

# METODOLOGÍA COSME PARA LA EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONTENEDORES DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE GASTADO

Sergio Cicero<sup>1\*</sup>, Sergio Arrieta<sup>1</sup>, Alejandro Palacio<sup>2</sup>, Virginia Madrazo<sup>2</sup>, Enrique Gómez-Poncela<sup>2</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, Cantabria, España

<sup>2</sup> ENSA (Equipos Nucleares, S.A., S.M.E), Av. Juan Carlos I, 8, 39600 Maliaño, Cantabria, España

\* Persona de contacto: [ciceros@unican.es](mailto:ciceros@unican.es)

## RESUMEN

Las regulaciones para los contenedores ENUN de transporte de combustible gastado (Tipo B(U), IAEA SSR-6) exigen garantizar su integridad estructural a una temperatura mínima de servicio de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto requiere evaluar el fallo por fractura no-dúctil, lo que puede realizarse según la ASME Sección III, División 3, Subapartado WB, utilizando el criterio de la temperatura de referencia de transición dúctil-frágil ( $RT_{NDT}$ ). Como alternativa, buscando la aprobación del CSN según la norma IAEA SSR-6, se propuso evaluar la integridad estructural mediante el enfoque FAD de la BS7910 y estimando la tenacidad a la fractura a partir de la  $RT_{NDT}$ . Dicho trabajo es el antecedente del proyecto COSME, cuyo objetivo principal es evaluar y descartar el fallo por fractura no-dúctil en la barrera de contención de los contenedores ENUN, utilizando los criterios de mecánica de la fractura de las Secciones III y XI del Código ASME, pero aplicando las propiedades mecánicas reales (experimentales) de los materiales (forjas y soldaduras). Este artículo describe el reto tecnológico, los resultados de la evaluación alternativa original (BS7910 y estimaciones de tenacidad), y define el procedimiento COSME, que permitirá realizar el análisis dentro de un marco metodológico basado íntegramente en el Código ASME y propiedades reales.

**PALABRAS CLAVE:** Combustible Nuclear Gastado, Contenedor, Fractura no-dúctil, Integridad Estructural, Código ASME, Temperatura de Referencia

## ABSTRACT

Regulations for ENUN spent fuel transport casks (Type B(U), IAEA SSR-6) require ensuring their structural integrity at a minimum service temperature of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . This entails assessing the risk of non-ductile fracture, which can be performed in accordance with ASME Section III, Division 3, Subsection WB, using the reference ductile-to-brittle transition temperature ( $RT_{NDT}$ ) criterion. As an alternative, seeking approval from the CSN under IAEA SSG-26, it was proposed to assess structural integrity using the FAD approach of BS 7910, estimating fracture toughness from the  $RT_{NDT}$ . This work constitutes the antecedent of the COSME project, whose main objective is to evaluate and rule out non-ductile fracture failure in the containment barrier of ENUN casks, using fracture mechanics criteria from ASME Code Sections III and XI, while applying the actual (experimental) mechanical properties of the materials (forgings and welds). This article describes the technological challenge, the results of the original alternative assessment (BS 7910 and toughness estimates), and defines the COSME procedure, which will enable the analysis to be carried out within a methodological framework fully based on the ASME Code and real material properties.

**KEYWORDS:** Spent Nuclear Fuel, Cask, Non-ductile Fracture, Structural integrity, ASME Code, Reference Temperature

## 1. INTRODUCCIÓN

ENSA ha desarrollado una serie de diseños propios de contenedores de doble propósito para el almacenamiento en seco y el transporte de combustible nuclear gastado (CNG) y otros residuos radiactivos de alta actividad (figura 1). La serie ENUN incluye varios tipos de contenedores, como el ENUN 32P, el ENUN 52B y el ENUN 24P, que actualmente se utilizan en varias instalaciones de almacenamiento en seco temporal en España, y para el transporte de CNG en China. La barrera de contención de los contenedores ENUN está diseñada conforme a la ASME Sección III, División 3, Subapartado WB [1], que en el párrafo WB-3211(d)

establece que “*se deberá proporcionar protección frente a la fractura no-dúctil. Un procedimiento aceptable para la prevención del fallo no dúctil se proporciona en WB-2300*”. El párrafo WB-2300 exige la realización de ensayos de impacto *-Drop Weight* en combinación con ensayos *Charpy V-Notch-* para determinar la Temperatura de Referencia  $RT_{NDT}$  del material, que representa la temperatura máxima a la que se produce fractura frágil del material (i.e., temperatura por debajo de la cual el fallo es frágil), y que debe compararse con un criterio de aceptación que depende de la Temperatura Mínima de Servicio (LST, *Lowest Service Temperature*) del material, según lo establecido por la normativa.

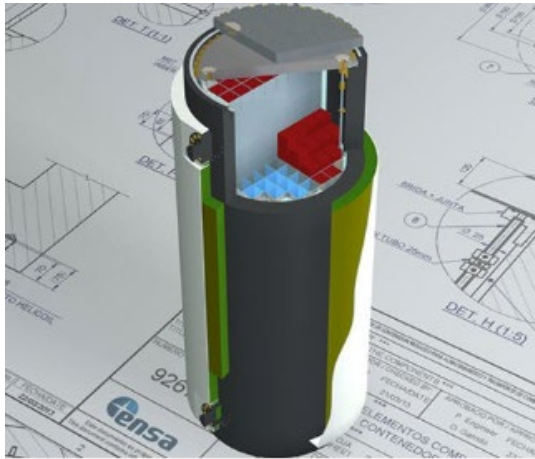


Figura 1. Esquema de contenedor ENUN  
(<https://www.ensa.es/contenedores/>)

De acuerdo con la IAEA SSR-6 [2], la LST para bultos Tipo B es  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El criterio de aceptación establecido en el párrafo WB-2331 [1] es el siguiente:

$$RT_{NDT} \leq LST - A \quad (1)$$

A depende del espesor del material de la barrera de contención del contenedor, según Tabla WB-2331.2-1 [1]. A mayor espesor de la barrera de contención, menor valor requerido de  $RT_{NDT}$ . La ecuación (1) pone de manifiesto que el criterio de aceptación no depende ni del estado tensional ni de los defectos intrínsecos del material. En consecuencia, no permite analizar/limitar las tensiones en el material ni tener en cuenta el uso de técnicas avanzadas de ensayos no destructivos capaces de detectar defectos no aceptables en los materiales.

Adicionalmente, en el caso de los bultos de transporte como los contenedores ENUN, el espesor de las barreras de contención viene determinado no solo por los requisitos de resistencia estructural, sino también por la necesidad de cumplir los criterios de dosis establecidos en la IAEA SSR-6 [2]. Para los contenedores ENUN, el mayor espesor requerido para cumplir los requisitos de blindaje, hace que todas las tensiones se mantengan muy por debajo de los límites estructurales establecidos por la Sección III, División 3 del Código ASME [1].

La barrera de contención de los contenedores ENUN está constituida por un cuerpo monolítico fabricado en acero al carbono. Dos o tres forjas se sueldan mediante penetración completa para crear el cuerpo del contenedor. La aplicación del criterio de la ecuación (1) exige un valor de  $RT_{NDT}$  muy bajo, en algunos casos inferior a  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que resulta muy exigente para la mayoría de los suministradores de forja. Esto ha llevado a ENSA, durante sus procesos iniciales de licenciamiento, a fijar el parámetro LST por encima del requisito de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  establecido por la normativa IAEA SSR-6 [2] para los bultos de Tipo B(U), adoptando un valor de LST más elevado, lo cual limita la certificación de los bultos al Tipo B(M) y requiere que esta restricción operativa se indique en el Certificado de Conformidad. Un bulto de Tipo B(U) dispone de aprobación unilateral,

que únicamente requiere la aprobación por parte de la autoridad competente del país de origen, pudiéndose convalidar sin restricciones adicionales por las autoridades competentes de otros países a través de los cuales se requiera hacer un transporte internacional; un bulto de Tipo B(M) requiere aprobación multilateral por parte de todas las autoridades competentes de los países por los que se transporte el bulto, lo que conlleva condicionantes y limitaciones adicionales para los envíos internacionales.

Por tanto, la obtención de la aprobación como bulto de Tipo B(U) de los contenedores ENUN, en lugar de Tipo B(M), ha sido un objetivo que ENSA ha perseguido en los últimos años, y se ha alcanzado mediante la aplicación de diversas metodologías de análisis acordes con el estado del arte, orientadas a cumplir el requisito de protección frente a la fractura no-dúctil especificado en el párrafo WB-3211(d) [1]. La Sección 2 de este documento resume el enfoque seguido por ENSA que condujo, en 2025, a la aprobación del contenedor ENUN 52B como bulto de Tipo B(U). La Sección 3 presenta un proyecto de investigación en curso (el proyecto COSME), cuyo objetivo es definir un enfoque alternativo. Por último, la Sección 4 presenta las principales conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA DE PARTIDA

Entre 2018 y 2021, ENSA desarrolló una metodología de análisis para evaluar la integridad estructural de la barrera de contención de los contenedores ENUN y demostrar la protección frente a la fractura no-dúctil, como alternativa al procedimiento basado en ensayos de impacto indicado en el Código ASME [1]. La metodología se basa en principios de mecánica de la fractura y sigue la norma de integridad estructural BS 7910 [3]. El análisis se realiza mediante Diagramas de Fallo (*Failure Assessment Diagrams*, FAD [3-5]), los cuales evalúan simultáneamente diversos mecanismos de fallo, desde la fractura frágil hasta el colapso plástico, e incluyendo condiciones de fractura elasto-plástica. Información adicional sobre su aplicación a un contenedor ENUN específico puede encontrarse en [6].

El objetivo último de la metodología ENSA fue demostrar la protección frente a la fractura no-dúctil de las forjas que constituyen la barrera de contención de los contenedores ENUN. Para ello, se establece un valor de diseño de  $RT_{NDT}$  de  $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que puede ser certificado por los suministradores de forja más cualificados. Para espesores comprendidos entre 200 mm y 300 mm, como es el caso de la barrera de contención de los contenedores ENUN, el parámetro A en la ecuación (1) varía entre  $64$  y  $67\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tabla WB-2331.2-1 [1]). Dado que LST es  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el valor de diseño de  $RT_{NDT}$  se sitúa unos  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima del valor requerido en [1]. No obstante, dado que el enfoque ENSA tiene en cuenta las condiciones reales de tensión y la presencia de defectos, esta metodología basada en BS 7910 puede aplicarse para evaluar la fractura no-dúctil. Para su desarrollo también se tuvieron en cuenta diversas recomendaciones de la

IAEA SSG-26, *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* [7].

La metodología ENSA comprende los siguientes pasos:

- Definición de los casos de carga (IAEA SSR-6 [2]).
- Obtención de los campos de tensiones.
- Linealización de tensiones conforme a BS 7910.
- Definición de las propiedades del material. Utiliza las propiedades del material incluidas en la especificación del material (no implica caracterización experimental).
- Establecimiento de un defecto de diseño en la sección más crítica de la barrera de contención y en la orientación más desfavorable.
- Cálculo del factor de intensidad de tensiones ( $K_I$ ).
- Cálculo de la coordenada  $K_r$  en el FAD ( $K_I/K_{mat}$ ).
- Cálculo de la tensión de referencia ( $\sigma_{ref}$ ) [3].
- Cálculo de la coordenada  $L_r$  en el FAD ( $\sigma_{ref}/\sigma_{ys}$ ).
- Representación del punto de coordenadas ( $K_r$ ,  $L_r$ ) en el FAD. La condición límite viene definida por la Línea de Fallo (*Failure Assessment Line*, FAL).
- Verificación de que se satisfacen los márgenes de seguridad requeridos. El enfoque ENSA, basado en la propuesta de Dillstroem et al. [8] (que cumple los requisitos del Código ASME), considera factores de seguridad de  $\sqrt{10}$  y  $\sqrt{2}$  en  $K_r$  para Condiciones Normales de Operación (NOC) y Condiciones de Accidente (AC), respectivamente, y de 2,4 (NOC) y 1,2 (AC) en  $L_r$ .

La figura 2 muestra un ejemplo de evaluaciones realizadas en el contenedor ENUN 52B, en las que se satisfacen todos los márgenes de seguridad (detalles en [6]). El enfoque ENSA fue apreciado favorablemente por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en 2021, y aplicado durante el licenciamiento del contenedor ENUN 52B, el cual fue aprobado como bulto Tipo B(U) en 2025.

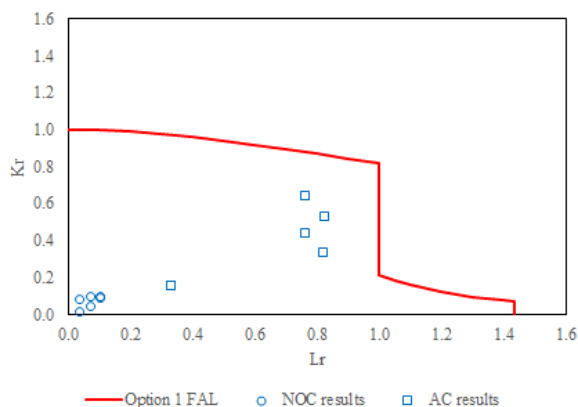


Figura 2. Análisis FAD de contenedor ENUN para diversos casos de carga.

### 3. PROYECTO Y METODOLOGÍA COSME

#### 3.1. Proyecto COSME

COSME – Evaluación de integridad estructural de Contenedores basada en código aSME – es un proyecto de I+D+i financiado por el CSN. Su objetivo principal es

desarrollar una metodología para la evaluación de la integridad estructural de contenedores de combustible nuclear gastado, basada íntegramente en criterios del Código ASME [1] y en un conocimiento preciso de las propiedades mecánicas reales de los materiales. El proyecto cuenta además con financiación adicional a través del programa de Doctorado Industrial de la Universidad de Cantabria. Comenzó en diciembre de 2024 y tiene una duración prevista de tres años. Los objetivos del proyecto son los siguientes:

- Objetivo 1: Desarrollo de una metodología de análisis de integridad estructural basada en el Código ASME y en propiedades mecánicas reales.
- Objetivo 2: Validación de la metodología propuesta frente a procedimientos existentes mediante el caso real del contenedor ENUN 52B.
- Objetivo 3: Aplicación de la metodología propuesta al caso real del contenedor ENUN 32P.
- Objetivo 4: Difusión nacional e internacional de los resultados y finalización de un doctorado industrial.

Para alcanzarlos, se han definido tareas y subtareas:

- Tarea 1: Definición de la metodología COSME para el análisis de la integridad estructural de contenedores de almacenamiento y transporte de combustible nuclear gastado.
  - Subtarea 1.1: Definición de la formulación ASME XI para el análisis de la integridad estructural.
  - Subtarea 1.2: Definición del proceso de caracterización mecánica de los materiales de interés e incorporación de los resultados al análisis de integridad estructural basado en ASME XI.
  - Subtarea 1.3: Análisis de la relación entre las evaluaciones según ASME XI y las evaluaciones mediante FAD.
  - Subtarea 1.4: Metodología COSME.
- Tarea 2: Aplicación de la metodología COSME al contenedor ENUN 52B.
  - Subtarea 2.1: Recopilación de datos iniciales y recogida de materiales de interés.
  - Subtarea 2.2: Mecanizado de probetas de ensayo.
  - Subtarea 2.3: Caracterización mecánica.
  - Subtarea 2.4: Análisis del contenedor ENUN 52B conforme a la metodología COSME.
- Tarea 3: Aplicación de la metodología COSME al contenedor ENUN 32P.
  - Subtarea 3.1: Recopilación de datos iniciales y recogida de materiales de interés.
  - Subtarea 3.2: Mecanizado de probetas de ensayo.
  - Subtarea 3.3: Caracterización mecánica.
  - Subtarea 3.4: Análisis del contenedor ENUN 32P conforme a la metodología COSME.
- Tarea 4: Difusión de resultados y doctorado industrial.
  - Subtarea 4.1: Difusión de resultados en eventos nacionales e internacionales.
  - Subtarea 4.2: Publicación de artículos científicos.
  - Subtarea 4.3: Comunicación general.
  - Subtarea 4.4: Desarrollo de Tesis Doctoral.

La Tarea 1 se completó en diciembre de 2025, junto con las Subtareas 2.1 y 2.2 (figura 3). Las subtareas 2.3 y 2.4 serán el principal foco de trabajo a lo largo de 2026. Hasta la fecha, el principal resultado alcanzado del proyecto es la definición de la metodología COSME.

### 3.2. Metodología COSME

La metodología COSME es de aplicación cuando el material del contenedor analizado no cumple el criterio establecido en la Sección III, División 3, Subapartado WB, párrafo WB-2300 del Código ASME [1]. Conceptualmente, el enfoque se enmarca dentro de la Sección XI del Código ASME [9] y permite el uso de propiedades mecánicas obtenidas a partir de ensayos mecánicos de los materiales de interés. Se asume que las condiciones de operación o accidentales pueden dar lugar a un proceso de fractura no-dúctil, dado que no se cumple el criterio de la Tabla WB-2331.2-1 [1]).

Los pasos del enfoque son los siguientes:

#### a) Definición de las hipótesis de carga

Los casos de carga, que incluyen las condiciones NOC y AC, se definen por las normas aplicables a cada diseño específico de contenedor y deben ser aprobados por la autoridad reguladora nuclear.

#### b) Determinación de los campos de tensiones e identificación de los puntos críticos

Las tensiones se calculan considerando las situaciones estáticas o dinámicas a las que está sometido el contenedor bajo cada condición de carga. El análisis debe identificar las tensiones de tracción máximas generadas para cada condición de carga, localizando así los perfiles tensionales críticos.

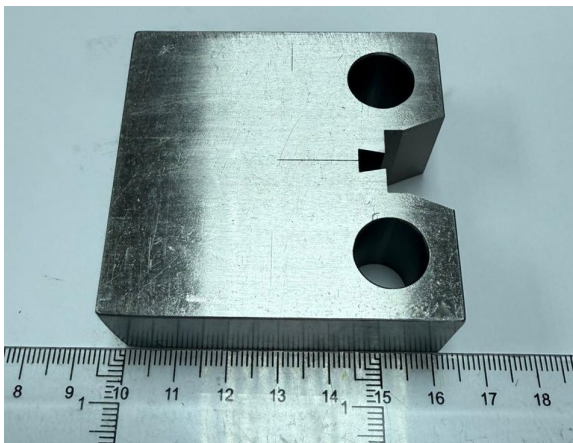


Figura 3. Probeta CT convencional ( $B = 25$  mm) mecanizada del material de forja.

#### c) Definición de la grieta

La Sección XI del Código ASME [9] determina el procedimiento a seguir. El Artículo A-1000 del Apéndice A (no obligatorio) define el alcance del análisis, estableciendo que puede utilizarse para determinar la aceptabilidad de defectos detectados durante las

inspecciones, incluidas las inspecciones previas al servicio. Este último caso es el contemplado por la metodología COSME, ya que considera defectos de referencia iguales o mayores que los criterios de rechazo ASME. En otras palabras, suponiendo que el contenedor analizado ha superado la inspección ASME (es decir, que no se detectan defectos mayores que los límites de rechazo), el tamaño del defecto considerado en el análisis de integridad estructural se toma igual o superior a dichos límites de rechazo ASME.

El Artículo A-2000 especifica los criterios para establecer el modelo de defecto a analizar. En este contexto, las grietas consideradas en la metodología COSME deben cumplir las disposiciones de A-2200 (forma del defecto), A-2400 (orientación del defecto) y A-2500 (localización del defecto). En general, los defectos (discontinuidades) serán elípticos (embebidos) o semi-elípticos (superficiales), orientados en la dirección más crítica (perpendicular a la tracción máxima) y localizados en la posición más desfavorable (aquella sometida a la máxima tensión de tracción).

Como ejemplo, en el caso del contenedor ENUN 52B, se adoptaron hipótesis conservadoras considerando defectos de la misma profundidad que los límites de rechazo, pero con mayores longitudes superficiales (relación de aspecto de 6:1). Así, para este contenedor se definieron los siguientes defectos de referencia:

- Defectos superficiales en forjas: semi-elipse, 6 mm de profundidad y 36 mm de longitud.
- Defectos internos en forjas: elipse, 6 mm de profundidad y 36 mm de longitud.
- Defectos superficiales en soldaduras: semi-elipse, 1,6 mm de profundidad y 9,6 mm de longitud.
- Defectos internos en soldaduras: elipse, 1,6 mm de profundidad y 9,6 mm de longitud.

#### d) Determinación del factor de intensidad de tensiones

El Artículo A-3000 del Apéndice A define la metodología para el cálculo del factor de intensidad de tensiones,  $K_I$ . Su ámbito de aplicación, establecido en A-3100, cubre el caso de contenedores de almacenamiento y transporte de combustible nuclear gastado.

La Sección A-3200 especifica las tensiones que deben considerarse y proporciona dos alternativas para definir las en la ubicación de interés: una representación polinómica de las tensiones (A-3210) o una representación mediante intervalos discretos (A-3220).

Las tensiones actuantes se derivan, como se ha discutido en los pasos (a) y (b), de los casos de carga definidos en las normas de diseño aplicables a cada contenedor. En todos los casos analizados bajo la metodología COSME, la distribución de tensiones se ajustará mediante una ecuación polinómica a lo largo de todo el espesor de la pared,  $t$ , tal y como se define en A-3212:

$$\sigma = B_0 + B_1 \left(\frac{x}{t}\right) + B_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + B_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + B_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4 \quad (2)$$

x es la distancia a través del espesor de la pared (t), medida desde la superficie más cercana al defecto (véase la Figura A-3210-2 en [9]). B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> y B<sub>4</sub> son constantes obtenidas a partir del ajuste polinómico de la distribución real de tensiones, realizado de acuerdo con A-3212. La Sección A-3300 proporciona la formulación de K<sub>I</sub> para grietas embebidas, mientras que la Sección A-3400 la proporciona para grietas superficiales. Como ejemplo, en el segundo caso la expresión general es:

$$K_I = \left( (B_0 + B_p)G_0 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right) G_1 + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 G_2 + B_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 G_3 + B_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 G_4 \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3)$$

$$Q = \phi - q_y \quad (4)$$

$$\phi = 1 + 4.593 \left(\frac{a}{l}\right)^{1.65} \quad (5)$$

$$q_y = \left( \left( (B_0 + B_p)G_0 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right) G_1 + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 G_2 + B_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 G_3 + B_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 G_4 \right) / \sigma_{ys} \right)^2 / 6 \quad (6)$$

a es la profundidad de la grieta, t el espesor de la pared y B<sub>p</sub> la presión para defectos superficiales expuestos a carga de presión (si los hubiera). Los valores B<sub>i</sub> son los que definen el campo de tensiones, mientras que los coeficientes G<sub>i</sub> se proporcionan en tablas (A-3412; Tablas A-3620-1 a A-3660-8) o como expresiones analíticas (A-3413). a/l es la relación de aspecto del defecto. El parámetro q<sub>y</sub> es una corrección plástica que permite extender el análisis elástico lineal (es decir, la comparación directa entre K<sub>I</sub> y la tenacidad a la fractura, K<sub>Ic</sub> o K<sub>Ia</sub>) a situaciones con plasticidad limitada en el fondo de la grieta, como las que ocurren en contenedores que operan dentro de la Zona de Transición Dúctil-Frágil (ZTDF) del material.

#### e) Definición de propiedades del material

La metodología COSME permite el uso de propiedades mecánicas obtenidas de ensayos de laboratorio realizados en probetas de material extraídas de las forjas y soldaduras utilizadas para la fabricación de los contenedores, de acuerdo con las normas de ensayo aplicables. Según la Sección XI del ASME, solo se requieren el límite elástico (para la corrección plástica utilizada en el paso d)) y la tenacidad a la fractura.

En cuanto al límite elástico, se puede usar el valor certificado por el proveedor del material (típicamente conservador) o el valor medido en laboratorio.

Respecto a la tenacidad a la fractura, el Artículo A-4000 del Apéndice A define el procedimiento para la determinación de propiedades mecánicas, y en particular, de la tenacidad a la fractura. Se distingue entre condiciones de iniciación estática, donde la propiedad es (K<sub>Ic</sub>), y condiciones de parada de fisura (K<sub>Ia</sub>). Ambas se determinan mediante curvas de ajuste conservadoras que dependen de la temperatura de servicio, T, y de la RT<sub>NDT</sub>.

Para condiciones de iniciación estática:

$$K_{Ic} = 36.5 + 22.783e^{0.036(T-RT_{NDT})} \quad (7)$$

Para evaluaciones de parada de fisura:

$$K_{Ia} = 29.4 + 13.675e^{0.0261(T-RT_{NDT})} \quad (8)$$

T y RT<sub>NDT</sub> en °C, K<sub>Ic</sub> y K<sub>Ia</sub> en MPa√m.

El Artículo A-4200 también permite el uso de datos específicos de tenacidad a la fractura del material analizado. Dado que RT<sub>NDT</sub> se deriva de ensayos de impacto y no es una medida directa de tenacidad, A-4200 permite el uso de una temperatura de referencia T<sub>0</sub>, obtenida según ASTM E1921 [10]. Cuando T<sub>0</sub> está disponible, A-4200 propone usar RT<sub>T0</sub> en lugar de RT<sub>NDT</sub> para condiciones de iniciación (estática):

$$RT_{T0} = T_0 + 19.4 \text{ (°C)} \quad (9)$$

Para condiciones de parada de fisura, se propone el uso de RT<sub>KIa</sub> (sustituyendo RT<sub>NDT</sub> en la ecuación (8)):

$$RT_{KIa} = T_0 + 44.97e^{-0.00613 \cdot T_0} \text{ (°C)} \quad (10)$$

En consecuencia, la metodología COSME requiere la determinación de T<sub>0</sub> siguiendo ASTM E1921 para los materiales de la forja y la soldadura. Las probetas de tenacidad a la fractura se extraen a mitad de espesor (t/2), cumpliendo con el requisito mínimo establecido en [11] (t/4), asegurando un valor mínimo de tenacidad considerado uniforme a lo largo del espesor. Una vez obtenido T<sub>0</sub>, se aplican las ecuaciones (9) y (10) para derivar RT<sub>T0</sub> y RT<sub>KIa</sub>, respectivamente, definiéndose K<sub>Ic</sub> y K<sub>Ia</sub> mediante las ecuaciones (11) y (12):

$$K_{Ic} = 36.5 + 22.783e^{0.036(T-RT_{T0})} \text{ (MPam}^{1/2}) \quad (11)$$

$$K_{Ia} = 29.4 + 13.675e^{0.0261(T-RT_{KIa})} \text{ (MPam}^{1/2}) \quad (12)$$

Es importante señalar que, aunque T<sub>0</sub> se deriva experimentalmente de datos de tenacidad a la fractura (a diferencia de RT<sub>NDT</sub>), el carácter conservador de las ecuaciones (9) y (10) puede producir valores de K<sub>Ic</sub> y K<sub>Ia</sub> a partir de las ecuaciones (11) y (12) que sean incluso más conservadores que los obtenidos con las ecuaciones (7) y (8). Por ello, la metodología COSME recomienda las siguientes expresiones finales:

$$K_{Ic} = \text{Max}\{\text{equation (7), equation (11)}\} \quad (13)$$

$$K_{Ia} = \text{Max}\{\text{equation (8), equation (12)}\} \quad (14)$$

#### f) Evaluación a fractura

El Artículo A-5100 del Apéndice A establece que la metodología de análisis de fractura se aplica tanto a Condiciones NOC como a Condiciones AC. Dentro del marco COSME, los análisis de fractura se realizan para ambas condiciones, considerando únicamente la iniciación de la grieta (estática).

Finalmente, las secciones A-5300 y A-5400 definen cómo completar los análisis de iniciación de fractura bajo NOC y AC, respectivamente. Para NOC, el

procedimiento consiste en comparar la evolución de  $K_I$ , a medida que aumenta el tamaño de la grieta, con  $K_{Ic}$ . El tamaño crítico de grieta,  $a_c$ , es la profundidad de grieta más pequeña en la que  $K_I = K_{Ic}$ , una vez evaluadas todas las NOC; para AC, el análisis es similar.

El criterio de iniciación establecido en A-5400 identifica la profundidad crítica de grieta de iniciación,  $a_i$ , como el tamaño de grieta en el que  $K_I = K_{Ic}$ . Alternativamente, si se está evaluando un tamaño de grieta específico ( $a$ ), como en los análisis COSME, la evaluación consiste simplemente en comparar el  $K_I$  aplicado con el  $K_{Ic}$  correspondiente. La iniciación de fractura se evita si:

$$K_I < K_{Ic} \quad (15)$$

De acuerdo con el Artículo A-1100, la aceptabilidad del componente agrietado se determinará aplicando los criterios del Artículo IWB-3600 de [1], usando los factores de seguridad (SF) especificados allí:

$$K_I < \frac{K_{Ic}}{\sqrt{10}} \quad (\text{NOC}) \quad (16)$$

$$K_I < \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2}} \quad (\text{AC}) \quad (17)$$

Finalmente, la evaluación de fractura se complementa con una verificación de colapso plástico. Dado que la Sección XI del ASME [9] no analiza este fenómeno, dicha verificación se realizará según ASME FFS-1 [11], aplicando los factores de seguridad definidos en [8].

#### 4. CONCLUSIONES

Para solicitar un Certificado de Conformidad de contenedores como bulto de transporte Tipo B(U), es necesario demostrar la integridad estructural del bulto bajo condiciones de frío extremo, lo que conlleva evaluar la susceptibilidad de los materiales del bulto a la fractura frágil. ENSA ha desarrollado previamente una metodología propia de análisis basada en la aplicación de la norma BS 7910 y en las propiedades de los materiales incluidas en las especificaciones correspondientes. Dicha metodología fue evaluada técnicamente y apreciada favorablemente por el CSN en 2021.

En este contexto, el proyecto COSME se puso en marcha a finales de 2024. Su objetivo es desarrollar una metodología para evaluar las condiciones de fractura no dúctil en contenedores de almacenamiento y transporte de combustible gastado, basada en el Código ASME y en un conocimiento preciso de las propiedades mecánicas reales de los materiales, en particular de su tenacidad a la fractura ( $T_0$ ). El proyecto se encuentra actualmente en ejecución y cuenta con financiación del CSN.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta publicación forma parte del proyecto «COSME – Evaluación de integridad estructural de contenedores basada en el Código ASME y en propiedades mecánicas reales», financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Ref. SUBV-12-2024. Asimismo, ha recibido financiación del Programa de Doctorado Industrial de la Universidad de Cantabria, Proyecto DI41. El proyecto

cuenta además con el apoyo de ENSA, mediante el suministro de material para ensayos y la aportación de conocimiento y experiencia en el sector.

#### REFERENCIAS

- [1] ASME, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 3: Containments for Transportation and Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Material and Waste*, 2023. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- [2] IAEA, *IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 2018. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- [3] British Standards Institution, *BS 7910:2013 + A1:2015 – Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, 2015. BSI Standards, London, UK.
- [4] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed., 2005. CRC Press, FL.
- [5] M. Kocak, S. Webster, J. J. Janosch, R. A. Ainsworth, and R. Koers, *FITNET Fitness-For-Service (FFS) Procedure, Vol. 1*, 2008. GKSS Research Centre, Hamburg, Germany.
- [6] E. Gómez-Poncela, A. Palacio, V. Madrazo, and S. Cicero, “Structural Integrity Assessment of a Spent Fuel Cask by Using BS 7910,” *Procedia Structural Integrity*, In Press, 2026.
- [7] IAEA, *IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-26 (Rev. 1): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 2018. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- [8] P. Dillström, M. Bergman, et al., “A Combined Deterministic and Probabilistic Procedure for Safety Assessment of Components with Cracks – Handbook,” 2008. Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm, Sweden.
- [9] ASME, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components*, 2023. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- [10] ASTM International, *ASTM E1921-23: Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*, 2023. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [11] ASTM International, *ASTM A350/A350M-18: Standard Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Forgings, Requiring Notch Toughness Testing for Piping Components*, 2018. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [12] API / ASME, *API RP 579-1 / ASME FFS-1: Fitness-For-Service*, 3rd ed., 2016. The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.