

# COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE CONDUCTANCIA TÉRMICA DE CONTACTO UO<sub>2</sub>-ZIRCALOY

**Soba, Alejandro**

Códigos y Modelos, Unidad de actividad Combustibles Nucleares, CAC, CNEA.  
([soba@cnea.gov.ar](mailto:soba@cnea.gov.ar))

**Key words:** Conductancia Térmica, UO<sub>2</sub>, Zircaloy, Contacto.

**Resumen.** En este trabajo se reseñan los modelos mas destacados utilizados en la literatura propuestos para el gap - vaina de zircaloy - pastilla cerámica comparándolos con los escasos datos experimentales hallados y destacando sus discrepancias numéricas y / o teóricas. A lo largo de una historia de potencia común, el gap varía sus dimensiones y composición gaseosa, su presión interna y la temperatura media. Así mismo puede cerrarse produciéndose contacto vaina-pastilla. Un modelo de conductancia térmica debe considerar la influencia de los diferentes parámetros mencionados.

La conductancia térmica del gap presenta varios estadios, en el caso en el que la distancia entre las superficies es suficientemente grande (mucho mayor que el libre camino medio de las moléculas del gas) el modelo es de conducción. Cuando el ancho del gap comienza a ser del orden de ese libre camino medio, deben considerarse los saltos térmicos sobre las superficies. Para gap cerrado debe establecerse un modelo de clausura y una conductividad asociada. Este caso es altamente dependiente del tipo de contacto (elástico o plástico) que se establece entre las superficies, las rugosidades y otros parámetros a determinar. Por último para temperaturas mayores a 300 °C, debe considerarse un término radiante entre las superficies.

El modelo propuesto contempla todas las variables del problema y responde aceptablemente al compararlo con los resultados experimentales de los que se dispone.

## 1 INTRODUCCIÓN

Desde hace unos años, en CNEA, se trabaja en la construcción de un código que propone la simulación del quemado de un elemento combustible en operación. Dicho código se aboca a la resolución de un sistema compuesto por la pastilla de combustible, la vaina de zircaloy y un gap gaseoso, en principio lleno de helio. El sistema se somete a una historia de potencia idealizada que es dato de entrada. El código resuelve la distribución de temperatura del sistema y las deformaciones termomecánicas y termoquímicas que se producen dentro del elemento.

Siendo la distribución de temperaturas del sistema y los modos de extracción del calor del mismo los fenómenos más importantes que condicionan el resto del cálculo, determinar la conductividad térmica de los materiales implicados ha conllevado una gran parte del trabajo experimental relacionada a materiales para reactores nucleares. Si bien para el combustible y la vaina existen modelos ampliamente validados con resultados empíricos, la conductividad del gap presenta aun hoy baches importantes en dos aspectos fundamentales. Por un lado existen pocos datos experimentales. Por otro, los modelos teóricos propuestos no son válidos para todo el rango de exigencias a los que deben responder a lo largo de una historia de potencia promedio. Son muchas las situaciones que “vive” el gap a lo largo del tiempo de operación de un reactor. Puede permanecer abierto o cerrarse al producirse contacto vaina-pastilla. Por ejemplo en combustibles tipo ATUCHA el cierre del gap no se produce o lo hace levemente. Mientras que en elementos tipo CANDU el cierre del gap se produce a las pocas días de comenzar la operación. Por otro lado la presión interna del gas de llenado, de la cual depende la conductancia del gap, varía en rangos que van desde unas pocas atmósferas hasta las 77-100 al final de la vida. También la conductancia del gap cerrado presenta una gran dependencia con la presión de contacto, parámetro que resulta difícil de determinar y que puede llegar a valores de 50 MPa. Por otro lado se debe distinguir entre contacto elástico o plástico. Otro factor a tener en cuenta es la liberación de gases por el combustible a medida que el quemado se intensifica. Ese gas liberado, de muy baja conductividad, produce una mezcla gaseosa de condiciones muy distintas a las obtenidas en situaciones experimentales ideales.

Por último la rugosidad de los materiales involucrados influye en la conductancia del gap y es un factor tenido en cuenta en numerosos experimentos realizados en el tema.

Antes que nada este trabajo presenta una revisión de los modelos conocidos para la conductancia del gap entre dos materiales, en particular UO<sub>2</sub> y zircaloy, en los casos de gap abierto o gap cerrado. Se mostrará que estos modelos son válidos para un conjunto de datos experimentales acotado por lo que sus predicciones resultan en algunos casos incomparables. Posteriormente se mostrará que elegir un modelo determinado propone resignar una respuesta a alguno de los factores que influyen el problema en desmedro de otro. Sin embargo se buscó seleccionar el modelo o conjunto de modelos adecuados para dar respuesta a todas las exigencias en operación, para lo cual se proponen variaciones empíricas sobre los mismos que concuerdan con los datos experimentales de los que se dispone.

## 2 MODELOS TEÓRICOS

### 2.1 Gap abierto

En este caso el primer mecanismo de transferencia de calor se produce por conducción a través del gap abierto y lleno de gas. Al comienzo de la historia de potencia el gas de llenado es Helio a presión atmosférica. A lo largo de la operación del reactor, los gases liberados por el combustible: básicamente Kriptón y Xenón más otros en menor cuantía, producen una mezcla gaseosa que modifica la conductividad del sistema. La distribución de los mismos es aproximadamente entre un 90% de xenón y un 10% de kriptón, poseen mas baja conductividad que el Helio. Las conductividades están dadas por leyes de igual forma funcional para todos los gases [3, 4]:

$$k_x = A_x T^{B_x}$$

donde  $A_x$  y  $B_x$  son constantes. De este modo la composición del gas de llenado es una mezcla función del tiempo de irradiación. La conductividad de la mezcla de gases se calcula a partir de la formula[4]:

$$k_{gasmix} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{1 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \phi_{ij} \frac{x_i}{x_j}}$$

Donde

$$\phi_{ij} = 0.3765 \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left( 1 + \left( \frac{k_i}{k_j} \right)^{1/2} \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right)^2$$

$M_i$  y  $x_i$  son el peso molecular y la fracción molecular de la especie  $i$  respectivamente.

Al mismo tiempo fenómenos como la densificación, el swelling, el creep, las deformaciones termoelastoplásticas, la relocación y la fractura del combustible producen una variación en el ancho del gap con el tiempo de operación del reactor. Si el gap es mucho mas grande que el libre camino medio de las moléculas del gas, la conductancia del gap toma la fórmula sencilla:

$$h_{gap} = \frac{k_{gasmix}}{A_{gap}(t)}$$

donde  $k_{gasmix}$  es la conductividad de la mezcla y  $A_{gap}(t)$  el ancho del gap que depende del tiempo. La mencionada disminución del espacio disponible para el gas de llenado así como la liberación de nuevos gases producen la variación de la presión interna del elemento que puede alcanzar 75-100 atmósferas al final de la vida [3, 4].

Cuando las dos superficies combustible – vaina se aproximan hasta superar el orden de los libres cominos medio de las moléculas del gas de llenado, las temperatura inmediatamente adyacentes a las superficies no son iguales a la temperatura superficial. Se produce una

discontinuidad sobre las paredes que depende del libre camino medio de las moléculas del gas y del material de la superficie, llamada salto en temperatura. La conductancia entonces se modifica para tomar la forma:

$$h_{gap} = \frac{k_{gasmix}}{A_{gap}(t) + J_V + J_F}$$

Donde los coeficientes  $J_V$  y  $J_F$  son los saltos térmicos en la vaina y el combustible respectivamente y dependen del tipo de material, la temperatura superficial, la presión interna del gas y de un parámetro de acomodación que caracteriza el tamaño del salto térmico de acuerdo al tipo de gas y material sobre el que se refleja.

Existen muchos y variados autores que proponen diversos modelos para la conductancia entre superficies cercanas. Se tomarán los principales para describirlos brevemente:

Modelo MATPRO: en este manual se propone un modelo para la conductancia del gap, en su componente de conducción

$$h_{gascond} = \frac{1}{\frac{A_{gap}(t)}{k_{gasmix}} + \frac{4}{\alpha P} \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \sqrt{\frac{\pi M T_{gas}}{2R}}} \quad (1)$$

medida en  $W m^{-2} K^{-1}$  para un gas simple.  $T_{gas}$  es la temperatura del gas,  $P$  la presión interna del gas,  $\gamma$  de el ratio de los calores específicos del gas y  $\alpha$  el coeficiente de acomodación. El modelo es válido hasta un ancho de gap del orden de la rugosidad media de ambas superficies.

De la misma manera el manual propone un modelo para estimar los saltos de temperatura sobre la superficie del zircaloy y el UO2 en función de las temperaturas superficiales, la fracción de gases presentes en la mezcla, la presión del gas y el tipo de material de la superficie. Se debe definir si la superficie es una fuente de calor o un sumidero.

Modelo de Tong, NEA, Olander.

En otros modelos considerados para pastillas de UO2 se propone una modelo similar en donde se toma en cuenta la rugosidad de las superficies involucradas en forma directa.

$$h_{gap} = \frac{k_{gasmix}}{A_{gap}(t) + L_0} \quad (2)$$

en donde

$$L_0 = A(rg_1 + rg_2) + rg_3 + J_V + J_F$$

$rg_i$  ( $i=1,2$ ) es la rugosidad media aritmética de la vaina y el combustible y  $rg_3$  es la rugosidad del combustible fragmentado. Ambas están expresadas en metros.

Modelo	Olander-MATPRO	TONG	NEA
A	0	2.0	[1.5 2.5]
Rg3	0	[5 8]E <sup>-6</sup> m	0

TABLA I: constantes en las expresiones de conductancia gaseosa para los tres modelos considerados.

## 2.2 Saltos térmicos según los diferentes modelos.

En el modelo Olander los saltos térmicos se esquematizan de la siguiente forma [3]

$$J_i = \frac{k_{mixgas}}{P_{int}} \left( \frac{1 - \alpha_{mixgas}}{\alpha_{mixgas}} \right) \sqrt{\frac{2\pi T}{R_{mixgas}}} \frac{\gamma_{mixgas} - 1}{\gamma_{mixgas} + 1}$$

donde  $\gamma_{mixgas}$  es el radio de calor específico de la mezcla;  $\alpha_{gasmix}$  es el coeficiente de acomodación de la mezcla;  $n$  es el número de componentes y  $k_i$  es la conductividad térmica de cada componente  $i$ .

El coeficiente de acomodación térmica del gas o de la mezcla sobre una superficie particular se define como

$$\alpha = \frac{T_r - T_i}{T_s - T_i}$$

donde  $T_i$  es la temperatura de moléculas que arriba a la superficie de temperatura  $T_s$  y rebota con temperatura  $T_r$ . Si  $T_r = T_s$ ,  $\alpha = 1$  y las moléculas que rebotan están completamente equilibradas con la superficie. Para superficies rugosas estos coeficientes aumentan debido a la mayor probabilidad de rebotes que una superficie irregular genera.

Tong propone una fórmula conjunta para el salto térmico dentro del gap que toma la forma

$$J_V + J_F = 0.782 \left( \frac{k\sqrt{T}}{P} \right) \left( \frac{1}{\sum_i \alpha_i x_i / \sqrt{M_i}} \right)$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del gas,  $P$  la presión gaseosa en Pa,  $T$  la temperatura meda del gas medida en K. Además propone una expresión para los coeficientes de acomodación de la forma

$$\alpha_{He} = 0.425 - 2.310^{-4} T_s$$

$$\alpha_{Xe} = 0.749 - 2.510^{-4} T_s$$

Donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie en K. Los coeficientes de acomodación de los demás gases se obtienen por interpolación lineal entre  $\alpha_{HE}$  y  $\alpha_{XE}$  basado en su peso molecular.

Valores para el coeficiente de acomodación térmica para el UO2 y las vaina de Zircaloy se

presentan en la tabla II

Gas	A gas-zircaloy	A gas - combustible
He	0.071	0.34
Ar	0.16	0.8
Kr	0.85	0.85
Xe	0.85	0.85
H2	0.071	0.34
O2	0.2	0.85

Tabla II de valores de coeficientes de acomodación térmica tomada de [4]

Valores de los saltos térmicos para una mezcla de gases se pueden estimar directamente de los saltos térmicos de los gases puros. Para temperaturas entre  $150-300\text{ C}$ ,  $(J_V+J_F)$  es del orden de  $10^{-3}\text{ cm}$  para Helio,  $5.10^{-4}\text{ cm}$  para el Argón y menor a  $10^{-4}$  para el Xenón. La expresión dada para una mezcla es

$$J_m = \frac{\sum x_i J_i / \sqrt{M_i}}{\sum x_i / \sqrt{M_i}}$$

En el texto de Ainscough (NEA) se propone un modelo para el salto térmico en función de parámetros mas fáciles de medir, relacionado a variables macroscópicas del gap

$$J_i = A \left( \frac{k_{gasmix} T_{mix}^{0.5}}{P_{mix}} \right) \left( \frac{2-\alpha}{\alpha} \right) \sqrt{M}$$

### 2.3 Contribución de la radiación

Cuando el gap se encuentra abierto y la temperatura es mayor que  $300$  grados centígrados es necesario contemplar la contribución a la conductancia dada por la radiación de cada superficie. Una expresión para este término esta dada por Olander como

$$h_{rad} = \frac{4\sigma T^3}{(1/\epsilon_V) + (1/\epsilon_F) - 1} \quad (3)$$

Donde  $\epsilon_i$  es el factor de emisividad de cada superficie. La temperatura utilizada es el promedio entre la temperatura exterior del combustible y la interior de la vaina.  $\sigma=5.67E^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzman. Valores para los coeficientes de emisividad pueden obtenerse de las expresiones:

$$\begin{aligned}\varepsilon_V &= 0.1906 - 0.2166 \exp(-3.792E^{-3}T) \\ \varepsilon_F &= 0.85\end{aligned}$$

con  $T$  en el rango  $[373 \ 1900]$  K. Para gaps pequeños, la contribución radiante es muy chica comparada con la conducción.

En el trabajo de la NEA se propone una expresión algo diferente pero con el mismo orden de magnitud en cuanto a la dependencia funcional con la temperatura:

$$h_{Rad} = \frac{4\sigma}{(1/\varepsilon_V) + (1/\varepsilon_F) - 1} \frac{(T_{Fuel}^4 - T_{vaina}^4)}{(T_{Fuel} - T_{vaina})} \quad (4)$$

donde  $T_{fuel}$  y  $T_{vaina}$  son las temperaturas sobre las superficies del combustible y la vaina respectivamente.

## 2.4 Gap cerrado

Debido a las interacciones termomecánicas y químicas que sufre el combustible, el gap puede cerrarse produciéndose contacto vaina-pastilla. Cuando ello ocurre, una parte del calor será transportada por conducción entre los sólidos en las regiones en donde hay contacto físico y otra por conducción gaseosa en las regiones en donde no hay contacto. Una esquemática figura como la figura 2 muestra el fenómeno idealizado. La porción de la superficie en contacto dependerá del modo de la deformación (elástica o plástica), la tensión de compresión, la presión interna y la rugosidad de cada superficie. El ancho medio del filme de contacto  $\delta$  es aproximadamente igual la suma de la rugosidad media de los dos sólidos.

Existen diversos estudios analíticos para obtener una conductancia de contacto. Centikale and Fishenden [1] representaron cada porción de contacto sólido por un cilindro de radio  $R_1$ . Para  $N$  cilindros en contacto por unidad de área, el área asociada con cada contacto será

$$\pi R_2^2 = \frac{1}{N}$$

donde  $R_2$  es el radio de la zona alrededor del contacto que forma la región interfacial. Un análisis de la conducción del calor de esa geometría idealizada nos da una expresión para la conductancia del gap en contacto sólido-sólido:

$$h_{contac} = \frac{1}{R_1} \left( \frac{2k_f k_c}{k_f k_c} \right) \frac{\left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2}{\tan^{-1} \left( \frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}$$

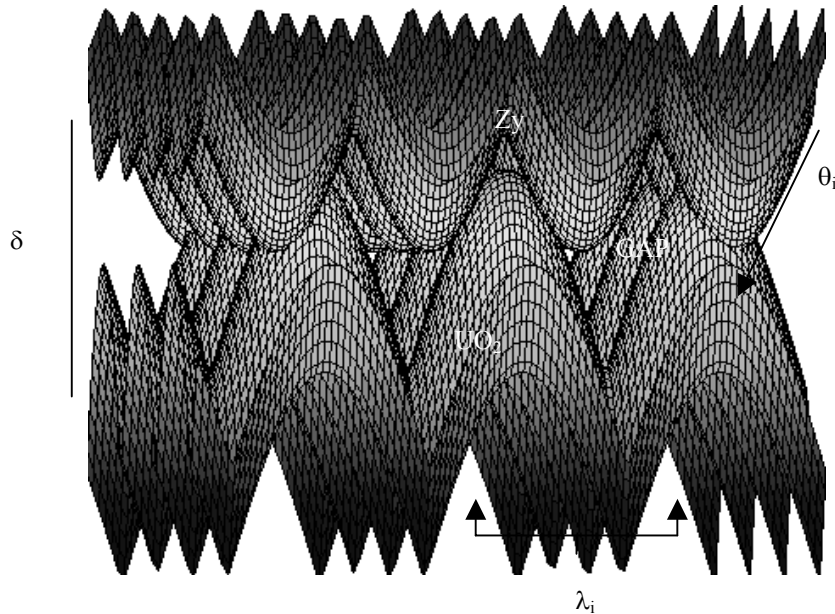


Figura 1. Esquema idealizado de dos superficies de contacto con diferentes rugosidades.

El área de contacto por unidad de área  $(R_1/R_2)^2$  se incrementa con la presión interfacial a causa del aumento de la deformación. La fracción de la interfaz que se encuentra en contacto sólido-sólido está dada por

$$\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 = Cte \frac{Pi}{H}$$

donde  $H$  es la dureza MEYER de la superficie mas blanda. También se ha encontrado que el radio medio del contacto sólido-sólido  $R_I$  es proporcional a la raíz cuadrada de la superficie media de la rugosidad  $R_I = Cte \delta^{1/2}$ , donde  $\delta$  es la media aritmética de la rugosidad de ambas superficies. Tomando la tangente en la expresión para  $h_{contacto}$  como  $\pi/2$  ya que se considera  $R_1/R_2 \ll 1$ , la conductancia estará dada por la ecuación

$$h_{contacto} = C \frac{Pi}{H\delta^{1/2}} \left( \frac{2k_f k_c}{k_f + k_c} \right) \quad (5)$$

siendo el valor estimado óptimo de la constante  $C = 1$ . Se puede tomar un valor  $\delta$  igual a la rugosidad media cuadrática de ambas superficies y este valor es del orden de  $4.4E^{-6} m$ .

MATPRO proporciona un modelo para determinar la dureza Meyer del zircaloy

$$H = \frac{4L}{\pi d^2} = \exp(2.6034 + T(-2.639410^{-2} + T(4.350210^{-5} + T2.5621x10^{-8})))$$



Tong proporciona dos modelos para la conductancia de gap cerrado. Ambos consisten en la sumatoria de dos términos, uno de conductancia sólido-sólido y otro para la conductancia del intersticial lleno de una mezcla de gases

$$h_{gap} = aP_c + \frac{k_{gasmix}}{L_{eff}} \quad (6)$$

donde  $L_{eff} = 1.8(2 \exp(-0.000125P_c)(rg_1 + rg_2) + J_V + J_F) - 0.00012$

$P_c$  es la presión de contacto en  $Kg\ cm^{-2}$  y  $a = 1.3610^{-3}\ W\ m^{-2}\ K^{-1}\ Pa$ .  $P_c$  está expresada en Pascales en esa parte de la ecuación. Debe destacarse que este último parámetro fue derivado con modelos empíricos. Por otro lado según algunos experimentos realizados entre contacto Uo2-zircaloy, indican que la presión de contacto debe seguir una ley distinta. Una correlación de ese conjunto de datos proporciona el segundo modelo para la conductancia sólido-sólido del texto con la forma:

$$h_s = \frac{k_V k_F}{k_V + k_F} \frac{12.310^{-3}}{L_0} \left( \frac{P_c}{H} \right)^{0.66} \quad (7)$$

Donde  $L_0$  es la rugosidad media cuadrática  $L_0 = \sqrt{rg_1^2 + rg_2^2}$

El modelo proporcionado por el texto de la NEA contiene una expresión similar a la anterior:

$$h_s = A \left( \frac{2k_F k_V}{k_F + k_V} \right) \left( \frac{P}{H} \right)^n \frac{1}{\sqrt{(rg_1^2 + rg_2^2)/2}} \quad (8)$$

pero el valor del exponente  $n$  depende de la forma en que se produce el contacto entre el combustible y la vaina. Para contacto plástico  $n=1$ , mientras que para el caso elástico  $n=0.5$ .

A diferencia del modelo de Centikale and Fishenden, existe otro grupo de modelos en donde se distingue entre el tipo de contacto (elástico o plástico) que se produce entre los cuerpos. El análisis teórico que da sustento a los modelos numéricos de este tipo fue elaborado por Mikic[8,9]. En este modelo el radio de contacto puede variar con una distribución seudo uniforme i.e., el área alrededor del contacto es proporcional a su tamaño. Además de eso, el alto de la zona de contacto no es uniforme sino que puede considerarse que sigue una distribución gaussiana. Con estas hipótesis, el modelo produce una conductancia

$$h_s = 1.45 \left( \frac{2k_F k_V}{k_F + k_V} \right) \left( \frac{P}{H} \right)^n \frac{\sqrt{(\tan\theta_F)^2 + (\tan\theta_V)^2}}{\sqrt{(rg_1^2 + rg_2^2)/2}} \quad (9)$$

donde  $n$  depende de igual modo con el tipo de contacto que se produce y las tangentes del parámetro  $\theta$  representa la distribución de las pendientes para los perfiles de las dos superficies en contacto (Figura 2). Para una superficie ideal,

$$\tan\theta_i = \frac{2R_i}{\lambda_i}$$

donde  $R = \sqrt{(rg_1^2 + rg_2^2)}/2$  y  $\lambda$  es la distancia media entre picos de cada superficie.

La presión de transición entre deformación plástica y elástica no está claramente establecida. Para metal-cerámico se encuentra aproximadamente en  $7Mpa$ .

### 3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Las ecuaciones involucradas en la generación y transferencia del calor en un sistema pastilla-gap-vaina son:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_F(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_F(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q_F(r)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_V(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_V(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Este conjunto de ecuaciones se completa con cuatro condiciones de contorno en la dirección  $r$  y condiciones de Neunman nulas en la dirección  $z$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{R=0} = 0$$

$$h_{F-V} (T_{REF} - T_{RIV}) = \frac{P_L}{2\pi R_{EF}}$$

$$\left( k_V(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{P_L}{2\pi R_{IV}}$$

$$(T_{REV}) = T_0$$

Donde  $P_L$  es la potencia lineal generada,  $R_{EF}$ ,  $R_{IV}$  y  $R_{EV}$  son los radios exterior del combustible e interior y exterior de la vaina y  $h_{F-V}$  es la conductancia entre la superficies del combustible y la vaina.  $T_0$  es la temperatura externa del elemento que se elije constante.

La conductancia total corresponde a la suma de tres términos

$$h_{tot} = h_{rad} + h_{gasmix} + h_s$$

Con todos los modelos parciales descriptos, se constituyeron cinco modelos de conductancia total definidos en la tabla III

Modelo	$h_{rad}$	$h_{gasmix}$	$h_s$
$h_{Olander}$	Eq. 3	Eq. 2 + ctes TABLA I	Eq. 5
$h_{MATPRO}$	Eq. 3	Eq. 1+ ctes TABLA I	Eq. 9
$h_{NEA}$	Eq. 4	Eq. 1+ ctes TABLA I	Eq. 8
$h_{Tong}$	Eq. 3	Eq. 1+ ctes TABLA I	Eq. 6
$h_{Tong 2}$	Eq. 3	Eq. 1+ ctes TABLA I	Eq. 7

Tabla III modelos de conductancia totales conformados.

Los 5 modelos constituidos se contrastaron con resultados experimentales obtenidos de las

fuentes [2], [3], [8].

En primer lugar frente a los resultados experimentales se observa una discrepancia en las conductancias gaseosas al variar las presiones del gas dentro del gap, en especial para presiones bajas (menores a 2 atmósferas) y en presencia de helio en el llenado. Para suplir esa discrepancia se agrega un término a las conductancias que depende de la presión interna y la cantidad de Helio en la mezcla.

$$h_{adicional} = 4.02E^{-6} \exp(22.937x_{He}) \exp(-0.005(P_{gas} - 10)^2)$$

Donde  $x_{He}$  representa la cantidad de helio en la mezcla y  $P_{gas}$  es la presión gaseosa. Claramente esta fórmula es empírica y solo viene a suplir una deficiencia en los modelos analíticos de saltos térmicos

Con dicho término el modelo que mejor representa los resultados experimentales fue el  $h_{MATPRO}$ , cuyos resultados presentan gran similitud con los proporcionados por [8] (figura 2)

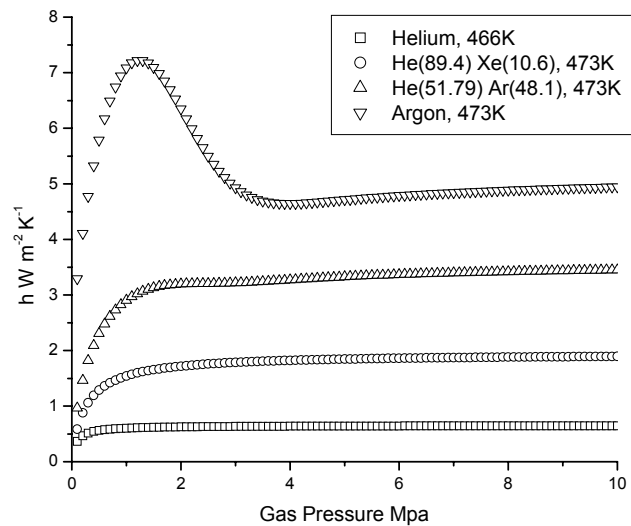


Figura 2: conductancia en función de la presión interna gaseosa para diferentes mezclas. Los resultados concuerdan con los proporcionados por la referencia 8.

Posteriormente se procedió a testear los modelos de conductancia en la situación de contacto. Los mismos son fuertemente dependientes de las rugosidades de las superficies y de la presión de contacto. En la figura 3 y 4 se contrastan los modelos con los resultados experimentales obtenidos de [2] y [3].

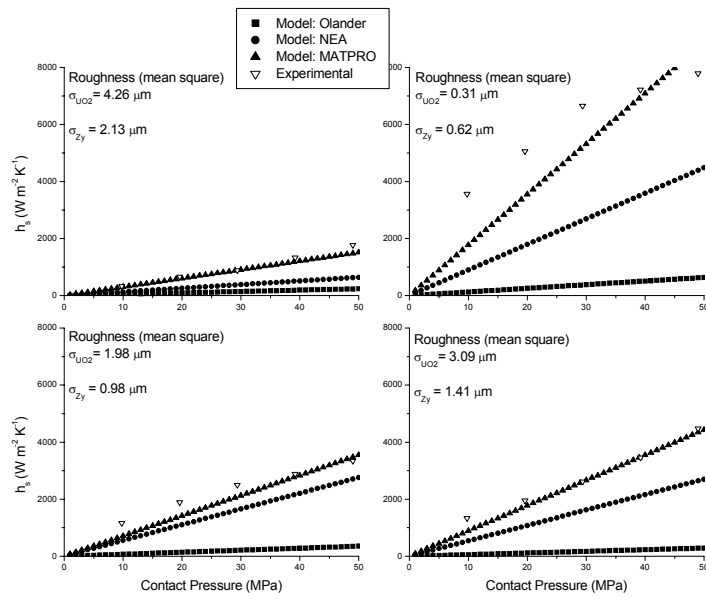


Figura 3 Modelos  $h_{Olander}$ ,  $h_{NEA}$  y  $h_{MATPRO}$  comparados con los resultados experimentales de [2].

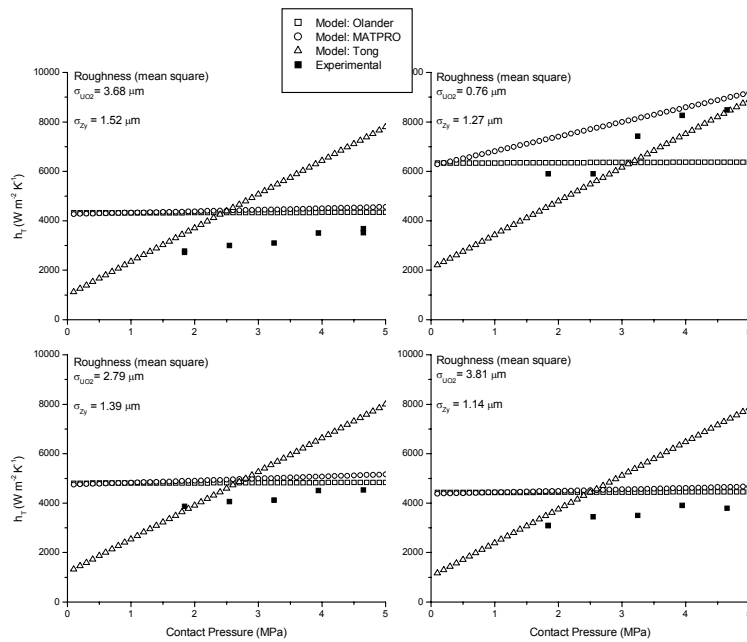


Figura 4 Modelos  $h_{Olander}$ ,  $h_{NEA}$  y  $h_{MATPRO}$  comparados con los resultados experimentales de [2].

Por ultimo se analizó la dependencia de la conductancia con la rugosidad media de las

superficies del  $\text{UO}_2$  y de la vaina de zircaloy dependiendo de la presión de contacto. La figura 5 presenta una comparación entre las predicciones de los modelos numéricos considerados.

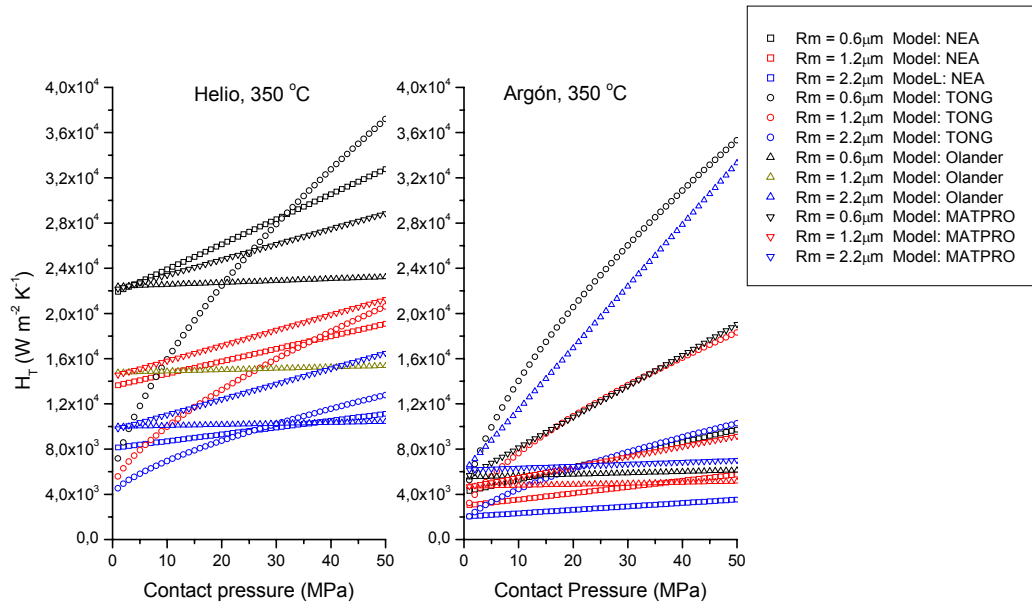


Figura 5 Modelos  $h_{\text{Olander}}$ ,  $h_{\text{NEA}}$  y  $h_{\text{MATPRO}}$  y  $h_{\text{Tong}_2}$  para diferentes rugosidades y presiones de contacto.

#### 4 CONCLUSIONES

El modelo seleccionado para incluir en el código DIONISIO ha sido el modelo  $h_{\text{MATPRO}}$  que corresponden a un término de radiación dado por la ecuación (3), el término de conductancia de mezcla de gases dado por el MATPRO al que se le agrega la conductividad de contacto dada por el modelo de Mikin y la corrección para bajas presiones gaseosas de propia autoría. Se elige por sus excelentes resultados al reproducir los datos experimentales de conductividad gaseosa además de concordar adecuadamente con la mayoría de los experimentos de contacto con los que se lo comparó. Cabe aclarar que el modelo no utiliza la corrección de contacto plástico - elástico advertida en las referencias [2][3], seleccionándose en cambio un exponente  $n=1.0$  para todos los casos, situación que no coincide con los sugerencias de los autores en dichos textos. Sin embargo cabe aclarar que la selección de  $n=0.5$  solamente es utilizada empíricamente para un conjunto de experimentos reportados por Rapier-Jones-McIntosh obtenidas de [2] y no coincide con otros modelos en fuentes diferentes.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- 1) Tong,, L.S, Weisman, J.. *Termal análisis of pressurized water reactors*. American Nuclear society. La Grange Prk, Illinois USA.
- 2) Jacobs, G and Todreas N.. Nuclear science and engineering: 50, 283-290 (1973)
- 3) Olander, D. Fundamental Aspecto of Nuclear Reactor Fuel Elements, Thecnical Information Center,, 1976
- 4) MATPRO-Versión 11 (1981)
- 5) Wahid, S, Madhu Sudana. Int. Journal of Heat Transfer 43 (2000), 4483-4487
- 6) Loyalka, S, Nuclear Technology 57, my 1982.
- 7) Savija, I, Culham, JR, Yovanovich,M, Journal of thermofhisics and Heat Transfer, 17, 1, Jan-Mar 2003. 43-52
- 8) Ainscough JB, Gap Conductance in Zircaloy-clad LWR fuel rods, april 1982,OECD, NEA.
- 9) Cooper, M., Mikic, B., Yovanovick, M.. Int J. Heat Mass Transfer, 12:279 (1960)