

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL COMBUSTIBLE EN UN ACCIDENTE DE CAÍDA VERTICAL DEL CONTENEDOR

Una de las situaciones más limitantes en el análisis de integridad del combustible gastado durante el transporte, es el de los hipotéticos accidentes de caída del contenedor. El escenario que debe ser analizado en este tipo de accidentes, según especifica el título 10 de las *Code Federal Regulations* (10 CFR 71.73) de la NRC, es el de la caída libre del sistema combustible-contenedor desde una altura de nueve metros con el posterior impacto contra una superficie plana, rígida y horizontal en la posición más desfavorable. En concreto, en este artículo se realiza el análisis de la respuesta del combustible bajo el supuesto de caída en posición vertical del contenedor.

Para este tipo de análisis, Enusa ha desarrollado y presenta en este artículo un modelo elasto-plástico de elementos finitos capaz de simular mediante un cálculo cuasiestático el comportamiento de una barra combustible irradiada durante el accidente postulado y evaluar su integridad estructural. Aproximaciones mediante un cálculo dinámico a este análisis también han sido acometidas y sus resultados podrán ser presentados en futuros artículos.

INTRODUCCIÓN

La modelización y el análisis mediante elementos finitos están siendo usados en la actualidad para estimar el comportamiento, las cargas y deformaciones que experimenta durante el almacenamiento y transporte en contenedores el combustible gastado. Este tipo de análisis se ha constituido como una herramienta práctica para evaluar el mantenimiento de la integridad mecánica de las barras combustibles del combustible gastado.

En este artículo se presenta una de las aproximaciones seguidas por Enusa para la evaluación mecánica del combustible gastado bajo hipotéticos accidentes de transporte, desde la determinación de los esfuerzos que se producen en la barra combustible mediante análisis por elementos finitos, hasta la evaluación del posible fallo de la vaina. En concreto, se aborda el análisis de este tipo de accidente en posición vertical del sistema contenedor-combustible [4-5] mediante un cálculo cuasiestático de la respuesta de la barra combustible.

Dentro de los escenarios a analizar definidos el título 10, parte 71.73 de la *Code Federal Regulation* de la NRC (10 CFR 71.73) [1], el más limitante desde el punto de vista mecánico para el combustible gastado es el hipotético

accidente de caída libre desde nueve metros del sistema contenedor-combustible durante el transporte, con el posterior impacto contra una superficie plana, horizontal y rígida en la posición más desfavorable.

En este tipo de accidente, el modo de fallo más probable para impactos axiales del combustible es el fallo de la vaina por flexión de la barra. Para realizar una evaluación conservadora respecto a este mecanismo de fallo, se supone en el cálculo que la barra pandeo como consecuencia del impacto axial sobre las barras combustibles tras la caída libre en posición vertical del contenedor. Tal como indica la *Interim Staff Guidance* (ISG)-12-Rev.1 de la NRC [2], "los análisis de pandeo de barra realizados para demostrar la integridad del combustible tras accidente de caída del contenedor llevan a resultados que presentan gran margen respecto del fallo real de la barra. El momento en el que se produce pandeo no implica el fallo del combustible o de la vaina". A su vez, la ISG-12 también indica que si la tensión máxima en la vaina combustible se mantiene por debajo del límite elástico, es decir, no existe plastificación, "la integridad de la misma está asegurada". No obstante, si dicho límite es superado, cabe la posibilidad de

JORGE MUÑOZ CARDADOR

Ingeniero de Tecnología de Combustible en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero de Caminos por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto de la Universidad Castilla-La Mancha.

ALBERTO CERRACÍN ARRANZ

Ingeniero de Tecnología de Combustible en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero de Caminos por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto de la Universidad Politécnica de Madrid.

CRISTINA MUÑOZ-REJA RUIZ

Responsable de Tecnología de Combustible en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Licenciada en Ciencias Químicas, Química Inorgánica y del Estado Sólido, por la Universidad Autónoma de Madrid.

STRUCTURAL ANALYSIS OF FUEL IN A VERTICAL DROP CASK SYSTEM ACCIDENT

One of the most limiting situations for the analysis of the fuel rod integrity under hypothetical transportation accident is, according to the NRC Code Federal Regulations (10 CFR 71.73), the drop impact of the cask system for the 9 meters free drop onto a flat, horizontal and unyielding surface, striking it in the worst position. In this paper, the analysis of the fuel behavior is performed for a vertical drop of the cask system.

For that purpose, ENUSA has developed and presents here a finite elements elastic-plastic model with the capacity to simulate and assess the structural behavior of an irradiated fuel rod during the hypothesized accident by means of a static calculation. Other dynamic finite element analyses of this accident assessment may be presented in future papers.

analizar las máximas deformaciones en la vaina asociadas a deformación plástica de la misma.

METODOLOGÍA E HIPÓTESIS

El escenario de accidente analizado es la caída libre del sistema combustible-contenedor en posición vertical desde una altura de nueve metros y su impacto posterior contra una superficie plana, horizontal y rígida. Se considera que el impacto se produce en la base del contenedor. Las barras combustibles impactan por tanto axialmente contra el cabezal inferior.

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos elasto-plástico para el análisis mecánico de las barras combustibles irradiadas durante el hipotético accidente, del que se extraen los resultados necesarios mediante un cálculo cuasiestático para la evaluación del fallo de las mismas.

En primer lugar, se realiza un análisis en profundidad de si el pandeo calculado de la barra no conlleva el fallo de la misma, y bajo qué supuestos de cálculo esto es cierto. Para ello, se analizará la influencia del espacio lateral del que dispone la barra que pandea para deformarse libremente.

Posteriormente, para un valor concreto y representativo de la realidad del huelgo lateral disponible para la deformación de la barra analizada, se evaluará su posible fallo en base a criterios de deformación última del material de la vaina.

Las principales hipótesis establecidas para el análisis son:

- La respuesta de una única barra se considera representativa de todas las barras del combustible. La barra analizada es libre para deformarse en cualquier dirección sin más restricción que la pared de la celda del bastidor del contenedor que aloja al combustible y el resto de barras apoyadas sobre ésta.
- Las características geométricas del combustible gastado evaluado se corresponden con un diseño estándar de combustible 17x17 PWR de 12 pies de altura, con rejillas intermedias y barras combustibles con vaina de Zircaloy-4.
- Las dimensiones de la celda del contenedor y de la aceleración máxima experimentada durante el accidente se corresponden con valores habituales en la industria. En concreto, la aceleración máxima del contenedor se estima en 60 g.

- Puesto que se analiza combustible gastado, se toman en consideración condiciones fin de vida del combustible. Se asume un quemado medio del elemento de 45 GWd/tU. Se considera un espesor no resistente de la capa de óxido de acuerdo con los límites de diseño de barra. Asimismo, la fuerza de sujeción que las rejillas ejercen sobre las barras combustibles se encuentran relajadas por efecto de la irradiación.
- La temperatura de la vaina para el análisis se asume igual a la temperatura máxima de transporte para penalizar las propiedades mecánicas de la misma.
- Las propiedades mecánicas del material de la vaina consideran el estado irradiado de las barras combustibles del combustible gastado.
- Se considera el 100% de la masa de las pastillas de UO_2 adherida a la vaina, pero no el efecto rigidizador que tienen frente a flexiones de la barra.
- Conservadoramente, no se considera el efecto rigidizador frente a pandeo de la presión interna de la barra.

ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL ACCIDENTE

Descripción del modelo

El modelo de elementos finitos desarrollado para este tipo de análisis es un modelo 2D realizado con ANSYS®. El modelo

calcula la respuesta de una barra sometida a una carga inercial en dirección axial para obtener las tensiones y deformaciones en la vaina. Con esta aproximación es posible estimar los efectos en la barra de la desaceleración provocada por el impacto tras la caída libre del sistema contenedor-combustible.

El modelo simula la totalidad de la longitud de la barra mediante elementos tipo viga, de sección tubular. El apoyo a la altura de cada rejilla se simula mediante tres elementos huelgo-muelle, dos para los resaltes y uno para el muelle de la banda de las rejillas, de tal forma que la rigidez frente al giro en ese punto reproduzca las condiciones de apoyo deseadas. Mediante otra serie de elementos huelgo a lo largo de la longitud de la barra se define el espacio lateral δ que tiene la barra para deformarse en el plano del modelo.

Al tratarse de una simulación 2D, se supone que todas las deformaciones ocurren en el mismo plano, por lo que todos los giros y deformaciones fuera de ese plano están restringidos. El nodo inferior de la barra que recibirá el impacto del cabezal superior se modeliza simplemente apoyado.

El material de la vaina se modeliza mediante una ley bilineal representativa del Zircaloy-4 irradiado con un límite de deformación última del 2.5%, consistente con modelos

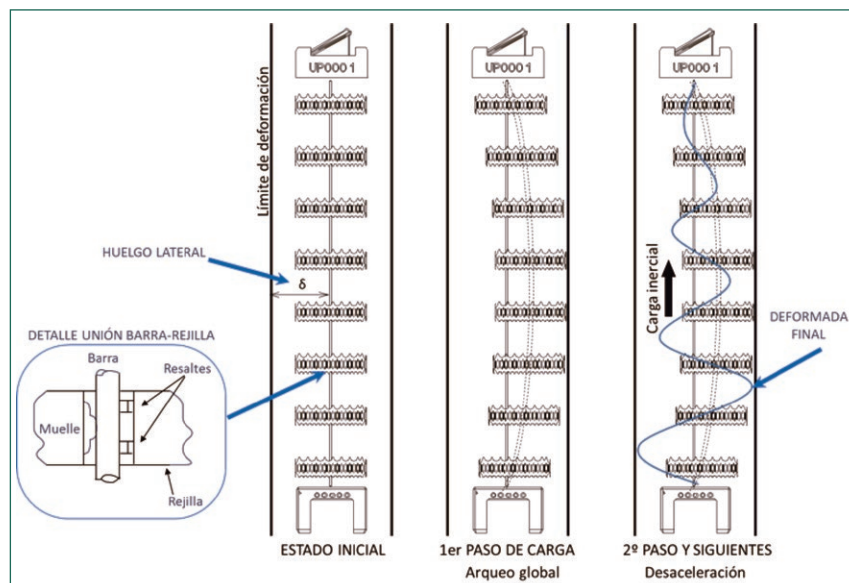


Figura 1. Esquema del modelo y el cálculo realizado con elementos finitos.



públicos como los recogidos en la referencia 3. La densidad del material se modifica para que el peso de las pastillas sea incorporado a la vaina y distribuido a lo largo de toda la longitud de la barra.

En el primer paso de carga de la simulación, se arquea globalmente la barra combustible para reproducir el posible arqueado del combustible gastado dentro de la celda del contenedor. Esta distorsión se introduce para inducir el posterior pandeo de la barra modelizada. En los siguientes pasos de carga, se realiza un cálculo estático y gradual de una carga inercial que represente la desaceleración debida al impacto. A un cierto nivel de desaceleración, se produce la inestabilidad de la barra y ésta pandeo. Este proceso de carga se muestra en la Figura 1.

Análisis de sensibilidad frente al huelgo lateral δ

Para analizar el efecto que el valor del huelgo lateral δ tiene en los resultados, se han analizado diferentes casos para varios valores de este parámetro. El huelgo lateral se ha supuesto simétrico para considerar como representativa la respuesta de la barra central (Ref. 6). En cada caso la carga inercial se ha incrementado hasta un valor suficiente para producir pandeo y, tras este, la plastificación del material de la vaina.

En la Figura 2 se representan las barra deformada tras pandeo en uno de los casos analizados. Se puede observar como la deformación lateral de la barra acaba siendo controlada y limitada por las restricciones laterales a un cierto valor de δ . Se han validado los resultados del modelo por comparación con el resultado analítico para los mayores esfuerzos en cada vano. Cuando la barra cierra el huelgo lateral δ en un determinado vano, estos esfuerzos se producen en los puntos de máxima curvatura A. En la Figura 2 se muestra la expresión para los esfuerzos axil NA y momento flector MA en este punto, cuando la reacción en los apoyos es R y bajo la hipótesis de que la deformada de la barra sigue una forma senoidal.

Para varios casos con diferente valor del parámetro δ , se representa en la Figura 3 la aceleración a la que se produce el pandeo y a la que se alcanza el límite elástico en algún punto de la vaina. Como era de esperar, se pone de manifiesto que el momento en el que se inicia el pandeo, alrededor de los 22 g de aceleración, es in-

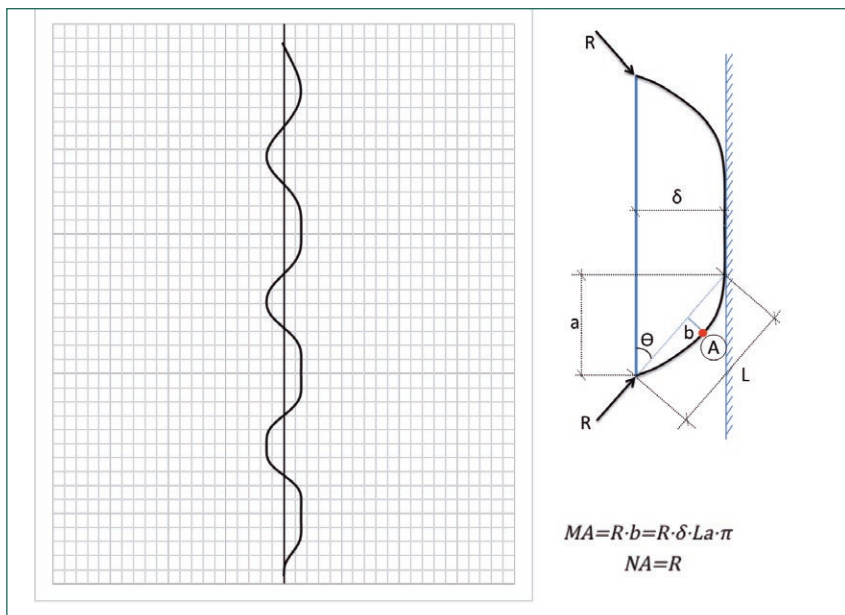


Figura 2. Deformadas de barra tras pandeo para dos casos con valor diferente de huelgo lateral.

dependiente del valor de δ . Además, se observa que a partir de un cierto valor umbral de δ , el pandeo conlleva seguidamente la plastificación de la barra. No obstante, por debajo de ese valor umbral, la deformación de la barra pandeada es controlada por las restricciones laterales antes de que se alcance el límite elástico en la vaina, apareciendo una cierta resistencia elástica post-pandeo Δ .

Para dimensiones de contenedores actuales y bajo hipótesis de deformación de barra central, el valor de δ , junto con el valor de la desaceleración razonablemente esperable en este tipo de caídas, puede no arrojar una suficiente resistencia post-pandeo Δ para asegurar la integridad de la vaina únicamente justificando la no plastificación del material, como posibilita la ISG-12. Por ello, es necesario evaluar criterios de fallo basados en criterios de deformación última del material de la vaina.

Resultados y verificación del criterio de fallo

Para un caso representativo por su valor del parámetro δ , se ha calculado el estado tensional y de deformaciones de la barra para un hipotético impacto de 60 g de desaceleración.

En la Figura 4 se representan las deformaciones máximas a lo largo de la barra y se verifica que en toda la longitud, el material no supera el valor de la deformación última del 2.5%

definido para este análisis, siendo el valor máximo obtenido de 1.03%. En este caso, aun habiéndose superado el límite elástico en algunos puntos de la barra, la integridad estructural de la vaina está asegurada.

CONCLUSIONES

Uno de los escenarios más demandantes para la integridad del combustible gastado son los accidentes hipotéticos durante transporte en contenedor del mismo. En la actualidad son numerosos los enfoques y las aproximaciones para la evaluación de las consecuencias que, desde el punto de vista de la seguridad, conllevarían este tipo de eventos.

Enusa ha desarrollado modelos y herramientas capaces de evaluar la integridad estructural los accidentes de caída durante transporte del combustible gastado. En concreto, se ha ejemplificado una evaluación del fallo de barra combustible como consecuencia de una caída vertical desde 9 m del sistema combustible-contenedor. Para este tipo de cálculo, se ha evaluado con un cálculo de pandeo estático de barra conservador, la influencia del huelgo lateral que pueda tener la barra para deformarse libremente, la dificultad de no superar el límite elástico si se produce pandeo y se ha verificado la integridad de la barra en base a criterios elasto-plásticos deformación última.

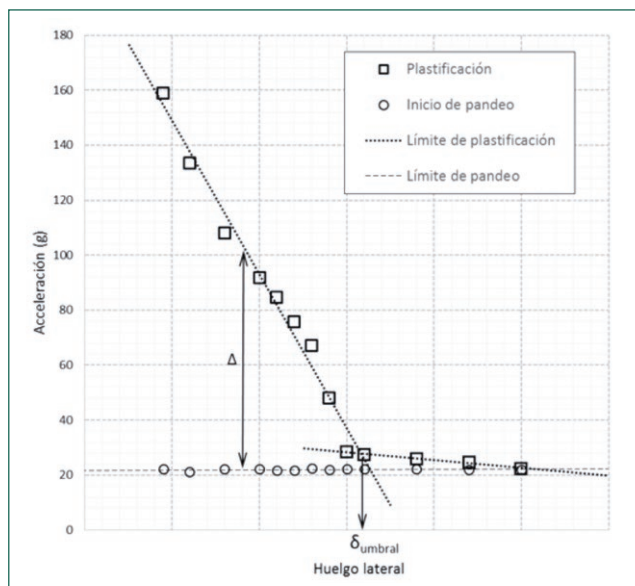


Figura 3. Aceleración de pandeo y plastificación según valor del huelgo lateral δ .

Los conservadurismos de este tipo de análisis de pandeo estático de la barra combustible pueden ser reducidos mediante la realización de cálculos dinámicos del accidente de caída libre vertical, con modelos similares al descrito en el NUREG-1864 [6]. Aproximaciones de este tipo reproducen más fielmente la respuesta real de la barra, recogiendo las posibles amplificaciones en la barra de la aceleración sufrida por el contenedor y la mayor resistencia de la barra frente a pandeos de tipo dinámico. La experiencia de Enusa con este tipo de modelos dinámicos podrá ser presentada en futuros artículos. ■

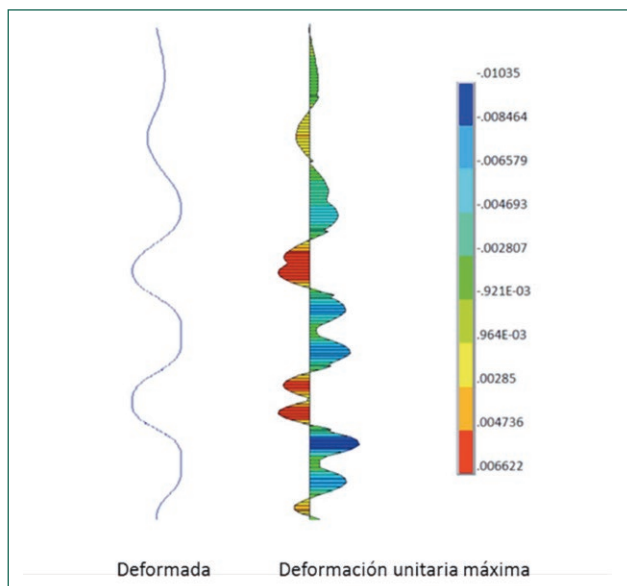


Figura 4. Deformada y máximas deformaciones calculadas a 60g a lo largo de la barra.

- [1] Title 10, Code Federal Regulations, Part 71, Subpart 73, "Packaging and Transportation of Radioactive Material". United States Government Printing Office, Washington DC. Junio 2004.
- [2] Interim Staff Guidance rev.1 (ISG-12 rev.1), "Buckling of Irradiated Fuel under Bottom End Drop Conditions", Spent Fuel Project Office, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [3] Geelhood KJ et al., "Stress/Strain correlation for Zircaloy", PNNL-17700 Report (2008)
- [4] Muñoz J, Cerracín A, Muñoz-Reja C, Quecedo M, "Structural Integrity of Irradiated Fuel Rod Cladding under Axial Loads from Hypothetical Transportation Accident". WRFPM 2014 (Top Fuel) Sendai, septiembre 2014.
- [5] Muñoz J, Cerracín A, Carrilho L A, "An Assessment of Irradiated Fuel Rod Failure After Vertical Drop Accident During Fuel Assembly Transportation". WRFPM 2015 (Top Fuel) Zurich, septiembre 2015.
- [6] NUREG-1864, "A Pilot Probabilistic Risk Assessment of a Dry Cask Storage System at a Nuclear Power Plant - Appendix C - Fuel Response to Loads", marzo 2007.