACTESUS. Estas experiencias, junto con las investigaciones de apoyo, proporcionarán validación para las técnicas de ensayo miniatura y experiencia con la que elaborar una manual de directrices para la determinación de la temperatura de referencia mediante probetas miniatura.

Los primeros resultados obtenidos hasta el momento a partir de probetas MCT en condiciones no irradiadas, sobre los materiales del RR, muestran unas T_0 entre 10-15 grados superiores a las obtenidos mediante probetas con dimensiones estándar.



Figura 4. Montaje para ensayos de fractura con MCT utilizado en las instalaciones de la UC

5. ESTADO DEL PROYECTO

El proyecto comenzó en octubre de 2020. Desde su inicio se han celebrado cuatro reuniones virtuales con los líderes de los WP, y múltiples reuniones virtuales de distintos para discutir apartados técnicos del proyecto. Los logros hasta el momento (marzo de 2022) han sido:

- Las vías de divulgación ya están disponibles: página web pública y perfiles en ResearchGate, Twitter y LinkedIn y Facebook.
- La hoja de ruta del proyecto ha sido trazada con el plan de gestión de datos (Data Management Plan [9]).
- Se han descrito los protocolos de ensayo, así como los formatos para publicación de datos (Testing protocol and reportig formats) [10].
- Ha sido finalizada la selección de los aceros del proyecto y la matriz de ensayos [7].
- Los ensayos en probetas MCT no irradiadas han comenzado, obtenido los primeros resultados de la temperatura de referencia.
- Ha sido publicado un artículo en una revista indexada en JCR [6], así como se ha divulgado el proyecto en conferencias nacionales [11] internacionales [12].

CONCLUSIONES

Las probetas miniatura ofrecen una amplia gama de posibilidades y ventajas para la caracterización en fractura de aceros de vasija: multiplicación de datos experimentales, la (re)utilización de probetas ya ensayadas (Charpy), reducción del volumen de material irradiado para su manejo, posibilidad de medir la tenacidad local para detectar heterogeneidades, etc.

A pesar de ello, el uso de probetas MCT, encuentra aún una serie de obstáculos para su aceptación por parte de los organismos reguladores. Sin embargo, el objetivo del proyecto FRACTESUS, desarrollado por un consorcio de 22 socios europeos e internacionales, es demostrar las capacidades y la solidez de estas técnicas de caracterización; comenzó en octubre de 2020 y se extenderá durante los siguientes 48 meses. Su fin último es abordar las diversas preocupaciones de las autoridades reguladoras para poder introducir estas probetas miniatura en los códigos y normativas, y por lo tanto en los programas de vigilancia.

Con los resultados obtenidos hasta el momento sobre material no irradiado, la temperatura de referencia obtenida a partir de probetas MCT se mostró entre 10 y 15 grados superiores a las obtenida mediante probetas con dimensiones estándar.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación y formación de Euratom 2020-2024, bajo el acuerdo de subvención N° 900014. También se reconoce la significativa contribución de los miembros del proyecto FRACTESUS.

REFERENCIAS

- [1] V. N. Shah, P.E. MacDonald. Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components, 1st ed. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands (1993).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] EN 10371:2021, Annex E, “Metallic materials - Small punch test method”, European standards ICS 77.040.10, (2021).
- [6] 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).
- [7] Pentti Arffman. Test matrix of FRACTESUS. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Deliverable D2.1, WP2, VTT/PR N°3 (2021).
- [8] ASTM E1921 – 21. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM International, Subcommittee E08.07 (2021).
- [9] S. Cicero, B. Arroyo. Data Management Plan (DMP) – 1st version. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Deliverable D6.8, WP6, UC/PR N°15 (2021).
- [10] S. Cicero, B. Arroyo, M. Sánchez, G. Díaz. Testing protocols and reporting formats. FRACTESUS Consortium (grant number 900014), Deliverable D6.9, WP6, UC/PR N°15 (2021).
- [11] B. Arroyo, S. Cicero, M. Lambrecht, H. Swan, P. Arffman, E. Altstadt, T. Petit, F. Obermeier. Caracterización en fractura de aceros de vasija mediante probetas mini-ct y small punch. Primeros pasos del proyecto europeo fractesus. Revista Española de Mecánica de la Fractura. Volumen 2, 2021.
- [12] 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).