T 99/24

Biblioteca Rector Gabriel Ferraté
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DOCTORAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE MEDIOS POROSOS SATURADOS HASTA EBULLICIÓN-"DRYOUT" DE SU FASE LÍQUIDA

Tesis doctoral presentada por: : **MONTSERRAT CARBONELL VENTURA**

DIRECTOR : **Dr. LUIS VIRTO ALBERT**

Vilanova i la Geltrú, 1999

4.3.7.- Heterogeneidad. Histéresis de flujo crítico de calor. Basculamiento

4.3.7.1.- Efectos de heterogeneidad

Los flujos a contracorriente vapor-líquido en medios porosos han sido objeto de muchos estudios recientes dada su relevancia en procesos geotérmicos, ebullición, depósitos de residuos nucleares, etc. El análisis teórico muestra que cuando el sistema es homogéneo se desarrolla una zona bifásica infinitamente larga de saturación constante si la tasa de calentamiento es suficientemente baja (por debajo del valor crítico). Además, bajo las mismas condiciones operativas, se predicen dos estados, uno que corresponde a baja saturación de líquido (domina el vapor) y una que corresponde a alta saturación de líquido (domina el líquido).

En aplicaciones de ebullición que implican calentamiento por el fondo se desarrolla el estado de saturación de líquido dominante, mientras que en el caso de condensación de vapor sobrecalentado (enfriamiento por encima) es el estado de saturación de vapor dominante. En cualquiera de ambos casos, la capilaridad es necesaria para conectar los perfiles de saturación constante a las regiones subenfriada o seca. En la práctica, por supuesto, todos los sistemas son finitos y heterogéneos. La zona bifásica debe terminar en alguna posición en el medio poroso. La terminación ocurrirá como una progresiva, suave, conexión de la zona bifásica con un líquido subenfriado o una región seca. Si la frontera del medio poroso es impermeable, el flujo a contracorriente vapor-líquido requiere la existencia de heterogeneidades en el medio poroso. Análogo problema surge en la estabilidad gravitacional de sistemas de flujo a contracorriente vapor-líquido, cuando una región rica en vapor subyace bajo una capa de líquido subenfriado.

En nuestro caso, las experiencias llevadas a cabo muestran, en general, al recorrer el sistema desde el fondo del medio poroso (calentamiento) hasta la superficie libre del líquido en la cubeta (evaporación) los siguientes estados zonales: zona seca-zona bifásica dominada por vapor-discontinuidad-zona de líquido subenfriado-discontinuidad MPS-capa líquida monofásica-superficie libre.

Por otra parte, el flujo de calor aportado por la placa calefactora deviene de inmediato, o transcurrido un cierto tiempo, crítico o supercrítico. Ello ocurre como resultado de que el líquido transferido por capilaridad a la entrefase placa-medio poroso, una vez se ha producido en ella el cambio de fase, no es suficiente como para disipar por evaporación todo el calor que recibe la placa calefactora.

Los resultados muestran también que la heterogeneidad (capilar) de permeabilidad actúa en realidad como una fuerza másica (gravedad), con la importante propiedad adicional de que también varia espacialmente. Esta heterogeneidad activa o contraresta efectos de gravedad, según el caso.

En un flujo a contracorriente unidimensional la principal variable heterogénea es la permeabilidad y un parámetro importante que es afectado es la presión capilar, dada por

$$P_c = \frac{\sigma . J(s)}{\sqrt{k'}} \qquad [1]$$

donde $J(s)$ representa la función J de Leverett, σ es la tensión superficial y k' es la permeabilidad. Ahora bien, se ha de tener en cuenta también el efecto de la conducción que se expresa por el siguiente grupo adimensional

$$KRm = \frac{k'.h_{lv}^{\ 2}.M_W.P_0.\rho_v}{\mu_v.\lambda_e.R.T_0^2} \qquad [2]$$

donde $K = h_{lv}.M_W/T_0.R$ y $Rm = \frac{k'.h_{lv}.P_0.\rho_v}{\mu_v.\lambda_e.T_0}$

$P_0 \equiv$ presión de vapor a la temperatura T_0

$T_0 \equiv$ temperatura de referencia.

$M_w \equiv$ masa molecular del agua.

La conducción debe tenerse en cuenta en sistemas con k' baja (baja permeabilidad) y altos valores de λ_e (conductividad térmica efectiva).

Para valores grandes de KRm, por ejemplo del orden de 10^3, la conducción tiene muy poca influencia sobre los efectos de heterogeneidad. En nuestro caso, el valor de KRm en todas las experiencias es mayor que 5.10^3 por lo que puede prescindirse de los efectos de conductividad térmica.

Satik, Parlar y Yortsos (1991) han estudiado el flujo estacionario a contracorriente agua-vapor en un medio poroso. De su modelo se deriva la ecuación

$$\tau.J'\frac{ds}{d\xi} - J\frac{d\tau}{d\xi} = \omega\frac{\left(k'_{rl}+\beta.k'_{rv}\right)}{k'_{rl}.k'_{rv}} + \operatorname{sen}\theta.\tau^2 \qquad [3]$$

donde:

$\tau \equiv \sqrt{k'/k'^*}$ ≡ variable de heterogeneidad

k'^* ≡ permeabilidad de referencia (m^2)

$J' = dJ/ds$

J ≡ función de Leverett

s ≡ saturación de líquido

$\xi = x.\sqrt{k'}.g.\Delta\rho/\sigma$ ≡ coordenada adimensional

θ = ángulo de inclinación

$\omega = q.\mu_v/k'^*.L_v.g.\Delta\rho.\rho_v$ ≡ flujo específico de calor adimensional.

K'_{rl}, k'_{rv} ≡ permeabilidades relativas

$\beta = v_l/v_v$ = relación de viscosidades cinemáticas

En nuestras experiencias el calentamiento es por el fondo luego la ecuación [3] deviene

$$\tau.J'.\frac{ds}{d\xi} = \omega\frac{\left(k'_{rl}+\beta.k'_{rv}\right)}{k'_{rl}.k'_{rv}} - \left(\tau^2 - J.a\right) \qquad [4]$$

donde $a \equiv \dfrac{d\tau}{d\xi}$ es el gradiente de heterogeneidad.

Para los dos valores de saturación, s_L y s_v, el primer término de la ecuación [4] se anula, luego

$$\omega\frac{\left(k'_{rl}+\beta.k'_{rv}\right)}{k'_{rl}.k'_{rv}} - \left(\tau^2 - J.a\right) = 0; \qquad o\ bien \qquad \omega\frac{1}{\tau^2}\frac{\left(k'_{rl}+\beta.k'_{rv}\right)}{k'_{rl}.k'_{rv}} + J.\frac{a}{\tau^2} = 1 \qquad [5]$$

Si el medio fuera homogéneo τ = C^{te} ; a = 0 ; entonces $\omega = \dfrac{\tau^2 . k'_{rl} . k'_{rv}}{k'_{rl} + \beta . k'_{rv}}$ [6]

siempre que $\omega < \omega_{cr}$ (bajo efectos de gravedad) (ω_{cr} = 0,3063 para τ = 1)

Volviendo a la ecuación [4] si realizamos su integración desde el fondo (lado del vapor) hacia arriba, si la saturación inicial es s_1 entonces $s_1 < s_L$ si la capa de vapor sobrecalentado se extiende hasta la zona de enfriamiento, donde condesa. Si realizamos la integración desde arriba (lado del líquido) hacia abajo, y la saturación inicial s_0 es igual a 1, entonces evidentemente $s_0 > s_v$ y se constituye la distribución de saturación representada en la figura 4.96.

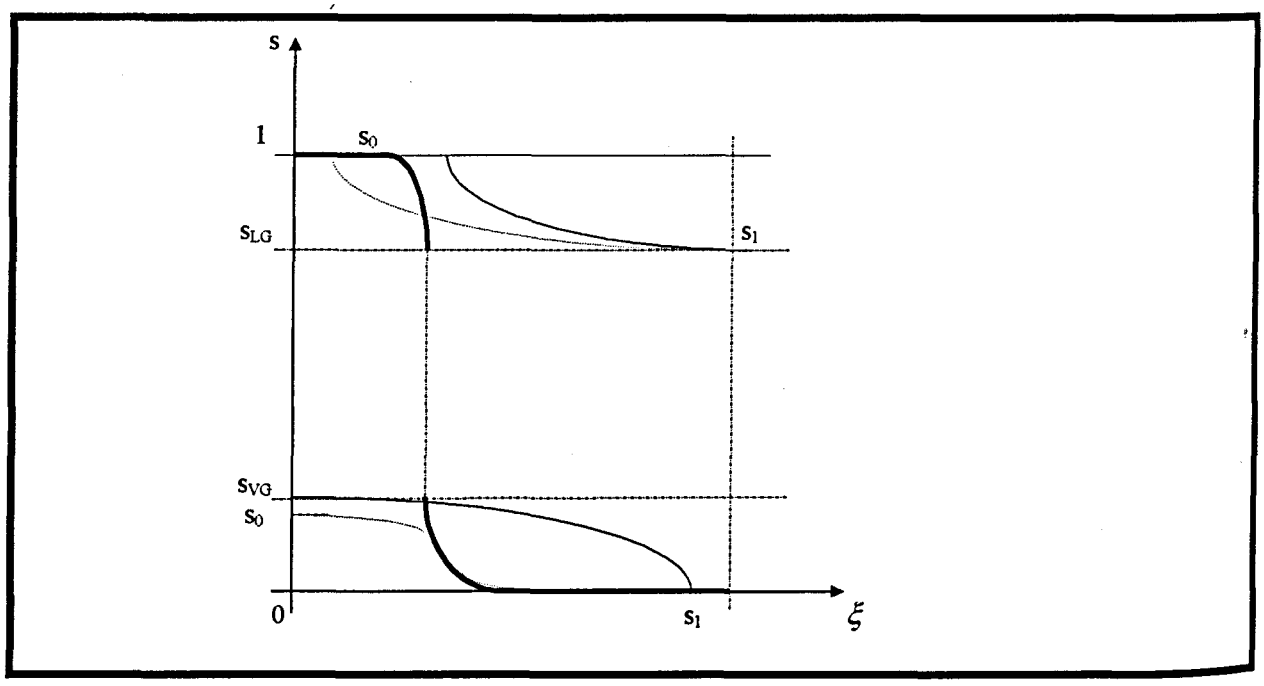


Figura 4.96.- Representación de los resultados de la integración de la ecuación [4] desde arriba hacia abajo (———) y desde el fondo hacia arriba (———), para los casos de estado de saturación de líquido dominante o de vapor dominante.

En la figura, la línea continua corresponde a las soluciones de la ecuación [4] integrando a partir del fondo para los casos $s_1 > s_{LG}$ y $s_1 < s_{LG}$, mientras que si la integración se lleva a cabo desde arriba hacia abajo (sentido + de ξ), las soluciones están representadas por la línea discontinua.

Nuestros resultados experimentales se acomodan bien a un comportamiento intermedio, tal como el representado por la línea de trazo grueso.

Los resultados experimentales conocidos hasta la fecha indican que con variaciones normales en τ la heterogeneidad activa los regímenes de vapor dominante o de líquido dominante cuando $\frac{d\tau}{d\xi} < 0$, y tiende a frenarlos en el caso opuesto.

Los resultados experimentales obtenidos en los medios porosos que han sido estudiados evidencian que, excepción hecha de los constituidos por arena, el flujo específico de calor aplicado supera al crítico transcurrido un cierto tiempo a partir del inicio del calentamiento y, además, se crea una zona bifásica finita, fruto de una variación brusca de permeabilidad, de manera que el estado del medio poroso es, de arriba hacia abajo, el siguiente: líquido subenfriado-(discontinuidad)-zona bifásica dominada por vapor-región seca.

La heterogeneidad débil afecta únicamente al flujo promovido por gravedad, pero las variaciones intensas de permeabilidad generan efectos capilares significativos.

4.3.7.2.- Histéresis de flujo específico crítico de calor

Es comúnmente aceptado que calentando un MPS por abajo pueden alcanzarse dos estados estacionarios: una región de líquido subenfriado en la parte superior sin que sea necesaria la existencia de una región seca en el fondo, y una región que contiene vapor sobrecalentado en el fondo pero no necesariamente limitada por líquido subenfriado en la parte superior.

En cada caso puede ser definido un flujo específico de calor crítico ω_{cr}. Aunque las dos configuraciones son prácticamente las mismas, los perfiles obtenidos y el valor del flujo específico crítico de calor en ambos sistemas son completamente diferentes.

El primer modelo de estado estacionario se atribuye a ebullición. Se alcanza a partir de un medio poroso saturado de líquido, calentado por el fondo, en el que el calor se transmite por conducción hasta la superficie superior donde es mantenido a temperatura constante. A partir de un determinado valor de q se inicia la ebullición, desarrollándose una entrefase líquido-bifase con diferentes grados de saturación.

Las experiencias realizadas en nuestro caso difieren algo de los dos modelos de estado estacionario descritos. En efecto, el dominio que delimita el medio poroso ensayado tiene la frontera superior permeable y en contacto con una capa líquida, cuya altura varía en el curso del proceso de calentamiento por desplazamiento del líquido saturante del medio poroso, primero por dilatación térmica y después por cambio de fase (líquido → vapor), que se calienta por conducción desde la entrefase líquido-MPS y se enfría por evaporación natural a partir de su superficie libre. Estas diferencias respecto a los dos modelos clásicos repercuten no sólo en el valor de ω_{cr} sino también en la longitud de la zona bifásica. Por consiguiente, la conclusión (Udell, K.S. (1985)) de que en el límite de conducción despreciable en la zona bifásica ($KR_m >> 1$), ω_{cr} es igual a una constante, ω_0 , de valor $\omega_0 = k'_{rl}.k'_{rv}/\left(k'_{rl}+\beta.k'_{rv}\right) = 0{,}3063$, que no depende de los parámetros del proceso, deja de ser válida.

Esto resulta evidente desde el momento en que en las experiencias llevadas a cabo no se cumplen una, otra o ambas condiciones: igualdad de los gradientes de presión de líquido y de vapor ($dP_c \neq 0$), e igualdad de los flujos másicos de líquido y de vapor a contracorriente en la zona bifásica.

No obstante, hay una excepción: los MPS en base a arena. En ellos el flujo específico de calor por conducción es notablemente menor que el flujo específico de calor convectivo, de manera que se puede alcanzar un valor de ω ligeramente mayor que ω_0 y para un determinado valor de saturación, $s \neq 0$, la temperatura adimensional toma un valor puntual singular como se muestra en la figura 4.97.

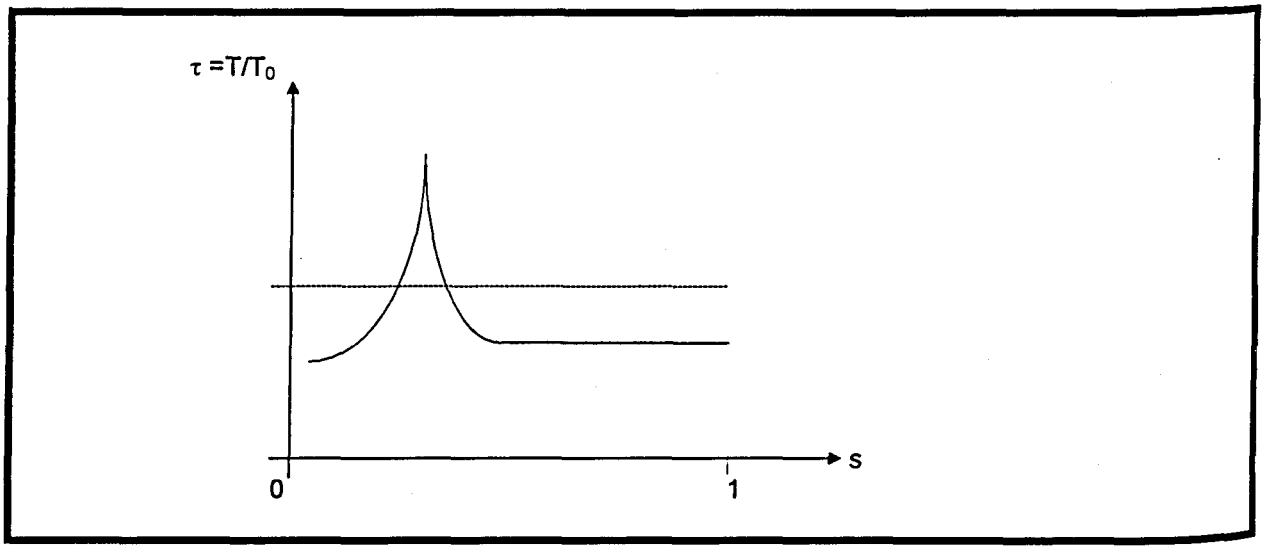


Figura 4.97.- Representación del valor de la temperatura adimensional respecto a la saturación, para el caso de los medios porosos en base a arena.

El hecho de que ω_{cr} tenga dos valores diferentes según sea el modelo estacionario que se alcance, sugiere un efecto de histéresis. En el caso de ebullición, un medio poroso saturado inicialmente de líquido se convierte en un sistema vapor-líquido por un proceso de calentamiento continuo. La presión de líquido es aproximadamente constante y la presión de vapor en la región bifásica es siempre mayor y positiva. Por contra, en el segundo modelo un medio poroso inicialmente saturado de vapor se convierte a un sistema vapor-líquido por condensación. Ahora, la presión de vapor en el fondo es constante y debe disminuir hacia arriba. Para valores de k' (permeabilidad) bastante bajos, la presión de vapor decrece tanto que deviene negativa.

4.3.7.3.- Basculamiento

En la figura 4.2 se muestra la configuración de la célula de alojamiento del medio poroso, con sus cubetas, tomas piezométricas, placa calefactora y otros accesorios, en la que se llevaron a cabo las experiencias de ebullición. El MPS ocupa un volumen cilíndrico de 0,15 m de diámetro y 0,15 m de altura. Su frontera superior es permeable, pero los componentes que la constituyen (tela tupida de nylon y chapa perforada) impiden todo desplazamiento de la fase sólida discreta del medio poroso. Por encima de esta frontera se encuentra un primer cuerpo de cubeta de 0,162 m de diámetro y 0,05 m de altura y por encima de este un segundo cuerpo de 0,159 m de diámetro y 0,1 m de altura.

En un capítulo anterior se explicó como se determinaba la posición media de la entrefase vapor-líquido subenfriado mediante la medida del volumen de líquido desplazado a la cubeta desde el MPS a través de la frontera permeable. También se dijo que el máximo desplazamiento de dicha entrefase ocurre en el medio poroso a base de arena saturado por agua destilada. Pues bien, vamos a ver como en estos medios se alcanza una situación umbral de inestabilidad que conduce al basculamiento de líquido subenfriado hacia la superficie de la placa calefactora en contacto con el medio poroso.

En la figura 4.98 se muestra la evolución temporal de volumen de líquido acumulado en la cubeta y la evolución temporal de la presión calculada a partir de la altura manométrica medida por el piezómetro 3, ambos valores (volumen y presión) referenciados a cero al inicio de la experiencia. La figura 4. 99 muestra idénticas representaciones pero con presiones determinadas por el piezómetro 4. Por otra parte, la figura 4. 100 muestra simultáneamente la evolución de la presión medida por el piezómetro 3 y la evolución temporal de la temperatura de la placa medida a 5 mm de distancia de su superficie de contacto con el medio poroso. En todos los casos se trata del medio poroso en base a arena saturada de agua destilada.

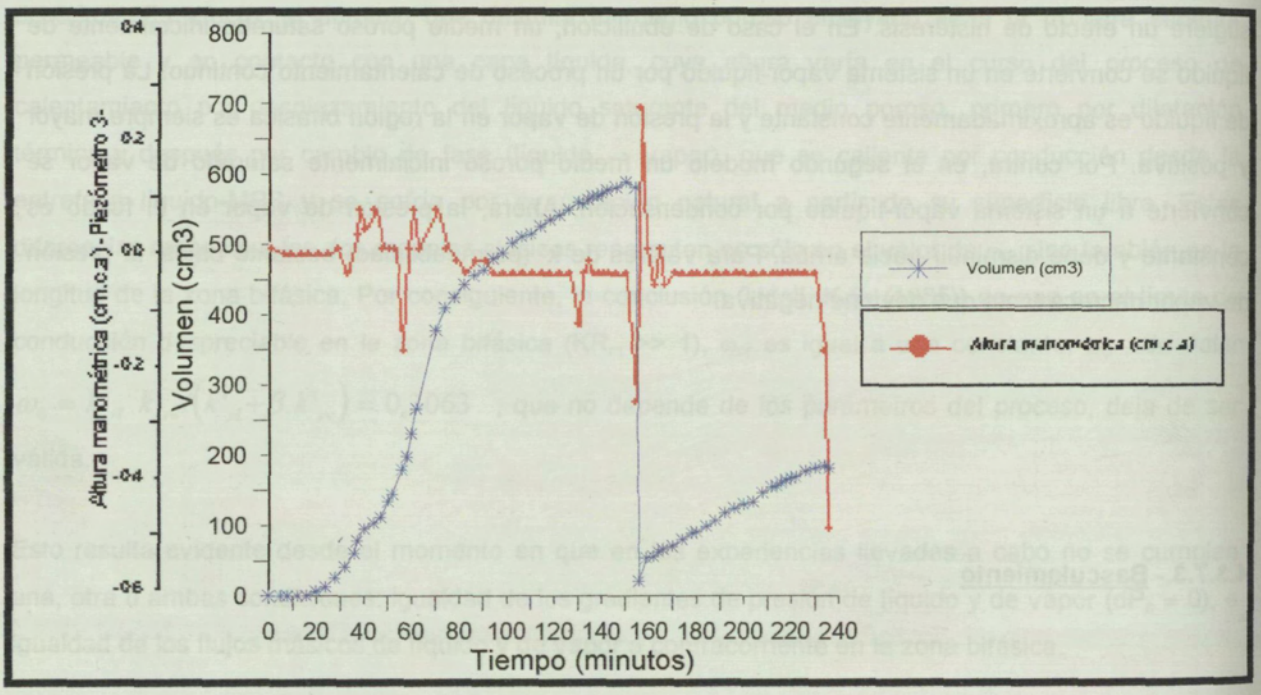


Figura 4.98.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 3) y del volumen de líquido acumulado, en el caso del medio poroso en base a arena saturada de agua destilada.

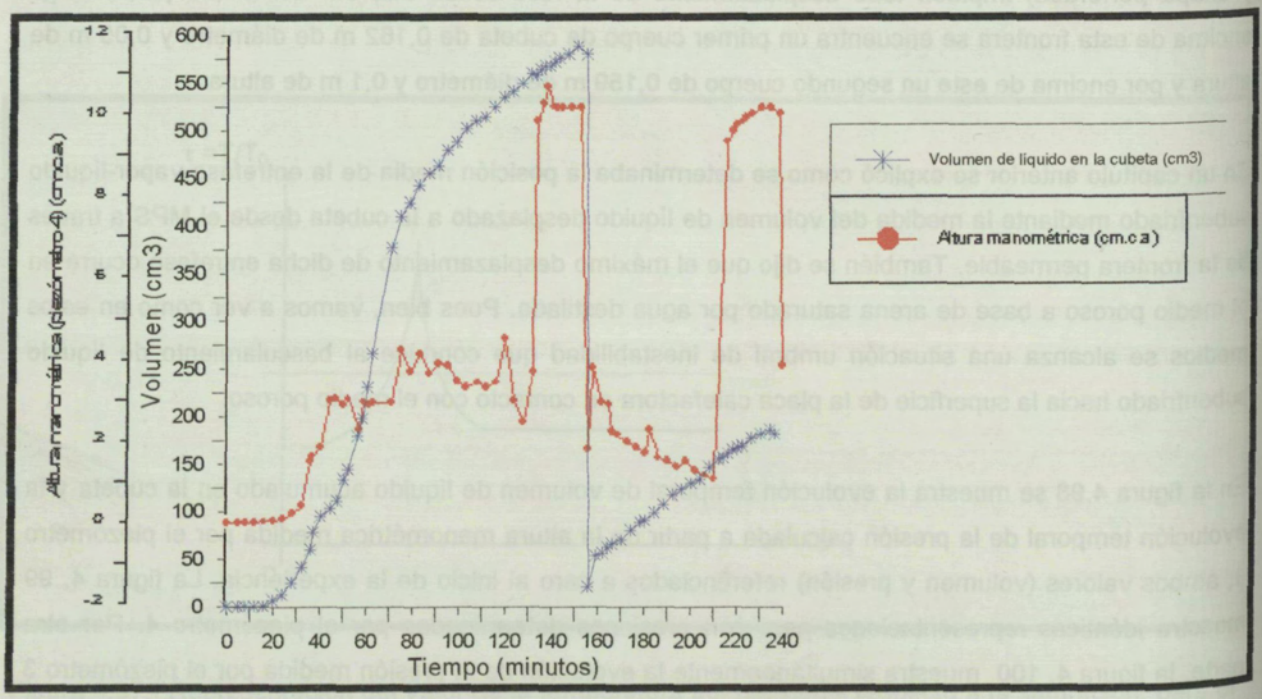


Figura 4. 99.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 4) y del volumen de líquido acumulado, en el caso del medio poroso en base a arena saturada de agua destilada

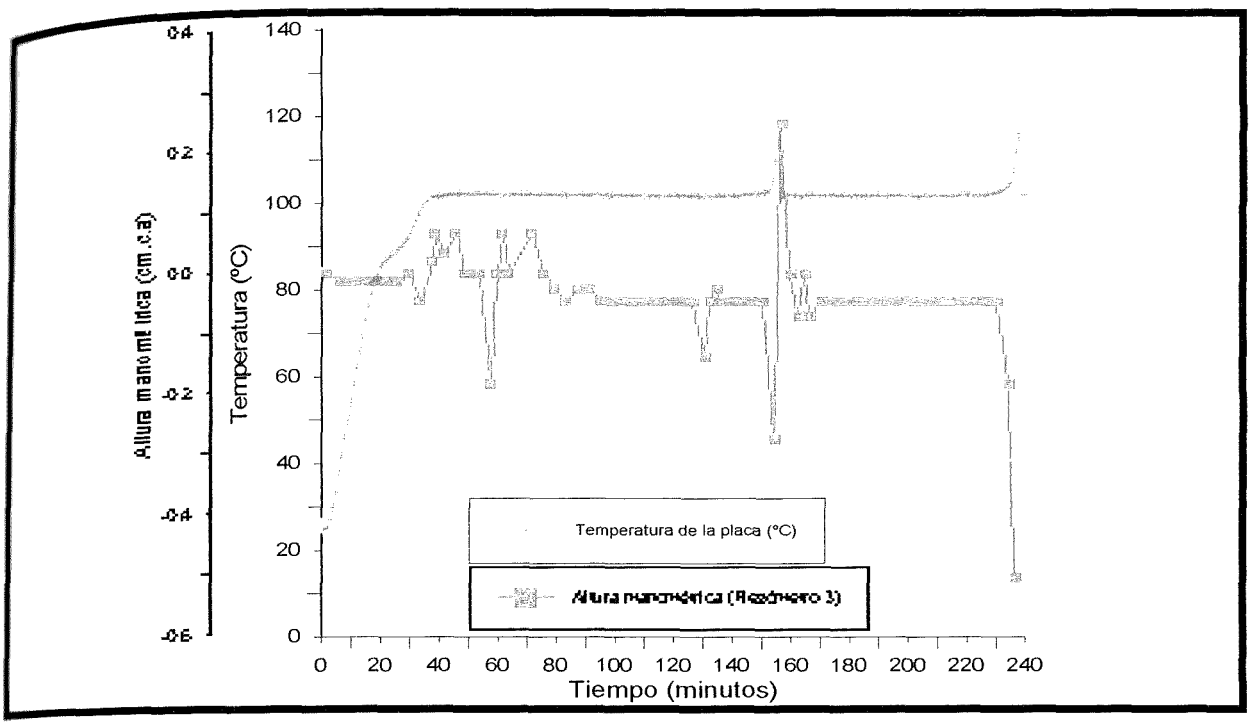


Figura 4.100.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 3) y de la temperatura de la placa medida a 5 mm de distancia de su superficie de contacto con el medio poroso.

Una primera lectura de estas gráficas nos dice que la tasa de evaporación pasa paulatinamente de un máximo constante a un mínimo asintótico, situación límite que va acompañada de inmediata aparición de "dryout". Tan pronto se inicia el "dryout", la presión de vapor en la entrefase MP-placa calefactora toma un valor que supera la presión fluidoestática más la presión capilar en la entrefase líquido subenfriado-región bifásica. Ello da lugar a la formación de canales que comunican directamente la región de vapor del medio poroso con la capa de líquido superior. La expansión brusca del vapor y su descenso de presión por condensación dan lugar a una presión negativa (succión) que produce basculamiento de líquido desde la capa al fondo del medio poroso. El líquido transferido da lugar primero a un descenso del volumen de líquido acumulado en la cubeta, a un aumento casi simultáneo, muy rápido, de la presión de vapor por vaporización "flash" del líquido al entrar en contacto con la placa y, finalmente, a una restitución del estado inicial del medio poroso antes de iniciarse el "dryout".

Según esta interpretación la tensión superficial del líquido saturante debe ser una variable fuerte. En efecto, las figuras 4.101, 4.102 y 4.103 que se refieren al medio poroso en base arena saturada de solución de tensioactivo, muestran como el fenómeno de "dryout" se presenta mucho antes que en el caso de medio poroso saturado de agua destilada, y también que se reproduce con mayor frecuencia.

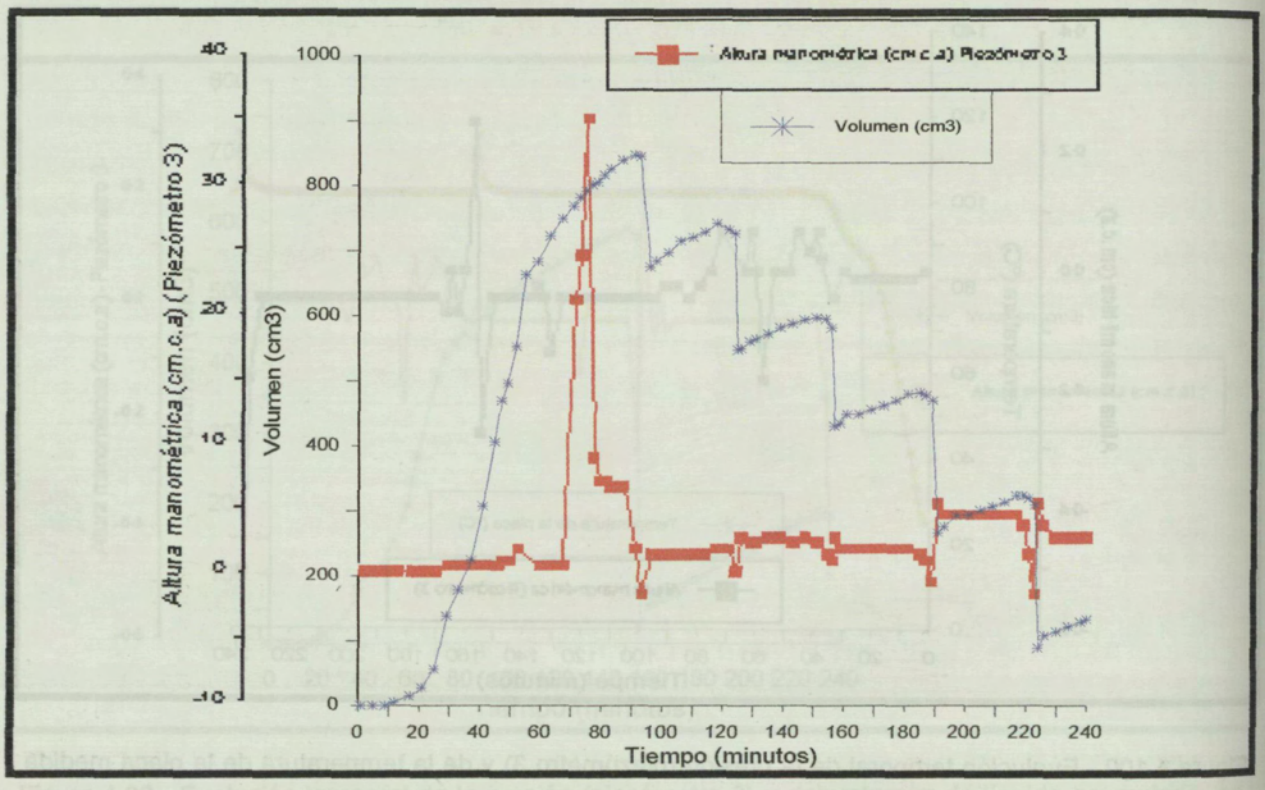


Figura 4.101.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 3) y del volumen de líquido acumulado, en el caso del medio poroso en base a arena saturada de solución de tensioactivo.

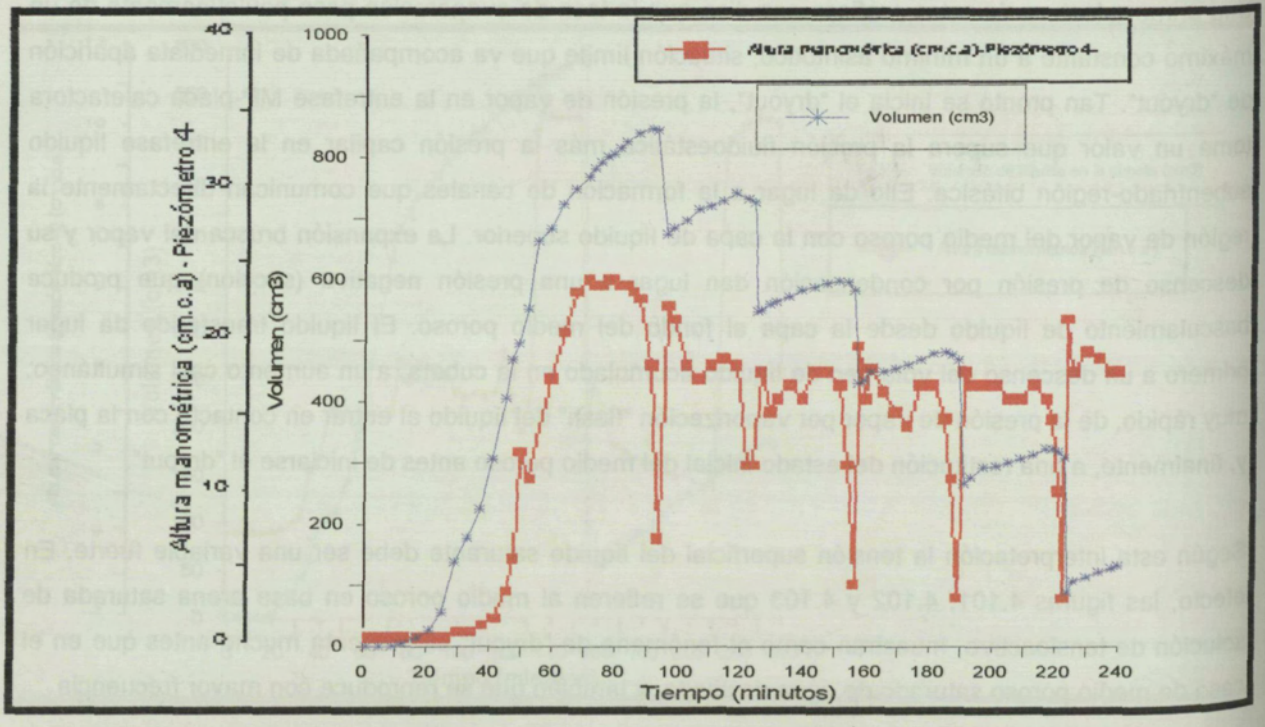


Figura 4.102.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 4) y del volumen de líquido acumulado, en el caso del medio poroso en base a arena saturada de solución de tensioactivo.

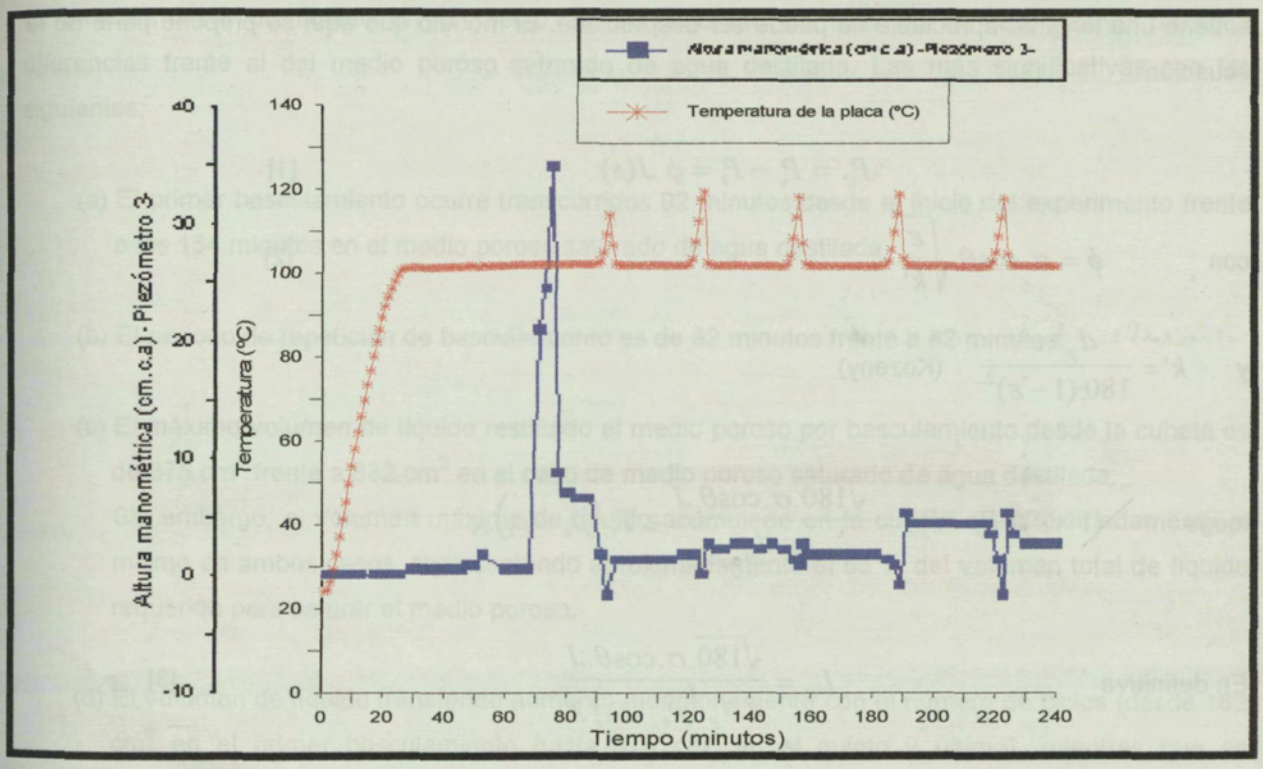


Figura 4.103.- Evolución temporal de la presión (piezómetro 3) y de la temperatura de la placa medida a 5 mm de distancia de su superficie de contacto con el medio poroso.

La presencia eventual de canales de vapor en medios porosos inicialmente saturados de líquido ha sido citada por varios investigadores (Gabor y colabor., 1972; Barleón, 1984; Buchlin y Van Komickloo, 1986; entre otros). A partir de una determinada profundidad en el medio poroso hirviente aparecen canales por los que se escapa vapor al mismo tiempo que se llenan progresivamente con el líquido que por ellos desciende. De hecho, las ecuaciones de flujo sugieren la aparición de tales canales al analizar las condiciones de contorno en la frontera superior del medio poroso (Reed, 1986). La experiencia enseña, y así se ha podido comprobar por simples experimentos realizados con tal fin (fotografía 13 - Anexo 5-) que en condiciones apropiadas, bajo un flujo específico de calor determinado, se originan unos canales de flujo de vapor en forma de cadena de burbujas relativamente grandes, lo que conlleva ΔP_c pequeño, y de acuerdo con la función de Leverett, en regiones de saturación de líquido próxima a la unidad. Por consiguiente, el área de la sección por la que fluye el vapor en la zona superior del medio poroso debe ser pequeña y estar asociada a capilares de gran diámetro.

Una de las cuestiones que plantea el fenómeno de "basculamiento" es la determinación de la "longitud de canal". Los modelos propuestos con este propósito se inspiran en el de Lipinski (1982). Este investigador supone que la presión de vapor allí donde se inicia el canal es suficiente como para contrarrestar el peso de las partículas más el del líquido que cargan sobre él. Evidentemente, se trata de un modelo aproximado pues no tiene en cuenta el efecto de resistencia fluidodinámica del canal que

si tiene una longitud apreciable no puede ser despreciada. El modelo que aquí se propone parte de la ecuación

$$P_C = P_v - P_l = \phi\ J(s) \qquad [1]$$

con $$\phi = \sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}} \qquad [2]$$

y $$k' = \frac{d_p{}^2.\varepsilon^3}{180.(1-\varepsilon)^2}$$ (Kozeny)

luego $$(1-\varepsilon).(P_v - P_l) = \frac{\sqrt{180}.\sigma.\cos\theta.J}{\varepsilon.d_p} \cong L_C(\rho_s - \rho_l).g$$

En definitiva $$L_C = \frac{\sqrt{180}.\sigma.\cos\theta.J}{\varepsilon.d_p.(\rho_s - \rho_l).g} \qquad [3]$$

En nuestras experiencias tenemos: $\varepsilon = 0{,}38$; $d_p \approx 2{,}96.10^{-3}$ m; $\rho_s = 2614$ kg/m^3; $\rho_l = 998$ kg/m^3; σ (agua destilada ~ 100 °C) $\approx 58{,}92.10^{-3}$ N/m; σ (solución de tensioactivo ~ 100 °C) $\approx 33{,}29.10^{-3}$ N/m;

$$L_C = 0{,}7524.(\sigma.\cos\theta.J) \qquad [4]$$

Para J se puede tomar la forma propuesta por Lipinski obtenida por ajuste funcional de los datos de Scheidegger (1957) obtenidos con arena

$$J = \left(S_e^{-1} - 1\right)^{0{,}175} / \sqrt{5} \qquad [5]$$

donde S_e es la saturación efectiva definida por

$$S_e = (s - s_r)/(1 - s_r)$$

En el caso de medio poroso en base a arena saturada de agua destilada, tomando $\cos\theta \approx 1$ y $J \approx 0{,}4$ $(S_e \approx 0{,}5)$ resulta $L_C = 0{,}0177\ m$, que coincide con la distancia entre la frontera superior del medio poroso, en contacto con el líquido de la cubeta, y la posición de la entrefase media líquido-zona bifásica.

El basculamiento de líquido en el medio poroso saturado de solución de tensioactivo presenta diferencias frente al del medio poroso saturado de agua destilada. Las más significativas son las siguientes:

(a) El primer basculamiento ocurre transcurridos 92 minutos desde el inicio del experimento frente a los 154 minutos en el medio poroso saturado de agua destilada.

(b) El periodo de repetición de basculamiento es de 32 minutos frente a 82 minutos.

(c) El máximo volumen de líquido restituido al medio poroso por basculamiento desde la cubeta es de 375 cm^3 frente a 832 cm^3 en el caso de medio poroso saturado de agua destilada.
Sin embargo, el volumen máximo de líquido acumulado en la cubeta es aproximadamente el mismo en ambos casos, representando aproximadamente el 85 % del volumen total de líquido requerido para saturar el medio poroso.

(d) El volumen de líquido transferido aumenta monótonamente con el número de ciclos (desde 162 cm^3 en el primer basculamiento hasta 375 cm^3 en el quinto y último), mientras que es prácticamente el mismo en el medio poroso saturado de agua destilada.

(e) La presión de vapor, calculada a partir de la medida del piezómetro 4, a la que ocurre el basculamiento es mayor en el medio poroso saturado de solución de tensioactivo que en el medio poroso de agua destilada. Esto se debe esencialmente al mayor valor de la presión fluidoestática en la entrefase líquido subenfriado-zona bifásica (746,6 Pa frente a 567,8 Pa).

4.4.- REFERENCIAS

FUKUSAKO, S.; KOMORIYA, T.; SEKI, N. (1986): "*An experimental study of transition and film boiling heat tranfer in liquid-saturated porous beds*". J.Heat Transfer, Vol. 108, pp.117-124.

LIPINSKI R.J. (1982): "*A model for boiling and dryout in particles beds*". Sandia Labs. Report SAND 82-0765 (NUREG/CR-2646).

PLATE, E. (1982): "Engineering meteorology", Ed. Elsevier.

SATIK, C.; PARLAR, M. Y YORTSOS, Y.C. (1991*): "A study of steady state steam-water counterflow in porous media*", Int.J. Heat and Mass Transfer, vol. 34, nº 7.

SONDERGELD, C.H.; TURCOTTE, D.L. (1977): "*An Experimental Study of Two-Phase Convection in a Porous Medium with Applications to Geological Problems* ". J.Geophys.Res., 82, pp.2045-2053.

UDELL, K.S. (1985): "*Heat Transfer in Porous Media Considering Phase Change and Capillarity: The Heat Pipe Effect*". Int.J.Heat and Mass Transfer, 28, pp.485-495

CAPÍTULO V.- MODELO FÍSICO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE MEDIOS POROSOS SATURADOS HASTA EBULLICIÓN-DRYOUT DE SU FASE LÍQUIDA

RESUMEN

Se realiza una descripción del modelo físico correspondiente al proceso de calentamiento de un medio poroso saturado hasta ebullición-dryout de su fase líquida, que tiene lugar en los medios porosos estudiados, y cuyos resultados experimentales fueron expuestos en el capítulo anterior.

5.1.- INTRODUCCIÓN

Las experiencias de ebullición en MPS se han llevado a cabo siguiendo un proceso no estacionario de calentamiento, a potencia constante, a partir del fondo, desde un estado inicial en equilibrio con el medio entorno ambiente. El MPS está limitado por una frontera impermeable por todas partes salvo en su superficie superior, que está limitada por una membrana indeformable, permeable, sobre la que se encuentra una capa de líquido subenfriado.

El proceso puede dividirse en tres etapas:

1.- Etapa de calentamiento progresivo del MPS hasta la aparición de vapor en la entrefase MPS-placa calefactora.

En esta etapa ocurre un continuo desplazamiento de líquido del MPS hacia la cubeta a través de la frontera permeable que resulta del aumento de volumen por dilatación térmica de las fases sólida y líquida del MPS.

2.- Etapa de evaporación de líquido en la superficie de contacto de la placa calefactora con el medio poroso, que da lugar a una zona bifásica cuyo frente se propaga por el medio poroso hacia la frontera permeable. Simultáneamente ocurre un desplazamiento significativo de líquido desde el MPS hacia la cubeta, de cuantía considerablemente mayor que el anterior, debido a la enorme variación del volumen específico del fluido al pasar del estado líquido a vapor.

3.- Etapa de formación de una entrefase de medio poroso saturado de vapor (zona seca) entre la placa calefactora y zona bifásica del medio poroso con la aparición de "dryout".

5.2.- 1ª ETAPA: CALENTAMIENTO PROGRESIVO DEL MPS

(a) Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{\varepsilon.\rho_l + (1-\varepsilon).\rho_s\right\} + \nabla(\rho_l.\vec{V}_l) = 0 \qquad [1]$$

donde ρ_l y ρ_s son funciones de T: $\beta_l = -\frac{1}{\rho_l}\frac{\partial \rho_l}{\partial T}$; $\beta_s = -\frac{1}{\rho_s}\frac{\partial \rho_s}{\partial T}$ [2]

(b) Ecuación de flujo:

$$\nabla P_l + \left(\frac{v}{k_l'}\right).\rho_l.\vec{V}_l + \rho_l.\vec{g} = 0 \qquad [3]$$

donde k_l' representa la permeabilidad intrínseca combinada del MPS y de la frontera permeable. Se ha supuesto además $\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} \approx 0$.

(c) Ecuación de la energía:

$$< \rho.c_p >_e \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}_l.\nabla(\rho_l.c_{pl}.T) - \nabla(\lambda_e.\nabla T) = 0 \qquad [4]$$

donde: $$< \rho.c_p >_e = (1-\varepsilon).\rho_s.c_{ps} + \varepsilon.\rho_l.c_{pl} \qquad [5]$$

La ecuación [4] es válida tan pronto se inicia la transferencia de calor desde la placa calefactora al MPS por su superficie de contacto.

En esta entrefase aparece una pequeña discontinuidad de temperatura debida a la conductancia de contacto.

$\vec{V}_l\nabla(\rho_l.c_{pl}.T)$ representa el transporte convectivo de entalpía por el líquido que se desplaza en el MPS debido a la dilatación térmica.

$$|\vec{V}_l| = \frac{1}{\varepsilon}\int_0^z \frac{\partial}{\partial t}\left\{\varepsilon\left(\alpha.T + \beta.T^2\right)_l + (1-\varepsilon).\alpha_s.T\right\}.dz \qquad [6]$$

En los medios porosos saturados cuya permeabilidad intrínseca es grande (del orden de 10^{-10} m^2) el valor de $|\vec{V}_l|$ debe comprender también un transporte convectivo promovido por inestabilidad de Rayleigh. En este contexto, se ha determinado el número de Rayleigh para cada MPS en las condiciones del proceso de calentamiento más críticas.

El valor del número de Rayleigh se calcula por la fórmula:

$$Ra = \frac{k'.g.\beta.\Delta T.h}{v.\lambda_e/(\rho.c_p)_l} \qquad [7]$$

De todos los medios porosos utilizados en las experiencias sólo los de matriz sólida a base de arena acusan efectos de inestabilidad térmica en el proceso de calentamiento por abajo. El número de Rayleigh de filtración toma el valor de 114,56, en el caso de saturación del medio poroso por agua destilada, y de 291,28 cuando el fluido saturante es una solución de tensioactivo. Ambos valores son superiores al crítico, $Ra_c = 4.\pi^2$.

Hasta el momento en que la superficie de la placa calefactora en contacto con el MPS alcanza la temperatura de 100 ºC, justo antes de que se produzca cambio de fase del fluido saturante, la velocidad V_l es lo suficientemente pequeña como para que el término convectivo de la ecuación [4] pueda ser despreciado. En tales condiciones, la ecuación [4] se simplifica en

$$< \rho.c_p >_e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad [8]$$

con la condición z = 0 $\rightarrow$ $$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} = \dot{q}_0 \qquad [9]$$

Este valor de $\dot{q}_0$ se puede calcular en todo momento a partir del valor de la temperatura en puntos conocidos de la placa calefactora, a la que se ha aplicado instantáneamente una potencia eléctrica $\dot{W}$.

El campo de temperaturas en la placa está definido por la ecuación

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \qquad [10]$$

$$\theta(z,t) = \frac{\dot{q}_0}{\lambda} 2\sqrt{\alpha.t}\left(\frac{e^{-\xi^2}}{\sqrt{\pi}} - \xi.erfc\xi\right) = \frac{\dot{q}_0}{\lambda} 2\sqrt{\alpha.t}.ierfc\xi \qquad [11]$$

donde $$\xi = \frac{z}{2\sqrt{\alpha.t}} \qquad [12]$$

La placa, de aluminio, tienen las propiedades siguientes: λ = 207 W/m.K; ρ = 2700 kg/m^3 ; c_p = 0,909 kJ/kg.K

La ecuación anterior nos permite calcular el valor de $\dot{q}_0$, o sea el calor transferido por la placa al MPS por su entrefase.

Para determinar el campo de temperaturas en el MPS se utiliza la ecuación [4], prescindiendo del término convectivo, pues $|\vec{V}_l|$ es muy pequeño hasta que se produce la evaporación. Por consiguiente, resulta la ecuación [8], o bien

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_e \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad ; \quad \dot{q}_0 = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \text{ , en } z = 0 \qquad [13]$$

con $\alpha_e = \dfrac{\lambda_e}{< \rho.c_p >_e}$ y z medido a partir de la entrefase placa-MPS.

y $\theta(z,t) = T(z,t) - T(0)$

La solución de la ecuación [13] es la misma que [11], tomando α_e en lugar de α ; o sea

$$\theta(z,t) = T(z,t) - T_0 = \frac{\dot{q}_0}{\lambda_e} 2\sqrt{\alpha_e.t}\, .ierf\ \xi \qquad [14]$$

donde $\xi = \dfrac{z}{2\sqrt{\alpha_e.t}}$, midiéndose ahora z a partir de la superficie de la placa en contacto con el medio poroso.

5.3.- 2ª ETAPA: CAMBIO DE FASE Y PROPAGACIÓN DE UN FRENTE DE VAPOR

Tan pronto como la superficie del MPS en contacto con la placa calefactora alcanza la temperatura de 100 °C, se inicia el proceso de cambio de fase. A partir de este momento, a medida que se aporta calor al medio poroso bajo una temperatura de placa $T_p \geq T_s$ (temperatura de saturación), pueden suceder dos fenómenos:

- En la superficie calentada se forma vapor que asciende a través del medio poroso hasta condensar en una capa subenfriada desde la cual vuelve líquido a la superficie de evaporación por acción capilar-gravitacional. En esta zona bifásica la saturación, s, debe variar desde el valor s_{ir} a la unidad.

- Transcurrido un tiempo, la superficie calefactora queda recubierta con una capa de vapor, momento a partir del cual $T_p - T_s$ aumenta monótonamente en el transcurso del tiempo.

Las experiencias llevadas a cabo muestran que el primer fenómeno es predominante en los medios porosos cuya matriz sólida es arena. No obstante, el segundo fenómeno aparece secuencialmente, para desaparecer después, con una frecuencia que aumenta al disminuir la tensión superficial del líquido. En todos los otros medios porosos ocurre el segundo fenómeno al cabo de un cierto tiempo desde el momento que el medio poroso en contacto con la placa calefactora alcanza la temperatura de saturación.

En las figuras 5.1, 5. 2 y 5. 3 se representan tres diferentes sistemas de medios porosos a los que se les aplica un flujo de calor por su parte inferior, indicándose las distribuciones de saturación y de temperatura en el MP.

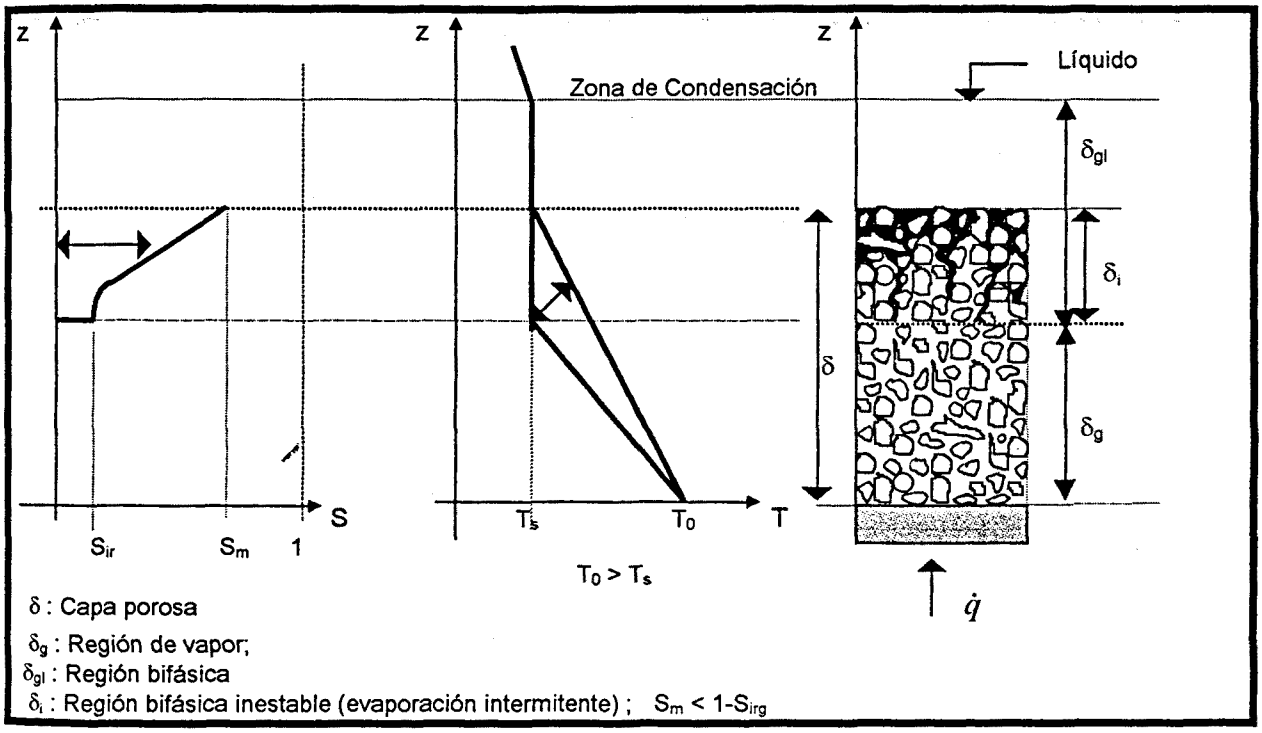


Figura 5.1.- Evaporación desde una superficie horizontal impermeable cubierta por una capa porosa con $\delta < \delta_g + \delta_{gl}$. donde se muestran las distribuciones de temperatura y de saturación asociadas.

La figura 5.1 muestra el proceso de evaporación desde una superficie horizontal impermeable sobre la que se ha situado una capa porosa de espesor δ. Se aprecian dos zonas perfectamente diferenciadas: una región inferior de vapor, δ_g, donde s = s_{ir} (irreducible o residual) y una región superior bifásica, donde la saturación crece hasta z = δ siendo en este punto inferior a 1 - s_{irg}, designándola como s_m. Siendo $\delta < \delta_g + \delta_{gl}$, la saturación alcanza el valor s = 1 en la parte superior coincidiendo con la zona de condensación.

La región bifásica es inestable presentando un secado intermitente siendo invadida periódicamente por la fase vapor. Cuando el medio poroso está seco se produce una ebullición nucleada en la superficie superior del medio poroso.

Cuando la región bifásica se extiende en la capa porosa, la región bifásica está a la temperatura de saturación (asumiendo despreciable el sobrecalentamiento del líquido debido a capilaridad). La evaporación tiene lugar en la zona de evaporación justo por debajo de la zona bifásica. Cuando la capa porosa se seca, la evaporación se presenta en z = δ. La frecuencia de secado intermitente de la capa porosa decrece al incrementar el espesor de la capa, δ, y es cero para $\delta > \delta_g + \delta_{gl}$.

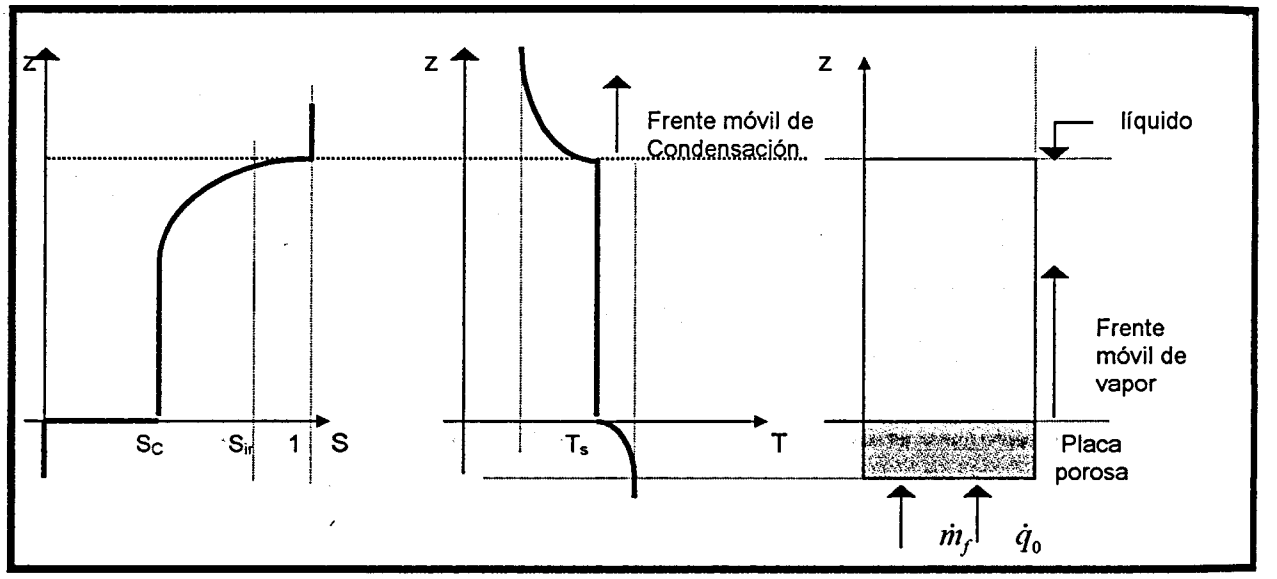


Figura 5.2.- Medio poroso con superficies limitantes permeables, al que se le añade un flujo de calor, y un flujo másico de vapor. Se muestran las distribuciones de saturación y de temperatura.

La figura 5.2 muestra las distribuciones de saturación y temperatura en un medio poroso con superficies límites, superior e inferior, permeables. Por su parte inferior se le aplica un flujo de calor, así como la inyección de vapor, el cual condensa en el medio poroso desplazando la fase líquida. El líquido subenfriado condensa el vapor en la zona de condensación. En este caso se presenta un frente de condensación móvil en estado quasi-estacionario.

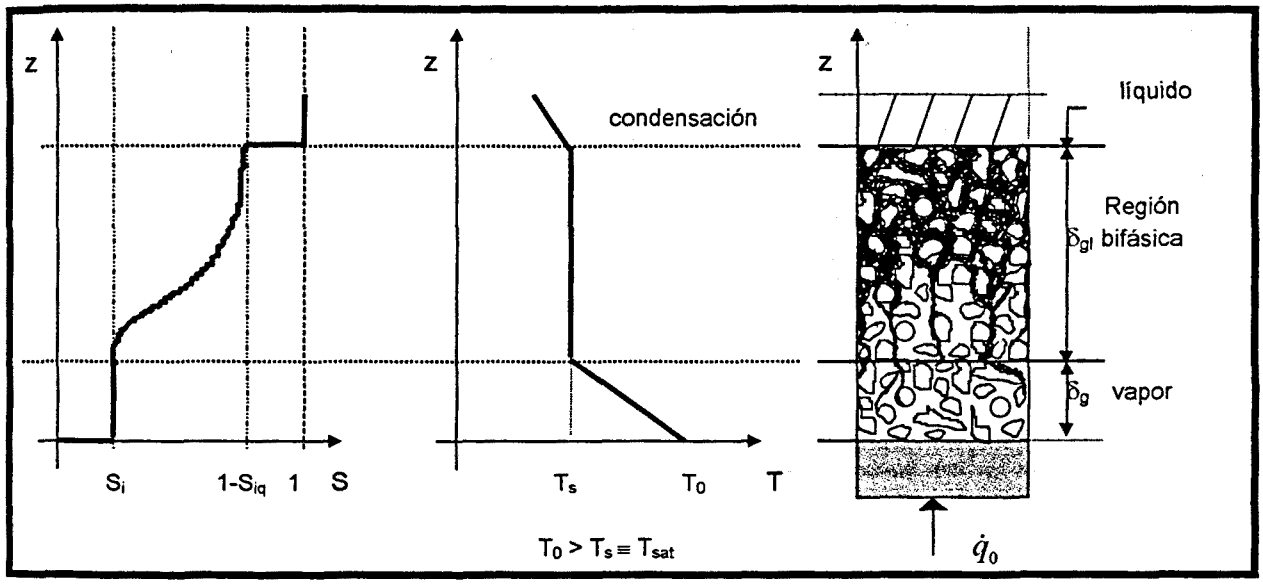


Figura 5.3.- Medio poroso con superficie superior permeable e inferior impermeable al cual se le aplica un flujo de calor por su límite inferior. Se han diferenciado tres zonas: zona de vapor, región bifásica y zona de líquido subenfriado.

Por último en la figura 5.3 se muestra el caso de un medio poroso, con límite inferior impermeable y superior permeable, inicialmente saturado de fase líquida, al cual se le ha aplicado un flujo de calor por su superficie inferior. Con el transcurso del tiempo de calentamiento, una vez comenzada la evaporación en la superficie calentada, el líquido es desplazado por la formación de vapor que tiende a ascender a través del medio poroso. Si existe suficiente reflujo de líquido por acción capilar-gravitacional, se formaran dos zonas: una zona inferior bifásica y una zona superior de líquido subenfriado. En el caso de que este reflujo no sea suficiente para contrarrestar la evaporación generada, se formará una zona de vapor subyacente a la región bifásica, tal como muestra la figura.

Dada la estructura de los medios porosos granulares saturados y la naturaleza y estado superficial del material de la placa calefactora, cabe suponer la existencia de pequeñas burbujas de aire ocluidas en el MPS o en pequeñas cavidades en la entrefase medio poroso-placa, o en la misma placa. Como resultado, si el líquido que satura el medio poroso llega a la temperatura de saturación hervirá. La ebullición podrá ser, en un principio, nucleada o convectiva. Si es nucleada, con formación de burbujas, ha de ser forzosamente heterogénea. Si es convectiva -calor conducido a través de una pequeña capa de MPS- el líquido se evapora en la entrefase líquido-vapor sin formación de burbujas. Este último mecanismo ocurre únicamente en flujo hirviente. La ebullición pelicular requiere un sobrecalentamiento notable.

La ebullición nucleada puede aparecer también en líquido subenfriado; en este caso, la burbuja formada en algún punto de la superficie calefactora, crece y alcanza líquido relativamente frío, en su entorno, donde empieza a condensar el vapor elevando la temperatura de aquel. En ebullición nucleada, las burbujas crecen, se desprenden, ascienden por flotación y empujan nuevo líquido hacia la zona de formación de burbuja.

5.3.1.- Formación de burbujas

Veamos como ocurre la nucleación (formación de burbujas, heterogénea). Sea R el radio en la entrada de la cavidad y P_B la presión dentro de la burbuja. Entonces

$$P_B = P + \frac{2\sigma}{r} \qquad [1]$$

donde r es el radio de la burbuja.

Sea T_p la temperatura en la superficie de la placa calefactora. Para que ocurra la vaporización del líquido a presión P_B se ha de verificar

$$T_p > T_{sat} + \frac{dT}{dP}(P_B - P) \qquad [2]$$

Conforme a la ecuación de Clapeyron $\frac{dP}{dT} = \frac{h_{lv}}{(v_g - v_l).T_{sat}}$ [3]

y dado que $v_g >> v_l$, obtenemos

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T_{sat}}{h_{lv}.\rho_g}; \quad \text{luego} \quad T_p > T_{sat} + \frac{2.\sigma}{R}\frac{T_{sat}}{h_{lv}.\rho_g} \qquad [4]$$

donde R es el radio de la cavidad.

Si ΔT_{sat} es el valor de $T_p - T_{sat}$ al iniciarse la nucleación, entonces

$$R = \frac{2.\sigma.T_{sat}}{\rho_g.h_{lv}.\Delta T_{sat}} \qquad [5]$$

Para el agua libre, a 1 bar, ΔT_{sat} es habitualmente (≈ 5 °C). Tomando T_{sat} = 373 K; σ = 0,059 N/m; h_{lv} = 2256 kJ/kg; $\rho_g \equiv \rho_v$ = 0,598 kg/m^3, resulta R ≅ 6,5 μm.

En líquido subenfriado el sobrecalentamiento mínimo para crecimiento de burbuja está dado por la ecuación de Bergles y Rohsenow

$$\Delta T_C = 2.\left\{\frac{2.\dot{q}.\sigma.T_{sat}}{\rho_v.h_{lv}.\lambda_l}\right\}^{1/2} \qquad [6]$$

El cálculo teórico del coeficiente de transferencia de calor en ebullición nucleada no es actualmente posible. Esto se debe a que la ebullición ocurre en lugares de nucleación, y el número de lugares depende enormemente del estado físico y de la preparación de la superficie y de la eficacia con que el líquido humedece la superficie y desplaza el aire de las cavidades.

En principio, se han propuesto ecuaciones del tipo $\dot{q} \propto \Delta T_{sat}{}^{a}.n^{b}$ [7]

donde $\dot{q}$ es el flujo específico de calor (W/m^2), n es el número de lugares de nucleación en una área unidad, y, a y b son exponentes empíricos.

Como quiera que $\dot{q} = h.\Delta T_{sat}$ [8]

resulta $h \propto \Delta T_{sat}{}^{m}$ con m ≈ 0,7 [9]

El valor de h en ebullición nucleada de agua libre es típicamente de 10 kW/m^2.K.

Rohsenow ha propuesto una correlación de la forma $Nu = \frac{1}{C_{sf}}\mathrm{Re}^{1-n}.\mathrm{Pr}^{-m}$ [10]

donde:

$$Nu = \frac{h}{\lambda_l}\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right]^{1/2}; \quad \mathrm{Re} = \frac{\dot{q}}{h_{lv}.\rho_l}\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right]^{1/2}\frac{\rho_l}{\mu_l} \quad y \quad \mathrm{Pr} = \frac{\mu_l.c_{pl}}{\lambda_l} \qquad [11]$$

donde C_{sf} es un coeficiente que depende de la interacción superficie-fluido.

En forma explicita, la correlación de Rohsenow se expresa

$$\frac{c_{pl}.\Delta T_{sat}}{h_{lv}} = C_{sf}\left[\frac{\dot{q}}{\mu_l.h_{lv}}\left(\frac{\sigma}{g.(\rho_l-\rho_v)}\right)^{1/2}\right]^n.\left(\frac{\mu_l.c_{pl}}{\lambda_l}\right)^{1+m} \qquad [12]$$

donde, típicamente, n = 0,33 ; m = 0,7 ; $0{,}0025 \leq C_{sf} \leq 0{,}015$.

Tomando como referencia la ecuación [8] se ha procedido al cálculo de h en una de las experiencias con el fin de confirmar la válidez de una ecuación de este tipo. En el caso del medio poroso a base de partículas de acero saturado con agua destilada, que presenta una ΔT_{sat} = 4 °C , considerando una potencia de 300 W, se obtiene un coeficiente de transferencia de $h \approx 4{,}24$ kW/m^2.K. La diferencia entre el valor calculado y el dado anteriormente, puede explicarse por no tener una garantía de que la ebullición sea plenamente nucleada, sino que como se ha comentado sería nucleada-pelicular.

De conformidad con los resultados experimentales, el inicio de la evaporación se manifiesta por una generación espacialmente aleatoria de burbujas que encuentran su origen en los extremos inferiores de los capilares de mayor diámetro.

Evidentemente, la presión del vapor en la burbuja, P_v, ha de ser mayor que la presión fluidoestática del lado del líquido, P_l. De acuerdo con la ecuación de Kelvin:

$$2.\sigma < \frac{1}{r} >= \left(P_v - P_0\right) - \frac{R_v.T}{v_l}.\ln\left(\frac{P_v}{P_0}\right) \qquad [13]$$

donde $P_v = P_0$ para $< \frac{1}{r} >= 0$; es decir, para el agua libre. Así, resulta que para una temperatura dada la presión de vapor disminuye a medida que $< \frac{1}{r} >$ aumenta, siendo $< \frac{1}{r} >$ el inverso del radio medio de curvatura del menisco.

5.3.2.- Zona bifásica

Sea $\dot{q}$ el flujo específico de calor transmitido por la placa al medio poroso. En condiciones de equilibrio, el flujo capilar de líquido hacia la placa debe ser idéntico al de vapor que parte de la placa, luego

$$\rho_v.V_v + \rho_l.V_l = 0 \qquad [14]$$

Sea A el área de la sección recta del MPS, constante, y ε.A el área disponible para el flujo del fluido. Las ecuaciones de balance de masa para las fases líquida y vapor se escriben

$$\varepsilon.\rho_l \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla\left(\rho_l.\vec{V}_l\right) = -\Gamma \qquad [15]$$

$$\varepsilon.\rho_v \frac{\partial}{\partial t}(1-s) + \nabla\left(\rho_v.\vec{V}_v\right) = \Gamma \qquad [16]$$

donde s es la saturación de líquido y Γ es la tasa temporal de generación de vapor (kg/m^3.s).

A su vez, la ecuación que describe el cambio de fase en la parte del medio poroso afectada por la ebullición, se expresa

$$-\varepsilon.\rho_v.h_{lv}\frac{\partial s}{\partial t} + h_{lv}\nabla\left(\rho_v.\vec{V}_v\right) = \nabla\vec{q} \qquad [17]$$

donde $\nabla\vec{q}$ es el calor aportado a la zona de cambio de fase por unidad de volumen y unidad de tiempo, de modo que $\Gamma = \nabla\vec{q}/h_{lv}$

Por otra parte, las ecuaciones de flujo se escriben

$$\nabla P_i + \frac{\upsilon_i}{k'.k'_{ri}}\rho_i.\vec{V}_i + \rho_i.\vec{g} = 0 \;; \quad i = l, v \qquad [18]$$

donde k_{ri}' representa la permeabilidad relativa de la fase i, que es una función de la saturación.

Ahora bien, las presiones locales P_v y P_l estan relacionadas por la presión capilar, luego

$$\frac{dP_c}{dz} = -\frac{1}{k'}\left\{\frac{\mu_v.V_v}{k_{rv}'} - \frac{\mu_l.V_l}{k_{rl}'}\right\} + (\rho_l - \rho_v).g \qquad [19]$$

o bien

$$\frac{dP_c}{dz} = -\frac{\nabla\vec{q}}{h_{lv}.k'}\left\{\frac{v_v}{k_{rv}'} + \frac{v_l}{k_{rl}'}\right\} + (\rho_l - \rho_v).g \qquad [20]$$

con $P_c = \phi J(s)$ [21]

donde $\phi = \sigma.\cos\theta\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}$ [22]

y $J(s)$ es la función de Leverett.

Las permeabilidades relativas pueden ser dadas como funciones de la saturación únicamente, funciones que fueron establecidas por Wyllie (1962) para medios porosos en base a arena

$k_{rl}' = S^3$; $k_{rv}' = (1-S)^3$, para arena no consolidada bien clasificada.

$k_{rl}' = S^{3,5}$; $k_{rv}' = (1-S)^2\left(1-S^{1,5}\right)$, para arena pobremente clasificada

con $S = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir} - s_{ir,v}}$ [23]

Para estos medios porosos en base a arena, Scheidegger (1974) propuso la siguiente expresión que relaciona la presión capilar con *k'*, s, ε y σ

$$< P_c >= \frac{\sigma}{\left(k'/\varepsilon\right)^{1/2}}\left[0{,}364.\left(1 - e^{-40(1-\varepsilon)}\right) + 0{,}221.(1-s) + \frac{0{,}005}{s - 0{,}08}\right] \qquad [24]$$

A partir de las ecuaciones (19, 20, 21 y 22) obtenemos

$$\frac{\sigma}{\left(k'/\varepsilon\right)^{1/2}}\frac{d\,J}{d\,z} = -\frac{\Gamma}{k'}\left[\frac{v_v}{(1-S)^3} + \frac{v_l}{S^3}\right] + (\rho_l - \rho_v).g = \frac{\sigma}{\left(k'/\varepsilon\right)^{1/2}}\frac{d\,J}{dS}\frac{dS}{dz} \qquad [25]$$

Esta ecuación nos permite determinar la altura a partir de la placa calefactora de la capa de la región bifásica en que el parámetro de saturación es igual a 1 ; o sea: la altura de la capa bifásica

$$Z_{bf} = \int_0^1 \frac{\dfrac{\sigma}{(k'/\varepsilon)^{1/2}} \dfrac{dJ}{dS}}{-\dfrac{\Gamma}{k'}\left[\dfrac{v_v}{(1-S)^3} + \dfrac{v_l}{S^3}\right] + (\rho_v - \rho_l).g} dS \qquad [26]$$

La resolución de la ecuación [26] presenta, en general, notables dificultades que se agravan en nuestro caso por, entre otras, las siguientes razones:

(a) No es posible conocer con suficiente precisión y fiabilidad el valor de ΔT en la entrefase placa-medio poroso. Ello impide identificar de modo inequívoco el modelo de ebullición y, por consiguiente, el verdadero valor de Γ.

(b) Existe considerable incertidumbre acerca de los valores de permeabilidad relativa y de su dependencia del grado de saturación. Scheidegger (1957) y Dullien (1979) indican que pueden existir considerables diferencias de permeabilidades relativas entre medios diferentes.

La figura 5.4 muestra la forma de las curvas de permeabilidad relativa. Los rasgos más comunes son:

- Las dos funciones son monótonas y la suma $k'_W + k'_{nW}$ es habitualmente menor que la unidad, presentando un mínimo.

- Ambas k'_W, k'_{nW} son cero para valores de saturación inferiores a los residuales S_{rw}, S_{rnw}.

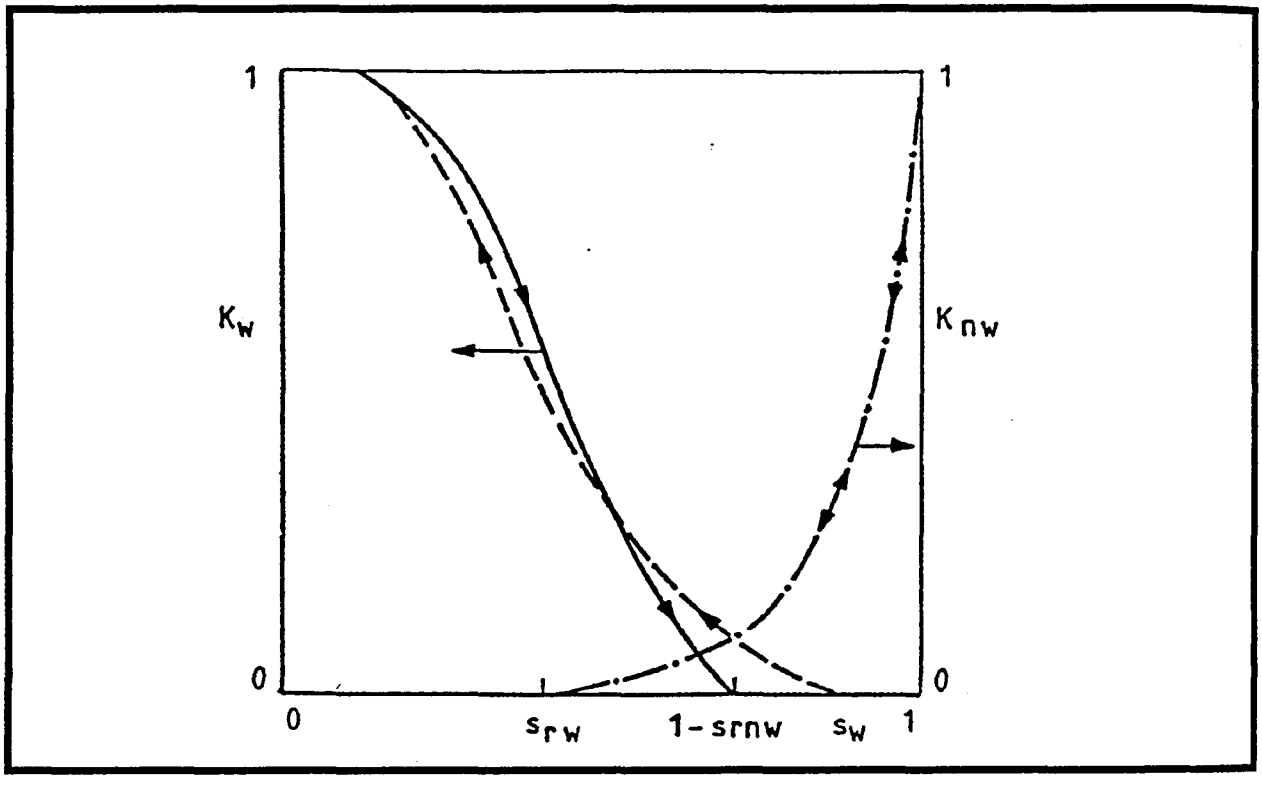


Figura 5.4.- Curvas de permeabilidades relativas respecto a la saturación, en los procesos de imbibición y de drenaje [Larson et al., 1981].

Los valores de k'_v y k'_l en base a los datos aportados por Turland y Morgan (1985) se encuentran en la Tabla 5.1.

	κ_v	κ_l	η_v	η_l	entrada
Turland & Moore (1983)	$1-s$	s^3	$(1-s)^2$	s^4	1
Lipinski (1980)	$1-1.11s$	s^3	$(1-s)^3$	s^3	2
Lipinski (1982)	$(1-s_e)^3$	s_e^3	$(1-s_e)^3$	s_e^3	3
Lipinski (1984)	$(1-s_e)^3$	s_e^3	$(1-s_e)^5$	s_e^5	4
Saez & Carbonell (1985)	$(1-s)^{4.8}$	$s_e^{2.43}$	$=\kappa_v$	$=\kappa_l$	5
Levec et al. (1986)	$(1-s)^n$, $n=f(Re)$	$s_e^{2.9}$, $s_e>0.2$ $0.25s_e^2$, $s_e<0.2$	$=\kappa_v$	$=\kappa_l$	6
Lee & Catton (1984)	$\tilde{\alpha}^3(1.58\tilde{\alpha}^2-0.83\tilde{\alpha}+0.25)$ with $\tilde{\alpha}=\frac{(1-s)}{\alpha'}$	$s^{2.2}$	$=\kappa_v$	$=\kappa_l$	7
Schulenberg & Muller (1984)	$(1-s_e)^3$	s_e^3	$(1-s_e)^6$, $s_e<0.68$ $0.1(1-s_e)^4$, $s_e>0.68$	s_e^5	8
Chu, Dhir & Marshall (1983)	$0.2(\alpha-\alpha_0)+0.8(\alpha-\alpha_0)^2$	$0.5(1-(\alpha-\alpha_0))^4+0.5(1-(\alpha-\alpha_0))^5$	$0.4(\alpha-\alpha_0)^2+0.6(\alpha-\alpha_0)^3$	$(1-(\alpha-\alpha_0))^3$	9

Tabla 5.1.- Correlaciones para permeabilidades relativas y pasabilidades.

La tabla 5.1 contiene las expresiones propuestas para la dependencia funcional de k'_l, k'_v, η_l y η_v respecto de la saturación de líquido, s, o respecto de la saturación efectiva, s_e ;

$s_e = (s - s_r)/(1 - s_r)$. En la tabla α representa la saturación de vapor.

Estudios experimentales llevados a cabo en el Van Kárman Institut han conducido a las correlaciones siguientes:

$$k_l' = s_e^{\,3} \;\; ; \;\; k_v' = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^2 \qquad [27]$$

A falta de una evaluación experimental propia de los valores de k_{rl}' y k_{rv}' se toman los valores aportados por las curvas de Wyckoff y Botset (Figura 5.5).

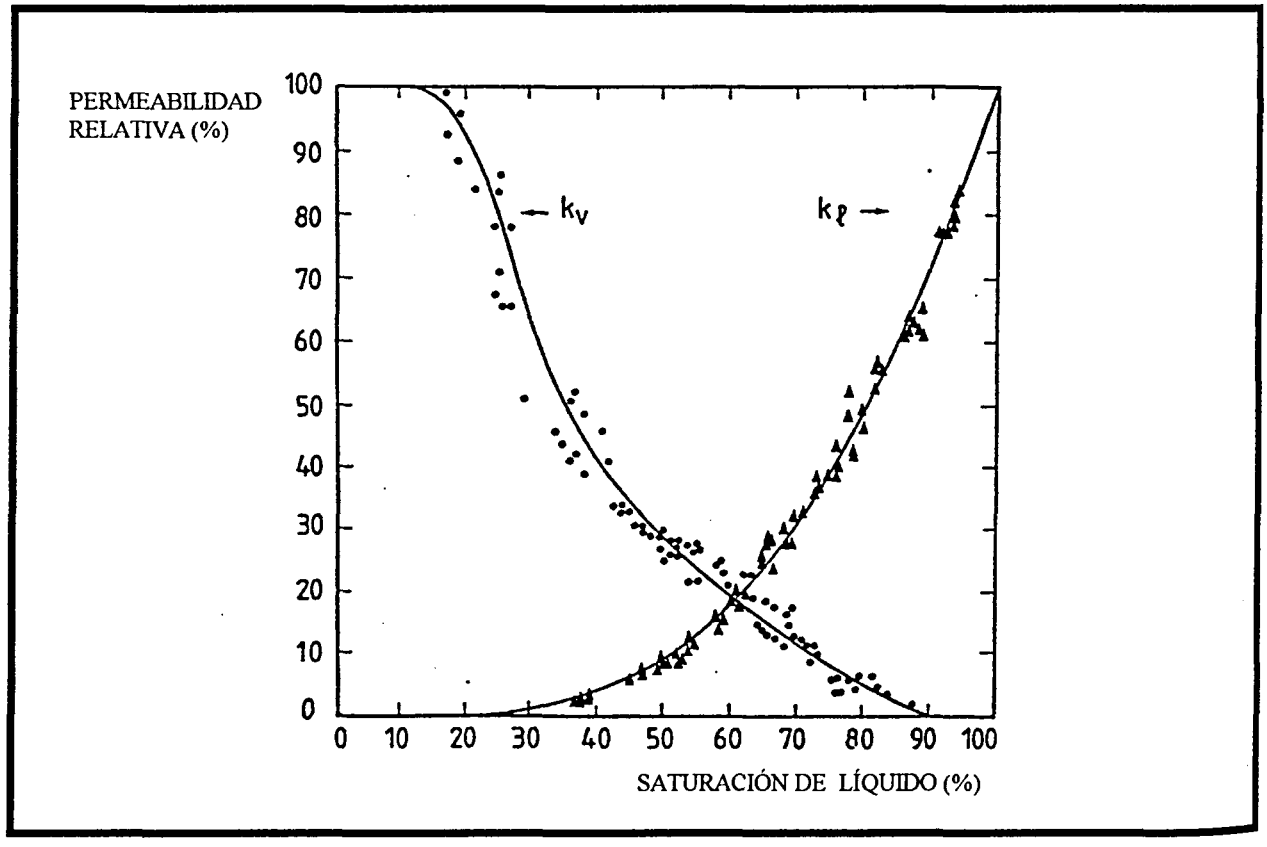


Figura 5.5.- Representación de la permeabilidad relativa de ambas fases respecto a la saturación [Wyckoff & Botset, 1936].

(c) La determinación de la curva $J(s) = \sqrt{\frac{k'}{\varepsilon}} \frac{P_c}{\sigma.\cos\theta}$ es un problema resuelto en medios porosos consolidados pero los datos disponibles en caso de medios granulares finos no consolidados y medios fibrilares son más bien escasos.

Stubos relacionó la presión capilar en una región bifásica del medio poroso con la saturación global medida. La figura 5.6 presenta los resultados obtenidos conjuntamente con los derivados de las correlaciones de Reed y de Lipinski.

La expresión propuesta por Lipinski para ajustar los datos aportados por Cheidegger en caso de arenas es:

$$J = \frac{\left(s_e^{-1} - 1\right)^{0,175}}{\sqrt{5}} \qquad [28]$$

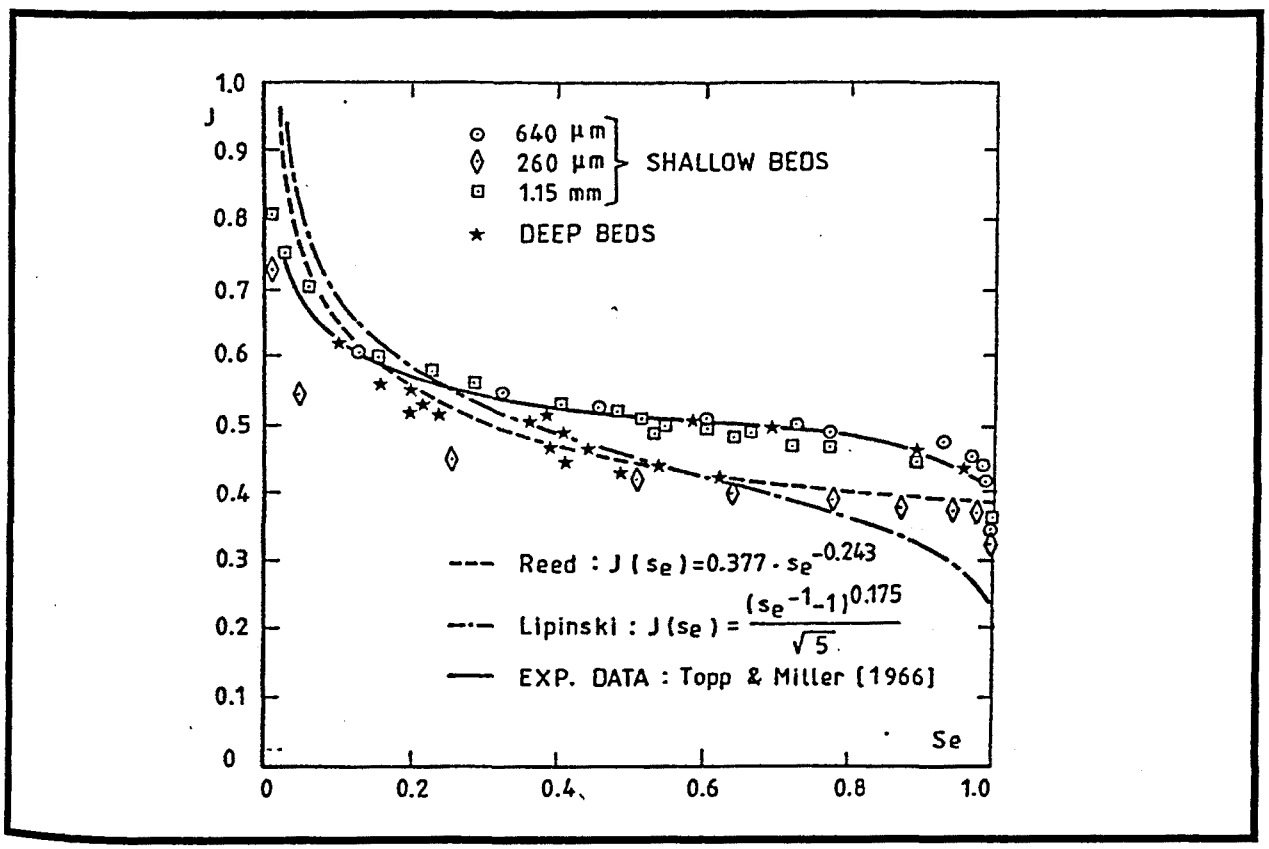


Figura 5.6.- Representación de los valores obtenidos a partir de las correlaciones de Reed y Lipinski de la función de Leverett respecto a la saturación efectiva.

(d) Se ha observado que a medida que aumenta la presión del vapor la entrefase deviene más y más cóncava hasta que se alcanza el mínimo radio de curvatura en el tubo capilar más grande. En este estado, la presión del vapor es suficientemente grande como para desplazar el líquido de los tubos capilares de mayor diámetro.

5.3.3.- Frente de vapor

Este fenómeno se ha comprobado en nuestras experiencias al ascender el líquido hacia la cubeta a través de la frontera permeable. A medida que se va generando vapor se va desplazando líquido de tubos capilares cada vez de menor diámetro, disminuyendo la saturación. Por consiguiente, la función de Leverett posiblemente debe de depender de la distribución de tamaño de poros.

En nuestro caso, este desplazamiento de líquido se manifiesta además por un desplazamiento de la frontera zona bifásica-líquido subenfriado, apareciendo como propagación de un frente de vapor.

En estas condiciones se ha de satisfacer la ecuación [4]

$$< \rho.c_p >_e \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}_l.\nabla(\rho_l.c_{pl}.T) - \nabla(\lambda_e.\nabla T) = 0$$

donde $\vec{V}_l$ representa ahora la velocidad del frente de vapor.

La ecuación anterior se puede escribir de la forma siguiente

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_l.c_{pl}.\vec{V}_l}{< \rho.c_p >_e}\nabla T - \frac{1}{< \rho.c_p >_e}\nabla(\lambda_e.\nabla T) = 0 \qquad [29]$$

o bien:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \beta.V_l\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_e\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad [30]$$

donde $\beta.V_l = \frac{\rho_l.c_{pl}}{< \rho.c_p >_e}|\vec{V}_l|$

La ecuación [30] admite soluciones de semejanza de la forma T(η) donde $\eta = \frac{z}{(\alpha_e.t)^{1/2}}$ [31]

En la nueva variable la ecuación [30] se expresa:

$$2.\eta.(2\beta-1)\frac{dT}{d\eta} = \frac{d^2T}{d\eta^2} \qquad [32]$$

Tomando $\eta^2(2\beta-1) = \chi^2$; obtenemos

$$T(\chi) - T(0) = \frac{1}{(2\beta-1)^{1/2}} \Delta T \int_0^{\chi} e^{\chi^2}.d\chi \qquad [33]$$

con $$\frac{\Delta T}{(2\beta-1)^{1/2}} = \left(T(h_s) - T_0\right) \Big/ \int_0^{\infty} e^{\chi^2}.d\chi \qquad [34]$$

donde $T(h_s)$ es la temperatura del líquido en la cubeta.

La figura 5.7 muestra, a título de ejemplo, la distribución espacial de temperatura para el medio poroso a base de partículas de bronce con solución de tensioactivo, para un tiempo de calentamiento de 37 minutos, y el ajuste exponencial con un R^2 de 0,998.

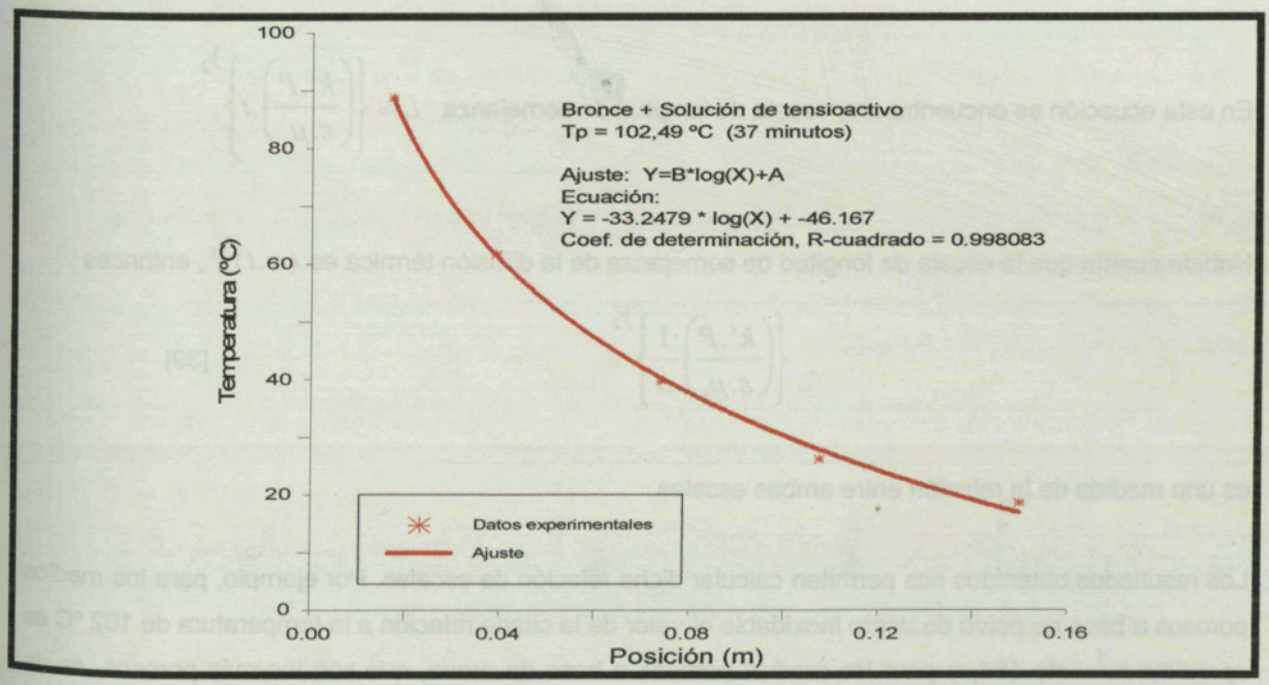


Figura 5.7.- Distribución de temperatura en el medio poroso a base de bronce con solución de tensioactivo, para un tiempo de calentamiento de 37 minutos. Ajuste teórico exponencial.

En la región de vapor propiamente dicha este se mueve con una velocidad V_v que es una función del gradiente de presión existente.

Prescindiendo en primera aproximación de los efectos de tensión superficial cabe suponer que en la entrefase líquido-vapor hay equilibrio termodinámico. Así, la presión y la temperatura están relacionadas por la ecuación de Clausius-Clapeyron que puede expresarse, en el intervalo de temperaturas 100 °C < T < 240 °C , por la ecuación empírica $T_{sat}(P) = 6{,}7.P^{0{,}23}$

En la región de vapor se han de satisfacer las ecuaciones siguientes:

$$\varepsilon\frac{\partial\rho_v}{\partial t}+\nabla\left(\rho_v.\vec{V}_v\right)=0 \qquad [35]$$

$$\vec{V}_v=-\frac{k'}{\mu_v}\nabla P \qquad [36]$$

$$P=\rho_v.R_v.T \qquad [37]$$

Combinando las ecuaciones [35],[36] y [37], obtenemos la ecuación no lineal

$$\frac{\partial(P/T)}{\partial t}-\frac{k'}{\varepsilon.\mu_v}\nabla\left(\frac{P}{T}\nabla P\right)=0 \qquad [38]$$

En esta ecuación se encuentra una escala de longitud de semejanza $L\approx\left\{\left(\frac{k'.P}{\varepsilon.\mu_v}\right).t\right\}^{1/2}$

Habida cuenta que la escala de longitud de semejanza de la difusión térmica es $(\alpha.t)^{1/2}$, entonces

$$\left\{\left(\frac{k'.P}{\varepsilon.\mu_v}\right)\frac{1}{\alpha}\right\}^{1/2} \qquad [39]$$

es una medida de la relación entre ambas escalas.

Los resultados obtenidos nos permiten calcular dicha relación de escalas. Por ejemplo, para los medios porosos a base de polvo de acero inoxidable el valor de la citada relación a la temperatura de 102 °C es aproximadamente 164, y para los medios porosos a base de arena, que son los más porosos, es de 9040.

Como cabe esperar la escala de longitud advectiva es considerablemente mayor que la escala de longitud difusiva, y tanto mayor cuanto más permeable sea el medio poroso. Por consiguiente, el campo de temperatura dentro de la región de vapor se ajusta a la temperatura de vapor de campo lejano por conducción térmica a través de una capa límite térmica muy delgada próxima a la entrefase. Además, la presión se mantiene prácticamente constante a través de esta capa límite. En la entrefase líquido-vapor, la conservación de calor se expresa por la forma aproximada

$$\alpha_e < \rho.c_p >_e \left\{ \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_- - \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_+ \right\} = f.\rho_l.h_{lv}.V_l \qquad [40]$$

donde f es la fracción de flujo másico específico de líquido que hierve. Más allá de esta capa límite delgada, el vapor alcanza la temperatura de campo lejano y de esta manera la distribución de presión delante de la entrefase está gobernada por la ecuación de régimen isotermo

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{k'}{\varepsilon.\mu_v}\nabla(P.\nabla P) = 0 \qquad [41]$$

5.4.- 3ª ETAPA: APARICIÓN DE "DRYOUT"

A medida que la entrefase medio poroso-placa calefactora se desatura, ocurre la formación de una película de vapor cuyo espesor, δ_v, ha de ser menor que el diámetro característico de los sólidos.

En la región seca, allí donde ocurre el "dryout", los flujos de fluido son nulos. Ahora bien, a través de dicha capa debe producirse una transferencia de calor desde la placa calefactora a la frontera de la capa bifásica del medio poroso. Admitido que el flujo convectivo de entalpía a través de la fase vapor recalentado es despreciable, dicha transferencia sólo puede realizarse por conducción a través de la fase sólida del medio poroso y, esencialmente, por radiación. Por consiguiente, podemos escribir:

$$\dot{q}_{pv} = -\lambda_{es}\frac{\partial T}{\partial z} + \varepsilon_p.\sigma.\left(T_p^4 - T_s^4\right) \qquad [42]$$

donde λ_{es} es la conductividad térmica efectiva de la matriz sólida del medio poroso saturado de vapor, ε_p es la emisividad de la placa y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}669.10^{-8}$ W/m^2.K^4).

La aparición del "dryout" ocurre cuando se alcanza el "flujo crítico de calor" en la entrefase placa calefactora-medio poroso, momento a partir del cual la temperatura de la placa aumenta monótonamente en el transcurso del tiempo.

En el sistema de MPS utilizado en este caso (frontera superior permeable y capa líquida subenfriada por encima), el "dryout" ocurre tan pronto queda la placa calefactora total o parcialmente seca como resultado de que la capacidad de vaporización en la entrefase placa-medio poroso supera el flujo de líquido que a ella llega por succión capilar. A su vez, esta succión capilar disminuye a medida que la presión capilar disminuye y aumenta la distancia desde la placa calefactora a la "superficie ficticia" de entrefase vapor-líquido subenfriado.

5.4.1.- "Dryout"

Para prevenir la aparición de canales que atraviesan la capa de medio poroso saturada de líquido subenfriado, el grado de subenfriamiento del líquido debe ser alto.

El espesor de la capa subenfriada, h_s, puede determinarse aproximadamente. En esta capa, el flujo ascendente de calor es casi estacionario y conductivo una vez alcanzado el equilibrio fluidodinámico; o sea, una vez ha cesado el desplazamiento de líquido hacia la cubeta. Así, en el volumen de control que corresponde a la capa subenfriada, se ha de cumplir

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad [43]$$

La experiencia enseña que la variación temporal de la temperatura del medio poroso en la capa subenfriada es muy pequeña en general, y puede expresarse por una expresión lineal en t, de pendiente β' ; o sea:

$$T(h_s) = T_l - \beta'.t \qquad [44]$$

Por consiguiente, la ecuación [43] se expresa

$$-\frac{\beta'}{\alpha_e} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad [45]$$

Integrada la ecuación [45] con las condiciones

$$z\,,\,T\,;\; z=0 \longrightarrow \frac{d\,T}{d\,z} = -\frac{\dot{Q}}{\lambda_e.A} \qquad [46]$$

donde $\dot{Q}/A$ es el flujo específico de calor que la capa subenfriada recibe por condensación del vapor procedente de la placa calefactora, λ_e es la conductividad térmica efectiva en la capa subenfriada del medio poroso, midiéndose z desde la superficie límite inferior de la capa subenfriada, obtenemos:

$$-\frac{\beta'}{2.\alpha_e} z^2 - \frac{\dot{Q}}{\lambda_e.A} z + C_1 = T(z) \qquad [47]$$

En condiciones de "dryout" el flujo de calor que recibe la capa subenfriada disminuye $\left(\left.\frac{\dot{Q}}{A}\right|_{dr} < \frac{\dot{Q}}{A}\right)$ y

$T(0) = T_{sat}$, luego se ha de verificar

$$-\frac{\beta'}{2.\alpha_e}h_s^2 - \frac{\dot{Q}_{dr}}{\lambda_e.A}h_s \le T(h_s) - T_{sat} \qquad [48]$$

En definitiva; $$h_s^2 + \frac{2.\alpha_e.\dot{Q}_{dr}}{\beta'.\lambda_e.A}h_s + \left(T(h_s) - T_{sat}\right)\frac{2.\alpha_e}{\beta'} \ge 0 \qquad [49]$$

La ecuación [49] nos permite sea calcular h_s si se conoce $\dot{Q}_{dr}$ o bien determinar $\dot{Q}_{dr}$ conocido h_s, supuestos conocidos λ_e , α_e y β. En efecto

$$\dot{Q}_{dr} \ge -\frac{\beta'.\lambda_e.A}{2.\alpha_e}\cdot h_s + \frac{T_{sat} - T(h_s)}{h_s}\cdot \lambda_e.A \qquad [50]$$

El valor de $\dot{Q}_{dr}$ puede obtenerse también a partir del criterio siguiente. Mientras el medio poroso mantiene suficiente capacidad de reflujo de líquido, la cantidad de calor por unidad de tiempo transferida al medio poroso se utiliza totalmente en la evaporación de dicho flujo líquido; o sea:

$$\dot{Q} = \rho_l.V_{lp}.\varepsilon.A.h_{lv} \qquad [51]$$

donde V_{lp} es la velocidad de líquido en el espacio de poro y h_{lv} es la entalpia de cambio de fase (evaporación).

Alcanzada la condición de equilibrio fluidodinámico (nulo desplazamiento de líquido a la cubeta), se ha de verificar:

$$\varepsilon.\left(\rho_l - \rho_v\right)\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_l.V_l + \rho_v.V_v\right) = 0 \qquad [52]$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial z} + \left(\frac{v_l}{k'.k'_{rl}}\right)\cdot \rho_l.V_l + \rho_l.g = 0 \qquad [53]$$

$$\frac{\partial P_v}{\partial z}+\left(\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}\right)\cdot\rho_v.V_v+\rho_v.g=0 \qquad [54]$$

$$P_c=P_v-P_l=\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}\cdot J(s) \qquad [55]$$

donde s es la saturación de líquido en la zona bifásica.

Combinando las ecuaciones (53, 54 y 55), obtenemos

$$\frac{\partial P_c}{\partial z}+(\rho_v-\rho_l).g+\rho_v.V_v\frac{\nu_v}{k'}\cdot\frac{1}{k'_{rv}}\left\{1-\left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\cdot\frac{V_l}{V_v}\cdot\frac{\nu_l}{\nu_v}\cdot\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right)\right\}=0$$

o bien

$$\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}\cdot\frac{\partial J(s)}{\partial z}+\rho_l.g.\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}-1\right)-\frac{\dot{Q}}{A.h_{lv}}\cdot\frac{\nu_v}{k'}\cdot\frac{1}{k'_{rv}}\cdot\left\{1-\left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\cdot\frac{V_l}{V_v}\cdot\frac{\nu_l}{\nu_v}\cdot\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right)\right\}=0 \qquad [56]$$

Además, en el equilibrio $\rho_l.V_l = -\rho_v.V_v$, luego

$$\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}\cdot\frac{\partial J(s)}{\partial z}+\rho_l.g.\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}-1\right)-\frac{\dot{Q}}{A.h_{lv}}\cdot\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}\cdot\left\{1+\left(\frac{\nu_l}{\nu_v}\cdot\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right)\right\}=0 \qquad [57]$$

La ecuación [57] puede expresarse en términos dè s así

$$\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}\cdot\frac{\partial J(s)}{\partial s}\cdot\frac{ds}{dz}+\rho_l.g.\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}-1\right)-\frac{\dot{Q}}{A.h_{lv}}\cdot\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}\cdot\left\{1+\left(\frac{\nu_l}{\nu_v}\cdot\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right)\right\}=0 \qquad [58]$$

Habida cuenta que a 100 °C : $\frac{\rho_v}{\rho_l}=\frac{1{,}0437.10^{-3}}{1673{,}8.10^{-3}}=0{,}6235.10^{-3}<<1$

y que $\frac{\nu_l}{\nu_v}=\frac{0{,}294.10^{-6}}{21{,}8.10^{-6}}\cong 0{,}0135$, resulta

$$\frac{\dot{Q}}{A.h_{lv}}\cdot\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}\left\{1+0{,}0135\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right\}\cong\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}\cdot\frac{\partial J(s)}{\partial s}\cdot\frac{ds}{dz}-\rho_l.g \qquad [59]$$

La integración de la ecuación [59] requiere conocer una correlación fiable de J vrs s y de $\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}$ vrs s en la horquilla de valores $0 \le s \le 1$ y en el intervalo $0 \le z \le (h - h_s)$, donde h es la altura inicial de la capa de MPS.

En primera aproximación cabe suponer que la transición de la zona bifásica, donde la saturación de líquido es s, a la capa de líquido subenfriado, donde s = 1, está representada por una función escalón. En tal caso, obtenemos

$$\frac{\dot{Q}}{A.h_{lv}}.\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}\left\{1+0{,}0135\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right\}(h-h_s) \cong \sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}.\int_s^1 dJ(s) - \rho_l.g.(h-h_s)$$

Luego

$$\dot{Q} = \frac{\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}.\int_s^1 dJ(s) - \rho_l.g.(h-h_s)}{\frac{1}{A.h_{lv}}.\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}.\left\{1+0{,}0135.\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right\}.(h-h_s)} \qquad [60]$$

Evidentemente, el "dryout" aparece tan pronto como $\dot{Q}_{dr} > \dot{Q}$.

A su vez, a partir de las ecuaciones (50 y 60) podemos escribir

$$\frac{\sigma.\cos\theta.\sqrt{\frac{\varepsilon}{k'}}.\int_s^1 dJ(s) - \rho_l.g.(h-h_s)}{\frac{1}{A.h_{lv}}.\frac{\nu_v}{k'.k'_{rv}}.\left\{1+0{,}0135.\frac{k'_{rv}}{k'_{rl}}\right\}.(h-h_s)} \cong \frac{T_{sat}-T(h_s)}{h_s}.\lambda_e.A - \frac{\beta.\lambda_e.A}{2.\alpha_e}.h_s \qquad [61]$$

La integral $\int_s^1 dJ(s)$ cabe expresarla más bien como $\int_{s_{el}}^{s_{es}} \frac{dJ}{ds_e}.ds_e$ donde $s_e = \frac{s-s_r}{1-s_r}$ es la saturación efectiva, así puede utilizarse la correlación de Lipinski $J = \frac{(s_e^{-1}-1)^{0,175}}{\sqrt{5}}$.

5.4.2.- Formación de canales:

Varios investigadores (Stevens y Trenberth, 1982; Buchlin y Van Komickxloo, 1986; entre otros) citan la eventual presencia de canales de vapor en el lecho. Su diámetro parece ser un orden de magnitud mayor que el diámetro medio de partícula. Estos canales se extienden desde la zona de vapor hasta la frontera superior del medio poroso atravesando la capa saturada de líquido subenfriado. También ocurren en el interior del MPS.

La experiencia enseña que la diferencia de presión entre el líquido y el vapor (es decir, la presión capilar) en la parte superior del lecho es pequeña. Esto corresponde a una fracción de líquido del orden de la unidad de acuerdo con la curva de Leverett, e implica que el área de flujo para el vapor en la zona superior del lecho es pequeña.

Observaciones realizadas añadiendo un colorante a la capa de líquido que recubre inicialmente el MPS muestran que el reflujo de líquido se produce uniformemente fuera de los canales de vapor. (Foto 13 - Anexo 5-).

Todos los intentos llevados a cabo para modelizar el flujo en medio poroso con canales de flujo de vapor, se han enfrentado a dificultades hasta el momento insalvables, como son: conocimiento de la densidad de población de canales, el diámetro de los canales y su longitud, etc.

Durante muchos años se ha mantenido como punto de vista aceptado mayoritariamente (Lipinski, 1982; Reed, 1986) que los canales atravesaban la capa subenfriada superior cuando la longitud de canal esperada devenia del orden del espesor de dicha capa, y que la aparición de canales ocurría cuando la presión de vapor en el fondo del medio poroso era suficiente como para superar la que se debe al peso de las partículas y del líquido.

Bajo estas premisas Lipinski introduce la idea del factor de adherencia S_f como coeficiente multiplicador de la presión debida a los pesos del sólido y del líquido, de manera que

$$P_v = S_f.\left[\rho_s(1-\varepsilon)+\rho_l.\varepsilon\right].g.L_C \quad . \qquad [62]$$

Introduciendo la presión de líquido, $P_l = \rho_l.g.L_C$, y el concepto de presión capilar, se obtiene

$$L_C = \frac{\sigma.\sqrt{\varepsilon/k'}.J(s)}{\left[S_f\left(\rho_s(1-\varepsilon)+\rho_l.\varepsilon\right)-\rho_l\right].g} \qquad [63]$$

El problema que surge al aplicar la ecuación [63] es que no se conoce un modelo apropiado que nos aporte el valor de S_f. El modelo de Stubos (1985) que tiene en cuenta, incluso, las fuerzas de fricción entre partículas no parece aportar resultados satisfactorios.

Un segundo tipo de formación de canal es el que resulta de una perturbación en el lecho. Esta perturbación puede provenir de un rápido incremento de la presión de vapor como resultado de la interrupción del reflujo de líquido hacia la superficie calefactora; o sea, justo cuando se alcanza la condición de "dryout".

El modelo que aquí se propone considera el fenómeno en dos fases. Primera, inicio de la formación del canal. Segunda, desarrollo del canal en toda su longitud atravesando la capa subenfriada.

La condición de inicio del canal se expresa así: $$P_v \geq \rho_l . g . h_s + P_c + \tau_0 . S_e . L_C \qquad [64]$$

donde P_v es la presión del vapor, P_c la presión capilar, $\rho_l . g . h_s$ es la presión hidrostática en la entrefase líquido-vapor, y $\tau_0 . S_e . L_C$ es la "presión de adhesión" líquido-sólido, función del grado de humectación y, por consiguiente, de la energía específica de entrefase. En la expresión de dicha magnitud S_e es la superficie específica del canal y L_C su longitud.

Una vez iniciado el desplazamiento del líquido en el canal, su desarrollo se ha de producir de manera que se satisfagan la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento lineal.

Tomando el volumen del canal, $< a_C > . L_C$, como volumen de control, se ha de verificar

$$\rho_l . V_l = \rho_v . V_v \qquad [65]$$

$$\rho_l . V_l = -\rho_l \frac{k' . k'_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial}{\partial s} P_v \qquad [66]$$

Además, la ecuación de la energía puede expresarse así:

$$h_0 + q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_v}{\rho_v} + \frac{V_v^2}{2} \qquad [67]$$

donde h_0 es la entalpía del vapor correspondiente al estado de equilibrio previo a la iniciación del canal, y q es la cantidad de calor por unidad de masa añadida al vapor justo para que se destruya el equilibrio y se inicie el desplazamiento de líquido por el canal.

Combinando las ecuaciones [65], [66] y [67], se obtiene

$$\rho_v\left\{2\frac{\gamma}{\gamma-1}\cdot\left[\left(\frac{P_v}{\rho_v}\right)_{oc}-\left(\frac{P_v}{\rho_v}\right)\right]\right\}^{1/2}=-\rho_l\frac{k'.k'_{rl}}{\mu_l}\cdot\frac{\partial}{\partial s'}\cdot P_v \qquad [68]$$

Integrada la ecuación [68] entre s' = h_s + h_c , donde P_v = P_{atm} y s = 0, donde P_v = P_{voc}, se obtiene la longitud rectificada del canal, h_s , pues h_c es la altura de líquido en la cubeta.

5.5.- REFERENCIAS

BUCHLIN, J.M.; VAN KONICKXLOO, T. (1986): *"O:P.E.R.A II - a test facility to study the thermohydraulics of liquid saturated self heated porous media"*. VKI, TM 41.

DULLIEN, F.A.L. (1979): *"Porous media fluid transport and pore structure"*. Academic Press.

KAVIANY, M. (1991): *"Principles of heat transfer in porous media"*. De. Springer-Verlag, pp.626.

LIPINSKI, R.J. (1982): *"A model for boiling and dryout in particle beds"*. Sandia Labs. Report SAND 82-0765 (NUREG/CR-2646).

REED, A.W. (1986): *"A mechanistic explanation of channels in debris beds"*. ASME Trans., Series C. J. Heat Transfer, Vol. 108, nº 1, Feb-1986.

STEVENS, G.F.; TRENBERTH, R. (1982): *"Experimental studies of boiling heat transfer and dryout in heat generating particulate beds in water at 1 bar"*. LIKAEA Winfrith, AEEW-R 1545 .

STUBOS, A.K. (1985): *"Experimental and theoretical investigation of boiling in liquid saturated porous media"*, VKI - PR 1985-25

CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES

RESUMEN

A continuación se exponen las principales conclusiones a las que se ha llegado en el transcurso del presente estudio experimental del proceso de calentamiento de medios porosos saturados hasta ebullición-"dryout" de su fase liquida.

CONCLUSIONES

1.- La experimentación y posterior modelización de los procesos de transporte y transferencia de calor y de masa en medios porosos saturados encuentra un gran número de dificultades que se derivan fundamentalmente de la heterogeneidad del propio medio, de la metodología de su parametrización estructural y física para asimilarlo a un medio continuo, y de la incertidumbre de las medidas resultado de la influencia no despreciable del tamaño físico de la sonda (sondas intrusivas) en el valor de la magnitud medida (presión, temperatura, etc.).

2.- Salvedad hecha de los MPS de matriz sólida a base de arena no consolidada, el resto presenta una característica de resistencia al flujo de agua y solución de tensioactivo evidentemente Darciana (lineal).

La permeabilidad intrínseca de dichos MPS ha sido definida teóricamente, con un error de orden del 8%, por el modelo de Rumpf-Gupte:

$$k' = \frac{\varepsilon^{5,5}.d^2}{5,6}$$ en los MPS granulares,

y por el modelo de Koh:

$$K_K = \frac{\varepsilon^2\left\{P_o.(1+\varepsilon) - \rho.u_D{}^2.\Phi/2\right\}}{S_e{}^2.(1-\varepsilon)^2.\mu.u_D.z}$$, para los MPS en base a algodón con $\varepsilon \leq 0,88$.

En estos últimos, el error que se deriva de calcular *k'* mediante el modelo puede ser importante (del orden del 40 % para $\varepsilon \geq 0,88$), lo que se debe a la gran porosidad de dichos MPS y las grandes dificultades que se encuentran para empaquetar uniformemente la matriz sólida.

3.- El comportamiento al flujo de los líquidos considerados en los MPS en base a arena es no-Darciano. No obstante la no linealidad, Q vrs ∇P, es poco significativa (el término cuadrático es de un orden muy inferior al lineal).

El número de Reynolds de partícula en estos medios porosos se encuentra en la horquilla 43 - 73, fuera por tanto del límite de validez de la ley de Darcy. Más adelante mencionaremos las consecuencias que se derivan de la gran permeabilidad intrínseca de estos medios porosos ($k' \cong 4,41.10^{-10}$ m^2).

Ello obedece fundamentalmente al gran tamaño de diámetro medio de partícula, $d_p \approx 2,96$ mm.

4.- La permeabilidad intrínseca de los medios porosos en base a algodón varía exponencialmente con la porosidad

$$k' = a.e^{b.\varepsilon}$$

En el intervalo $0,83 < \varepsilon < 0,92$; $a = 1,08272.10^{-24}$ y $b = 33,9766$

5.- La adición de un tensioactivo al agua saturante del medio poroso produce un aumento de la permeabilidad intrínseca de los medios porosos granulares muy considerable en el caso del tipo de arena utilizado, y una reducción de la permeabilidad intrínseca en los medios porosos en base a algodón, en este caso tanto mayor cuanto menor es la porosidad del medio poroso.

Este comportamiento cabe explicarlo por diversas causas:

(i) La naturaleza como substancia del sólido; en un caso inorgánica (arena) y en el otro orgánica (algodón), que se traduce en notables diferencias de absorción del tensioactivo.

(ii) La mejora substancial de la humectación de la superficie del sólido inorgánico por el fluido, con la consiguiente modificación del ángulo de contacto entre ambos, en el sentido de activar la eficacia de desplazamiento de toda fase no acuosa (por ejemplo, aire) adsorbida o retenida entre partículas.

El menor valor de σ de la solución de tensioactivo facilita la desorción y el arrastre de aire en burbujas por los capilares de radio variable, lo que en definitiva aumenta la sección neta de flujo del lecho poroso que aparece, en la relación Q vrs ∇P, como un aumento de *k'*.

(iii) La velocidad de desplazamiento de gas aumenta a medida que disminuye la tensión de entrefase líquido-gas, del cómo se demuestra por el modelo teórico desarrollado a partir de las ecuaciones básicas de Slattery (páginas 81, 82 y 83; ecs. (8), (9) y (10)).

6.- Habida cuenta que en las experiencias de conductividad térmica de medios porosos saturados no siempre fue posible alcanzar estados de equilibrio, la determinación de la conductividad térmica y de la difusividad térmica efectivas se llevó a cabo por dos procedimientos:

(i) Aplicación de la ley de Fourier $\vec{q} = -\lambda_e . \nabla T$; $\alpha_e = \dfrac{\lambda_e}{< \rho . c_p >}$

en los casos que se alcanzó régimen estacionario (medios porosos a base de bronce y de acero).

(ii) Método de I. Nozad, R.G. Carbonell y S. Whitaker, que utilizan la segunda ley de Fourier

$$\frac{\partial < T >}{\partial t} = \alpha_e \frac{\partial^2 < T >}{\partial z^2}$$

en los casos que no se llegó a alcanzar el régimen estacionario (medios porosos en base a arena y algodón).

7.- Los valores de λ_e y α_e determinados por los métodos anteriores aplicados a los resultados experimentales obtenidos, representados por los valores de T (z,t), bajo una potencia $\dot{W}$, se inscriben correctamente en la gráfica de correlación λ_e / λ_f vrs λ_s / λ_f (Fig. 3.58 propuesta por Nozad y colabs.), como se muestra en la figura 3.59.

8.- La conductividad térmica efectiva, λ_e, de los medios porosos granulares: bronce, acero y arena, determinada experimentalmente, está bien simulada por el modelo teórico de Bauer & Schlünder.

9.- Los valores calculados a partir de los resultados experimentales de los medios porosos en base a algodón se corresponden bien con los predichos por el "modelo en serie".

10.- En base a la aplicación de criterios de órdenes de magnitud a la segunda ley de Fourier, se ha llegado a establecer la ecuación $\alpha_e.t^n = Cte.$, con 0 < n < 1, donde la aparición del exponente $n \neq 1$ obedece al hecho de suponer que en realidad el proceso de transferencia de calor en medio poroso saturado no es estrictamente difusivo.

11.- A partir de la segunda ley de Fourier, la solución no estacionaria a los problemas que nos ocupan es

$$\theta = 1 - erf\left\{\frac{z}{\sqrt{4.\alpha_e.t}}\right\} \quad ; \quad \theta = \frac{< T > - T_0}{T_1 - T_0}$$

lo que nos permite calcular α_e en función de t , para cada valor de z a partir de los valores medidos de <T> y T_1 .

Ello nos ha permitido establecer la relación $\alpha_e = f(t)$ en diferentes puntos z del medio poroso saturado (situación de los termopares).

En todos los casos se ha comprobado la validez del modelo teórico: $\alpha_e.t^n = Cte$ en z.

Tomando el promedio espacial, resulta: $< \alpha_e >.t^n = C_0$

Los valores de n y C_0 obtenidos son por ejemplo los siguientes:

	n	C_0	R^2
Bronce y agua destilada	0,8154	$3,7767.10^{-4}$	0,995
Bronce y solución de tensioactivo	0,7582	$2,1902.10^{-4}$	0,997
Acero y agua destilada	0,5874	$3,4643.10^{-5}$	0,972
Acero y solución de tensioactivo	0,7094	$1,0377.10^{-4}$	0,986
Arena y agua destilada	0,6421	$5,6434.10^{-5}$	0,994
Arena y solución de tensioactivo	0,7619	$1,5442.10^{-4}$	0,989
Algodón y agua destilada (ε = 0,92)	0,3608	$2,589.10^{-6}$	0,984
Algodón y agua destilada (ε = 0,88)	0,3307	$1,6482.10^{-6}$	0,958

Los otros medios porosos en base a algodón no son considerados dada la poca fiabilidad de algunos resultados experimentales fruto de las dificultades encontradas, ya citadas.

12.- A la vista de los resultados anteriores, resulta

(i) La difusividad térmica efectiva $<\alpha_e>$, promediada espacialmente, del medio poroso saturado tiende al valor de la difusividad del componente del medio poroso de menor difusividad térmica a medida que transcurre el tiempo (agua o solución acuosa en los medios porosos a base de bronce, acero y arena) y (algodón) en los medios porosos a base de algodón.

(ii) La difusividad térmica efectiva, α_e , de los medios porosos saturados en los que $\lambda_s / \lambda_l < 1$ (arena-agua; algodón-agua) se aproxima a la de la fase líquida; en los medios porosos para los que $\lambda_s / \lambda_l >> 1$, dicha difusividad térmica equivalente es un grado de orden superior a la de la fase líquida.

(iii) Cuanto precede nos ratifica la hipótesis formulada: en los procesos de transferencia de calor en medio poroso saturado no se alcanza el equilibrio termodinámico local.

13.- La adición de tensioactivo a la fase líquida saturante provoca la disminución de la conductividad térmica efectiva del MPS, λ_e, en aquellos que la fase sólida es granular e inorgánica. Los resultados obtenidos en el caso del algodón (fase sólida orgánica) son contradictorios. Parece, no obstante, que si la porosidad es baja ($\varepsilon \approx 0,83$), dicha adición de tensioactivo mejora la conductividad térmica efectiva, lo que cabría atribuirlo a la mejor condición de entrefase sólido-líquido por efectos de humectación.

14.- El proceso de calentamiento de un MPS hasta ebullición-"dryout" de su fase líquida comporta tres fases diferenciadas:

(i) Calentamiento del MPS hasta la temperatura de saturación de su fase líquida acompañado por segregación de fase líquida por su frontera permeable debido al aumento de volumen de las fases sólido y líquido del MPS por dilatación térmica.

(ii) Proceso de evaporación a partir del momento en que el MPS en contacto con la placa calefactora alcanza un pequeño sobrecalentamiento respecto a la temperatura de saturación de la fase líquida, acompañado de gran segregación de fase líquida por la frontera permeable como resultado del aumento de volumen específico de la fase saturante (cambio de fase líquido-vapor), y consiguiente formación de una capa bifásica cuya frontera superior se desplaza a la velocidad del frente de vapor. Simultáneamente se produce una disminución de la presión fluidoestática en la frontera de la capa bifásica, lo que se traduce en una reducción del reflujo de líquido hacia la placa calefactora.

(iii) Total desaturación de la entrefase MP-placa calefactora al recibir por reflujo menos líquido del que es capaz de evaporar la placa calefactora. Aparición del "dryout" y elevación progresiva de la temperatura de la placa.

(iv) Aparición, en algún caso, de un fenómeno de basculamiento de la fase líquida desde la capa subenfriada a la zona desaturada del MP (capa de vapor).

15.- El proceso de calentamiento es macroscópicamente difusivo excepción hecha de los medios porosos en base a arena en los que el transporte convectivo de entalpía es significativo. En estos medios porosos aparece la inestabilidad de Rayleigh. En efecto, el valor de Ra en las experiencias con medios porosos en base a arena es mayor que el crítico Ra_c ($Ra = 291{,}28 > Ra_c = 4\,\pi^2$).

16.- La segregación de líquido por la frontera permeable del medio poroso es resultado de la diferencia entre el flujo másico de vapor generado en la entrefase con la placa calefactora y el flujo másico de líquido por condensación de parte de dicho flujo másico de vapor al entrar en contacto con la capa de líquido subenfriado. En efecto: la tasa de evaporación en régimen estacionario de cambio de fase es de $\dot{W} / \Delta h_{lv} \approx 300$ J/s / 2257.10^3 J/kg = $0{,}133.10^{-3}$ kg/s = 0,133 g/s , lo que representa $0{,}133.10^{-3}$ kg/s / 0,603 kg/m^3 = $0{,}221.10^{-3}$ m^3/s = 221 cm^3 /s , mientras que el volumen desplazado es como máximo de 0,5295 cm^3 /s, que representa únicamente el 2,4 %. del flujo másico de vapor.

17.- En general, la segregación de líquido por la frontera permeable del MP depende básicamente de la porosidad, ε , de la superficie específica, S_e, y de la tensión superficial, σ. Cuanto mayor es la porosidad y menor la superficie específica tanto mayor es el volumen de líquido segregado. Por otra parte, la adición de un tensioactivo al agua facilita la segregación de líquido. En efecto, la reducción del valor de la tensión superficial facilita el desplazamiento de líquido por los capilares, por una parte, y dificulta el reflujo de líquido por succión capilar.

18.- El número de Bond de todos los medios porosos ensayados es mucho menor que la unidad; por ello, el flujo de líquido en la capa bifásica está dominado por capilaridad. De hecho, los únicos medios porosos en los que los efectos gravitacionales no pueden ser despreciados son los de base arena, de gran permeabilidad intrínseca (en comparación con el resto de medios) y, con un número de Bond que es de dos a tres órdenes de magnitud mayor que el de los otros.

19.- Mientras el flujo másico de líquido por capilaridad desde la zona bifásica a la entrefase placa calefactora-MP es suficiente para disipar por cambio de fase el calor transferido por la entrefase se mantiene en ésta una ebullición nucleada con un ΔT_{sat} que no supera los 3-4 °C. De esta manera se comportan los medios porosos granulares, muy particularmente la arena por las razones ya expuestas. Esto no sucede prácticamente en los medios porosos en base a algodón, en los que la placa se seca rápidamente. En estos últimos la ebullición, cuando ocurre, es de tipo pelicular.

20.- Tan pronto como la temperatura de la placa aumenta monótonamente por encima de 100 °C se ha de producir una disminución del reflujo de líquido cuyo valor en un instante dado t se calcula mediante la expresión

$$\dot{V}_{l,r} = \frac{\dot{W} - (m.c_p.\partial T / \partial t)_p}{\rho_l.h_{lv}}$$

Tomamos, a título de ejemplo el MPS de bronce y solución de tensioactivo. En el instante t = 2400 s la temperatura de la placa es de 106 °C, la del MP en contacto con la placa alcanza 100 °C, y la potencia suministrada es de 290 W. La placa calefactora tiene una masa de 2,5 kg y su calor específico es 896 J/kg.K. En los primeros instantes después del tiempo de referencia, la temperatura de la placa se eleva $2{,}833.10^{-3}$ °C/s y al cabo de 600 segundos se eleva $25{,}5.10^{-3}$ °C/s.

A estos valores de $\partial T/\partial t$ corresponden los siguientes valores de $\dot{V}_{l,r}$: 0,1257 cm^3 /s y 0,103 cm^3 /s. Se constata pues la disminución progresiva del caudal de reflujo que inicialmente era de 0,133 cm^3 /s.

El modelo es válido mientras la superficie del MP en contacto con la placa calefactora se encuentra a la temperatura de saturación (100-101 °C).

21.- La propagación del frente de vapor en los medios porosos saturados con una solución de tensioactivo es más lenta que en los mismos medios porosos saturados con agua destilada. Esto se explica por la menor transferencia de calor en la entrefase placa calefactora-medio poroso, resultado de la disminución del flujo capilar de líquido desde la zona bifásica como consecuencia de la disminución del valor de la tensión superficial.

El efecto es tanto más acusado cuanto menor es la conductividad térmica efectiva del MP. Estas son las causas por las que hubo que reducir de 300 W a 150 W la potencia calefactora aplicada a los medios porosos en base a algodón saturados de solución de tensioactivo.

A partir de las medidas de T (z,t) (ver anexo 3 –como ejemplo, correspondiente a los MPS constituidos por arena-), representadas en las figuras 4.61 a 4.66, se han calculado las velocidades de propagación del frente de vapor. Los resultados son los siguientes:

Bronce y agua destilada	$\langle V_v \rangle$ = 0,0350 mm/s
Bronce y solución de tensioactivo	$\langle V_v \rangle$ = 0,0186 mm/s
Acero y agua destilada	$\langle V_v \rangle$ = 0,0273 mm/s
Acero y solución de tensioactivo	$\langle V_v \rangle$ = 0,0198 mm/s
Arena y agua destilada	$\langle V_v \rangle$ = 0,188 mm/s
Arena y solución de tensioactivo	$\langle V_v \rangle$ = 0,077 mm/s
Algodón y agua destilada	$\langle V_v \rangle$ = 0,0225 mm/s; ε = 0,88; $\dot{W}$ = 300 W
Algodón y solución de tensioactivo	$\langle V_v \rangle$ = 0,0066 mm/s; ε = 0,88; $\dot{W}$ = 150 W

Con la notación $\langle V_v \rangle$ indicamos el valor promedio de V_v entre los termopares 2 y 5, pues los valores entre termopares sucesivos difieren entre sí, lo que es una prueba más de la heterogeneidad del medio poroso.

Se observa una buena correlación entre $\langle V_v \rangle$ y k', permeabilidad intrínseca, del medio poroso.

El conocimiento de estos valores de $<V_v>$ y el de los volúmenes de líquido segregados en el medio poroso en el intervalo de tiempo considerado en la propagación del frente de vapor nos permite, a su vez, calcular el grado de saturación promedio de la zona bifásica desarrollada. Este cálculo se realiza así

$$< s >_{bf} = 1 - \frac{< \dot{V}_l >}{A.\varepsilon.< V_v >}$$

Aplicado, por ejemplo, al MPS constituido por partículas de bronce y agua destilada, resulta $< s >_{bf} \approx 18\%$.

22.- El proceso de ebullición nucleada en la entrefase placa calefactora-medio poroso inicia su evolución hacia el proceso de ebullición nucleada-pelicular tan pronto disminuye el reflujo de líquido desde la capa saturada subenfriada a la placa calefactora vía la zona bifásica. Esto ocurre en los medios porosos en base a bronce saturado de agua destilada y saturado de solución de tensioactivo; en el MP en base a acero saturado de agua destilada; en los medios porosos en base a arena saturada de agua destilada y de solución de tensioactivo; y en los medios porosos en base a algodón saturado de agua destilada.

En estos medios porosos la temperatura de la placa calefactora se mantiene durante un tiempo finito, más o menos largo, unos pocos grados (de 2ºC a 5 ºC) por encima de la temperatura del medio poroso en contacto con ella antes de que se produzca "dryout".

En todos los otros medios porosos ensayados, la evolución monótona creciente de la temperatura de la placa calefactora ocurre de forma continua, desde el principio, por lo que en ellos el "dryout" ocurre ya desde el principio del cambio de fase.

23.- La evolución del proceso de ebullición hacia el estado de "dryout" se manifiesta por una progresiva disminución del caudal de fluido saturante segregado por la frontera del MPS, que deviene finalmente nulo, condición que se ve acompañada por la correspondiente elevación de la temperatura de la placa calefactora, síntoma de la aparición de "dryout". Así en el MP en base a acero saturado de agua destilada, el tiempo durante el que ΔT_{sat} es de 2,5 a 4 ºC es de 4320 segundos, mientras que si el fluido saturante es solución de tensioactivo esa condición no ocurre. En este caso, como en los otros citados, la placa calefactora aumenta monótonamente su temperatura, incluso cuando la temperatura del medio poroso en contacto con ella alcanza los 100 ºC.

24.- En las condiciones experimentales descritas, el "dryout" está determinado por el límite de reflujo capilar de líquido desde la capa saturada subenfriada hacia la placa calefactora vía la zona bifásica. El modelo de Udell aporta valores de $\dot{q}_{cr}$ inferiores a los reales.

El comportamiento de los medios porosos en base a arena saturada, sea de agua destilada sea de solución de tensioactivo, nos muestra que el "dryout" se alcanza por un secado progresivo de la placa calefactora, lo que ratifica la heterogeneidad estructural espacial de dichos medios.

El tiempo que transcurre entre "dryouts" consecutivos es de 4920 segundos cuando el fluido saturante es agua destilada, y de 1935 segundos si es solución de tensioactivo, lo que ratifica la influencia del valor de la tensión superficial en el reflujo capilar de líquido.

En el MPS de agua destilada el "dryout" va seguido de basculamiento de agua subenfriada desde la zona saturada a la entrefase medio poroso-placa calefactora. El volumen de líquido introducido casi instantáneamente es de 568 cm^3 . Este líquido es el que ha de evaporarse en el tiempo que transcurre entre dos eventos consecutivos de "dryout" (4920 segundos), ello representa una tasa de evaporación de 0,1155 cm^3/s. Por consiguiente, el flujo crítico de calor es de 281,5 W; que coincide prácticamente con el aplicado.

En el MPS de solución de tensioactivo el "dryout" va seguido de basculamiento de 178,5 cm^3 de solución. Esta cantidad debe evaporarse en 1935 segundos; o sea: 0,0922 cm^3/s. En este caso el flujo crítico de calor es de 225 W, lo que corresponde a un flujo específico de calor de 12,732 kW/m^2.

25.- Todos los medios porosos saturados de solución de tensioactivo alcanzan el estado de "dryout" tan pronto como ocurre evaporación en la entrefase medio poroso-placa calefactora y la temperatura de ésta supera los 103-104 °C.

Los tiempos de iniciación de la evaporación, instantes en los que en la placa calefactora ocurre un "secado parcial" son: bronce, 2700 s ; acero, 1620 s ; algodón (ε = 0,83), 1320 s ; algodón (ε = 0,88), 3240 s (150 W); algodón (ε = 0,92), 2400 s (150W).

En estos medios porosos, el flujo crítico de calor se calcula mediante la ecuación

$$\dot{Q}_{cr} \geq \dot{W} - \int_0^e \rho . c_p \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{z,\ t=t_i} .dz.A$$

donde $\dot{W}$ es el calor aportado a la placa calefactora por unidad de tiempo, y $\int_0^e \rho.c_p \left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{z,\ t=t_i} .dz.A$ es el calor acumulado en la placa calefactora por unidad de tiempo en el instante inicial de "dryout".

En primera aproximación, tenemos

$$\int_0^e \rho.c_p \left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{z,\ t=t_i} A.dz = \int_0^V < \rho.c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) >_{t=t_i} dV = m.c_p.< \frac{\partial T}{\partial t} >_{t=t_i}$$

Para cada medio poroso, $< \frac{\partial T}{\partial t} >$ es el valor medio espacial a lo largo del espesor, e, de la variación temporal de la temperatura de la placa calefactora. A partir de las medidas de temperatura en tres puntos distintos a lo largo del espesor de la placa se ha establecido la ecuación que relaciona T y t. Así:

Bronce	T = 131,9.ln (t) - 931,25 ;	R^2 = 0,981
Acero	T = 81,6133.ln (t) - 505,46 ;	R^2 = 0,990
Algodón (ε = 0,83)	T = 119,365.ln(t) - 739,57 ;	R^2 = 0,976
Algodón (ε = 0,88)	T = 67,29.ln(t) - 393,44 ;	R^2 = 0,960
Algodón (ε = 0,92)	T = 51,71.ln(t) - 316,26 ;	R^2 = 0,995

Se sabe que la masa de la placa calefactora es de 2,5 kg y su calor específico (aluminio) es de 896 J/kg.K; luego

Bronce	$\dot{Q}_{cr} \geq$ 190,5 W ;	$\dot{q}_{cr}$ = 10,79 kW/m^2
Acero	$\dot{Q}_{cr} \geq$ 187 W ;	$\dot{q}_{cr}$ = 10,59 kW/m^2
Algodón (ε = 0,83)	$\dot{Q}_{cr} \geq$ 97 W ;	$\dot{q}_{cr}$ = 5,49 kW/m^2
Algodón (ε = 0,88)	$\dot{Q}_{cr} \geq$ 103,48 W ;	$\dot{q}_{cr}$ = 5,86 kW/m^2
Algodón (ε = 0,92)	$\dot{Q}_{cr} \geq$ 101,73 W ;	$\dot{q}_{cr}$ = 5,76 kW/m^2

26.- La presión estática que reina en la entrefase media vapor-líquido subenfriado se corresponde prácticamente en todos los casos con la presión de vapor saturado de la fase vapor. El desplazamiento de la superficie de entrefase es tanto mayor cuanto menor es la tensión superficial del líquido saturante.

27.- Los medios porosos ensayados acusan manifiestos efectos de heterogeneidad, que afectan significativamente a la permeabilidad, generando efectos capilares significativos.

28.- Tan pronto se inicia el "dryout", la presión de vapor en la entrefase medio poroso-placa calefactora toma un valor que supera la presión fluidoestática más la presión capilar en la entrefase líquido subenfriado-región bifásica. Ello da lugar a la formación de canales que comunican directamente la región de vapor del medio poroso con la capa de líquido superior. La expansión brusca del vapor que en ese momento ocurre y el ulterior descenso de la presión de vapor por condensación dan lugar a una presión negativa (succión) que produce basculamiento de líquido desde la capa subenfriada al fondo del medio poroso. La disminución de la tensión superficial del líquido saturante, y por consiguiente de la presión capilar, favorece la aparición de este fenómeno.

29.- El modelo teórico desarrollado para determinar la longitud crítica de canal asociada a la aparición de basculamiento, inspirado en el de Lipinski, aporta una ecuación [3] -página 278- para L_C que reproduce los resultados experimentales obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

AITTOMÄKI, A.A.; ARI AULA (1991). "*Determination of effective thermal conductivity of adsorbent bed using measured temperature profiles*". Int. Comm. Heat Mass Transfer. Vol. 18; p. 681.

ALLRED, B; G.O. BROWN (1994*). "Surfactants-induced reductions of saturated hydraulic conductivity and unsaturated diffusivity*" Proceedings of Symposium on Surfactants-Enhanced Subsurface Renediation at the 20th National Meeting of the American Chem.Soc. Am. Chem. Soc. San Diego. Calif., pp. 216-230

AMMERMAN,C.N. & YOU,S.M.(1996*): "Determination of the boiling enhancement mechanism caused by surfactant addition to water*". Journal of Heat Transfer, Vol. 118.

ARIS, R. (1956). "*On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube*" Proc.Roy.Soc.A235, pp. 67-77.

ASM International (1990). "*Metals Handbook*". Materials Park. OH 44073. 4 tomos.

BARLEON, L.; WERLE, H. (1981). "*Dependence of dry-out heat flux on particle diameter*", Trans. American Nucl. Soc., Vol. 38, p.382

BARLEON, L; THOMAUSKE, K.; WERLE, H. (1984). "*Cooling of debris beds*", Nuclear Tecnology, Vol. 65, pp. 67-86

BAU, H.H. y TORRANCE, K.E. (1982). "*Boiling in low-permeability porous materials*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 25, nº 1, pp. 45-55

BAUER, T.H. (1993). "*A general analytical approach toward the thermal conductivity of porous media*". Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 17, p. 4181-4191

BEAR, J (1975). "*Dynamics of Fluids in Porous Media*". American Elsevier Publishing Co. Inc.

BRINKMAN, H.C. (1947): "*A calculation of the viscous force exerced by a flowing fluid on a dense swarm of particles*". Appld.Sci.Res.A1, pp. 27-34

BUCHLIN, J.M.; VAN KONICKXLOO, T. (1986): "*O.P.E.R.A II - a test facility to study the thermohydraulics of liquid saturated self heated porous media*". VKI, TM 41.

BUONANNO, G.; A COROTENUTO (1997). "*The effective thermal conductivity of a porous medium with interconnected particles*". Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 2, p.393.

CARBONELL, R.G.; S. WHITAKER (1984): "*Heat and mass transfer in porous media" en "Fundamental of transport phenomena in porous media*", Bear and Corapcioglu eds., Martinus Nijhoof, pp.121-198.

CARRION FITÉ, F.J. (1991): "*Surface Adsorption in the Mixtures of Sodium Dodecylsulphate and Oxyethylenated Nonylphenol with Different Oxyethylenation Degrees*". JAOCS, Vol. 68, nº 4

CHANG, C.S.; MAA, J.R.; YANG, Y.M. (1987). "*Dynamic surface effect and nucleate flow boiling of dilute surfactant solution*". J.Chin.Inst.Chem.Eng. 18, Nº 2. pp. 125-130.

CHENG, P.; VERMA, A.K. (1981). "*The effect of subcooled liquid on film boiling above a vertical surface in a porous medium*". Int.J.Heat and Mass Transfer, Vol. 24, pp. 1151-1160

CHUAH, Y.K. y CAREY, V.P. (1985). "*Analysis of boiling heat transfer and two-phase flow in porous media with non-uniform porosity*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 28, nº 1, pp. 147-154

CORAPCIOGH, M.Y.; S. JIANG (1973): "*Colloid-facilitated grunwater contamination transport*". Water Resour. Res. Vol. 29, nº 7, pp. 2215-2226

DE JOSSELIN DE JONG, G (1958): "*Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits*" Trans.Amer.Geophys.Union, Vol. 39, pp. 67-74.

DHIR, V.K.; CATTON, I. (1977). "*Study of dry-out heat fluxes in beds of inductively heated particles*". UCLA, NUREG-0262 NRC 7

DULLIEN, F.A.L. (1979):"*Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*". Academic Press.

DULNEV, G.N.; V.V: NOVIKOV (1979). "*Conductivity of heterogeneous systems*". J. Engng. Phys., Vol. 36, p. 901

ECKERT, E.R.: R.J. GOLDSTEIN; A.I.BEHBAHANI & R.HAIN (1985). "*Boiling in unconstricted granular medium*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 28. Nº 6 . pp.1187-1196

ECKERT, E. & DRAKE , R.M. (1987): "*Analysis of Heat and Mass Transfer*". Hemisphere Publ. Corporation.

ERGUN, S. (1952): "*Fluid flow through packed columns*". Chemical Eng. Prog. Vol. 48, No. 2.

FUKUSAKO, S.; KOMORIYA, T.; SEKI, N. (1986): "*An experimental study of transition and film boiling heat transfer in liquid-saturated porous beds*", J.Heat Transfer, Vol. 108, pp.117-124.

HADLEY, G.R. (1986). "*Thermal conductivity of packed metal powders*". Int.J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 6, p.909

HARDEE, H.C.; NILSON, R.H. (1977). "*Natural convection in porous media with heat generation*", Nuclear Sci. And Eng., Vol. 69, p. 119.

HOKE, B.C.Jr.; CHEN, J.C. (1991): "*Binary aqueous-organic surface tension temperature dependence*". J. Chem. Eng. Data, 36. p.322-326.

HUPLIK, V.; RAITHBY, G.D. (1972). "*Surface-tension effects in boiling from a downward-facing surface*" ASME Pap. Nº 72-HT-42 for Meet. Aug. 6-9. p. 7

IVES, K.J.; V. PIENVICHITR (1965): "*Kinetics of the filtration of dilute suspensions*". Chem. Eng. Sci., Vol. 20, pp. 965-973

JIMENEZ SALAS, J.A.; DE JUSTO ALPAÑES, J.L. (1975): "*Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*". Ed. Rueda.

JONTZ, P.D. & MYERS, J.E. (1960). "*The effect of dynamic surface tension on nucleated boiling coefficients*", A.I.Ch.E.Journal, Vol. 6, nº 1 pp.34-38

KALPACKI, B. et al (1981): "*Flow Characteristics of Surfactants Solutions in Porous Media and Their Role in Permeability Modification*". Society of Petroleum Engineers Journal, Dec. 1981, p.709

KÄMPF, H.; M. KARSTEN (1970). "*Effects of different types of void volumes on the radial temperature distribution of fuel pins*". Nuclear Appl. Tech., Vol. 9, p. 288

KAVIANY, M. (1991): "*Principles of Heat Transfer in Porous Media*". Ed. Springer-Verlag, pp.626.

KIM,S.J. y CHOI, CH.Y. (1996). " *Convective heat transfer in porous and overlyings fluid layers heated from below*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 39, nº 2, pp. 319-329

KIPPENHAN, C. & TEGELER, D. (1970): "*A bubble growth experiment for the determi-nation of dynamic surface tension*". A.I.Ch.E. Journal, Vol. 16, Nº 2 , p.314-316.

KLOKER, M.; BORSBOOM, M. (1988): "*A fulli implicit scheme for unsteady flow calculations solved by the approximate factorizacion technique*". Von Karman Institute LS 1988-05 Computational Fluid Dynamics, Marzo 7-11.

KOH, K.S. (1986*): "Permeability and Pore Diameter in Random Fibrous Medium in Liquid Flow* ". Fluid Filtration: liquid, Vol. II, ASTM. STP 975, P.R. Johnston & H.G. Schroeder, Eds. American Society for Testing and Materials .

KOTCHAPHAKDEE, P. & WILLIAM, M.C. (1970). "*Enhancement of nucleate poll boiling with polymer additives*". Inst.J.Heat Mass Transfer, 13. pp. 835-848.

LEVERETT, M.C. (1941): "*Capillary behavior in porous solids".* Trans. AIME, Vol.142, pp. 152-169

LIPINSKI, R.J. (1980). "*A particle bed dry-out model with upward and downward boiling*". Trans. Amer. Nucl. Soc., Vol. 35, p. 358

LIPINSKI, R.J. (1982). "*A model for boiling and dryout in particle beds*", Sandia Labs. Report SAND 82-0765 (NUREG/CR-2646)

LOWERY, A.J. & WESTWATER, J.W. (1957): "*Heat Transfer to Boiling Methanol-Effect of Added Agents*". Ind. Eng. Chemistry. Vol. 49.

LUIKOV, A.V. (1966): "*Heat and mass transfer in capillary porous bodies*". Pergamon Press (versión de la edición en ruso de 1961).

LUIKOV, A.V.; A.G. SHASHKOV, et al. (1968). "*Thermal conductivity of porous systems*". Int.J. Heat Mass Transfer, No.11, p.117

MAJUMDAR, A. & TIEN, C.L. (1990*): "Effects of surface tension on film condensation in a porous medium*". Journal of Heat Transfer. Transactions of the ASME. VOL. 112, p. 751-757.

MILLER, W.W., et al. (1975): "*Movement of two nonionic surfactants in wettable and water-repellent soils*". Soil Sci.Soc.Am.Proc., 39, pp. 11-16

MORGAN, A.I.; BROMLEY, L.A. ; WILKE, C.R. (1949*): "Effect of Surface tension on Heat Transfer in Boiling*". Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 41. Nº 12.

MÜLLER, A.J. et al. (1993): "*Flowing polymers through porous media: An experimental study of flow distribution, degradation polumer and molecular weight effects*". Appl. Mech. Rev. Vol. 46, Nº 11, part 2.

MUSKAT, M.; A.W. MERES (1936): "*The flow of heterogeneous fluid through porous media*". Physics, Vol. 7, pp. 346-363.

NAKAGAWA, T; M. ISHIGURO (1994): "Hydraulic conductivity of an allophanic andisol as affected by solution pH". J. Environ. Qual. , 23, pp. 208-210

NATO ASI Series (1987): "Advances in Transport Phenomena in Porous Media". Editada por: J. Bear y M.Yavuz Corapeogen Martinus Nijhoff Publishers

NEUMAN, S.P.; YAKOWITZ, S. (1979): "*A Statistical Approach to the Inverse Problem of Aquifer Hydrology. 1.Theory*". Water Resources Research, Vol. 15. Nº 4

NOZAD, I.; R.G. CARBONELL; S. WHITAKER (1985).*"Heat Conduction in Multiphase Systems - II Experimental Methods and Results for Three Phases Systems*". Chemical Engineering Science, Vol. 40, No. 5 . pp.857-863

PARMENTIER, E.M. (1979*): "Two phase natural convection adjacent to a vertical heated surface in a permeable medium*". Int.J.Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp. 849-855.

PASEK, A.D. (1991): "*Pool boiling on porous surfaces in cryogenic and refrigerants liquids*", Ph.D.Thesis, University of South Hampton.

PLATE, E. (1982): "Engineering meteorology". Ed. Elsevier.

PEREZ CASEIRAS, C (1989). "Numerical Simulation of the Transient Thermo-hydraulic Behaviour of a Heat Dissipating Debris Bed", Von Karman Institute PR 1889-12

PRICE, W.L.V. (1983). "*The calculation of thermal conductivity and thermal diffusivity from transient heating measurement*" Building and Environment, Vol.18, No. 4, p.219.

RAMESH, P.S. y TORRANCE, K.E. (1990). "N*umerical algorithm for problems involving boiling and natural convection in porous materials*", Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, pp. 1-24

RAMESH, P.S. y TORRANCE, K.E. (1990). "*Stability of boiling in porous media*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.33, Nº 9, pp. 1895-1908

REED, A.W. (1986): "*A mechanistic explanation of channels in debris beds*". ASME Trans. Series C. J. Heat Transfer, Vol. 108, nº 1, Feb-1986.

RENSHAW, C.E. et al. (1997): "*Permeability reductions induced by sorption of surfactant*". Water Resour.Res. Vol. 33 Nº 3, March 1997, pp. 371-378

ROLL, J.B. & MYERS, J.E. (1964): "*The effect of Surface Tension on Factors in Boiling Heat Transfer*". A.I.Ch.E.Journal. Vol. 10. Nº 4.

SAFFMAN, P.G. (1959): "*A theory of dispersionin a porous medium*". Journal Fluid Mech., Vol. 6, pp. 321-349.

SALTANOV, G.A. et al. (1984). "*Effect of surfactants on pool boiling heat transfer*", Heat Transfer Sov. Res. V. 18, nº 6.

SALTANOV, G.A. et al. (1986): "*Surfactant influence on heat transfer at boiling and condensation*". Heat Transfer, Proceedings of the International Heat Transfer Conference, 8th, Vol. 5, Publ. by Hemisphere Publ. Corp.

SATIK, C.; PARLAR, M. Y YORTSOS, Y.C. (1991*): "A study of steady state steam-water counterflow in porous media*", Int.J. Heat and Mass Transfer, vol. 34, nº 7.

SCHEIDEGGER, A.E. (1954): "*Statistical hydrodyamics in porous media*". J. Appl. Phys., Vol. 25, pp. 994-1001.

SCHEIDEGGER, A.E. (1960): "*The Physics of Flow Through Porous Media*". University of Toronto Press

SCHROCK, V.E.; FERNANDEZ, R.T.; KESAVAN, K. (1970). "*Heat transfer from cylinders embedded in a liquid filled porous medium*". Heat Transfer, Vol. VII, paper CT3.6 Elsevier.

SCHULZ, B. (1981). "*Thermal conductivity of porous and highly porous materials*". High Temp-High Pressures, Vol. 13, p. 649

SHIRES, G.L.; STEVENS, G.F. (1980). "*Dry-out during boiling in heated particulate beds*", AEE Winfrith Report AEEW-R1779

SHULMAN, Z.P.; L.N. NOVICHYONOK; E.P. BELSKAYA, et al. (1982). "*Thermal conductivity of metal-filled systems*". Int.J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 5, p. 643

SING, B.P.; M. KAVIANY (1991): "*Independent theory versus direct simulation of radiative heat transfer in packed beds*". Int.J.Heat and Mass-Transfer.

SLATTERY, J.C.(1970): "*Two-phase flow through porous media*", AIChE J., Vol. 16, pp. 345-352.

SLATTERY, J.C. (1979): "Interfacial Transport Phenomena". Springer-Verlag, p. 584

SONDERGELD, C.H.; D.L..TURCOTTE (1977): "*An Experimental Study of Two-Phase Convection in a Porous Medium with Applications to Geological Problems* ". J.Geophys.Res., 82, pp.2045-2053.

SONDERGELD, C.H. y TURCOTTE, D.L. (1978). "*Flow visualization studies of two-phase thermal convection in a porous layer*", Pure Appl. Geophys., 117, pp. 321-330

STEVENS, G.F.; TRENBERTH, R. (1982): "*Experimental studies of boiling heat transfer and dryout in heat generating particulate beds in water at 1 bar*". LIKAEA Winfrith, AEEW-R 1545 .

STUBOS, A.K. (1985): "*Experimental and theoretical investigation of boiling in liquid saturated porous media*", VI - PR 1985-25

STUBOS, A.K. y colab. (1988). "*Numerical simulation and interpretation of the Piramids in pile experiments*", Eurotherm Seminar, Modelling of Nuclear and Advanced Heat Transfer, Bologne .

STUBOS, A.K. (1990). "*Boiling and Dryout in Unconsolidated Particle Beds*", Von Karman Institute-Université Libre de Bruxelles

TAYLOR, G.I. (1953): "*Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube*". Proc.Roy.Soc.A219, pp. 186-203.

TAYLOR, S.W.; P.R. JAFFÉ (1990): "*Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium. 1.- Experimental investgation*". Water Resour. Res, Vol. 26, nº 9, pp. 2153-2159

THEUNISSEN, P.H.; BUCHLIN, J.M.; STUBOS, A.K. (1985). "*A two dimensional code modeling the thermohydraulic behaviour of liquid saturated self heated debris beds*", Von Karman Institute, Nov. 7-8.

TIEN et al. (1979): "*Simulation of the dynamic behavior of deep bed filters*". AICHE. J. 25 (3) pp. 385-395

TORRANCE, K.E. (1983)."Boiling in porous media", ASME/ISME

TUNG, V.X.; DHIR, K.D.(1990): "*Experimental study of boiling heat transfer from a sphere embedded in a liquid-satured porous medium*", J.Heat Transfer, Vol.112, pp. 736-742

TURLAND, B.D.; MOORE, K. (1983*): "One-dimensional models of boiling and dryout in post debris cooling*", G. Braun, Karlsruhe. Pp. 192-197.

UDELL, K.S. (1983). "*Heat transfer in porous media heated from above with evaporation, condensation and capillary effects*", J. Heat Transfer, 105 (3), pp.485-492.

UDELL, K.S. (1985). "*Heat transfer in porous media considering phase change and capillarity-the heat pipe effect*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 28, Nº 2, pp. 485-495.

VACHON, R.I. (1979). "*Thermal conductivity of heterogeneous mixtures and lunar soils*". Contract NASA-26579. Auburn University.

VALEA, A.; GONZALEZ, M.L. (1990): "Comportamiento de los tensioactivos en disolución". Serv. Ed. de la Universidad del Pais Vasco, pp.56.

VANDERVIVERE, P; P. BAWEYE (1992*): "Saturated hydraulic conductivity reductions caused by aerobic bacteria in sand columns*". Soil Sci.Soc.Am.J., 56, pp.1-13

VANDEVIVERE et al. (1995*): "Microbial clogging of saturated soils and aquifer materials: Evaluation of mathematical models*". Water Resour. Res, Vol. 31, Nº 9, pp. 2173-2180

WANG, A.T.A. & HARTNETT, J.P. (1992): "Influence of surfactants on pool boiling of aqueous polyacrylamide solutions". Wärme-und Stoffübertragung, 27. p. 245-248.

WEEKMAN, V.W.; J.E. MYERS (1965*): "Heat transfer characteristics of co-current gas-liquid flow in packed beds*", AIChE J., Vol. 11, pp. 13-17.

WEI, H. & MAA, J.R. (1982). "*Enhancement of flow boiling heat transfer with polymer additives*", Inst.J.Heat Mass Transfer, Vol. 25, nº 3, pp. 431-434.

WHITAKER, S. (1986): "*Flow in Porous Media I: A Theorical Derivation of Darcy's Law*". Transp. Porous Media, 1, 3-25

WHITE, I. (1976): "Effect of surfactants on the evaporation of water close to 100 degree C". Ind. Eng. Chem. Fundam. Vol. 15, Nº 1. p. 53-59.

WU, W. & YANG, Y. (1993): " Enhanced boiling heat transfer by surfactant additives". Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Pool and External Flow Boiling. ASME. A.I.Ch.E.

YANG, Y.M. (1990). "*Dynamic surface effect on boiling of aqueous surfactant solutions*". Int.Commun.Heat Mass Transfer. Vol. 18, nº 6, pp. 711-727.

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos latinos			
A	superficie	L^2	m^2
A_e	área de la entrefase sólido-fluido	L^2	m^2
a	gradiente de heterogeneidad $a \equiv \frac{d\tau}{d\xi}$	1	------
B_o	número de Bond $B_o = \frac{g.(\rho_l - \rho_v).k'}{\sigma.\varepsilon}$	1	------
C_F	constante adimensional de resistencia de forma	1	------
C_{sf}	coeficiente en la ec. de Rohsenow	1	------
C_T	capacidad de sorción	1	------
c_p	calor específico a presión constante	$L^2.T^{-2}.\theta^{-1}$	J/kg.K
D	longitud característica	L	m
Da	número de Darcy	1	------
d	diámetro de la sección recta del MPS	L	m
d_f	diámetro medio de fibra	L	m
d_m	diámetro medio de partícula	L	m
d_p	diámetro medio de poro	L	m
$\dot{e}$	tasa de evaporación superficial	$M.L^{-2}.T^{-1}$	$kg/m^2.s$
F	fuerza	$M.L.T^{-2}$	$kgm/s^2 \equiv N$
f	fracción de flujo másico específico de líquido que hierve	------	------
f_p	coeficiente de fricción $f_p = -g.\nabla(\phi).d_p.[\varepsilon^3/(1-\varepsilon)] / v_p^2$	1	------
g	gravedad	$L.T^{-2}$	m/s^2
H	altura inicial del MPS	L	m
h	coeficiente de transferencia de calor	$L^2.T^{-2}$	J/kg
h_{lv}	calor latente de vaporización	$L^2.T^{-2}$	J/kg

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos latinos			
h_c	altura de líquido en la cubeta	L	m
h_{ev}	altura correspondiente a la capa de líquido evaporado en la cubeta	L	m
h_{ef}	altura media de entrefase	L	m
h_s	altura de la capa de líquido *subenfriado*	L	m
J(s)	función J de Leverett	1	------
K	conductividad hidráulica	$L.T^{-1}$	m/s
k'	permeabilidad intrínseca	L^2	m^2
k'_r	permeabilidad relativa	------	------
k_k	constante de Kozeny	1	------
L	longitud	L	m
L_C	longitud de canal	L	m
L_f	espesor de película de tensioactivo que envuelve al sólido	L	m
L_m	longitud media de fibra	L	m
M_W	masa molecular del agua	1	kg/kmol
m	masa	M	kg
$\dot{m}_v$	fujo másico vertical de vapor	$M.T^{-1}$	kg/s
Ne	número de poro efectivo	1	------
Nu	número de Nusselt	1	------
	$Nu = \frac{h}{\lambda_l}\left[\frac{\sigma}{g.(\rho_l - \rho_v)}\right]^{1/2}$		
P	presión	$M.L^{-1}.T^{-2}$	$N/m^2 \equiv Pa$
P_c	presión capilar	$M.L^{-1}.T^{-2}$	N/m^2
	$P_C = \frac{\sigma.J(s)}{\sqrt{k'}} = P_v - P_l$		
P_B	presión en el interior de una burbuja	$M.L^{-1}.T^{-2}$	N/m^2
Pr	número de Pranldt	1	------
	$Pr = \frac{\mu_l.c_{pl}}{\lambda_l}$		
p_e	presión fluidoestática	$M.L^{-1}.T^{-2}$	N/m^2

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos latinos			
$\dot{Q}$	flujo de calor	$M.L^2.T^{-3}$	J/s ≡ W
$\dot{Q}_{dr}$	flujo de calor en condiciones de dryout	$M.L^2.T^{-3}$	J/s
$\dot{q}$	flujo específico de calor	$M.T^{-3}$	$J/s.m^2$
q_{cr}	flujo específico crítico de vapor	$M.T^{-3}$	$J/s.m^2$
q_d	flujo específico de calor de dryout	$M.T^{-3}$	$J/s.m^2$
q_{dL}	flujo de calor de dryout en el límite laminar	$M.T^{-3}$	$J/s.m^2$
q_{dT}	flujo de calor de dryout en el límite turbulento	$M.T^{-3}$	$J/s.m^2$
R	radio	L	m
Ra	número de Rayleigh $Ra = \frac{k'.g.\beta.\Delta T.h}{\nu.\lambda_e / (\rho.c_p)_l}$	1	------
Re_d	número de Reynolds referido a d_m y a u_D: $Re_d = u_D.d_m / \nu$	1	------
Re_p	número de Reynolds referido a d_m y V_p: $Re_p = V_p.d_m / \nu\ (1-\varepsilon)$	1	------
r	radio de burbuja	L	m
r_e	radio efectivo de curvatura de la entrefase	L	m
r_o	radio de poro equivalente $r_o = \frac{2.\sigma}{\rho_l.g.z}$	L	m
S_e	superficie específica	L^{-1}	m^{-1}
	saturación efectiva $S_e = (s-s_{ir})/(1-s_{ir})$	1	------
s	saturación	1	------
s_{ir}	saturación irreducible o residual	1	------
T	temperatura	θ	°C o K
t	tiempo	T	s
V	volumen total	L^3	m^3

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos latinos			
V_c	volumen de líquido en la cubeta	L^3	m^3
V_{ev}	volumen de líquido evaporado en la cubeta	L^3	m^3
V_d	volumen de líquido en la cubeta por dilatación térmica del MPS	L^3	m^3
V	velocidad	$L.T^{-1}$	m/s
V_p	velocidad de poro $V_p = u_D / \varepsilon$	$L.T^{-1}$	m/s
V_v	velocidad de propagación del frente de vapor	$L.T^{-1}$	m/s
$\dot{V}$	caudal volumétrico	$L^3.T^{-1}$	m^3/s
$\dot{W}$	potencia	$M.L^2.T^{-3}$	$J/s \equiv W$
U_D	velocidad de filtración o de Darcy	$L.T^{-1}$	m/s
Z_{bf}	altura de la capa bifásica	L	m
z	altura, posición	L	m

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos griegos			
α	inverso de la permeabilidad intrínseca en la ec. de Forchheimer	L^{-2}	m^{-2}
α	saturación de vapor	1	------
α	fracción de vacío	1	------
α	difusividad térmica	$L^2.T^{-1}$	m^2/s
α_e	difusividad térmica efectiva	$L^2.T^{-1}$	m^2/s
β	parámetro de inercia en la ec. de Forchheimer	L^{-1}	m^{-1}
β	coeficiente de dilatación térmica	θ^{-1}	K^{-1}

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos griegos			
Γ	tasa temporal de generación de vapor	$M.L^{-3}.T^{-1}$	$kg/m^3.s$
χ	relación entre conductividades térmicas: $\chi = \lambda_s / \lambda_f$	1	------
δ	desviación estándar	------	------
δ	altura de la capa porosa	L	m
ε	porosidad geométrica	1	------
ε_p	emisividad de la placa	------	------
ϕ	gradiente hidráulico	1	------
γ	peso específico	$M.L^{-2}.T^{-2}$	N/m^3
γ	constante psicrométrica	$M.L^{-1}.T^{-2}.\theta^{-1}$	$Kg/m.s^2.°C$
η	pasabilidad del lecho $\eta = \frac{d_p.\varepsilon^3}{B(1-\varepsilon)}$	L	m
η	variable de semejanza $\eta = \frac{z}{(\alpha_e.t)^{1/2}}$	1	------
φ	humedad relativa	1	------
λ	altura manométrica capilar	L	m
λ	conductividad térmica	$M.L.T^{-3}.\theta^{-1}$	W/m.K
λ_e	conductividad térmica efectiva	$M.L.T^{-3}.\theta^{-1}$	W/m.K
μ	viscosidad dinámica	$M.L^{-1}.T^{-1}$	kg/m.s
ν	viscosidad cinemática	$L^2.T^{-1}$	m^2/s
v_a	velocidad de advención	$L.T^{-1}$	m/s
v_{ap}	velocidad de advención en el poro $v_{ap} = \frac{v_a}{\varepsilon}$	$L.T^{-1}$	m/s
$\dot{v}_c$	caudal de líquido desplazado a la cubeta	$L^3.T^{-1}$	m^3/s
θ	ángulo de contacto	------	------

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolo	Definición	Dimensiones	Unidades (SI)
Símbolos griegos			
θ	diferencia de temperatura entre capas del medio poroso	θ	°C
θ	parámetro adimensional de temperatura: $\theta = \frac{<T> - T_0}{T_1 - T_0}$	1	------
θ	ángulo entre el flujo de calor y la orientación de las fibras	------	------
ρ	densidad	$M.L^{-3}$	kg/m^3
ρ_b	densidad del medio poroso	$M.L^{-3}$	kg/m^3
ρ_s	densidad del tensioactivo adsorbido	$M.L^{-3}$	kg/m^3
σ	tensión superficial	$M.T^{-2}$	J/m^2
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$M.T^{-3}.\theta^{-4}$	$J/s.m^2.K^4$
σ	fracción de volumen del espacio de poro ocupada por tensioactivo adsorbido $\sigma = \frac{C_T.\rho_b}{\rho_s.\varepsilon_o}$	1	------
τ	factor de tortuosidad	1	------
τ	variable de heterogeneidad	1	------
ω	flujo específico de calor adimensional	1	------
ω_{cr}	flujo específico de calor crítico adimensional	1	------
ξ	coordenada adimensional $\xi = x.\sqrt{k'}.g.\Delta\rho/\sigma$	1	------
ξ	variable adimensional $\xi = \frac{z}{2.\sqrt{\alpha.t}}$	1	------
ψ	función de posición	------	------

NOMENCLATURA (continuación)

Símbolos especiales

$\| \|$	valor absoluto
$< >$	promediado volumétrico
$< >^i$	promediado intrínseco de la fase i
∇	operador gradiente
ϑ	orden de magnitud
f	función

Subíndices

at	atmosférica
e	efectiva
f, f	fluido
gl, bf	región bifásica
i	fase
l, l	líquido
máx	máximo
nw	fase no humectante
o	inicial
p	placa
s	sólido
sat	condiciones de saturación
v, v	vapor
w	placa ó pared
w	fase humectante

Supraíndices

$\rightarrow$	vector
=	tensor
+, *	parámetro adimensional

ANEXOS

ANEXO 1

CAPITULO II

1.1.- Datos experimentales para el cálculo de la conductividad hidráulica (medios porosos granulares)

1.2.- Datos experimentales para el cálculo de la conductividad hidráulica (medios porosos fibrosos)

ANEXO 1.1.- DATOS EXPERIMENTALES PARA EL CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (MEDIOS POROSOS GRANULARES)

DATOS DE PIEZOMETRIA (MEDIOS POROSOS GRANULARES)

Valores medios correspondientes a siete medidas realizadas para cada uno de los caudales y alturas piezométricas.

FLUIDO SATURANTE: AGUA DESTILADA

BRONCE

Porosidad: 0,36 Temperatura: 25,5 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
9,348E-07	22,2	20,3	18,3	16,4
1,988E-06	36,2	31,9	27,3	22,9
2,220E-06	39,7	34,8	29,5	24,5

ACERO

Porosidad: 0,59 Temperatura: 24 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
3,497E-08	15,9	15,1	14,2	13,1
5,356E-07	85,4	74,3	54,7	42
5,481E-07	94	85,2	70,2	40,7

ARENA

Porosidad: 0,38 Temperatura: 22 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
6,572E-05	35,6	28,9	21,3	12,9
8,043E-05	62,4	53,3	42,8	31,5
9,174E-05	94,1	81,8	68	53,2

FLUIDO SATURANTE: SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

ARENA

Porosidad: 0,38 Temperatura: 19 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
5,750E-05	14,49	10,14	5,53	0,94
7,500E-05	39,71	33,53	27,04	20,33
8,690E-05	62,6	55,31	46,86	37,48

ANEXO 1.2.- DATOS EXPERIMENTALES PARA EL CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (MEDIOS POROSOS FIBROSOS)

DATOS DE PIEZOMETRIA (MEDIOS POROSOS FIBROSOS)

Valores medios correspondientes a siete medidas realizadas para cada uno de los caudales y alturas piezométricas.

FLUIDO SATURANTE: AGUA DESTILADA

ALGODON

Porosidad: 0,83 Temperatura: 21 °C

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
2,632E-07	34,38	30,42	26,2	22,72
6,214E-07	63,75	52,49	41,55	33,01
9,401E-07	87,73	73,2	58,73	45,63

Porosidad: 0,88 Temperatura: 24,2 °C

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
5,218E-07	28,84	24,85	19,12	14,14
1,032E-06	47,94	39,2	26,21	17,39
1,370E-06	60,97	48,21	31,02	20,49

Porosidad: 0,92 Temperatura: 20 °C

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
2,889E-06	48,63	41,32	35,92	28,55
4,153E-06	65,21	54,68	46,33	35,62
6,081E-06	91,68	75,88	63,53	47,58

ANEXO 1.2.- DATOS EXPERIMENTALES PARA EL CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (MEDIOS POROSOS FIBROSOS)

DATOS DE PIEZOMETRIA (MEDIOS POROSOS FIBROSOS)

Valores medios correspondientes a siete medidas realizadas para cada uno de los caudales y alturas piezométricas.

FLUIDO SATURANTE: SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

ALGODON

Porosidad: 0,83 Temperatura: 20 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
2,950E-07	51,3	35,8	16,1	1,5
3,740E-07	68,1	47,6	22,4	3,1
7,220E-07	130,03	90,8	45,7	9,4

Porosidad: 0,88 Temperatura: 20 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
1,200E-06	67,3	60	47,7	30,4
1,570E-06	87	77,8	61,4	36,8
1,780E-06	94,63	83,63	65,67	39,47

Porosidad: 0,92 Temperatura: 20 ºC

	ALTURAS PIEZOMETRICAS EN (cm)			
Caudal (m3/s)	piezómetro 1	piezómetro 2	piezómetro 3	piezómetro 4
1,920E-06	34,4	29,4	24	19,1
3,660E-06	54,7	45,8	35,7	26,2
6,550E-06	90	74	55,8	39,2

ANEXO 2

CAPITULO III

2.1.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada.

2.2.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo.

2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

2.5.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Permanente)

2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

ANEXO 2.1.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
0	17,67	18,07	18,07	18,05	18,14	18,32	18,54
1	18,95	18,33	18,21	18,28	19,91	18,31	18,56
2	18,68	18,26	18,21	18,39	22,72	18,41	18,39
3	18,05	18,25	18,22	19,04	25,32	18,37	18,45
4	18,80	18,33	18,36	19,76	27,59	18,43	18,38
5	18,99	18,30	18,49	20,71	29,67	18,37	18,30
6	18,87	18,38	18,73	21,71	31,63	18,33	18,28
7	18,61	18,36	19,10	22,77	33,46	18,31	18,31
8	17,95	18,52	19,56	23,93	35,03	18,22	18,35
9	18,34	18,64	19,97	24,97	36,79	18,19	18,29
10	18,48	18,97	20,65	25,89	38,26	18,31	18,36
11	17,93	19,09	21,08	27,17	39,82	18,20	18,25
12	19,30	19,50	21,84	28,21	41,33	18,27	18,29
13	17,89	19,62	22,37	29,34	42,63	18,18	18,33
14	18,65	20,05	23,10	30,42	43,94	18,28	18,33
15	19,31	20,30	23,61	31,34	45,40	18,23	18,30
16	19,22	20,65	24,40	32,33	46,65	18,28	18,35
17	19,32	21,02	25,06	33,36	47,93	18,28	18,38
18	18,28	21,26	25,64	34,44	49,08	18,25	18,38
19	19,17	21,68	26,35	35,40	50,29	18,21	18,48
20	20,16	22,18	27,04	36,29	51,37	18,31	18,48
21	19,53	22,53	27,80	37,22	52,39	18,27	18,51
22	19,66	22,79	28,32	38,14	53,57	18,23	18,45
23	20,17	23,36	29,15	39,06	54,60	18,29	18,52
24	19,46	23,64	29,74	39,97	55,60	18,33	18,60
25	20,24	24,14	30,48	40,76	56,67	18,37	18,64
26	20,30	24,57	31,10	41,58	57,70	18,38	18,55
27	20,67	24,93	31,65	42,50	58,61	18,27	18,62
28	20,46	25,26	32,31	43,39	59,41	18,29	18,71
29	20,63	25,67	33,00	44,18	60,23	18,36	18,88
30	20,89	26,20	33,69	45,00	61,12	18,45	18,82
31	21,51	26,52	34,18	45,73	61,87	18,40	18,77
32	20,84	26,93	34,87	46,38	62,80	18,40	18,92
33	21,28	27,27	35,56	47,23	63,65	18,45	18,97
34	21,97	27,56	35,99	47,90	64,47	18,40	18,97
35	21,94	28,17	36,63	48,53	65,03	18,62	19,01
36	21,38	28,48	37,19	49,29	65,74	18,50	18,94
37	22,61	28,90	37,60	50,08	66,54	18,43	19,05
38	22,15	29,26	38,36	50,62	67,29	18,58	19,22
39	22,69	29,70	38,81	51,32	67,99	18,46	19,25
40	23,41	30,22	39,48	52,00	68,59	18,51	19,11
41	22,21	30,27	39,89	52,63	69,13	18,42	19,21
42	23,44	30,85	40,44	53,01	69,61	18,50	19,29
43	23,57	31,05	40,87	53,64	70,22	18,63	19,25
44	22,55	31,35	41,36	54,20	70,62	18,56	19,35
45	23,65	31,64	41,69	54,80	71,29	18,37	19,30
46	24,39	32,08	42,19	55,36	71,84	18,37	19,38

ANEXO 2.1.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada

tiempo (minutos)	termopar1 (ºC)	termopar2 (ºC)	termopar3 (ºC)	termopar4 (ºC)	termopar5 (ºC)	entrada (ºC)	salida (ºC)
47	23,67	32,47	42,81	55,88	72,34	18,56	19,47
48	24,36	32,58	43,11	56,42	73,00	18,49	19,48
49	24,83	33,30	43,70	56,75	73,54	18,59	19,46
50	24,16	33,22	43,92	57,33	74,02	18,43	19,52
51	25,09	33,54	44,42	57,87	74,50	18,39	19,50
52	25,03	34,15	44,93	58,23	74,96	18,57	19,51
53	25,33	34,26	45,22	58,79	75,44	18,51	19,65
54	24,83	34,26	45,58	59,21	75,69	18,54	19,70
55	25,45	34,94	46,08	59,61	76,41	18,50	19,81
56	25,31	35,05	46,25	59,93	76,82	18,46	19,57
57	25,05	35,18	46,62	60,47	77,03	18,40	19,66
58	25,64	35,57	47,09	61,03	77,42	18,50	19,76
59	25,61	35,82	47,64	61,31	77,72	18,56	19,82
60	26,64	36,11	47,72	61,69	78,26	18,37	19,73
61	26,55	36,45	48,29	61,99	78,67	18,70	19,79
62	26,00	36,34	48,32	62,46	79,07	18,44	19,85
63	27,10	36,85	48,75	62,97	79,41	18,47	19,86
64	27,02	37,01	49,04	63,32	79,80	18,54	19,99
65	27,56	37,37	49,40	63,51	80,27	18,64	19,78
66	26,74	37,45	49,64	63,93	80,55	18,58	19,84
67	25,50	37,62	50,06	64,34	80,95	18,68	19,96
68	27,10	37,90	50,19	64,58	81,52	18,57	19,93
69	25,99	37,93	50,55	65,11	81,75	18,55	20,01
70	27,50	38,38	50,83	65,38	82,26	18,61	19,96
71	26,51	38,42	51,07	65,78	82,47	18,59	20,05
72	27,44	38,61	51,45	66,15	82,87	18,55	20,08
73	28,42	39,03	51,71	66,45	83,12	18,56	20,01
74	27,29	39,03	51,98	66,75	83,17	18,54	20,17
75	27,65	39,30	52,26	67,00	83,22	18,67	20,22
76	28,71	39,66	52,50	67,22	83,78	18,58	20,06
77	27,08	39,55	52,97	67,49	84,00	18,56	20,16
78	27,91	39,86	53,02	67,84	84,53	18,56	20,34
79	28,52	40,17	53,35	68,02	85,26	18,69	20,07
80	26,68	40,13	53,54	68,37	85,20	18,74	20,20
81	28,19	40,23	53,56	68,82	85,45	18,40	20,20
82	28,30	40,35	53,80	68,96	85,56	18,50	20,21
83	28,23	40,91	54,27	69,08	85,75	18,81	20,24
84	27,60	40,97	54,36	69,15	85,88	18,73	20,21
85	26,85	40,84	54,57	69,58	85,86	18,56	20,29
86	28,94	41,17	54,65	69,81	86,41	18,69	20,17
87	27,61	41,24	54,92	69,97	86,67	18,67	20,29
88	28,21	41,36	54,95	70,17	86,92	18,52	20,27
89	29,57	41,55	55,30	70,38	87,34	18,60	20,32
90	28,85	41,63	55,37	70,76	87,78	18,55	20,27
91	28,73	41,75	55,69	70,94	87,91	18,62	20,43
92	28,85	41,91	55,88	71,17	87,91	18,80	20,40

ANEXO 2.1.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
93	29,19	42,00	55,99	71,35	87,91	18,60	20,42
94	29,94	42,29	56,16	71,60	88,13	18,65	20,35
95	28,70	42,10	56,31	71,70	88,48	18,72	20,42
96	29,69	42,38	56,45	71,82	88,89	18,65	20,32
97	29,77	42,55	56,75	72,00	89,11	18,65	20,40
98	28,23	42,54	56,88	72,26	88,97	18,71	20,46
99	28,42	42,61	57,00	72,41	88,95	18,73	20,44
100	29,90	42,87	57,00	72,55	89,08	18,71	20,46
101	29,46	42,94	57,20	72,75	88,95	18,66	20,48
102	30,40	43,12	57,36	72,81	89,07	18,82	20,40
103	29,48	43,00	57,49	72,99	89,12	18,50	20,40
104	30,13	43,11	57,67	73,12	89,18	18,70	20,50
105	29,86	43,49	57,81	73,16	89,39	18,76	20,27
106	28,78	43,36	57,80	73,17	89,51	18,83	20,46
107	29,41	43,45	57,84	73,37	89,81	18,70	20,50
108	28,85	43,59	58,13	73,39	89,83	19,04	20,52
109	29,85	43,46	58,01	73,78	90,26	18,56	20,49
110	29,61	43,44	58,31	73,90	90,22	18,69	20,66
111	30,69	43,92	58,25	73,91	90,47	18,83	20,43
112	30,54	43,89	58,32	74,06	90,53	18,79	20,40
113	30,38	43,97	58,44	74,12	90,74	18,78	20,43
114	29,58	44,14	58,72	74,05	90,65	18,88	20,33
115	29,38	44,17	58,80	74,19	90,79	18,94	20,49
116	29,90	44,09	58,81	74,43	91,11	18,63	20,51
117	29,29	44,06	58,90	74,60	91,21	18,77	20,65
118	30,49	44,33	59,14	74,68	91,55	18,84	20,56
119	29,41	44,40	59,22	74,74	91,81	18,93	20,63
120	29,50	44,36	59,19	75,02	91,97	18,74	20,64
121	30,21	44,40	59,31	75,26	92,00	18,76	20,61
122	31,12	44,67	59,51	75,25	91,97	18,87	20,57
123	29,47	44,49	59,52	75,42	92,07	18,78	20,68
124	29,58	44,65	59,67	75,50	92,13	18,80	20,62
125	29,64	44,66	59,69	75,55	92,01	18,81	20,66
126	30,08	44,79	59,86	75,72	92,24	18,90	20,75
127	30,77	44,95	59,87	75,80	92,29	18,86	20,59
128	29,94	44,95	60,06	75,90	92,19	18,89	20,77
129	29,71	44,89	60,07	75,91	92,09	18,83	20,66
130	30,76	45,00	60,11	75,85	92,36	18,85	20,57
131	29,92	45,03	60,14	76,01	92,28	18,90	20,75
132	31,31	45,18	60,24	76,14	92,62	18,77	20,64
133	31,41	45,29	60,23	76,15	92,82	18,83	20,58
134	29,69	45,18	60,47	76,29	92,73	19,03	20,74
135	29,57	45,26	60,47	76,25	92,80	19,07	20,72
136	30,45	45,38	60,53	76,35	92,89	18,93	20,70
137	30,03	45,41	60,65	76,51	93,16	18,91	20,69
138	29,62	45,19	60,68	76,68	93,00	18,90	20,87
139	30,52	45,17	60,60	76,82	93,46	18,90	20,87

ANEXO 2.1.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
140	30,87	45,39	60,72	76,96	93,68	18,91	20,81
141	30,54	45,52	60,93	76,99	93,45	18,95	20,84
142	31,42	45,69	60,92	77,07	93,61	18,86	20,73
143	31,23	45,67	60,97	77,14	93,68	19,01	20,68
144	30,15	45,61	60,95	77,26	93,43	18,92	20,79
145	30,01	45,73	61,23	77,22	93,41	19,15	20,80
146	30,67	45,76	61,19	77,20	93,50	19,08	20,61
147	30,00	45,79	61,29	77,09	93,36	19,09	20,71
148	30,88	45,77	61,27	77,19	93,43	19,02	20,74
149	29,99	45,87	61,37	77,17	93,26	19,10	20,80
150	30,72	45,92	61,26	77,13	93,18	19,03	20,70
151	29,97	45,95	61,43	77,16	93,27	19,06	20,68
152	30,47	45,96	61,37	77,10	93,41	19,02	20,74
153	29,70	45,80	61,28	77,17	93,45	18,92	20,77
154	31,41	46,06	61,55	77,17	93,37	18,97	20,72
155	30,48	45,85	61,38	77,31	93,42	19,10	20,88
156	30,72	46,07	61,56	77,22	93,59	19,06	20,81
157	30,77	46,02	61,50	77,23	93,42	18,91	20,78
158	30,46	46,12	61,59	77,28	93,45	19,06	20,79
159	31,04	46,05	61,52	77,39	93,49	19,14	20,72
160	31,19	46,03	61,50	77,41	93,82	19,09	20,74
161	31,03	46,13	61,55	77,39	93,78	19,05	20,75
162	30,35	45,92	61,51	77,55	93,67	19,05	20,97
163	31,44	46,18	61,65	77,57	93,76	19,10	20,80
164	31,22	46,13	61,58	77,58	93,59	18,90	20,83
165	30,00	46,16	61,70	77,60	93,55	19,25	20,93
166	30,99	46,28	61,72	77,54	93,74	19,11	20,76
167	29,97	46,09	61,67	77,62	93,44	19,00	21,00
168	30,77	46,42	61,82	77,49	93,68	19,16	20,93
169	30,38	46,12	61,70	77,69	93,79	19,08	20,98
170	30,36	46,26	61,79	77,60	93,68	19,25	20,88
171	30,89	46,12	61,70	77,78	93,94	19,03	20,88
172	30,46	46,33	61,84	77,74	93,98	19,30	20,95
173	31,35	46,31	61,75	77,74	94,29	19,16	20,81
174	31,30	46,47	61,79	77,72	94,14	19,16	20,86
175	31,01	46,35	61,84	77,78	94,31	19,13	20,86
176	31,42	46,37	61,76	77,84	94,44	19,18	20,83
177	30,81	46,23	61,79	77,95	94,43	19,00	20,87
178	31,08	46,32	61,87	78,11	94,30	19,15	20,90
179	31,94	46,51	62,06	78,02	94,41	19,20	20,87

ANEXO 2.2.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
0	18,99	18,54	18,35	18,17	18,15	18,37	18,22
1	18,86	18,46	18,29	18,14	20,46	18,29	18,24
2	18,23	18,33	18,28	18,65	23,52	17,78	18,05
3	18,04	18,51	18,31	19,15	25,77	17,99	17,96
4	18,44	18,25	18,35	20,10	28,16	17,65	17,80
5	18,85	18,45	18,63	20,99	30,06	17,66	17,71
6	17,35	18,41	18,96	21,94	31,74	17,62	17,75
7	17,49	18,50	19,37	22,98	33,58	17,61	17,78
8	18,39	18,81	19,75	24,07	35,27	17,60	17,63
9	17,69	18,75	20,18	24,94	36,69	17,57	17,66
10	17,48	18,70	20,52	26,22	38,23	17,41	17,71
11	18,29	19,16	21,35	27,07	39,70	17,62	17,65
12	17,49	19,20	21,83	28,27	41,07	17,39	17,69
13	19,07	19,49	22,29	29,34	42,48	17,36	17,59
14	18,73	20,06	23,05	30,11	43,64	17,69	17,66
15	18,72	20,20	23,54	31,10	45,07	17,61	17,51
16	17,54	20,38	24,30	32,16	46,16	17,64	17,74
17	19,18	20,70	24,72	33,20	47,75	17,44	17,59
18	19,00	20,90	25,34	34,28	48,92	17,35	17,62
19	18,74	21,28	26,12	35,08	49,84	17,48	17,80
20	20,28	21,92	26,64	36,02	51,08	17,58	17,61
21	19,15	22,30	27,48	36,72	51,95	17,69	17,77
22	19,71	22,49	27,93	37,71	53,17	17,48	17,68
23	19,23	23,06	28,66	38,53	54,08	17,67	17,82
24	19,98	23,29	29,16	39,40	55,02	17,63	17,68
25	19,35	23,43	29,85	40,24	55,77	17,40	17,82
26	20,33	24,06	30,67	41,02	56,48	17,64	17,84
27	20,30	24,35	31,07	41,70	57,42	17,49	17,79
28	20,32	24,64	31,60	42,69	58,22	17,48	17,95
29	19,98	25,10	32,49	43,23	58,98	17,61	18,03
30	19,90	25,44	33,09	44,03	59,71	17,70	18,07
31	20,91	25,83	33,47	44,73	60,63	17,65	18,00
32	20,59	26,32	34,17	45,39	61,34	17,80	18,10
33	21,08	26,44	34,45	46,14	62,00	17,55	18,05
34	20,69	26,93	35,20	46,71	62,41	17,68	18,13
35	21,29	27,42	35,71	47,23	63,10	17,76	18,13
36	21,56	27,59	36,07	47,96	63,79	17,54	18,08
37	21,64	28,08	36,69	48,36	64,43	17,69	18,14
38	21,12	28,23	37,03	48,97	65,05	17,60	18,19
39	22,78	28,77	37,66	49,54	65,83	17,80	18,03
40	21,51	28,85	38,12	50,13	66,40	17,61	18,50
41	23,06	29,36	38,53	50,67	67,04	17,57	18,16
42	23,09	29,66	38,92	51,21	67,64	17,65	18,20
43	22,15	30,01	39,50	51,71	68,19	17,86	18,28
44	22,05	30,07	39,81	52,23	68,72	17,64	18,28
45	23,49	30,58	40,18	52,73	69,36	17,75	18,25
46	23,18	30,84	40,57	53,27	69,89	17,64	18,26

ANEXO 2.2.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
47	23,12	31,09	40,93	53,72	70,32	17,70	18,22
48	22,42	31,46	41,53	54,10	70,74	17,83	18,35
49	23,06	31,44	41,78	54,85	71,31	17,52	18,36
50	23,59	31,82	42,17	55,20	71,77	17,66	18,40
51	22,96	32,19	42,67	55,54	71,89	17,91	18,46
52	22,29	32,27	43,13	56,01	72,26	17,73	18,54
53	22,96	32,47	43,45	56,53	72,57	17,81	18,55
54	23,63	33,13	43,84	56,72	73,23	17,82	18,44
55	22,69	32,95	44,20	57,22	73,48	17,81	18,53
56	24,27	33,32	44,26	57,67	74,14	17,57	18,56
57	24,59	33,67	44,60	57,97	74,60	17,73	18,47
58	23,62	33,85	45,10	58,26	74,76	17,84	18,56
59	24,59	34,00	45,23	58,68	75,11	17,58	18,54
60	23,99	34,30	45,66	58,99	75,30	17,77	18,56
61	23,41	34,29	45,93	59,48	75,62	17,75	18,59
62	24,45	34,73	46,27	59,65	76,06	17,84	18,53
63	24,78	34,79	46,40	60,05	76,47	17,55	18,61
64	25,16	35,01	46,69	60,43	76,77	17,69	18,60
65	24,85	35,38	47,14	60,55	77,02	17,92	18,53
66	25,08	35,32	47,13	60,98	77,39	17,56	18,65
67	25,52	35,66	47,40	61,35	77,73	17,71	18,60
68	24,15	35,79	47,85	61,57	77,81	17,95	18,66
69	25,40	35,87	47,91	61,91	78,28	17,53	18,62
70	25,50	36,09	48,15	62,26	78,80	17,67	18,70
71	24,32	36,20	48,60	62,50	79,12	17,95	18,79
72	24,13	36,30	48,84	62,80	79,57	17,88	18,82
73	25,09	36,69	49,04	63,02	80,24	17,89	18,66
74	25,68	36,77	49,04	63,48	80,80	17,75	18,69
75	24,71	36,70	49,61	63,90	80,81	17,90	18,84
76	25,79	37,00	49,62	64,34	80,97	17,74	18,83
77	25,70	37,01	49,97	64,64	81,00	17,72	19,15
78	25,12	37,30	50,28	64,76	80,81	17,95	18,96
79	26,47	37,57	50,41	64,92	81,28	17,83	18,77
80	26,48	37,69	50,48	65,13	81,20	17,57	18,85
81	26,65	37,86	50,72	65,21	81,44	17,97	18,78
82	26,43	37,82	50,93	65,69	81,58	17,62	18,93
83	25,95	38,18	51,24	65,60	81,94	17,97	18,89
84	26,27	38,06	51,14	65,71	82,20	17,60	19,04
85	26,83	38,37	51,40	66,06	82,34	17,80	18,99
86	27,25	38,54	51,55	66,17	82,47	17,83	18,87
87	26,40	38,79	51,87	66,18	82,70	18,01	18,80
88	25,38	38,60	51,86	66,48	82,66	17,91	19,00
89	27,28	38,96	52,04	66,57	82,88	18,04	18,90
90	26,11	38,84	52,13	66,68	82,90	17,84	19,10
91	26,50	38,93	52,35	66,93	83,10	17,97	19,10
92	26,48	39,13	52,53	67,09	83,48	17,99	19,03
93	26,14	39,10	52,67	67,25	83,52	17,99	19,13

ANEXO 2.2.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
94	27,48	39,38	52,58	67,36	83,92	17,89	18,93
95	26,14	39,44	52,88	67,39	84,25	18,02	19,06
96	27,04	39,50	52,88	67,56	84,53	17,97	18,95
97	27,11	39,58	53,04	67,75	84,98	17,97	18,96
98	27,31	39,62	53,18	67,97	85,33	18,01	19,00
99	26,06	39,53	53,20	68,22	85,24	17,96	19,13
100	26,28	39,74	53,55	68,44	85,39	18,09	19,10
101	27,18	39,83	53,50	68,57	85,60	17,98	19,19
102	27,78	39,99	53,75	68,62	85,91	17,96	19,12
103	26,88	40,13	53,80	68,93	85,87	18,08	19,17
104	27,53	40,27	54,00	68,88	85,97	18,07	18,91
105	27,43	40,22	53,93	69,04	86,10	17,92	19,08
106	27,16	40,17	54,01	69,32	86,40	17,99	19,10
107	27,10	40,26	54,29	69,52	86,38	17,96	19,19
108	27,88	40,54	54,40	69,43	86,51	18,15	19,09
109	27,36	40,58	54,55	69,54	86,74	18,12	18,91
110	27,60	40,46	54,41	69,74	86,74	17,94	19,15
111	26,57	40,62	54,73	69,80	86,71	18,28	19,25
112	26,76	40,54	54,65	69,88	86,75	18,00	19,31
113	27,60	40,58	54,76	70,06	86,98	18,00	19,14
114	27,13	40,76	54,96	70,00	86,75	18,14	19,22
115	26,54	40,75	55,00	70,11	86,86	18,13	19,22
116	27,46	40,81	54,90	70,28	87,18	17,97	19,26
117	27,45	40,93	55,05	70,36	87,21	18,14	19,30
118	27,20	41,13	55,25	70,24	87,43	18,23	19,24
119	27,19	40,95	55,22	70,50	87,48	18,09	19,33
120	27,11	41,14	55,40	70,59	87,72	18,31	19,27
121	27,12	41,05	55,36	70,82	87,84	18,10	19,36
122	27,50	41,16	55,49	70,92	88,11	18,14	19,37
123	28,46	41,37	55,55	70,99	88,28	18,10	19,27
124	28,45	41,40	55,61	71,09	88,44	18,07	19,23
125	27,47	41,37	55,76	71,17	88,52	18,18	19,27
126	28,37	41,50	55,82	71,20	88,82	18,12	19,30
127	27,92	41,46	55,87	71,32	88,87	18,13	19,34
128	28,42	41,59	55,93	71,42	89,06	18,09	19,28
129	27,20	41,48	56,06	71,59	88,94	18,20	19,24
130	27,50	41,73	56,23	71,65	89,14	18,24	19,37
131	27,95	41,74	56,17	71,57	89,44	18,37	19,19
132	28,37	41,61	56,18	71,71	89,51	18,01	19,24
133	27,09	41,78	56,42	71,99	89,69	18,34	19,53
134	27,78	42,10	56,41	71,88	89,92	18,28	19,24
135	28,08	41,83	56,32	72,07	90,04	18,16	19,27
136	27,39	41,81	56,49	72,28	90,11	18,22	19,43
137	27,81	41,84	56,57	72,43	90,12	18,21	19,37
138	29,05	42,16	56,74	72,41	90,35	18,31	19,40
139	28,45	42,05	56,72	72,53	90,48	18,12	19,31
140	27,08	42,08	56,94	72,72	90,47	18,36	19,39

ANEXO 2.2.- Datos experimentales de temperatura correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo

tiempo (minutos)	termopar1 (°C)	termopar2 (°C)	termopar3 (°C)	termopar4 (°C)	termopar5 (°C)	entrada (°C)	salida (°C)
141	28,56	42,20	56,76	72,77	90,69	18,28	19,27
142	28,28	42,38	56,91	72,78	90,72	18,24	19,23
143	26,83	42,15	57,12	72,94	90,47	18,35	19,41
144	28,61	42,29	57,06	72,90	90,56	18,26	19,34
145	27,55	42,42	57,27	72,93	90,46	18,39	19,40
146	26,73	42,28	57,28	73,09	90,46	18,37	19,48
147	27,54	42,50	57,33	73,05	90,66	18,32	19,26
148	27,05	42,41	57,35	73,12	90,73	18,48	19,44
149	28,18	42,56	57,32	73,29	91,00	18,34	19,35
150	26,80	42,54	57,55	73,29	90,96	18,37	19,50
151	26,83	42,56	57,60	73,38	91,27	18,52	19,45
152	28,24	42,45	57,51	73,45	91,47	18,20	19,53
153	27,91	42,74	57,65	73,48	91,43	18,45	19,32
154	26,96	42,56	57,89	73,66	91,21	18,31	19,47
155	27,33	42,68	57,73	73,82	91,26	18,36	19,57
156	27,08	42,77	57,98	73,82	91,15	18,36	19,54
157	28,50	42,77	57,78	73,89	91,55	18,24	19,48
158	28,79	42,87	57,80	73,90	91,57	18,22	19,38
159	28,79	42,97	58,08	73,97	91,70	18,34	19,43
160	27,34	42,85	58,06	74,06	91,55	18,44	19,53
161	27,94	42,82	57,99	74,21	91,77	18,32	19,60
162	27,68	42,92	58,22	74,24	91,84	18,42	19,60
163	28,40	42,97	58,10	74,28	91,81	18,34	19,58
164	28,15	43,19	58,29	74,22	91,82	18,55	19,54
165	28,46	43,16	58,18	74,24	91,80	18,40	19,44
166	28,60	43,28	58,34	74,28	91,75	18,52	19,44
167	28,61	43,38	58,32	74,24	91,91	18,40	19,51
168	28,90	43,30	58,18	74,33	91,84	18,30	19,54
169	27,98	43,45	58,48	74,15	91,51	18,55	19,56
170	27,54	43,30	58,45	74,13	91,53	18,60	19,61
171	28,67	43,25	58,31	74,37	91,53	18,25	19,61
172	27,58	43,30	58,54	74,39	91,51	18,62	19,66
173	28,84	43,34	58,27	74,35	91,73	18,34	19,55
174	27,71	43,40	58,57	74,28	91,64	18,62	19,63
175	28,77	43,39	58,40	74,42	91,77	18,42	19,63
176	28,96	43,39	58,47	74,48	91,81	18,39	19,65
177	29,37	43,50	58,54	74,45	91,85	18,51	19,62
178	28,76	43,48	58,51	74,34	91,91	18,56	19,59
179	27,33	43,29	58,65	74,49	91,63	18,48	19,72

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

BRONCE + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	26,66	8614,05	376,0	996,1	4178,0	3571099,08
	5400	29,43	8614,05	376,0	995,2	4177,0	3569387,136
	7200	29,55	8614,05	376,0	995,2	4177,0	3569387,136
	9000	29,59	8614,05	376,0	995,2	4177,0	3569387,136
	10800	30,5	8614,05	376,0	994,9	4176,0	3568577,856
	14340	30,72	8614,05	376,0	994,8	4176,0	3568427,52
53,58	3600	36,14	8614,05	376,0	993,2	4174,0	3565307,04
	5400	39,76	8614,05	376,0	991,8	4174,0	3563203,344
	7200	41,42	8614,05	376,0	991,2	4174,0	3562301,76
	9000	42,64	8614,05	376,0	990,7	4174,0	3561550,44
	10800	43,17	8614,05	376,0	990,5	4174,0	3561249,912
	14340	43,84	8614,05	376,0	990,2	4174,0	3560799,12
35,38	3600	45,09	8614,05	376,0	989,7	4174,0	3560047,8
	5400	49,85	8614,05	376,0	987,8	4175,0	3557548,392
	7200	52,11	8614,05	376,0	986,9	4176,0	3556550,976
	9000	53,79	8614,05	376,0	986,2	4177,0	3555853,656
	10800	54,45	8614,05	376,0	986,0	4177,0	3555552,912
	14340	55,24	8614,05	376,0	986,6	4176,0	3556099,968
13,98	3600	55,58	8614,05	376,0	985,5	4177,0	3554801,052
	5400	60,98	8614,05	376,0	982,9	4180,5	3552129,834
	7200	64,09	8614,05	376,0	981,4	4182,0	3550402,32
	9000	65,94	8614,05	376,0	980,4	4183,0	3549249,744
	10800	66,5	8614,05	376,0	980,0	4184,0	3549000,192
	14340	67,55	8614,05	376,0	979,5	4184,0	3548247,072

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

BRONCE + SOLUCION ACUOSA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	26,29	8614,05	376,0	996,1	4178,0	3571099,08
	5400	27,81	8614,05	376,0	995,7	4177,6	3570354,067
	7200	28,96	8614,05	376,0	995,4	4177,2	3569759,549
	9000	31,12	8614,05	376,0	994,7	4176,3	3568384,612
	10800	31,94	8614,05	376,0	994,5	4176,0	3567976,512
	14340	32,63	8614,05	376,0	994,3	4175,7	3567568,456
53,58	3600	36,96	8614,05	376,0	993	4174,0	3565006,512
	5400	40,99	8614,05	376,0	991,3	4174,0	3562452,024
	7200	43,25	8614,05	376,0	990,4	4174,0	3561099,648
	9000	44,78	8614,05	376,0	989,8	4174,0	3560198,064
	10800	45,94	8614,05	376,0	989,4	4174,0	3559597,008
	14340	47,22	8614,05	376,0	988,9	4174,0	3558845,688
35,38	3600	46,66	8614,05	376,0	989,1	4174,0	3559146,216
	5400	52,1	8614,05	376,0	986,9	4176,0	3556550,976
	7200	55,17	8614,05	376,0	986,6	4176,0	3556099,968
	9000	57,16	8614,05	376,0	984,8	4178,0	3554102,976
	10800	58,6	8614,05	376,0	984,1	4179,0	3553404,396
	14340	59,99	8614,05	376,0	983,4	4180,0	3552705,312
13,98	3600	58,04	8614,05	376,0	984,4	4179,0	3553855,728
	5400	64,61	8614,05	376,0	981,1	4183,0	3550303,86
	7200	68,2	8614,05	376,0	979,1	4185,0	3547997,052
	9000	70,62	8614,05	376,0	977,4	4186,0	3545787,696
	10800	72,43	8614,05	376,0	976,1	4187,0	3544180,044
	14340	73,83	8614,05	376,0	975,1	4188,0	3543023,76

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

ACERO + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	24,43	7660,77	502,01	996,8	4177	4033314,915
	5400	27,39	7660,77	502,01	995	4177	4028878,941
	7200	28,21	7660,77	502,01	994,9	4177	4028632,498
	9000	28,69	7660,77	502,01	994,5	4177	4027646,726
	10740	30,96	7660,77	502,01	994,2	4177	4026907,397
53,58	3600	33,99	7660,77	502,01	993,3	4174	4022931,269
	5400	39,61	7660,77	502,01	991,3	4177	4019760,55
	7200	42,97	7660,77	502,01	989,7	4178	4016401,385
	9000	44,82	7660,77	502,01	988,7	4179	4014519,698
	10740	45,97	7660,77	502,01	988,3	4179	4013533,454
35,38	3600	44,4	7660,77	502,01	989	4178,8	4015142,679
	5400	52,24	7660,77	502,01	985,4	4181	4007545,957
	7200	56,89	7660,77	502,01	983,2	4182,4	4002931,142
	9000	59,5	7660,77	502,01	982	4183,1	4000375,569
	10740	60,76	7660,77	502,01	981,3	4183,5	3998879,535
13,98	3600	57,57	7660,77	502,01	983,3	4185	4004686,286
	5400	66,87	7660,77	502,01	979	4185	3994068,941
	7200	72,08	7660,77	502,01	975,2	4185	3984686,171
	9000	74,86	7660,77	502,01	973,4	4185	3980241,701
	10740	76,42	7660,77	502,01	972,4	4185	3977772,551

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

ACERO + SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	25,39	7660,77	502,01	996,99	4178,8760	4034886,665
	5400	26,41	7660,77	502,01	996,73	4178,2640	4033885,73
	7200	28,48	7660,77	502,01	996,11	4177,3480	4031818,98
	9000	27,77	7660,77	502,01	996,34	4177,6320	4032552,79
	10800	28,51	7660,77	502,01	996,1	4177,3360	4031787,28
	14340	29,69	7660,77	502,01	995,73	4176,8640	4030598,08
53,58	3600	35,77	7660,77	502,01	993,8	4174,4320	4024415,90
	5400	40,17	7660,77	502,01	992,05	4174,0000	4019852,94
	7200	42,57	7660,77	502,01	991,02	4174,0000	4017316,40
	9000	44	7660,77	502,01	990,41	4174,0000	4015814,18
	10800	45	7660,77	502,01	989,98	4174,0000	4014755,24
	14340	46,12	7660,77	502,01	989,5	4174,0000	4013573,16
35,38	3600	47,45	7660,77	502,01	988,9	4174,2400	4012235,59
	5400	53,6	7660,77	502,01	985,91	4176,7000	4006302,77
	7200	57,14	7660,77	502,01	984,18	4178,1740	4002895,51
	9000	59,34	7660,77	502,01	983,12	4179,4940	4001048,13
	10800	60,7	7660,77	502,01	982,47	4180,3100	3999918,30
	14340	62,59	7660,77	502,01	981,56	4181,4440	3998330,61
13,98	3600	61,84	7660,77	502,01	981,92	4180,9940	3998958,05
	5400	68,59	7660,77	502,01	978,52	4185,0440	3992909,15
	7200	72,96	7660,77	502,01	976,02	4187,6660	3988246,09
	9000	75,22	7660,77	502,01	974,73	4189,0220	3985838,68
	10800	76,79	7660,77	502,01	973,83	4189,9640	3984155,55
	14340	79,01	7660,77	502,01	972,39	4192,1600	3981855,62

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

ARENA + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	26,64	2613,95	538,71	995,0	4177,0	2452383,523
	5400	28,85	2613,95	542,31	994,7	4175,0	2456985,709
	7200	29,5	2613,95	543,46	994,5	4174,0	2458154,246
	9000	30,72	2613,95	545,43	994,2	4174,0	2460871,088
	10740	31,94	2613,95	547,56	994,0	4173,0	2463628,126
53,58	3600	36,11	2613,95	554,11	992,8	4175,0	2473095,017
	5400	41,63	2613,95	563,28	992,0	4177,5	2487629,569
	7200	44,36	2613,95	567,87	990,0	4178,0	2492081,548
	9000	45,92	2613,95	570,49	989,0	4178,5	2494927,918
	10740	46,51	2613,95	571,31	988,0	4178,7	2494744,108
35,38	3600	47,72	2613,95	573,27	987,5	4179,0	2497239,202
	5400	55,37	2613,95	585,88	983,9	4182,0	2513080,36
	7200	59,19	2613,95	592,11	982,2	4183,0	2520848,667
	9000	61,26	2613,95	595,55	981,2	4183,6	2525057,874
	10740	62,06	2613,95	596,86	980,8	4183,9	2526656,828
13,98	3600	61,69	2613,95	596,2	981,0	4184,0	2525942,454
	5400	70,76	2613,95	611,11	976,0	4185,0	2542527,61
	7200	75,02	2613,95	617,99	973,0	4185,0	2548906,776
	9000	77,13	2613,95	621,42	972,0	4185,0	2552875,302
	10740	78,02	2613,95	622,9	971,4	4185,0	2554319,682

ANEXO 2.3.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios granulares)

ARENA + SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (ºC)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	23,99	2613,95	534,44	997,34	4179,72	2450195,65
	5400	26,11	2613,95	537,91	996,81	4178,44	2454499,47
	7200	27,11	2613,95	539,55	996,55	4177,90	2456537,69
	9000	26,8	2613,95	539,04	996,63	4178,03	2455900,36
	10740	27,33	2613,95	539,91	996,48	4177,81	2456977,52
53,58	3600	34,3	2613,95	551,32	994,27	4175,02	2470914,42
	5400	38,84	2613,95	558,76	992,62	4174,00	2479969,15
	7200	41,14	2613,95	562,53	991,63	4174,00	2484509,18
	9000	42,54	2613,95	564,82	991,03	4174,00	2487272,67
	10740	43,29	2613,95	566,05	990,71	4174,00	2488753,12
35,38	3600	45,67	2613,95	569,95	989,69	4174,00	2493451,06
	5400	52,13	2613,95	580,53	986,62	4176,11	2506522,76
	7200	55,4	2613,95	585,88	985,03	4177,42	2513165,15
	9000	57,55	2613,95	589,40	983,98	4178,42	2517588,32
	10740	58,65	2613,95	591,21	983,45	4179,08	2519912,98
13,98	3600	58,99	2613,95	591,76	983,29	4179,28	2520631,46
	5400	66,68	2613,95	604,36	979,58	4183,90	2536874,94
	7200	70,59	2613,95	610,76	977,38	4186,24	2544615,01
	9000	73,29	2613,95	615,18	975,83	4187,86	2549925,88
	10740	74,49	2613,95	617,15	975,15	4188,58	2552285,65

ANEXO 2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

ALGODON 0,92 + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	21,75	1176,25	1329,98	998,1	4181	3964362,73
	5400	23,04	1176,25	1329,98	997,52	4180,3	3961489,346
	7200	22,79	1176,25	1329,98	997,62	4180,4	3961965,714
	9000	23,56	1176,25	1329,98	997,32	4180	3960444,91
	10740	23,35	1176,25	1329,98	997,4	4180,1	3960844,319
	12300	24,84	1176,25	1329,98	996,8	4179,2	3957711,553
	14340	25,08	1176,25	1329,98	996,7	4179,1	3957235,37
53,58	3600	22,34	1176,25	1329,98	997,8	4180,7	3962933,381
	5400	24,66	1176,25	1329,98	996,9	4179,3	3958187,754
	7200	26,58	1176,25	1329,98	996,1	4178,2	3954103,736
	9000	28,14	1176,25	1329,98	995,6	4177,5	3951540,598
	10740	29,17	1176,25	1329,98	995,3	4177,1	3950021,338
	12300	29,99	1176,25	1329,98	995,1	4176,7	3948886,554
	14340	30,83	1176,25	1329,98	994,8	4176,4	3947459,22
35,38	3600	24,64	1176,25	1329,98	996,9	4179,3	3958187,754
	5400	28,67	1176,25	1329,98	995,5	4177,3	3950973,096
	7200	31,66	1176,25	1329,98	994,6	4176,1	3946416,253
	9000	33,95	1176,25	1329,98	993,9	4175,2	3942903,896
	10740	35,54	1176,25	1329,98	993,4	4174,5	3940343,554
	12300	36,57	1176,25	1329,98	993,1	4174,1	3938825,931
	14340	37,45	1176,25	1329,98	992,8	4174	3937582,542
13,98	3600	31,48	1176,25	1329,98	994,6	4176,1	3946416,253
	5400	36,27	1176,25	1329,98	993,2	4174,2	3939301,323
	7200	39,81	1176,25	1329,98	991,8	4174	3933742,462
	9000	42,33	1176,25	1329,98	990,8	4174	3929902,382
	10740	43,83	1176,25	1329,98	990,2	4174	3927598,334
	12300	44,74	1176,25	1329,98	989,8	4174	3926062,302
	14340	45,54	1176,25	1329,98	989,5	4174	3924910,278

ANEXO 2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

ALGODON 0,92 + SOLUCION ACUOSA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (ºC)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	20,42	1176,25	1329,98	998,2	4182	3965665,726
	5400	21,23	1176,25	1329,98	998,0	4182	3964896,238
	7200	22,18	1176,25	1329,98	997,8	4181	3963208,774
	9000	22,65	1176,25	1329,98	997,7	4180	3961906,238
	10740	23,32	1176,25	1329,98	996,2	4180	3956137,838
53,58	3600	22,12	1176,25	1329,98	997,8	4181	3963208,774
	5400	24,78	1176,25	1329,98	997,1	4179	3958681,546
	7200	27,25	1176,25	1329,98	996,5	4178	3955457,958
	9000	29,15	1176,25	1329,98	994,6	4177	3947239,782
	10740	30,03	1176,25	1329,98	994,4	4177	3946471,214
35,38	3600	25,3	1176,25	1329,98	997,0	4179	3958297,078
	5400	29,86	1176,25	1329,98	995,7	4177	3951466,906
	7200	33,5	1176,25	1329,98	994,5	4175	3945025,618
	9000	36,19	1176,25	1329,98	993,7	4174	3941038,614
	10740	37,87	1176,25	1329,98	993,0	4174	3938350,558
13,98	3600	33,21	1176,25	1329,98	994,6	4175	3945409,718
	5400	38,92	1176,25	1329,98	992,6	4174	3936814,526
	7200	42,88	1176,25	1329,98	990,9	4174	3930286,39
	9000	45,52	1176,25	1329,98	989,8	4174	3926062,302
	10740	47,72	1176,25	1329,98	988,8	4174	3922222,222

ANEXO 2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

ALGODON 0,88 + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (ºC)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	21,91	1176,25	1329,98	998,0	4181,0	3859648,117
	5400	21,57	1176,25	1329,98	998,1	4181,0	3860016,045
	7200	22,17	1176,25	1329,98	997,9	4180,8	3859104,559
	9000	22,82	1176,25	1329,98	997,6	4180,4	3857649,672
	10740	22,87	1176,25	1329,98	997,6	4180,4	3857649,672
53,58	3600	22,47	1176,25	1329,98	997,8	4180,6	3858561,035
	5400	24,41	1176,25	1329,98	997,0	4179,5	3854652,797
	7200	25,79	1176,25	1329,98	996,4	4178,6	3851656,872
	9000	27,41	1176,25	1329,98	995,8	4177,8	3848749,528
	10740	28,3	1176,25	1329,98	995,6	4177,4	3847663,784
35,38	3600	25,04	1176,25	1329,98	996,7	4179,1	3853198,571
	5400	28,47	1176,25	1329,98	995,5	4177,4	3847296,173
	7200	30,98	1176,25	1329,98	994,8	4176,3	3843759,928
	9000	33,01	1176,25	1329,98	994,2	4175,5	3840854,925
	10740	34,4	1176,25	1329,98	993,7	4175,0	3838580,477
13,98	3600	31,73	1176,25	1329,98	994,5	4176,0	3842394,837
	5400	35,96	1176,25	1329,98	993,3	4174,4	3836586,415
	7200	39,09	1176,25	1329,98	992,1	4174,0	3831829,029
	9000	41,03	1176,25	1329,98	991,3	4174,0	3828890,533
	10740	42,28	1176,25	1329,98	990,8	4174,0	3827053,973

ANEXO 2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

ALGODON 0,83 + AGUA DESTILADA

Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	20,43	1176,25	1329,98	998,3	4182,4	3731436,759
	5400	21,5	1176,25	1329,98	998,1	4181,4	3729914,058
	7200	22,37	1176,25	1329,98	997,8	4180,7	3728293,168
	9000	22,62	1176,25	1329,98	997,7	4180,5	3727780,551
	10740	24,45	1176,25	1329,98	997,0	4179,4	3724441,42
53,58	3600	22,36	1176,25	1329,98	997,8	4180,7	3728293,168
	5400	24,71	1176,25	1329,98	996,9	4179,3	3724011,787
	7200	26,59	1176,25	1329,98	996,1	4178,2	3720327,292
	9000	28,15	1176,25	1329,98	995,6	4177,5	3718014,896
	10740	29,34	1176,25	1329,98	995,3	4177,0	3716561,649
35,38	3600	25,2	1176,25	1329,98	996,7	4179,0	3723069,845
	5400	29,14	1176,25	1329,98	995,3	4177,1	3716644,259
	7200	32,33	1176,25	1329,98	994,4	4175,8	3712451,007
	9000	34,3	1176,25	1329,98	993,8	4175,0	3709711,576
	10740	36,09	1176,25	1329,98	993,2	4174,3	3707055,377
13,98	3600	32,58	1176,25	1329,98	994,3	4175,7	3712021,889
	5400	37,47	1176,25	1329,98	992,8	4174,0	3705422,302
	7200	40,97	1176,25	1329,98	991,4	4174,0	3700572,114
	9000	43,28	1176,25	1329,98	990,4	4174,0	3697107,694
	10740	44,93	1176,25	1329,98	989,8	4174,0	3695029,042

ANEXO 2.4.- Tablas de cálculo de capacidad calorífica (medios fibrosos)

ALGODON 0,83 + SOLUCION ACUOSA

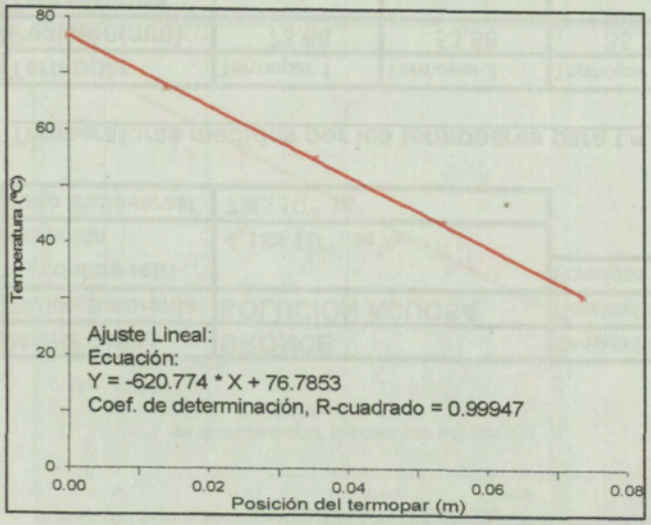
Termopar (mm)	Tiempo (s)	Temperatura (ºC)	Densidad (s) (kg/m^3)	Calor esp. (s) (J/kg.K)	Densidad (f) (kg/m^3)	Calor esp. (f) (J/kg.K)	Capac.Calorif. ($J/m^3.K$)
73,68	3600	20,26	1176,25	1329,98	998,3	4182,6	3731602,477
	5400	21,36	1176,25	1329,98	998,1	4181,5	3729996,9
	7200	22,61	1176,25	1329,98	997,7	4180,5	3727780,551
	9000	23,72	1176,25	1329,98	997,3	4179,9	3725895,97
	10800	24,83	1176,25	1329,98	996,8	4179,2	3723582,171
	14340	25,88	1176,25	1329,98	996,4	4178,6	3721698,469
53,58	3600	22,34	1176,25	1329,98	997,8	4180,7	3728293,168
	5400	25,69	1176,25	1329,98	996,5	4178,7	3722128,002
	7200	28,85	1176,25	1329,98	995,4	4177,2	3717073,576
	9000	31,33	1176,25	1329,98	994,7	4176,2	3713821,022
	10800	33,21	1176,25	1329,98	994,1	4175,5	3711163,702
	14340	35,34	1176,25	1329,98	993,5	4174,6	3708342,159
35,38	3600	26,45	1176,25	1329,98	996,2	4178,2	3720674,083
	5400	31,82	1176,25	1329,98	994,5	4176	3712962,686
	7200	36,38	1176,25	1329,98	993,1	4174,2	3706626,482
	9000	39,86	1176,25	1329,98	991,8	4174	3701957,882
	10800	42,52	1176,25	1329,98	990,7	4174	3698147,02
	14340	45,62	1176,25	1329,98	989,5	4174	3693989,716
13,98	3600	35,61	1176,25	1329,98	993,4	4174,5	3707913,215
	5400	42,36	1176,25	1329,98	990,8	4174	3698493,462
	7200	47,46	1176,25	1329,98	988,8	4174,2	3691728,763
	9000	51,14	1176,25	1329,98	987,3	4175,7	3687761,072
	10800	53,98	1176,25	1329,98	986,1	4176,9	3684584,23
	14340	57,2	1176,25	1329,98	984,8	4178,2	3681139,955

ANEXO 2.5.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Permanente)

Matriz Sólida	BRONCE	Densidad: 8614,05 kg/m^3	Calor específico: 376 J/kgK	
Fluido Saturante	AGUA DESTILADA	Densidad: 985,315 kg/m^3	Calor específ.: 4177,186 J/kgK	Temperatura media: 54,81 ºC
Caudal de refrigeración	$4,116.10^{-6}$ m^3/s	Porosidad: 0,36		
Área transversal	$7,85.10^{-3}$ m^2			

Temperaturas medidas por los termopares para t = 239 minutos:

Termopar	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5	Entrada	Salida	Δ T (salida-entrada)	Temperatura media (sal. - ent.)
Posición(mm)	73,68	53,58	35,38	13,98	0				
Temperatura (ºC)	30,72	43,84	55,24	67,55	76,94	20,35	22,46	2,11	21,4



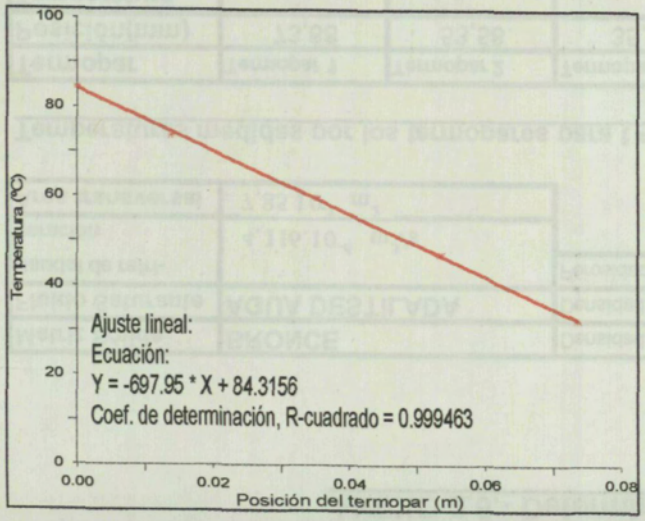
Potencia real suministrada (J/s)	Flujo de calor ($J/s.m^2$)	Gradiente de Temperatura (ºC/m)	Conductividad térmica efectiva (J/s.m.ºC)	Capacidad calorífica $\langle \rho.c_p \rangle$ ($J/m^3.ºC$) 10^6	Difusividad térmica efectiva (m^2/s).10^{-6}
36,24	**4616,617**	**-620,774**	**7,437**	**3,555**	**2,1**

ANEXO 2.5.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Permanente)

Matriz Sólida	BRONCE	Densidad: 8614,05 kg/m^3	Calor específico: 376 J/kgK	
Fluido Saturante	SOLUCION ACUOSA	Densidad: 983,005 kg/m^3	Calor específ.: 4179,64 J/kgK	Temperatura media: 59,58 °C
Caudal de refrigeración	$4,188.10^{-6}$ m^3/s	Porosidad: 0,36		
Área transversal	$7,85.10^{-3}$ m^2			

Temperaturas medidas por los termopares para t = 239 minutos:

Termopar	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5	Entrada	Salida	Δ T (salida-entrada)	Temperatura media (sal. - ent.)
Posición(mm)	73,68	53,58	35,38	13,98	0				
Temperatura (°C)	32,63	47,22	59,99	73,83	84,63	20,81	22,99	2,18	21,9



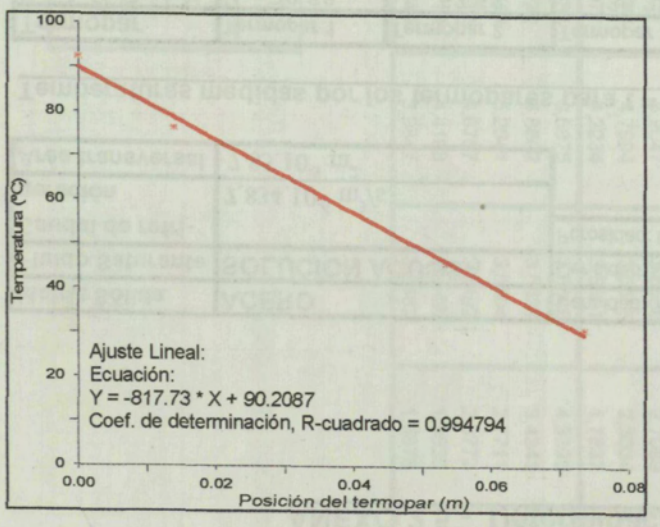
Potencia real suministrada (J/s)	Flujo de calor ($J/s.m^2$)	Gradiente de Temperatura (°C/m)	Conductividad térmica efectiva (J/s.m.°C)	Capacidad calorífica $\langle \rho.c_p \rangle$ ($J/m^3.°C$) 10^6	Difusividad térmica efectiva (m^2/s).10^{-6}
38,09	**4852,229**	**-697,95**	**6,952**	**3,552**	**1,957**

ANEXO 2.5.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Permanente)

Matriz Sólida	ACERO	Densidad: 7660,77 kg/m^3	Calor específico: 502,01 J/kg.K	
Fluido Saturante	AGUA DESTILADA	Densidad: 982,36 kg/m^3	Calor específico: 4180,442 J/kg.K	Temperatura media: 60,92 °C
Caudal de refrigeración	$5{,}592.10^{-6}$ m^3/s	Porosidad: 0,59		
Área transversal	$7{,}85.10^{-3}$ m^2			

Temperaturas medidas por los termopares para t = 179 minutos:

Termopar	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5	Entrada	Salida	Δ T (salida-entrada)	Temperatura media (sal. - ent.)
Posición(mm)	73,68	53,58	35,38	13,98	0				
Temperatura (°C)	30,96	45,97	60,76	76,42	92,50	20,07	21,13	1,06	20,6



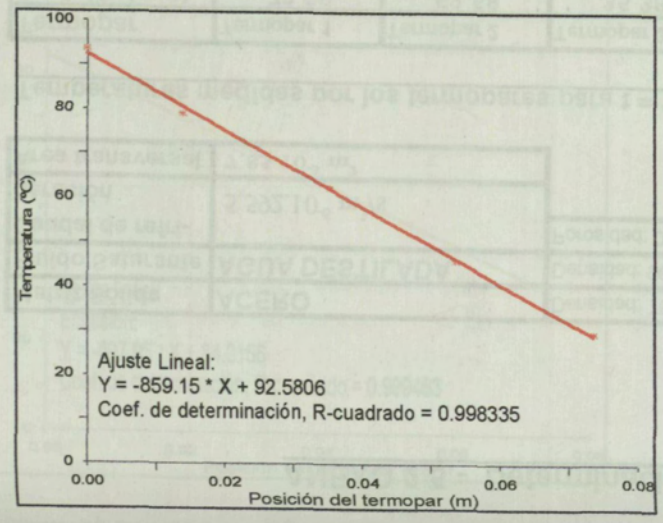
Potencia real suministrada (J/s)	Flujo de calor ($J/s.m^2$)	Gradiente de Temperatura (°C/m)	Conductividad térmica efectiva (J/s.m.°C)	Capacidad calorífica $\langle \rho.c_p \rangle$ ($J/m^3.°C$) 10^6	Difusividad térmica efectiva (m^2/s).10^{-6}
24,75	**3152,866**	**-817,73**	**3,856**	**4,0043**	**0,964**

ANEXO 2.5.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Permanente)

Matriz Sólida	ACERO	Densidad: 7660,77 kg/m^3	Calor específico: 502,01 J/kg.K	
Fluido Saturante	SOLUCION ACUOSA	Densidad: 981,82 kg/m^3	Calor específico: 4181,114 J/kg.K	Temperatura media: 62,04 °C
Caudal de refrigeración	$7{,}834.10^{-6}$ m^3/s	Porosidad: 0,59		
Área transversal	$7{,}85.10^{-3}$ m^2			

Temperaturas medidas por los termopares para t = 239 minutos:

Termopar	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5	Entrada	Salida	ΔT (salida-entrada)	Temperatura media (sal. - ent.)
Posición(mm)	73,68	53,58	35,38	13,98	0				
Temperatura (°C)	29,69	46,12	62,59	79,01	93,75	19,75	20,54	0,79	20,1



Potencia real suministrada (J/s)	Flujo de calor ($J/s.m^2$)	Gradiente de Temperatura (°C/m)	Conductividad térmica efectiva (J/s.m.°C)	Capacidad calorífica $\langle \rho.c_p \rangle$ ($J/m^3.°C$) 10^6	Difusividad térmica efectiva (m^2/s).10^{-6}
25,84	**3291,720**	**-859,15**	**3,831**	**3,999**	**0,958**

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: BRONCE + AGUA DESTILADA

Temperatura inicial: 19,72 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	26,66	36,14	45,09	55,58	64,4
5400	29,43	39,76	49,85	60,98	70,13
7200	29,55	41,42	52,11	64,09	73,51
9000	29,59	42,64	53,79	65,94	75,35
10800	30,5	43,17	54,45	66,5	76,11
14340	30,72	43,84	55,24	67,55	76,94

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-4}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha}$, 10^{-4}	$<\rho . c_p>$ 10^6 (J/m3.°C)	α, 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	6,14	0,1554	1,00457	6,1121	3,5711	3,7357	1,334
	5400	5,0133	0,1926	0,92133	5,4414	3,5694	2,9609	1,057
	7200	4,3416	0,1828	0,94195	4,6092	3,5694	2,1244	0,758
	9000	3,8833	0,1775	0,95373	4,0717	3,5694	1,6579	0,592
	10800	3,5449	0,1912	0,92423	3,8355	3,5686	1,4711	0,525
	14340	3,0764	0,1923	0,92187	3,3371	3,5684	1,1136	0,397
53,58	3600	4,465	0,3674	0,63734	7,0057	3,5653	4,908	1,750
	5400	3,6456	0,3975	0,59834	6,0929	3,5632	3,7123	1,323
	7200	3,1572	0,4034	0,59088	5,3432	3,5623	2,855	1,017
	9000	2,8239	0,4119	0,5802	4,8671	3,5616	2,3689	0,844
	10800	2,5779	0,4159	0,57529	4,481	3,5612	2,008	0,715
	14340	2,2372	0,4215	0,56844	3,9357	3,5608	1,549	0,552
35,38	3600	2,9483	0,5679	0,40389	7,2998	3,56	5,3286	1,897
	5400	2,4073	0,5976	0,37316	6,4511	3,5575	4,1617	1,481
	7200	2,0848	0,6022	0,36866	5,6551	3,5565	3,198	1,137
	9000	1,8647	0,6124	0,35827	5,2047	3,5558	2,7089	0,963
	10800	1,7022	0,616	0,35467	4,7994	3,5555	2,3034	0,819
	14340	1,4772	0,6209	0,34977	4,2234	3,5561	1,7837	0,634
13,98	3600	1,165	0,8025	0,17685	6,5875	3,5548	4,3395	1,543
	5400	0,9512	0,8185	0,16232	5,8602	3,5521	3,4341	1,220
	7200	0,8238	0,8249	0,15649	5,2641	3,5504	2,7711	0,984
	9000	0,7368	0,8308	0,15112	4,8757	3,5492	2,3772	0,844
	10800	0,6726	0,8296	0,15218	4,4198	3,549	1,9535	0,693
	14340	0,5837	0,8359	0,14649	3,9847	3,5482	1,5878	0,563

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$<\alpha,>$ (m2/s)10^{-7}
3600	4,578
5400	3,567
7200	2,737
9000	2,278
10800	1,934
14340	1,509

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: BRONCE + SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

Temperatura inicial: 19,78 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	26,29	36,96	46,66	58,04	67,87
5400	27,81	40,99	52,1	64,61	74,78
7200	28,96	43,25	55,17	68,2	78,67
9000	31,12	44,78	57,16	70,62	81,21
10800	31,94	45,94	58,6	72,43	83,14
14340	32,63	47,22	59,99	73,83	84,63

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-4}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha}$, 10^{-4}	$< \rho . c_p >$ 10^{6}	α , (m2/s) 10^{-7}	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	6,14	0,1354	1,056	5,8146	3,571	3,3809	1,207
	5400	5,013	0,146	1,0281	4,876	3,57	2,3776	0,849
	7200	4,342	0,1559	1,0035	4,3269	3,57	1,8722	0,668
	9000	3,883	0,1846	0,9382	4,1389	3,568	1,7131	0,611
	10800	3,545	0,1919	0,9228	3,8417	3,568	1,4759	0,527
	14340	3,076	0,1982	0,91	3,3801	3,568	1,1425	0,408
53,58	3600	4,465	0,3573	0,651	6,8584	3,565	4,7037	1,677
	5400	3,646	0,3856	0,6135	5,9429	3,562	3,5319	1,258
	7200	3,157	0,3985	0,597	5,2882	3,561	2,7965	0,996
	9000	2,824	0,407	0,5864	4,8157	3,56	2,3191	0,826
	10800	2,578	0,4129	0,579	4,4524	3,56	1,9823	0,706
	14340	2,237	0,4231	0,5664	3,9492	3,559	1,5596	0,555
35,38	3600	2,948	0,5589	0,4133	7,1335	3,559	5,0887	1,811
	5400	2,407	0,5876	0,3835	6,2771	3,557	3,9401	1,401
	7200	2,085	0,601	0,3699	5,636	3,556	3,1775	1,130
	9000	1,865	0,609	0,3622	5,1489	3,554	2,6512	0,942
	10800	1,702	0,6127	0,358	4,7545	3,553	2,2605	0,803
	14340	1,477	0,6201	0,3506	4,2127	3,553	1,7747	0,631
13,98	3600	1,165	0,7956	0,1832	6,3595	3,554	4,0444	1,437
	5400	0,951	0,8151	0,1654	5,7516	3,55	3,3081	1,174
	7200	0,824	0,8222	0,1589	5,1847	3,548	2,6881	0,954
	9000	0,737	0,8276	0,154	4,7845	3,546	2,2891	0,812
	10800	0,673	0,831	0,151	4,4558	3,544	1,9854	0,704
	14340	0,584	0,8335	0,1487	3,9256	3,543	1,5411	0,546

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$< \alpha >$ (m2/s) 10^{-7}
3600	4,304
5400	3,289
7200	2,634
9000	2,243
10800	1,926
14340	1,505

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ACERO + AGUA DESTILADA

Temperatura inicial: 19,8 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	24,43	33,99	44,4	57,57	73,51
5400	27,39	39,61	52,24	66,87	82,18
7200	28,21	42,97	56,89	72,08	87,75
9000	28,69	44,82	59,5	74,86	90,61
10740	30,96	45,97	60,76	76,42	92,5

DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-4}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{a_e}$ 10^{-3}	$< \rho . c_p >$ 10^6 (J/m3.°C)	a_e 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	6,14	0,0862	1,2134	0,506	4,033	2,5607	1,033
	5400	5,013	0,1217	1,0945	0,458	4,029	2,0979	0,845
	7200	4,342	0,1238	1,0884	0,399	4,029	1,5916	0,641
	9000	3,883	0,1255	1,0834	0,3584	4,028	1,2845	0,517
	10740	3,555	0,1535	1,0093	0,3522	4,027	1,2405	0,500
53,58	3600	4,465	0,2642	0,7896	0,5655	4,023	3,1978	1,286
	5400	3,646	0,3176	0,7068	0,5159	4,0198	2,6613	1,070
	7200	3,157	0,3410	0,6744	0,4682	4,0164	2,1916	0,880
	9000	2,824	0,3533	0,6564	0,4302	4,0145	1,8511	0,743
	10740	2,585	0,3600	0,6473	0,3993	4,0135	1,5947	0,640
35,38	3600	2,948	0,4580	0,5248	0,5617	4,0151	3,1554	1,267
	5400	2,407	0,5200	0,455	0,5291	4,0075	2,7991	1,122
	7200	2,085	0,5458	0,4272	0,4881	4,0029	2,3824	0,954
	9000	1,865	0,5607	0,4114	0,4533	4,0004	2,0548	0,822
	10740	1,707	0,5634	0,4086	0,4178	3,9989	1,7453	0,698
13,98	3600	1,165	0,7032	0,2694	0,4324	4,0047	1,8695	0,749
	5400	0,951	0,7546	0,221	0,4303	3,9941	1,8512	0,739
	7200	0,824	0,7694	0,2073	0,3975	3,9847	1,5798	0,630
	9000	0,737	0,7776	0,1997	0,369	3,9802	1,3618	0,542
	10740	0,674	0,7788	0,1986	0,3393	3,9778	1,1515	0,458

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$< a_e >$ .10-/(m2/s)
3600	2,6959
5400	2,3524
7200	1,9364
9000	1,638
10740	1,433

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ACERO+ SOLUCIÓN ACUOSA DE TENSIOACTIVO

Temperatura inicial: 19,93 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	25,39	35,77	47,45	61,84	77,45
5400	26,41	40,17	53,6	68,59	82,82
7200	28,48	42,57	57,14	72,96	87,82
9000	27,77	44	59,34	75,22	89,81
10800	28,51	45	60,7	76,79	91,38
14340	29,69	46,12	62,59	79,01	93,75

DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{a}$ 10^{-3}	$<\rho . c_p>$ 10^{6} (J/m3.°C)	a 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	0,614	0,0949	1,18095	0,5199	4,035	2,7032	1,091
	5400	0,5013	0,1030	1,15302	0,4348	4,034	1,8903	0,763
	7200	0,4342	0,1259	1,08224	0,4012	4,032	1,6097	0,649
	9000	0,3883	0,1122	1,13141	0,3432	4,033	1,1779	0,475
	10800	0,3545	0,1201	1,09913	0,3225	4,032	1,0402	0,419
	14340	0,3076	0,1322	1,06462	0,2889	4,031	0,8348	0,337
53,58	3600	0,4465	0,2754	0,77132	0,5789	4,024	3,3510	1,348
	5400	0,3646	0,3218	0,70059	0,5204	4,02	2,7084	1,089
	7200	0,3157	0,3335	0,68495	0,4609	4,017	2,1244	0,853
	9000	0,2824	0,3444	0,66928	0,4219	4,016	1,7804	0,715
	10800	0,2578	0,3509	0,65962	0,3908	4,015	1,5275	0,613
	14340	0,2237	0,3548	0,65435	0,3419	4,014	1,1687	0,469
35,38	3600	0,2948	0,4784	0,50126	0,5881	4,012	3,4588	1,388
	5400	0,2407	0,5354	0,43827	0,5492	4,006	3,0163	1,208
	7200	0,2085	0,5481	0,42471	0,4909	4,003	2,4101	0,965
	9000	0,1865	0,5640	0,40797	0,4571	4,001	2,0898	0,836
	10800	0,1702	0,5706	0,40106	0,4244	3,999	1,8009	0,720
	14340	0,1477	0,5779	0,39351	0,3753	3,999	1,4088	0,563
13,98	3600	0,1165	0,7286	0,24538	0,4748	3,999	2,2541	0,901
	5400	0,0951	0,7737	0,20333	0,4677	3,993	2,1876	0,873
	7200	0,0824	0,7811	0,19651	0,4193	3,988	1,7583	0,701
	9000	0,0737	0,7912	0,18722	0,3937	3,986	1,5496	0,618
	10800	0,0673	0,7958	0,183	0,3678	3,984	1,3525	0,539
	14340	0,0584	0,8003	0,17887	0,3265	3,982	1,0660	0,424

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$\overline{<a>}$ 10^{-7} (m2/s)
3600	2,942
5400	2,451
7200	1,976
9000	1,649
10800	1,430
14340	1,120

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ARENA + AGUA DESTILADA

Temperatura inicial: 20,5 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	26,64	36,11	47,72	61,69	78,26
5400	28,85	41,63	55,37	70,76	87,78
7200	29,5	44,36	59,19	75,02	91,97
9000	30,72	45,92	61,26	77,13	93,26
10740	31,94	46,51	62,06	78,02	94,41

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{a_t}$ 10^{-3}	$<\rho.c_p>$ 10^{6} (J/m3.°C)	a_t 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	0,614	0,1063	1,142	0,5376	2,4524	2,89	0,709
	5400	0,5013	0,1241	1,0875	0,461	2,457	2,125	0,522
	7200	0,4342	0,1259	1,0822	0,4012	2,4582	1,61	0,396
	9000	0,3883	0,1406	1,042	0,3726	2,4609	1,388	0,342
	10740	0,3555	0,1548	1,0061	0,3533	2,4636	1,248	0,307
53,58	3600	0,4465	0,2703	0,7795	0,5728	2,4731	3,281	0,811
	5400	0,3646	0,314	0,712	0,5121	2,4876	2,622	0,652
	7200	0,3157	0,3339	0,6844	0,4613	2,4921	2,128	0,530
	9000	0,2824	0,3498	0,6612	0,4271	2,4949	1,824	0,455
	10740	0,2585	0,3519	0,6583	0,3927	2,4955	1,542	0,385
35,38	3600	0,2948	0,4713	0,5094	0,5787	2,4972	3,349	0,836
	5400	0,2407	0,5183	0,4568	0,5269	2,5131	2,776	0,698
	7200	0,2085	0,5413	0,432	0,4826	2,5209	2,329	0,587
	9000	0,1865	0,5609	0,4112	0,4536	2,5251	2,058	0,520
	10740	0,1707	0,5623	0,4097	0,4166	2,5267	1,736	0,439
13,98	3600	0,1165	0,7131	0,26	0,4481	2,5259	2,008	0,507
	5400	0,0951	0,7471	0,228	0,4171	2,5425	1,74	0,442
	7200	0,0824	0,7629	0,2133	0,3863	2,5489	1,492	0,380
	9000	0,0737	0,7783	0,1991	0,3702	2,5529	1,37	0,350
	10740	0,0674	0,7782	0,1992	0,3384	2,5543	1,145	0,292

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$<a_t>$ 10^{-7} (m2/s)
3600	2,882
5400	2,316
7200	1,89
9000	1,66
10740	1,418

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ARENA+ SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO

Temperatura inicial: 18,41 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	23,99	34,3	45,67	58,99	75,3
5400	26,11	38,84	52,13	66,68	82,9
7200	27,11	41,14	55,4	70,59	87,72
9000	26,8	42,54	57,55	73,29	90,96
10740	27,33	43,29	58,65	74,49	91,63

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha}$ 10^{-3}	$<\rho \cdot c_p>$ 10^{6} (J/m3.°C)	α 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	0,614	0,0981	1,16983	0,5249	2,450	2,7548	0,675
	5400	0,5013	0,1194	1,11363	0,4501	2,454	2,0263	0,497
	7200	0,4342	0,1255	1,08335	0,4008	2,456	1,6064	0,395
	9000	0,3883	0,1156	1,1258	0,3449	2,456	1,1896	0,292
	10740	0,3555	0,1218	1,0941	0,3249	2,457	1,0558	0,259
53,58	3600	0,4465	0,2793	0,76505	0,5836	2,471	3,4061	0,842
	5400	0,3646	0,3168	0,70793	0,5150	2,480	2,6525	0,658
	7200	0,3157	0,3279	0,69234	0,4560	2,485	2,0793	0,517
	9000	0,2824	0,3326	0,68615	0,4116	2,487	1,6939	0,421
	10740	0,2585	0,3398	0,67615	0,3823	2,489	1,4616	0,364
35,38	3600	0,2948	0,4792	0,50038	0,5892	2,493	3,4710	0,865
	5400	0,2407	0,5229	0,45183	0,5327	2,507	2,8379	0,711
	7200	0,2085	0,5337	0,4401	0,4738	2,513	2,2444	0,564
	9000	0,1865	0,5395	0,4339	0,4298	2,518	1,8475	0,465
	10740	0,1707	0,5496	0,42313	0,4034	2,520	1,6275	0,410
13,98	3600	0,1165	0,7133	0,25981	0,4484	2,521	2,0107	0,507
	5400	0,0951	0,7485	0,22674	0,4194	2,537	1,7592	0,446
	7200	0,0824	0,7528	0,22266	0,3701	2,545	1,3695	0,349
	9000	0,0737	0,7564	0,21932	0,3360	2,550	1,1292	0,288
	10740	0,0674	0,7659	0,21055	0,3201	2,552	1,0247	0,262

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$<\alpha>$ 10^{-7} (m2/s)
3600	2,9107
5400	2,3190
7200	1,8249
9000	1,4651
10740	1,2924

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ALGODON + AGUA DESTILADA (POROSIDAD: 0,92)

Temperatura inicial: 20 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	21,75	22,34	24,64	31,48	44,74
5400	23,04	24,66	28,67	36,27	49,16
7200	22,79	26,58	31,66	39,81	51,77
9000	23,56	28,14	33,95	42,33	53,7
10740	23,35	29,17	35,54	43,83	54,24
12300	24,84	29,99	36,57	44,74	55,49

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-4}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha_e}$ 10^{-4}	$< \rho . c_p >$ 10^6 (J/m3.°C)	α_e 10^{-7} (m^2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	6,14	0,0707	1,27791	4,8047	3,96436273	2,3085	0,915
	5400	5,0133	0,1042	1,14887	4,3634	3,96148935	1,9039	0,754
	7200	4,3416	0,0878	1,20716	3,5969	3,96196571	1,2937	0,513
	9000	3,8833	0,1056	1,14425	3,3935	3,96044491	1,1516	0,456
	10740	3,555	0,0978	1,17066	3,0367	3,96084400	0,9222	0,365
	12300	3,322	0,1364	1,05327	3,154	3,95771155	0,9948	0,394
	14340	3,076	0,1413	1,04013	2,9573	3,95723537	0,8746	0,346
53,58	3600	4,465	0,0946	1,18212	3,7771	3,96293338	1,4267	0,565
	5400	3,6456	0,1598	0,99407	3,6677	3,95818775	1,3452	0,532
	7200	3,1572	0,2071	0,89213	3,5387	3,95410374	1,2523	0,495
	9000	2,8239	0,2415	0,82821	3,4098	3,95154060	1,1627	0,459
	10740	2,585	0,2678	0,78361	3,2989	3,95002134	1,0882	0,430
	12300	2,4156	0,2815	0,76156	3,1719	3,94888655	1,0061	0,397
	14340	2,2372	0,3013	0,73097	3,0606	3,94745922	0,9367	0,370
35,38	3600	2,9483	0,1876	0,93196	3,1632	3,95818775	1,0006	0,396
	5400	2,4073	0,2973	0,73697	3,2661	3,9509731	1,0667	0,421
	7200	2,0848	0,367	0,63789	3,2686	3,94641625	1,0684	0,422
	9000	1,8647	0,4139	0,57771	3,2283	3,9429039	1,0422	0,411
	10740	1,707	0,4539	0,52967	3,2228	3,94034355	1,0386	0,409
	12300	1,595	0,4669	0,51449	3,1002	3,93882593	0,9611	0,379
	14340	1,4772	0,4854	0,49335	2,9942	3,93758254	0,8965	0,353
13,98	3600	1,165	0,464	0,51778	2,25	3,94641625	0,5062	0,200
	5400	0,9512	0,558	0,41429	2,2955	3,93930132	0,5269	0,208
	7200	0,8238	0,6235	0,34711	2,3739	3,93374246	0,5635	0,222
	9000	0,7368	0,6626	0,30855	2,3886	3,92990238	0,5705	0,224
	10740	0,674	0,696	0,27633	2,4391	3,92759833	0,5949	0,234
	12300	0,63	0,6971	0,27525	2,2888	3,9260623	0,5239	0,206
	14340	0,584	0,7104	0,26257	2,2242	3,92491028	0,4947	0,194

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$< \alpha_e >$ 10^{-7}
3600	1,311
5400	1,211
7200	1,045
9000	0,982
10740	0,911
12300	0,872
14340	0,801

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ALGODON + SOLUCION ACUOSA (POROSIDAD: 0,92)

Temperatura inicial: 20 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	20,42	22,12	25,3	33,21	48,35
5400	21,23	24,78	29,86	38,92	53,42
7200	22,18	27,25	33,5	42,88	56,54
9000	22,65	29,15	36,19	45,52	58,81
10740	23,32	30,03	37,87	47,72	59,74

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha_e}$ 10^{-3}	$< \rho . c_p >$ 10^6 J/m3.°C)	α_e 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/s.m.°C)
73,68	3600	0,614	0,0148	1,72354	0,3562	3,96566573	1,2691	0,5033
	5400	0,5013	0,0368	1,47654	0,3395	3,96489624	1,1527	0,4570
	7200	0,4342	0,0597	1,33164	0,3261	3,96320877	1,0632	0,4214
	9000	0,3883	0,0683	1,28921	0,3012	3,96190624	0,9072	0,3594
	10740	0,3555	0,0835	1,22390	0,2905	3,95613784	0,8437	0,3338
53,58	3600	0,4465	0,0748	1,26	0,3544	3,96320877	1,2557	0,4977
	5400	0,3646	0,1430	1,03577	0,3520	3,95868155	1,2391	0,4905
	7200	0,3157	0,1984	0,90951	0,3471	3,95545796	1,2049	0,4766
	9000	0,2824	0,2358	0,83834	0,3369	3,94723978	1,1347	0,4479
	10740	0,2585	0,2524	0,80939	0,3194	3,94647121	1,0200	0,4025
35,38	3600	0,2948	0,1869	0,93333	0,3159	3,95829708	0,9977	0,3949
	5400	0,2407	0,2950	0,7405	0,3251	3,95146691	1,0566	0,4175
	7200	0,2085	0,3695	0,63461	0,3285	3,94502562	1,0794	0,4258
	9000	0,1865	0,4172	0,57372	0,3251	3,94103861	1,0567	0,4165
	10740	0,1707	0,4497	0,53455	0,3193	3,93835056	1,0197	0,4016
13,98	3600	0,1165	0,4660	0,51552	0,2260	3,94540972	0,5107	0,2015
	5400	0,0951	0,5661	0,40577	0,2344	3,93681453	0,5493	0,2162
	7200	0,0824	0,6262	0,34445	0,2392	3,93028639	0,5723	0,2249
	9000	0,0737	0,6576	0,31343	0,2351	3,9260623	0,5529	0,2171
	10740	0,0674	0,6975	0,27487	0,2452	3,92222222	0,6013	0,2358

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$< \alpha_e >$ 10^{-7} (m2/s)
3600	1,008
5400	0,999
7200	0,980
9000	0,913
10740	0,871

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ALGODON + AGUA DESTILADA (POROSIDAD: 0,88)

Temperatura inicial: 20,86 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	21,91	22,47	25,04	31,73	44,42
5400	21,57	24,41	28,47	35,96	48,18
7200	22,17	25,79	30,98	39,09	50,55
9000	22,82	27,41	33,01	41,03	52,16
10740	22,87	28,30	34,40	42,28	52,86

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha_e}$ 10^{-3}	$<\rho . c_p>$ 10^6 (J/m3.°C)	α_e 10^{-7} (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	0,614	0,0446	1,42034	0,4323	3,85964812	1,8688	0,7213
	5400	0,5013	0,0260	1,57438	0,3184	3,86001605	1,0139	0,3914
	7200	0,4342	0,0441	1,42340	0,3050	3,85910456	0,9305	0,3591
	9000	0,3883	0,0626	1,31664	0,2949	3,85764967	0,8698	0,3355
	10740	0,3555	0,0628	1,31570	0,2702	3,85764967	0,7301	0,2816
53,58	3600	0,4465	0,0683	1,28902	0,3464	3,85856104	1,1998	0,4630
	5400	0,3646	0,1299	1,07090	0,3405	3,8546528	1,1591	0,4468
	7200	0,3157	0,1660	0,97936	0,3224	3,85165687	1,0391	0,4002
	9000	0,2824	0,2093	0,88791	0,3181	3,84874953	1,0116	0,3893
	10740	0,2585	0,2325	0,84431	0,3062	3,84766378	0,9374	0,3607
35,38	3600	0,2948	0,1774	0,95379	0,3091	3,85319857	0,9553	0,3681
	5400	0,2407	0,2786	0,76627	0,3141	3,84729617	0,9867	0,3796
	7200	0,2085	0,3409	0,67457	0,3091	3,84375993	0,9553	0,3672
	9000	0,1865	0,3882	0,61024	0,3056	3,84085493	0,9340	0,3587
	10740	0,1707	0,4231	0,56645	0,3014	3,83858048	0,9081	0,3486
13,98	3600	0,1165	0,4614	0,52085	0,2237	3,84239484	0,5003	0,1922
	5400	0,0951	0,5527	0,41979	0,2265	3,83658641	0,5132	0,1969
	7200	0,0824	0,6140	0,35665	0,2310	3,83182903	0,5338	0,2045
	9000	0,0737	0,6444	0,32639	0,2258	3,82889053	0,5099	0,1952
	10740	0,0674	0,6694	0,30194	0,2232	3,82705397	0,4983	0,1907

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$<\alpha_e>$ 10^{-7} (m2/s)
3600	1,131
5400	0,918
7200	0,865
9000	0,831
10740	0,768

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ALGODON + AGUA DESTILADA (POROSIDAD: 0,83)

Temperatura inicial: 20,41 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar / Posición(mm) / Tiempo (s)	Termopar 1 73,68	Termopar 2 53,58	Termopar 3 35,38	Termopar 4 13,98	Termopar 5 0
3600	20,87	22,36	25,20	32,58	46,89
5400	22,05	24,71	29,14	37,47	51,75
7200	22,37	26,59	32,33	40,97	53,68
9000	22,62	28,15	34,30	43,28	56,25
10740	23,90	29,34	36,09	44,93	57,24

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-4}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha_e}$ 10^{-3}	$< \rho . c_p >$ 10^{6} (J/m3.°C)	10^{-7} α_e (m2/s)	λ_e (J/m.s.°C)
73,68	3600	0,614	0,0174	1,68169	0,3651	3,733143676	1,3330	0,4976
	5400	0,5013	0,0523	1,37237	0,3653	3,72991406	1,3343	0,4977
	7200	0,4342	0,0589	1,33579	0,3251	3,72829317	1,0566	0,3939
	9000	0,3883	0,0617	1,32125	0,2939	3,72778055	0,8637	0,3220
	10740	0,3555	0,0948	1,18132	0,3009	3,72444142	0,9056	0,3373
53,58	3600	0,4465	0,0736	1,26517	0,3529	3,72829317	1,2455	0,4644
	5400	0,3646	0,1372	1,05108	0,3469	3,72401179	1,2033	0,4481
	7200	0,3157	0,1858	0,93564	0,3374	3,72032729	1,1385	0,4236
	9000	0,2824	0,2160	0,87492	0,3228	3,7180149	1,0418	0,3874
	10740	0,2585	0,2425	0,82651	0,3128	3,71656165	0,9782	0,3636
35,38	3600	0,2948	0,1809	0,94619	0,3116	3,72306984	0,9707	0,3614
	5400	0,2407	0,2786	0,76619	0,3142	3,71664426	0,9869	0,3668
	7200	0,2085	0,3583	0,64961	0,3210	3,71245101	1,0302	0,3824
	9000	0,1865	0,3876	0,61098	0,3052	3,70971158	0,9318	0,3457
	10740	0,1707	0,4257	0,56329	0,3030	3,70705538	0,9183	0,3404
13,98	3600	0,1165	0,4596	0,52293	0,2228	3,71202189	0,4963	0,1842
	5400	0,0951	0,5444	0,42866	0,2219	3,7054223	0,4922	0,1824
	7200	0,0824	0,6180	0,35266	0,2337	3,70057211	0,5459	0,2020
	9000	0,0737	0,6381	0,33262	0,2216	3,69710769	0,4910	0,1815
	10740	0,0674	0,6658	0,30543	0,2207	3,69502904	0,4870	0,1799

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$< \alpha_e >$ 10^{-7} (m2/s)
3600	1,011
5400	1,004
7200	0,943
9000	0,832
10740	0,822

ANEXO 2.6.- Determinación de la difusividad térmica efectiva (Régimen Transitorio)

EXPERIENCIA: ALGODON + SOLUCION ACUOSA DE TENSIOACTIVO (POROSIDAD: 0,83)

Temperatura inicial: 19,20 °C

DATOS EXPERIMENTALES:

Termopar	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Termopar 4	Termopar 5
Posición(mm)	73,68	53,58	35,38	13,98	0
Tiempo (s)					
3600	20,26	22,34	26,45	35,61	52,99
5400	21,36	25,69	31,82	42,36	58,71
7200	22,61	28,85	36,38	47,46	62,60
9000	23,72	31,33	39,86	51,14	65,66
10800	24,83	33,21	42,52	53,98	67,92
14340	25,88	35,34	45,62	57,20	70,23

DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA:

Posición (Z) (m) 10^{-3}	Tiempo (s)	$Z/2\sqrt{t}$ 10^{-3}	<T>-To/T5-To (θ)	$Erf^{-1}(1-\theta)$	$\sqrt{\alpha_e}$ 10^{-3}	$\langle \rho . c_p \rangle$ 10^6 (J/m3.°C)	10^{-7} α_e (m2/s)	λ_e (J/m.s.-C)
73,68	3600	0,614	0,0314	1,52174	0,4035	3,73160248	1,6280	0,608
	5400	0,5013	0,0547	1,35858	0,3690	3,7299969	1,3615	0,508
	7200	0,4342	0,0786	1,24380	0,3491	3,72778055	1,2186	0,454
	9000	0,3883	0,0973	1,17254	0,3312	3,72589597	1,0967	0,409
	10800	0,3545	0,1156	1,12587	0,3149	3,72358217	0,9914	0,369
	14340	0,3076	0,1309	1,06823	0,2880	3,72169847	0,8292	0,309
53,58	3600	0,4465	0,0929	1,18826	0,3758	3,72829317	1,4120	0,526
	5400	0,3646	0,1643	0,98347	0,3707	3,722128	1,3744	0,512
	7200	0,3157	0,2224	0,86283	0,3659	3,71707358	1,3387	0,498
	9000	0,2824	0,2611	0,79471	0,3553	3,71382102	1,2627	0,469
	10800	0,2578	0,2876	0,75201	0,3428	3,7111637	1,1752	0,436
	14340	0,2237	0,3163	0,70866	0,3157	3,70834216	0,9965	0,370
35,38	3600	0,2948	0,2146	0,87756	0,3359	3,72067408	1,1285	0,420
	5400	0,2407	0,3194	0,70411	0,3418	3,71296269	1,1686	0,434
	7200	0,2085	0,3959	0,60031	0,3473	3,70662648	1,2063	0,447
	9000	0,1865	0,4447	0,54043	0,3451	3,70195788	1,1909	0,441
	10800	0,1702	0,4787	0,50092	0,3398	3,69814702	1,1545	0,427
	14340	0,1477	0,5177	0,45744	0,3229	3,69398972	1,0425	0,385
13,98	3600	0,1165	0,4856	0,49313	0,2362	3,70791321	0,5581	0,207
	5400	0,0951	0,5862	0,38494	0,2471	3,69849346	0,6103	0,226
	7200	0,0824	0,6512	0,31968	0,2578	3,69172876	0,6644	0,245
	9000	0,0737	0,6875	0,28445	0,2591	3,68776107	0,6713	0,248
	10800	0,0673	0,7139	0,25925	0,2596	3,68458423	0,6739	0,248
	14340	0,0584	0,7447	0,23028	0,2536	3,68113995	0,6432	0,237

DIFUSIVIDAD PROMEDIADA:

Tiempo (s)	$\langle \alpha_e \rangle$ 10^{-7} (m2/s)
3600	1,182
5400	1,129
7200	1,107
9000	1,055
10800	0,999
14340	0,878