

EVALUACIÓN TERMOHIDRÁULICA DE PROTOTIPOS DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES CON BARRAS CROMADAS



ANTONIO RAFAEL ESPEJO LOZANO

Ingeniero del Área Termo-Hidráulica
ENUSA

INTRODUCCIÓN

El término ATF (Advanced Technology Fuel) designa un conjunto de nuevas tecnologías de combustible que tienen el potencial de aumentar la seguridad de las plantas nucleares gracias a sus mejores prestaciones en operación normal, transitorios y accidentes. Dentro de estas tecnologías, una de las más prometedoras a corto plazo para los reactores de agua ligera (LWR) y en particular para los de agua a presión (PWR) es la introducción de combustibles con barras cromadas. Estos combustibles solo difieren de los actuales en la aplicación de una minúscula capa de cromo en la cara exterior de las barras combustibles para mejorar su comportamiento frente a condiciones térmicas adversas. Esto implica una modificación mínima que supone una importante ventaja de cara a su evaluación y licenciamiento frente a otras opciones con cambios más radicales. No obstante, esto no significa que esos procesos de evaluación y licenciamiento no sean rigurosos y minuciosos. En particular, antes de consolidar el producto como una opción comercial, es necesario, además de los pertinentes análisis teóricos y ensayos específicos, la confirmación de su buen comportamiento mediante la introducción de elementos de prueba en reactores comerciales durante todo el ciclo de vida del combustible. Ello exige un análisis adicional previo a la carga de estos elementos de prueba que asegure que, con sus configuraciones específicas, son tan seguros para la operación de la planta como lo son los diseños de combustible actualmente licenciados. Este artículo presenta los resultados de este análisis desde el punto de vista termo-

hidráulico obtenidos mediante dos procedimientos diferentes y, en cierta forma, complementarios.

DESCRIPCIÓN DE LAS BARRAS CROMADAS

Las barras cromadas difieren de las estándar únicamente en su revestimiento exterior por una fina capa de cromo de unas decenas de micras de espesor. Esta capa confiere a las barras una mayor dureza superficial y una mayor resistencia a la corrosión, entre otras ventajas.

En última instancia, las barras cromadas sustituirán completamente a las barras estándar. Sin embargo, previamente es necesario probar en un reactor elementos con solo un número limitado de barras cromadas para demostrar su operabilidad y minimizar los posibles riesgos indeterminados no previstos inicialmente. Estos elementos de prueba difieren tanto de los estándar como de los constituidos al completo por barras cromadas y, por ello, requieren un análisis específico antes de poder ser cargados en el reactor.

En la actualidad hay varios programas en marcha de desarrollo y pruebas de combustible con barras cromadas. En particular, Westinghouse ya tiene elementos de prueba con barras cromadas cargados en varias plantas y las inspecciones realizadas muestran un excelente comportamiento de las barras dentro del reactor, ya que su aspecto tras la irradiación es prácticamente indistinguible del que tenían en el combustible fresco.

BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO TERMOHIDRÁULICO

Los elementos de prueba con barras cromadas han de cumplir con todos los criterios de diseño que se le exigen al combustible para poder ser cargado en el reactor. En particular, el objetivo general del área de Diseño Termo-Hidráulico es garantizar una adecuada distribución de la transferencia de calor de las barras combustibles al refrigerante, a fin de obtener el rendimiento requerido cumpliendo los criterios de seguridad establecidos tanto para el sistema principal de refrigeración del reactor como para los sistemas de refrigeración de emergencia, de modo que siempre se garantice el control del reactor y de la radiación potencialmente emitida.

Los conceptos fundamentales en relación a esto son el límite de ebullición nucleada, DNB (*Departure from Nucleate Boiling*), el flujo de calor crítico, CHF (*Critical Heat Flux*) y el cociente del límite de ebullición nucleada, DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*). Si se supera el DNB, la superficie exterior de la barra combustible se ve sometida a unas condiciones muy adversas que, bajo una hipótesis habitual en los análisis de seguridad, provocarían su rotura. Este límite se supera si el flujo térmico local supera el CHF y el parámetro que permite cuantificar el riesgo de llegar a ese límite es el DNBR.

LÍMITE DE EBULLICIÓN NUCLEADA EN COMBUSTIBLES DE PRUEBA CON BARRAS CROMADAS

Efectos de las características superficiales de las barras cromadas

Los mecanismos subyacentes al fenómeno del DNB no pueden ser reproducidos mediante técnicas analíticas basadas únicamente en primeros principios. La literatura recoge un importante número de publicaciones que tratan de establecer una conexión entre el flujo crítico y las características superficiales del material de la barra combustible que, de lograrse, constituiría un avance importante para abordar el fenómeno. Entre estos estudios se pueden mencionar como ejemplos los de [1] y [2], de los que se concluye que las características superficiales que pueden afectar más directamente al flujo crítico son la porosidad, la capilaridad o esponjosidad, la humectabilidad, la rugosidad y la rehumectabilidad. Sin embargo, no se pueden extraer de estos estudios conclusiones que sean aplicables a las barras cromadas en las condiciones de un PWR típico. Además, las propiedades superficiales identificadas serían por lo general difíciles de medir.

Por todo ello, para abordar la fenomenología del DNB es necesario construir modelos empíricos basados en ensayos controlados con los que establecer correlaciones que den el CHF en función de los parámetros locales del refrigerante. Estos ensayos han de reproducir de la forma más fiel posible las condiciones reales que se tendrían dentro del reactor tanto en lo que respecta a geometría como a condiciones de operación.

Aún no se dispone de ensayos completos de este tipo en los que se reproduzcan todas las características relevantes del combustible con barras cromadas. No obstante,

Westinghouse dispone de un lazo de ensayo simplificado en el que se puede probar una sección de barra y comparar los valores de flujo crítico obtenidos con distintos tipos de barras. Un ejemplo de este tipo de estudios se da en [3]. Ahí se comparan los flujos críticos obtenidos con barras cromadas y sin cromar y los resultados no evidencian ningún efecto adverso del cromado. Con ello se garantiza en principio que las correlaciones de flujo crítico aplicables a las barras estándar serían también aplicables a las barras cromadas. Además, los ensayos han demostrado que las barras cromadas, a diferencia de las estándar, mantienen su integridad durante un tiempo significativo aun en condiciones de DNB, lo que permitiría plantear una relajación de la hipótesis subyacente al criterio de diseño de que las barras en DNB fallarían.

Efectos de los cambios en geometría y resistencia hidráulica debidos a las barras cromadas

La introducción de un número limitado de barras cromadas en un elemento combustible hace que se modifique ligeramente la geometría de la región del refrigerante en contacto con ellas debido al mayor diámetro exterior de estas. La **Figura 1** representa de forma simplificada y esquemática esta alteración geométrica. En ella se puede ver que la presencia de una barra cromada implica variaciones geométricas en 4 de las regiones del refrigerante que usualmente se denominan con el término subcanal. La máxima alteración se tiene en el subcanal en el que la barra cromada contacta con dos resortes de la rejilla, la menor y prácticamente nula, en el subcanal en el que el contacto con la rejilla es con dos resaltes, y en los dos subcanales en los que el contacto es con un resorte y un resalte, la alteración es intermedia.

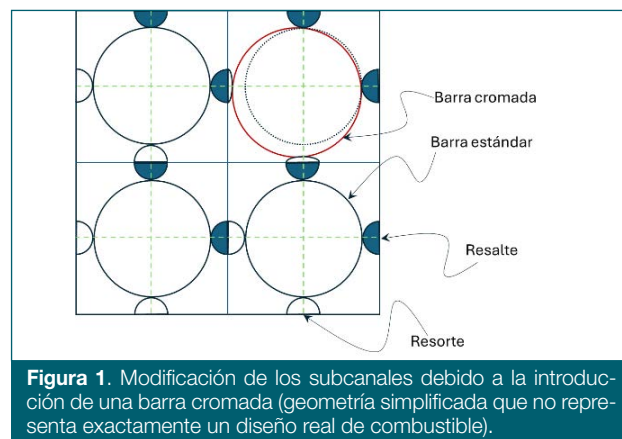


Figura 1. Modificación de los subcanales debido a la introducción de una barra cromada (geometría simplificada que no representa exactamente un diseño real de combustible).

Adicionalmente, las barras cromadas pueden alterar la resistencia hidráulica en los subcanales debido a cambios en la fricción, máxime si hay cambios en rugosidad, o en las resistencias hidráulicas de las rejillas en las celdas que fijan las barras.

Estimación mediante cálculos de código de subcanal

El impacto de la introducción de un número limitado de barras cromadas en elementos de prueba se ha analizado en primer lugar utilizando un modelo típico utilizado en diseño para el cálculo de DNBR con un código de subcanal. En este modelo se han introducido los cambios geométricos inducidos por la presencia de una barra cromada en la zona más caliente del

núcleo. Para introducir en detalle estas variaciones geométricas se han considerado las dimensiones que se muestran en la **Figura 2**, a partir de las que se determinan para cada uno de los subcanales afectados las áreas de paso para el refrigerante, los perímetros mojado y calentado y el área de contacto lateral entre estos subcanales.

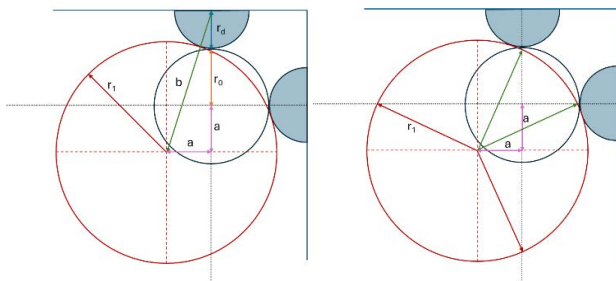


Figura 2. Parametrización de los cambios geométricos en los subcanales debido a la introducción de una barra cromada. La figura está distorsionada para poder mostrar mejor los cambios geométricos y la geometría se ha simplificado para no mostrar detalles del diseño real sujetos a los derechos de propiedad.

En unas condiciones típicas para el cálculo del DNBR y para un subcanal con una barra cromada apoyada en dos resortes de la rejilla, se obtiene que los efectos puramente geométricos resultan en una reducción del mínimo DNBR con respecto al caso con barras estándar de un 0.2% y de un 0.54% si se consideran también los efectos de las resistencias hidráulicas.

Estos cambios en DNBR son relativamente apreciables, pero no constituyen un aumento significativo de riesgo, por lo que se podría concluir que es seguro desde el punto de vista termo-hidráulico introducir en las centrales el prototipo de prueba con un número limitado de barras cromadas. Sin embargo, la respuesta del código a variaciones muy pequeñas en algunos parámetros de entrada podría no representar propiamente la respuesta fenomenológica real debido a la interferencia de efectos numéricos derivados de la complejidad de los cálculos que podrían manifestarse a esas mismas pequeñas escalas. Por ello, siguiendo la aparentemente paradójica máxima de John Archibald Wheeler que de forma muy sagaz recomienda no hacer cálculos sin conocer previamente el resultado, el estudio se completa con una serie de estimaciones mediante modelos simplificados que simulan los aspectos fundamentales de la fenomenología y que permitirán calibrar la respuesta del modelo de diseño a pequeñas variaciones sobre las condiciones de referencia.

Estimación mediante modelos simplificados

Generalmente, la dependencia más fuerte en las correlaciones de flujo crítico con respecto a los parámetros locales del fluido se da para la calidad estática (o termodinámica) y para la velocidad másica del refrigerante. Para el caso en el que solo haya una barra cromada en un subcanal, e ignorando posibles cambios en las resistencias hidráulicas, la velocidad másica del refrigerante sería la misma que en los subcanales vecinos del mismo tipo, ya que ello resulta en el equilibrio en presiones al que tiende el fluido de forma natural. Sin embargo, los subcanales con barras cromadas serían más estrechos, de modo que el caudal a través de ellos sería menor y como consecuencia habría un incremento de calidad con respecto

al subcanal equivalente con barras estándar al transmitirse la misma energía a una cantidad menor de fluido.

Es habitual que la dependencia del flujo crítico con respecto a la calidad venga dada principalmente por un término proporcional al producto de esta por la velocidad másica. Asumiendo esto, se puede hacer una estimación del impacto en DNBR de los cambios en calidad debidos a los cambios geométricos debidos a las barras cromadas. Para ello se obtiene en primer lugar el impacto en calidad debido a un cambio en caudal para un canal cerrado recurriendo a la siguiente fórmula:

Dónde Q es el calor transmitido al fluido por unidad de tiempo,

$$Q = GA(h - h_0) \quad (1)$$

G la velocidad másica, A el área de paso y h_0 la entalpía específica en el principio del conducto.

De la ecuación (1) se obtiene que, manteniendo G y Q constantes, una reducción en ΔA de A implica un incremento de la calidad estática, x, dado por:

Siendo x_0 la calidad estática al principio del canal.

$$\Delta x = (x_0 - x) \frac{\Delta A}{A} \quad (2)$$

Si se introduce este cambio en el término correspondiente de la correlación de flujo crítico se obtiene una reducción del mismo de aproximadamente un 0.55% para un subcanal con una barra cromada apoyada en dos resortes de la rejilla.

Sin embargo, esto no sería representativo del caso de los subcanales abiertos y por ello la estimación obtenida ha de corregirse para tener en cuenta sobre todo el intercambio turbulento de energía con los subcanales adyacentes. Para determinar esta corrección se puede recurrir a una versión algo más complicada de la fórmula anterior considerando un modelo simple de dos canales que representen respectivamente al subcanal más caliente y a su entorno y entre los que se permite el intercambio turbulento de energía. La **Figura 3** compara los modelos de canal cerrado y de canal abierto que se consideran.

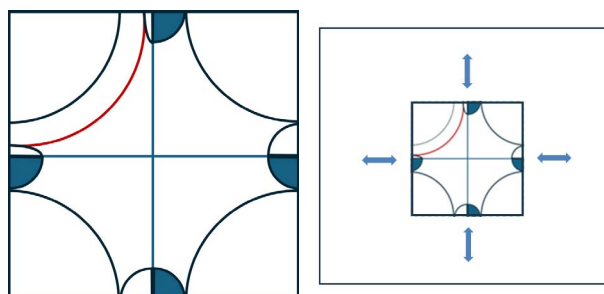


Figura 3. Modelos de subcanal cerrado con barra cromada, izquierda, y abierto, derecha. En este último, las flechas indican las aberturas para el intercambio entre canales.

En el modelo de canal abierto, las ecuaciones respectivas para ambos subcanales vienen dadas por:

$$G_i A_i \Delta h_i \pm t_{turb} = Q_i \quad (3)$$

Donde ahora Δh es el incremento de entalpía en el canal, t_{turb} la entalpía intercambiada a lo largo de los dos canales por la mezcla turbulenta, que adopta un signo + o - dependiendo de la convención para el flujo positivo de energía entre canales, y donde el índice i toma los valores 1 y 2 para referirse respectivamente al subcanal caliente y al de entorno.

El término de mezcla turbulenta está caracterizado por un flujo másico lateral, w_l , que es nulo en promedio pero que transporta fluido con la entalpía del canal más caliente a su entorno reemplazándolo con fluido a la entalpía más baja de este último. Esto provoca un flujo de entalpía que se suele suponer directamente proporcional a la diferencia de entalpía entre los subcanales, a G e inversamente proporcional a la distancia relativa entre los dos canales.

Se plantean entonces estas ecuaciones para comparar el incremento de entalpía en el subcanal abierto, $\Delta h_{1,b}$, con respecto al que experimentaría el subcanal cerrado, $\Delta h_{1,a}$, obteniéndose:

$$\frac{\Delta h_{1,b}}{\Delta h_{1,a}} = \frac{A_i}{A_i + 0.5\lambda R \frac{\Delta y_h}{\Delta y_e}} \quad (4)$$

Aquí λ es la constante de proporcionalidad entre el flujo turbulento y el caudal axial, normalmente denominada TDC por su nomenclatura inglesa Thermal Diffusion Coefficient, R , la superficie lateral de contacto entre el fluido de ambos canales y $\Delta y_h/\Delta y_e$, el cociente entre los anchos de subcanal con la barra cromada y el de su entorno.

Para tener en cuenta a la vez la proximidad entre canales y un tamaño del canal de entorno que haga despreciable en él la contribución de la mezcla turbulenta, se ha estimado un valor para este cociente de 1/5. Con ello la proporción entre los incrementos de entalpía -o incrementos de calidad, pues estos son proporcionales a aquellos- es de aproximadamente 0.39. Por tanto, el impacto del cambio geométrico de la barra cromada en el flujo crítico consistiría en una reducción de aproximadamente un $0.39 \times 0.55 \approx 0.21\%$ para el subcanal en el que la barra cromada contacta con dos resortes de la rejilla. Este sería también el impacto en DNBR, ya que, aunque la mayor superficie exterior de la barra cromada reduciría el flujo térmico en ella, habría otras barras no cromadas en el subcanal para las que no habría tal beneficio.

Ahora bien, hay otros términos y factores a tener en cuenta en las correlaciones de flujo crítico que no se han considerado en el razonamiento anterior. La alteración de la geometría del subcanal también afecta a los diámetros mojado y calentado equivalentes, que son parámetros habituales en estas correlaciones. También hay que tener en cuenta que, por lo general, las correlaciones se definen para un perfil axial de potencia uniforme debiendo aplicarse un factor corrector en otro caso para tener en cuenta las diferencias en el historial térmico a lo largo del canal. Finalmente, la barra cromada también reduce el área de contacto lateral del subcanal considerado con los adyacentes, lo que puede implicar modificaciones en flujos cruzados que repercutirían en la velocidad másica. Todos estos efectos se han analizado con técnicas similares a las anteriormente planteadas y se ha hallado que tienen un impacto menor.

Para completar el análisis hay que añadir los posibles efectos sobre las caídas de presión que las barras cromadas puedan inducir. El cambio de geometría cambia el área de paso del fluido a través de las celdas afectadas de las rejillas y el consiguiente cambio en el coeficiente de caída de presión puede evaluarse mediante una metodología que lo correlaciona con la fracción de área obstruida en las mencionadas celdas. En cuanto a la rugosidad, su efecto puede determinarse mediante correlaciones para la fricción superficial como las que se basan en las curvas de Moody. Usando un procedimiento similar al aplicado anteriormente para la calidad, se ha estimado que el impacto en el CHF de estos cambios de resistencia hidráulica resulta en una reducción del flujo crítico de aproximadamente un 0.3% para todos los subcanales en contacto con una barra cromada.

Así pues, considerando todos los efectos, se estima que la barra cromada en un subcanal caliente puede suponer una reducción del DNBR de aproximadamente un 0.51% si la barra cromada contacta con dos resortes de la rejilla y este valor concuerda muy bien con el 0.54% obtenido con el código de diseño.

CONCLUSIONES

Se ha verificado el cumplimiento del criterio del DNBR para el combustible de prueba con barras cromadas. Puesto que los ensayos de DNB disponibles no muestran ningún efecto adverso del cromado, se asume que las correlaciones ya establecidas para las barras estándar también se pueden aplicar a las barras cromadas. Esto permite analizar los efectos derivados de los pequeños cambios geométricos debidos a la fina capa de cromo. Para ello se ha utilizado un método basado en un modelo de núcleo para un código de subcanal aplicado en diseño. Sin embargo, esto no es una aplicación estándar del código y ello hace recomendable la verificación de los resultados mediante una serie de modelos simplificados que se han desarrollados al efecto. Ambos métodos han dado resultados consistentes que no comprometen el cumplimiento del criterio, por lo que la introducción en las centrales de estos elementos de prueba con barras cromadas no implicaría un problema de seguridad. Además, la verificación con modelos simplificados garantiza que el código y modelo de diseño pueden ser aplicados al análisis de pequeñas variaciones en las condiciones de referencia para obtener respuestas precisas en una variedad de situaciones.

REFERENCIAS

- [1] Mori, S. e Y. Utaka, «Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: A review», International Journal of Heat and Mass Transfer 108, 2534–2557, 2017.
- [2] Seo, G.H., H.H. Son, U. Jeong, G. Jeun y S.J. Kim, «Effects of various thin film coating techniques on pool boiling heat transfer», NURETH-16, Chicago, IL, August 30-September 4, 2015.
- [3] Guoqiang Wang, William A. Bayers y Zeses Karoutas, «Baseline WALT DNB Test Results With Cr-Coated Cladding to Support Accident Tolerant Fuel Development», International Conference on Nuclear Engineering, October 19, 2021. ■