

Contacto intermitente y localizado entre dos superficies. Aplicación al caso de la interacción pastilla-vaina (PCI) en un combustible nuclear de potencia

Alejandro Soba y Alicia Denis

Comisión Nacional de Energía Atómica
Centro atómico Constituyentes
Avda. Gral. Paz 1499, (1650) San Martín, Argentina
Tel: 54 11 6772 7241
e-mail: soba@cnea.gov.ar; denis@cnea.gov.ar

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de un algoritmo de resolución del problema de contacto entre dos materiales separados por un huelgo (gap), alternadamente abierto o cerrado, basado en el método de elementos finitos, en donde el contacto se expresa por medio de restricciones. Para tratar el problema se utiliza una aproximación de campo incompleto, subdividiendo el dominio en dos regiones, correspondientes a cada material involucrado. En cada una se utiliza una formulación irreducible en los desplazamientos y multiplicadores de Lagrange para tratar las fuerzas sobre la frontera para unir los subdominios mencionados. El esquema se deriva de la aplicación del principio de los trabajos virtuales suponiendo una condición de continuidad para los desplazamientos en la frontera entre ambos dominios.

El conjunto de algoritmos se prueba con diversos problemas generales, con simetría plana o axial, cuya solución analítica puede hallarse en la literatura, para después aplicarlo a la simulación del contacto entre la pastilla y la vaina de una barra combustible nuclear en operación.

Palabras clave: *Contacto sin deslizamiento, Interacción pastilla vaina, PCI, MEF.*

INTERMITENT AND LOCAL CONTACT BETWEEN TWO SURFACES. APPLICATION TO THE CASE OF PELLET-CLADDING INTERACTION (PCI) IN A NUCLEAR POWER FUEL ROD

Summary

This work contains a study of an algorithm devised to analyze problems of contact between two materials separated by a gap, alternatively open and close. In the finite element scheme used the contact is expressed by restrictions. An approximation of incomplete field is employed; the domain is divided in two subdomains, in each of which an irreducible formulation in the displacements is used. Lagrange multipliers are used for the treatment of forces in the boundary between the subdomains. The calculation scheme derives from the virtual work principle, assuming continuity for the displacements at the boundary.

The contact algorithm is tested in general problems with plane or axial symmetry, with well known analytical solution. Then it is applied to the simulation of the behavior of a nuclear fuel rod subjected to a postulated power history where the problem of pellet-cladding contact may arise.

Keywords: *Contact without sliding, pellet cladding interaction, PCI, FEM.*

INTRODUCCIÓN

El problema de la interacción pastilla-vaina (Pellet-Cladding Interaction o PCI) ha sido motivo de particular atención en la industria nuclear desde sus primeros prototipos de elementos combustibles. A partir de los estudios llevados a cabo con el fin de incrementar el quemado y la vida útil de los combustibles, se ha reavivado el interés sobre el mismo, tanto en el aspecto del conocimiento básico como en el de su simulación. La aparición de contacto aumenta en forma considerable las posibilidades de rotura de la vaina al punto que el daño de las vainas por este mecanismo es el límite más severo que se impone al elemento combustible y a su permanencia dentro del reactor. En contraposición, el contacto favorece la conducción del calor disminuyendo la temperatura del sistema apreciablemente y, en consecuencia, convierte en menos extremas las condiciones en las que tienen lugar todos los procesos fisicoquímicos dentro de este complejo sistema.

Para estudiar numéricamente estos fenómenos se ha construido el código DIONISIO, que simula el comportamiento térmico, las deformaciones elasto-plásticas y las debidas a la fluencia, además del hinchado-densificación. También registra la generación y lleva el inventario de los diversos productos de fisión, particularmente los gaseosos, que aparecen durante el quemado del combustible y son finalmente expulsados hacia los volúmenes libres de la barra combustible. El código fue utilizado previamente para simular los experimentos de la serie FUMEX-1¹. Los resultados mostraron un muy buen acuerdo con los valores experimentales^{1,2} y quedaron dentro del rango de los logrados mediante otros códigos de uso internacional.

DIONISIO es un código bidimensional que simula el conjunto pastilla-vaina, con un hueco (*gap*) entre ellas de espesor variable. En forma esquemática, el sistema es el representado en la Figura 1, en el que se supone simetría cilíndrica. Para integrar las ecuaciones diferenciales que representan los problemas térmico y elasto-plástico^{3,4} usa el método de elementos finitos⁵. Ambos problemas son no lineales: el primero debido a la dependencia del coeficiente de conductividad térmica con la temperatura y el de las tensiones-deformaciones, debido a la plasticidad^{6,7}. Para calcular el inventario de los gases de fisión se elige un grano representativo en cada elemento finito del dominio. Por simplicidad, el grano se supone esférico y en él se resuelve para los gases de fisión la ecuación unidimensional de difusión en coordenadas esféricas. La dilatación térmica, el hinchado de la pastilla debido a los productos de fisión, principalmente los gaseosos alojados en burbujas, el incremento de la presión en el interior de la barra causado por los gases de fisión liberados, así como la densificación debida a la disminución de la porosidad de fabricación son fenómenos que tienen lugar durante el quemado del combustible y modifican el campo de tensiones. Por otro lado, los gases liberados a la atmósfera interna del elemento modifican la conductividad térmica del *gap* pastilla-vaina mientras que los productos sólidos de fisión, particularmente el yodo, por su naturaleza altamente corrosiva, intervienen en la estabilidad mecánica de la vaina. Dependiendo del diseño del combustible (sus parámetros geométricos y los materiales que lo conforman) y debido a las variaciones que sufre la potencia térmica durante la operación del combustible así como a la evolución de los parámetros de este complejo sistema, el *gap* entre la vaina y la pastilla puede llegar a cerrarse total o parcialmente, y permanecer en esa condición o volver a abrirse. Es por esto que el código propone un algoritmo de contacto entre materiales que simula el posible cierre y reapertura del *gap*. Este problema representó uno de los mayores desafíos de la simulación ya que sobre él influyen todas las restantes variables del sistema.

A partir de los datos de entrada del código: parámetros geométricos del sistema, constantes físicas de los materiales que lo componen e historia de potencia de una barra combustible promedio en el reactor, se resuelve, en primer lugar el problema térmico en los tres materiales que forman el dominio de la Figura 1, en el que se ha realizado previamente una

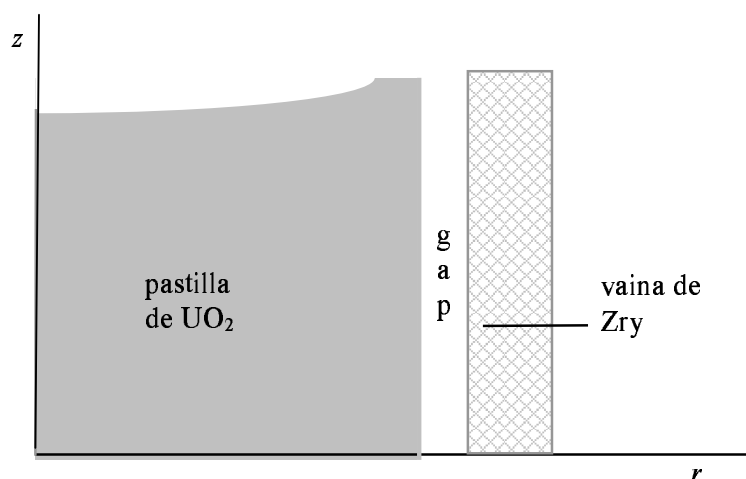


Figura 1. Dominio de resolución de DIONISIO

discretización en elementos finitos. Con la distribución espacial de temperatura en cada paso temporal, se resuelve el problema elastoplástico, el de producción de gases y se evalúan los cambios químicos dentro de cada material. Debido principalmente a la dilatación térmica y a la forma propia de las pastillas, la deformación de las mismas resulta máxima en sus extremos. Es por esto que, en caso de tener lugar el contacto entre la pastilla y la vaina, éste ocurre primero cerca de las tapas. Si, además, la vaina se halla en el rango de deformación plástica, una vez desaparecidas las condiciones de contacto, la misma habrá adquirido una deformación permanente característica, que consiste en arrugas anulares separadas por una distancia igual a la altura de las pastillas. Por el parecido que adquiere la vaina con una caña, este fenómeno se conoce como “efecto bambú”. También se lo compara con la forma de un reloj de arena, por lo que se lo designa alternativamente como “*hourglassing*”.

En la simulación numérica, el contacto se expresa por medio de restricciones que impiden la interpenetración de la pastilla y la vaina. En cada uno de los dominios se utiliza una formulación irreducible en los desplazamientos y multiplicadores de Lagrange para tratar las fuerzas sobre la frontera entre los dominios mencionados. Esta formulación se deriva de la aplicación del principio de los trabajos virtuales, suponiendo una ecuación de continuidad para los desplazamientos en la frontera.

Para simular la interacción mecánica pastilla-vaina se adaptó un algoritmo de carácter general a las condiciones particulares de este sistema, en el que se supuso contacto localizado sin deslizamiento entre la pastilla y la vaina. Se considera que esta hipótesis está bien justificada tanto en los combustibles PWR como en los PHWR. En el primer caso nos remitimos al trabajo de Harriague y Meyer⁸, en el que se analiza un apilamiento de pastillas del tipo PWR y se concluye que el contacto con la vaina presenta deslizamiento sólo en unas pocas pastillas cercanas al tope de la pila. En la mayor parte de la longitud de la barra, las pastillas y la vaina se alargan juntas bajo el efecto de la temperatura. En el caso de los combustibles PHWR el efecto es similar, debido al colapso de la vaina sobre las pastillas al cabo de un corto tiempo de irradiación.

Por otra parte, la suposición de contacto localizado y sin deslizamiento entre pastilla y vaina da lugar a una simplificación considerable del algoritmo de cálculo con la consiguiente disminución del tiempo de cómputo, ya que en cada paso de tiempo (del programa principal) se efectúan varias iteraciones de la subrutina que evalúa el contacto hasta que se alcanza la solución, como se verá más adelante. Además, al estar impedido el deslizamiento entre los dominios, el análisis se realiza sobre una región de altura igual a la de media pastilla, como se muestra en la Figura 1.

Uno de los mecanismos más frecuentes de fisuración de la vaina es el denominado *corrosión bajo tensión*. Este proceso aparece como consecuencia de la ocurrencia simultánea de dos procesos: la acumulación de tensiones en la zona de contacto entre la pastilla y la vaina, junto a la degradación de la vaina provocada por los productos corrosivos acumulados en la punta de una fisura preexistente. El algoritmo controla la condición del contacto a través del tiempo y calcula la tensión generada en la vaina. Evalúa, asimismo, la composición de la atmósfera interna de la barra combustible para predecir el estado de la superficie interna de la vaina y decide si las condiciones favorecen o no la propagación de una fisura. La hipótesis de contacto fijo permite simular este aspecto de manera realista.

Dado que los modelos empleados son bidimensionales, pueden emplearse para simular problemas con simetría plana y de revolución. Los algoritmos de cálculo se pusieron a prueba, comparando sus resultados con los obtenidos en forma analítica en problemas especialmente elegidos para tal fin^{9,10,11}. Tanto las constantes como la mayoría de los modelos utilizados en DIONISIO fueron tomados de la literatura^{12,13}.

MODELADO NUMÉRICO

Algoritmo de resolución del problema de contacto

El método tradicional para tratar el problema de contacto mediante elementos finitos estuvo basado en la estrategia de considerar dos superficies fuente/receptor, en donde los nodos de una superficie deformable, la fuente, penetran la superficie receptora. Este método si bien ha tenido buenos resultados en problemas de pequeñas deformaciones, presenta una degradación en la convergencia en el caso de grandes deformaciones. Otra particularidad de los métodos que emplean la formulación nodo-superficie es el tratamiento deficiente de los contornos poco definidos o rugosos, debiéndose proyectar la posición del nodo sobre el dominio mallado o utilizar una malla extremadamente fina. Ambos problemas generan un mal comportamiento en la convergencia. En la pasada década se han desarrollado métodos que sortean todas estas deficiencias, como el elemento tipo "mortar"^{14,15,16} que se introdujo originalmente como un método para tratar problemas de descomposición de dominios. Este método permite trabajar con grandes deformaciones y utiliza la condición de continuidad en las interfaces en forma integral, en vez de utilizar un método de restricciones locales en los nodos.

Sin embargo, debido a la particularidad de nuestro problema, definido como de pequeñas deformaciones, con contacto sin deslizamiento por la forma en que el combustible nuclear y la vaina interaccionan, y debido a la necesidad de que el modelo de contacto se adapte a DIONISIO sin introducir cambios que perturben el funcionamiento de conjunto, preferimos tomar un modelo del tipo fuente/receptor y adaptarlo a nuestras necesidades particulares.

El modelo, tomado del trabajo de Bathe y col.¹⁷, realiza un tratamiento general del problema de interacción mecánica contemplando la posibilidad de contacto con o sin deslizamiento y separación entre los cuerpos involucrados, con simetría plana o axial. En dicho trabajo se supone que el contacto ocurre entre un nodo de la fuente y un lado del receptor. Para el presente trabajo se adoptó ese algoritmo pero suponiendo que la condición de contacto es siempre sin deslizamiento entre los cuerpos y se lo modificó para considerar únicamente contacto nodo a nodo. El algoritmo presenta algunas características particulares: a) El potencial total de las fuerzas de contacto se incluye en la formulación variacional para reforzar las compatibilidades geométricas a lo largo de la superficie de contacto; b) En la región de contacto, las tensiones de superficie se evalúan a partir de las fuerzas aplicadas, las fuerzas nodales equivalentes (en el sentido de los trabajos virtuales); c) Esas tensiones de superficie se utilizan en la decisión de cuándo un nodo permanecerá en contacto fijo o se separará del receptor; d) El número de ecuaciones que determinan las condiciones de contacto se ajusta dinámicamente a lo largo de cada iteración.

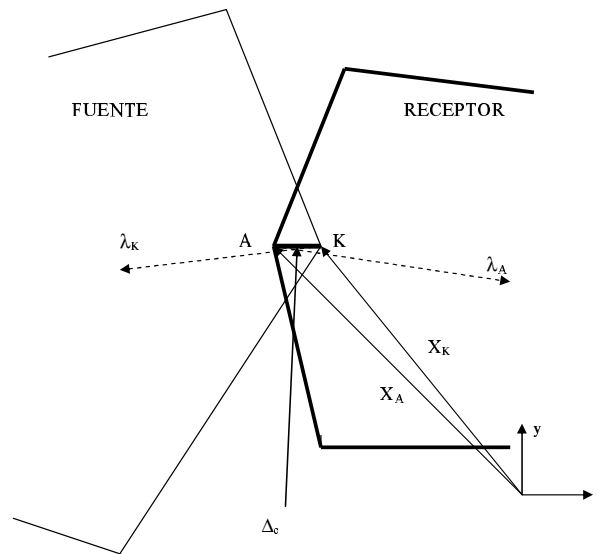


Figura 2. Condición de contacto entre el receptor y la fuente: esquema de los nodos y parámetros involucrados

Cuando ocurre el contacto entre las dos superficies, se obtiene una configuración como la que se muestra en la Figura 2, donde un nodo K de la fuente penetra la superficie del receptor. Para fijar ideas, digamos que esto ocurre en la iteración $(i - 1)$ en una condición previa de ausencia de fuerza de contacto. En la iteración i el algoritmo evalúa la fuerza necesaria para eliminar la superposición entre los cuerpos. Dicha fuerza actúa con igual valor y sentidos opuestos en los nodos de contacto de la fuente y del receptor. Como resultado del contacto, en la iteración $(i + 1)$ las superficies han adquirido una forma diferente, se encuentran nuevamente separadas y el incremento de la fuerza entre ellas es nulo. Los parámetros involucrados en el algoritmo son:

$X_A; X_K$ = vectores posición de los nodos A y K .

Δ_c = vector superposición.

$n_s; n_r$ = vectores unitarios a lo largo de las direcciones (s, r) del sistema isoparamétrico de coordenadas a lo largo del receptor.

λ_K = fuerza sobre el nodo K debido al contacto con el nodo A .

λ_A = fuerza sobre el nodo A debido al contacto con el nodo K .

$\lambda_A = -\lambda_K$

Para la formulación de este problema se adoptó la notación incremental de K.J. Bathe¹⁸. La condición de contacto se incorpora agregando al potencial variacional usual, Π , un término que representa el potencial total de las fuerzas de contacto con las restricciones de desplazamientos compatibles en la superficie. El funcional es:

$$\Pi_c = \Pi - \sum_K W_K \quad (1)$$

El segundo término se interpreta como la contribución del multiplicador de Lagrange para imponer la condición de contorno.

La malla de elementos finitos puede, en el comienzo, elegirse de modo que los nodos de la fuente y del receptor estén alineados y, dada la hipótesis adoptada de imposibilidad de deslizamiento entre ambas superficies, esta condición se mantiene a lo largo de la evolución temporal del sistema. Esto da lugar a una simplificación importante del algoritmo ya que es suficiente con analizar el contacto nodo-nodo.

Ecuación en elementos finitos

La suposición de potencial estacionario, con las condiciones de contacto incorporadas, conduce a una ecuación incremental en elementos finitos igualada a cero. La ecuación, después de aplicar los procedimientos usuales, será

$$\left(\begin{bmatrix} K^{i-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + [K_c^{i-1}] \right) \begin{bmatrix} \Delta U^i \\ \Delta \lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F^{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_c^{i-1} \\ \Delta_c^{i-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde

$\Delta U^{(i)}$ = vector incremento de los desplazamientos en la iteración i .

$\Delta \lambda^{(i)}$ = vector incremento de las fuerzas de contacto en la iteración i .

$K^{(i-1)}$ = matriz de rigidez usual en la iteración $i-1$.

$K_c^{(i-1)}$ = matriz de rigidez de contacto en la iteración $i-1$.

$F^{(i-1)}$ = vector de fuerzas nodales equivalentes en la iteración $i-1$.

R = vector de fuerzas externas.

$R_c^{(i-1)}$ = vector de las fuerzas de contacto en la iteración $i-1$.

$\Delta_c^{(i-1)}$ = vector de superposición en la iteración $i-1$.

En la superficie de contacto, cada nodo K del cuerpo fuente, y su correspondiente nodo A en el receptor, contribuye a formar la matriz $K_c^{(i-1)}$ y los vectores $R_c^{(i-1)}$ y $\Delta_c^{(i-1)}$ con dos componentes, una por cada dirección coordenada, que aquí se indicaron con x e y .

$$K_c^{(i-1)} = \begin{bmatrix} & & \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ 0 & & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{simétrica} & & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta_c^{(i-1)} = \begin{bmatrix} \Delta_{K_x}^{(i-1)} \\ \Delta_{K_y}^{(i-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_c^{(i-1)} = \begin{bmatrix} \lambda_{K_x}^{(i-1)} \\ \lambda_{K_y}^{(i-1)} \\ -\lambda_{K_x}^{(i-1)} \\ -\lambda_{K_y}^{(i-1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Después de la iteración $(i-1)$ se conocen los desplazamientos nodales $U^{(i-1)}$ y el vector incremento de fuerzas nodales $\Delta R^{(i-1)} = F^{(i-1)} - R$. Para aquellos nodos que no pertenecen a la superficie de contacto, este vector es igual a menos el balance de fuerzas en la iteración $(i-1)$. Para los nodos en contacto este vector contiene a la fuerza $R_c^{(i-1)}$.

A partir del vector $\Delta R^{(i-1)}$ se calculan las tensiones normales y tangenciales sobre cada nodo involucrado. De allí se obtiene el incremento en la fuerza de contacto, λ_K , y se determina, en general, la condición de separación o soldadura entre los materiales^{11,17}.

El algoritmo se testeó con problemas de contacto que poseen solución analítica, como el problema de Hertz en su formulación bidimensional tanto en simetría axial como en deformación plana. Los resultados de ambas simulaciones fueron adecuados al compararse con la solución analítica del problema^{17,19}.

CONTACTO PASTILLA-VAINA BAJO IRRADIACIÓN

El principal inconveniente que genera la inclusión del algoritmo de contacto en DIONISIO proviene del carácter evolutivo del problema que no permite predecir la cantidad de nodos que van a estar en contacto en un dado paso temporal, por lo que en cada etapa de resolución se debe construir el sistema de ecuaciones con el número de incógnitas agregadas por el contacto. En una historia de potencia general pueden darse tres situaciones entre dos pasos sucesivos. 1) Situación de No Contacto-No Contacto: el sistema consiste en dos materiales separados por un *gap*. Matemáticamente, esto proporciona una matriz cuadrada de dos bloques no conectados. 2) Situación de No Contacto-Contacto: el contacto se produce durante el paso de tiempo en proceso. Esto significa que el sistema debe determinar cuantos pares de nodos se incorporan a la situación de contacto para luego calcular el número de filas y columnas con las que se amplía la matriz del sistema. 3) Situación de Contacto-Contacto: aquí ambos dominios en contacto aumentan o disminuyen la cantidad de nodos involucrados con lo cual el sistema de ecuaciones debe adecuarse dinámicamente. En particular, involucra la situación de Contacto-No Contacto en la que, luego del paso de tiempo considerado, se tiene dos materiales separados (nuevamente) por un *gap*.

Las condiciones del contacto varían durante la permanencia de la barra dentro del reactor, y resultan ser muy sensibles a las variaciones bruscas de potencia (rampas). Durante una rampa ascendente, tiene lugar un aumento de la temperatura del sistema que provoca dilatación térmica e hinchado y puede conducir a una situación de nuevo contacto o al aumento de la cantidad de nodos que contactan.

Experimentos MOX

En el marco del programa de óxidos mixtos llevado a cabo en la CNEA²⁰, se construyeron barras combustibles prototipos con pastillas de $(U,Pu)O_2$, que fueron irradiadas en el reactor HFR-PETTEN (Holanda). Dos de las barras que componían el experimento, identificadas como A.1.2 y A.1.3, fueron sometidas a una historia de potencia similar, hasta alcanzar un quemado de aproximadamente 15 MWd/KgU durante 531 días efectivos de irradiación. Posteriormente, a la barra A.1.3 se la sometió a una una fase final de grandes rampas de potencia altamente exigentes. Durante esta última etapa se detectó un incremento en la actividad del circuito primario por lo que el experimento tuvo que ser interrumpido. Una inspección visual detectó un pequeño agujero circular en la vaina, similar a los producidos por fallas debidas a corrosión bajo tensiones (Stress Corrosion Cracking- SCC). Se observaron, asimismo, deformaciones tipo bambú sobre la vaina, medidas por la técnica de corrientes de Eddy, como puede observarse en la Figura 3.

Mediante el código DIONISIO se estimó la deformación final de la vaina así como el ancho del *gap* a fin de vida en cada barra. En la Figura 4 se presenta la evolución del radio de la vaina en las secciones transversales que corresponden al plano central y al extremo de una pastilla, respectivamente. También se representa la diferencia entre ambos, para comparar con el resultado medido experimentalmente a fin de vida para ambas barras. Los resultados numéricos coinciden aceptablemente con los medidos. Además, se observa que la barra que fue sometida a la rampa final (A.1.3.) sufrió una deformación marcadamente mayor que la barra que se sometió sólo a una potencia estacionaria.

La Figura 5 presenta la evolución de los radios interno de la pastilla y externo de la vaina junto a la tensión tangencial (*hoop stress*). Puede apreciarse el cambio de signo de la misma al ocurrir el contacto pastilla-vaina, lo que indica la aparición de una tensión de tracción. Su importancia reside en que cuando su valor supera cierto umbral, se produce la propagación de fisuras preexistentes en la vaina. El *gap* final en el experimento fue estimado en 8 a 12 μm , que coincide con el obtenido por el código DIONISIO.

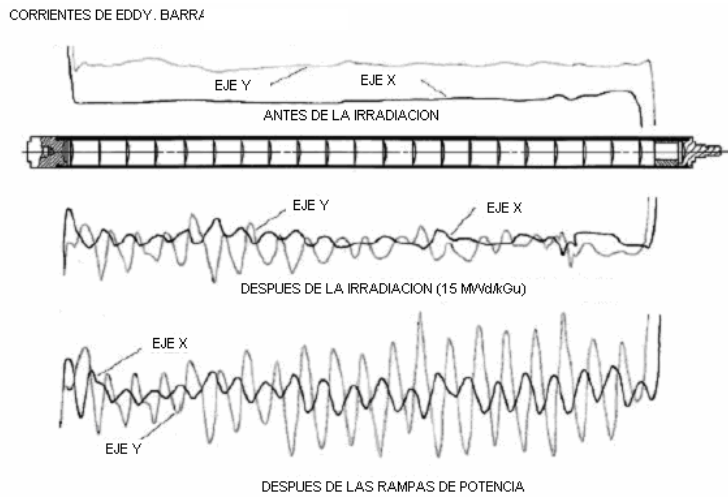


Figura 3. Deformaciones de la barra A.1.3 medidas por la técnica de corrientes de Eddy

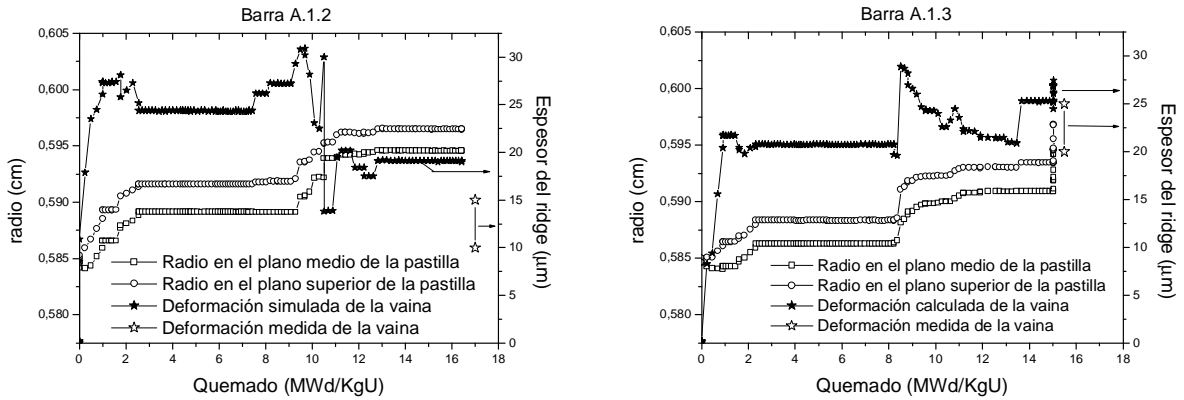


Figura 4. Evolución de los radios de la vaina en el medio y el extremo de una pastilla. La diferencia entre ambos se compara con los valores medidos en los experimentos A.1.2 y A.1.3

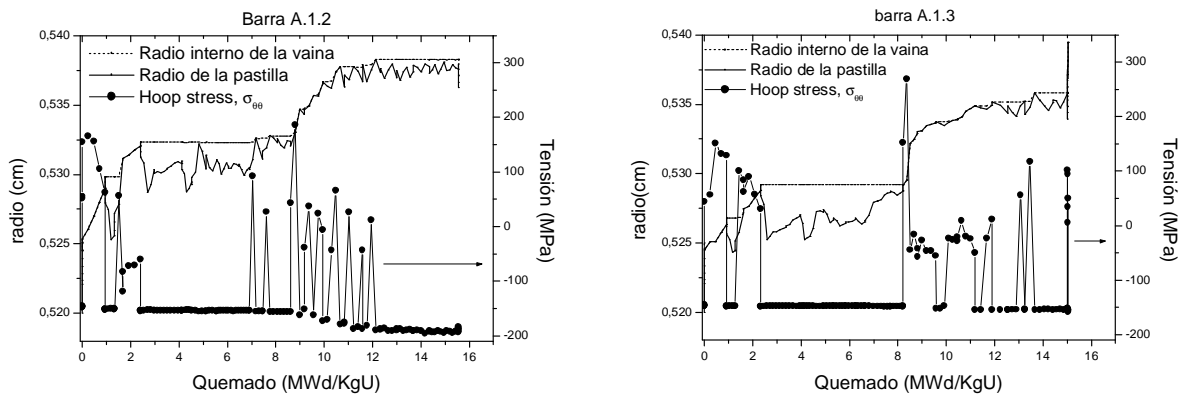


Figura 5. Evolución de las superficies de contacto y tensión tangencial para las barras A.1.2 y A.1.3

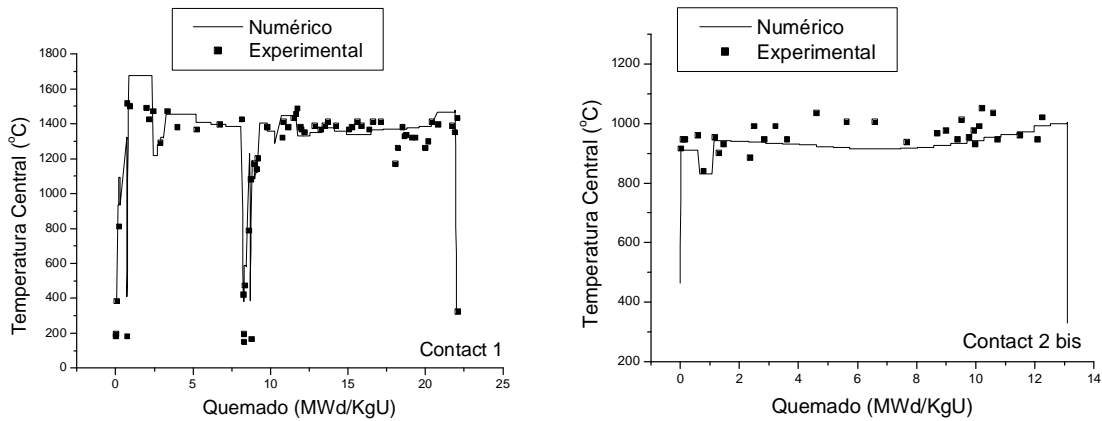


Figura 6. Evolución con el quemado de la temperatura central de los experimentos CONTACT

Experimentos CONTACT

Los experimentos CONTACT^{21,22,23} fueron diseñados para analizar el comportamiento de combustibles tipo PWR bajo condiciones de exigencia mecánica que favorecen el contacto pastilla-vaina en diversas situaciones. Las barras fueron irradiadas en un dispositivo (*loop*) que simula un reactor de agua presurizada. Dicho dispositivo es móvil, pudiendo mantener una potencia más o menos constante durante todo el experimento. CONTACT 1 se irradió a una potencia cercana a los 400 W/cm hasta alcanzar un quemado de aproximadamente 22 MWd/kgU con una presión interna de 1 MPa de helio. CONTACT 2 se irradió con potencia cercana a los 250 W/cm y una presión de helio se entre 0.1-0.2 MPa. Esta barra se extrajo tempranamente (5.5 MWd/kgU de quemado) debido a una falla en los sistemas de adquisición de datos y se reemplazó por otra de similares características, denominada CONTACT 2bis, que se mantuvo bajo irradiación hasta alcanzar los 12.4 MWd/kgU.

Se midieron las deformaciones radiales de la vaina, la presión interior, los gases liberados por tipo e isótopo y la temperatura central. Dichos resultados experimentales, además del análisis post irradiación de la estructura interna del combustible se comparan con los resultados numéricos obtenidos con DIONISIO.

En la Figura 6 se muestra la temperatura en el centro de la pastilla medida para distintas etapas del quemado de la misma y su comparación con las predichas por DIONISIO. Ésta es una forma alternativa de chequear el correcto funcionamiento del algoritmo de contacto ya que en los momentos en que éste ocurre, la temperatura del sistema desciende debido a la mejor conducción térmica de las superficies.

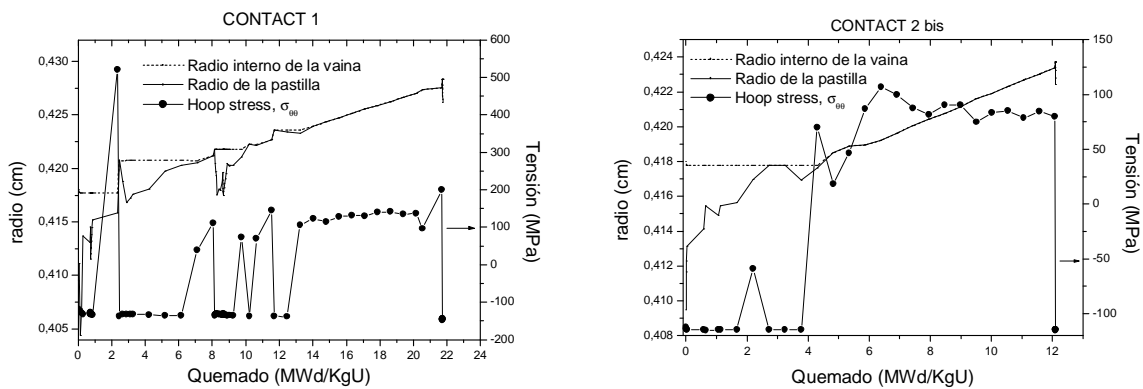


Figura 7. Evolución de las superficies de contacto y tensión tangente para los experimentos CONTACT 1 y 2 bis

La Figura 7 presenta, para ambos experimentos de la serie, la evolución del radio interno de la vaina, el de la pastilla y la tensión en la dirección tangencial (hoop stress). Puede apreciarse que la misma adopta valores positivos altos al producirse el contacto.

CONCLUSIONES

El fenómeno de PCMI es, sin duda, el más difícil de tratar en cualquier código de simulación de quemado de combustible, no sólo por la complejidad numérica que surge del contacto localizado e intermitente entre dos superficies sino también por su influencia sobre los demás fenómenos fisicoquímicos que suceden tanto en la pastilla, como en la vaina y en el *gap*. En particular, el tratamiento térmico de este último resulta condicionante para el cálculo²⁴ y depende a su vez del contacto entre las superficies involucradas.

El algoritmo incluido en el código DIONISIO ha sido empleado para simular diversos experimentos y ejemplos de interacción pastilla-vaina para los que se cuenta con resultados medidos o calculados por otros autores^{25,26,27}. Un punto a destacar del modelo que se presenta aquí es que no sólo provee el estado de tensiones completo de la vaina, sino que además permite medir la variación temporal de las tensiones. Este dato, junto al monitoreo de las condiciones de la atmósfera interna del elemento, nos permite incluir un modelo de crecimiento de fisuras en la vaina en condiciones de contacto intermitente, trabajo que se presentará próximamente en forma separada.

Un código de las características de DIONISIO requiere que aproximadamente cuarenta modelos de diferentes problemas físico-químicos se acoplen para funcionar armónicamente^{28,29}, reproduciendo condiciones extremas y extendidas en el tiempo. La evolución de un elemento combustible dentro de un reactor en operación es un problema complejo. No obstante, el algoritmo de contacto, si bien simple en comparación con modelos más sofisticados que abundan en la literatura del tema, nos ha permitido reproducir con buena fidelidad los resultados de diversos experimentos.

REFERENCIAS

- 1 *Report of the Co-ordinated Research Programme on Fuel Modeling at Extended Burnup - FUMEX*, IAEA-TECDOC-998, (1998).
- 2 A. Soba, A. Denis, "Finite element simulation of the thermoelastic behavior of a fuel rod", *Proceedings of the Technical Committee Meeting on Fuel chemistry and pellet-clad interaction related to high burnup fuel*, IAEA-TECDOC-1179, pp. 75-85, (2000).
- 3 Y. Fung, "*Foundations of Solid Mechanics*", Prentice Hall, (1965).
- 4 V. Feodosyev, "*Strength of Materials*", Mir Publishers, (1968).
- 5 O. Zienkiewicz y R. Taylor, "*El método de los elementos finitos*", 4ª Edición, CINME, Barcelona, España (1994).
- 6 L. Landau y E. Lifshitz, "*Theory of elasticity*", Pergamon Press, (1959).
- 7 S. Timoshenko, "*Theory of elasticity*", McGraw Hill, (1951).
- 8 S. Harriague y J. Mayer, "A study of friction and axial effects in pellet-clad mechanical interaction", CNEA-NT 14/82, (1982).
- 9 F. Gallego y J. Anza, "Un modelo de elementos finitos mixtos para la resolución del problema del contacto elástico", *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, Vol. 5, N° 2, pp. 163-184, (1989).
- 10 U. Sellgren, S. Björklund y S. Andersson, "A finite element-based model of normal contact between rough surfaces", *Wear*, Vol. 254, pp. 1180-1188, (2003).

- 11 J. Zurita, M. Doblare y L. García, “Determinación de tensiones de contacto mediante el M.E.C. en problemas multicuerpo con simetría axial”, *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, Vol. **9**, N° 1, pp. 15-34, (1993).
- 12 D. Olander, “*Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements*”, Technical Information Center, USDOE, (1976).
- 13 “Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Behavior (MATPRO)”, version 11, NUREG/CR-0497, TREE-1280 (1979).
- 14 V. Chawlas, T.A. Laursen, “Energy consistent algorithms for frictional contact problems”, *Int. J. Numer. Meth. Engng.* Vol. **42**, pp. 799-827 (1998).
- 15 B. Yang, T.A. Laursen, X. Meng, “Two dimensional mortar contact methods for large deformation frictional sliding”, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. **62**, pp. 1183-1225, (2005).
- 16 V.G. Oances, T.A. Laursen, “A Finite element formulation of thermomechanical rate-dependent frictional sliding”, *Int. J. Numer. Meth. Engng.* Vol. **40**, pp. 4275-4311, (1997).
- 17 K.J. Bathe y A. Chaudhary, *A solution method for planar and axisymmetric contact problems*, *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. **21**, pp. 65-88, (1985).
- 18 K.J. Bathe, *Finite Element Procedures*, PRENTICE HALL, (1996).
- 19 D. Maugis, *Contact, adhesion and rupture of elastic solids*, Springer-Verlag, (2000).
- 20 A.C. Marino, E. Pérez, P. Adelfang, *Argentine Nuclear Fuels MOX irradiated in the Petten Reactor. Experiment analysis with the BACO code*. Water Reactor Fuel Element Modelling at High Burnup and Experimental Support. Windermere, England, 19-23 September, (1994).
- 21 J.A. Turnbull, “Database for contact experiments irradiated at CEA”, IFPE/CONTACT Rev.1., Grenoble, Jan,(2003).
- 22 M. Bruet, J. Dodalier, P. Melin y M. Pointud, “CONTACT 1 and 2 Experiments: Behaviour of PWR Fuel Rods up to 15000 MWd/TU”, *IAEA Specialists’ Meeting on Water Reactor Fuel Elements Performance Computer Modelling*, Blackpool, UK, 17-21 March, (1980).
- 23 M. Charles y C. Lemaignan, “Fuel Performance under Normal PWR Conditions: A Review of Relevant Experimental Results and Models”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. **188**, pp. 96-103, (1992).
- 24 A. Soba y A. Denis, “Simulation with DIONISIO 1.0 of Thermal and Mechanical Pellet-Cladding Interaction in Nuclear Fuel Rods”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. **374**, pp. 32-43, (2008).
- 25 J. Mathews, *The quantitative description of deformation and stress in cylindrical fast reactor fuel pins*, in *Advances in Nuclear Science and Technology*, Vol. **6**, Academic Press, (1972),
- 26 L. Caillot, B. Linet, C. Lemaignan, Pellet clad interaction in PWR fuel. Analytical irradiation experiment and finite element modelling, *Proc. SMIRT 12*, Stuttgart, Germany, (1993).
- 27 G. Zhou, J.E. Lindback, H.C. Schutte, L.O. Jernkvist, A.R. Massih, *Modelling of Pellet-Clad Interaction during Power ramps*,(2004).
- 28 A. Denis y A. Soba, “Simulation of Pellet-Cladding Thermomechanical Interaction and Fission Gas Release”, *Technical Committee Meeting on Nuclear Fuel Behaviour Modelling at High Burnup and its Experimental Support*, Windermere, 19-23 June, (2000).
- 29 A. Denis y A. Soba, “Simulation of pellet-cladding thermomechanical interaction and fission gas release”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. **223**, pp. 211-229, (2003).