·1400312551 T 99/24



Biblioteca Rector Gabriel Ferraté UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNY



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

ALGODÓN + AGUA DESTILADA (POROSIDAD: 0,88)

La difusividad térmica efectiva promediada espacialmente (ver apartado 2.6 del Anexo 2) fue determinada para los tiempos de 3600 s, 5400 s, 7200 s, 9000 s y 10740 s, y se muestra en la figura 3.52.

Realizados diversos ajustes de los datos experimentales, una expresión de tipo potencial (Fig. 3.52) fue la que dio un mejor coeficiente de determinación siendo éste de 0,9578 y la expresión la siguiente:



 $< \alpha_e > =$ 1,64818.10⁻⁶. t^(-0,33068)

Figura 3.52.- Ajuste de la variación temporal de la difusividad térmica promediada para el medio constituido por algodón de porosidad 0,88 saturado con agua destilada.

ALGODÓN + AGUA DESTILADA (POROSIDAD: 0,83)

La difusividad térmica efectiva promediada espacialmente (ver apartado 2.6 del Anexo 2) fue determinada para los tiempos de 3600 s, 5400 s, 7200 s, 9000 s y 10740 s, y su representación de muestra en la figura 3.53 junto con el ajuste polinómico realizado.

1.6E-7 1.2E-7 Difusividad térmica promediada (m2/s) Ajuste Polinómico 8.0E-8 Grado = 3 Coeficiente de Determinación (R-cuadrado) Grado 0: 0 0.913123 Grado 1: Grado 2: 0.921011 4.0E-8 -Grado 3: 0.990751 Coeficientes del Polinomio Grado 0: 4.34957E-008 Grado 1: 3.08045E-011 Grado 2: -4.92691E-015 Grado 3: 2.22775E-019 0.0E+0 0 4000 8000 12000 Tiempo (s)

Figura 3.53.- Ajuste polinómico de la variación temporal de la difusividad térmica efectiva promediada espacialmente.

ALGODÓN + SOLUCIÓN ACUOSA (POROSIDAD: 0,83)

La variación temporal de la difusividad térmica efectiva correspondiente a la posición fija del termopar 1, se muestra en la figura 3.54. La difusividad térmica efectiva promediada espacialmente (ver apartado 2.6 del Anexo 2) fue determinada para los tiempos de 3600 s, 5400 s, 7200 s, 9000 s, 10800 s y 14340. Su representación de muestra en la figura 3.55, junto con el ajuste polinómico realizado.



Figura 3.54.- Variación temporal de la difusividad térmica efectiva en la posición del termopar 1.



Figura 3.55.- Variación temporal de la difusividad térmica efectiva para el medio poroso constituido por algodón con una porosidad de 0,83 y solución acuosa de tensioactivo como fluido saturante. La figura 3.56 muestra la diferente variación temporal de la difusividad térmica efectiva promediada para el medio constituido por algodón y saturado con agua destilada o bien con solución acuosa de tensioactivo.



Figura 3.56.- Comparación de la diferente variación temporal de la difusividad térmica efectiva promediada espacialmente mostrada por el medio poroso constituido por algodón con una porosidad de 0,83 y saturado con agua destilada o bien solución acuosa de tensioactivo.



Figura 3.57.- Variación temporal de temperatura de los diferentes termopares para el medio constituido por algodón de porosidad 0,83 saturado por agua destilada o bien solución de tensioactivo.

* CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICAS EFECTIVAS POR EL MÉTODO DE NOZAD ET AL.

Los valores de difusividad térmica efectiva correspondientes a los medios de arena y algodón fueron determinados mediante la aplicación del método de I. Nozad y colab., pues como ya se comentó anteriormente, en dichas experiencias no fue alcanzado el régimen conductivo permanente.

Considerando los valores de difusividad térmica efectiva promediada espacialmente para un mismo tiempo (t = 10740 s), los valores de difusividad térmica efectiva de dichos medios son mostrados en la tabla 3.3.

MATRIZ SÓLIDA	З	FLUIDO	DIFUSIVIDAD TÉRMICA	
			$ EFEC IIVA < \alpha_e > (m/s) $	$EFECTIVA < \Lambda_e > (J/S.M.^{\circ}C)$
ARENA	0,38	Agua destilada	1,418.107	0,357
		Solución acuosa	1,292.10-7	0.330
ALGODÓN	0,92	Agua destilada	0,911.10-7	0,359
		Solución acuosa	0,8712.10	0,344
ALGODÓN	0,88	Agua destilada	- 0,7685.10	0,295
ALGÓDÓN	0,83	Agua destilada	0,8223.10	0,305
		Solución acuosa	0.998.10-7	0,369

Tabla 3.3.- Valores de difusividad y conductividad térmicas efectivas de los medios porosos constituidos por arena y algodón, obtenidos por aplicación del método de Nozad et al.

- 163

3.3.5.3.- CONTRASTACIÓN CON MODELOS TEÓRICOS.

A fin de simular los valores de conductividad y difusividad térmica efectivas calculados a partir de las magnitudes físicas "ad hoc" que caracterizan el medio poroso y sus constituyentes, se comparan dichos valores con los que resultan de la aplicación de los diversos modelos teóricos propuestos hasta la fecha con tal propósito.

Muchos son los modelos propuestos para la conductividad térmica efectiva, algunos de ellos puramente empíricos. Otros, teóricos, tratan de tener en cuenta en su análisis la estructura real del medio poroso, partiendo siempre de un sistema geométrico más o menos simple con el que pretenden simular la estructura real del medio. En cualquier caso, la modelización precisa de las componentes de λ_e de un medio poroso específico es un artificio matemático que, aunque frecuentemente útil, es incapaz de describir la complejidad real del problema físico. Resulta, pues, evidente que las técnicas de medida para la determinación de la conductividad térmica efectiva de muestras porosas son imprescindibles.

SUMARIO DE CORRELACIONES

Aparte los modelos teóricos presentados en el apartado 2 del presente Capítulo, se presentan, a continuación, algunos de los modelos teóricos, empíricos y semiempíricos más utilizados.

- Modelos estadísticos para estructuras periódicas:

Se tratan de modelos que aplican la formulación variacional a la determinación de la conductividad térmica efectiva para materiales multifase isótropos y macroscópicamente uniformes. Esta formulación proporciona los valores absolutos máximo y mínimo de la conductividad térmica efectiva.

Los parámetros de análisis utilizados son ε , λ_s y λ_f , por lo que λ_e parece ser independiente de la estructura al permanecer la ε constante. Este hecho hace que las predicciones realizadas a partir de estas correlaciones, no se ajusten bien a los datos experimentales.

a) Hashin y Shtrikman (1962):

a.1.- Límite superior: $\lambda_s / \lambda_f \ge 1$

$$\frac{\lambda_{e}}{\lambda_{f}} = \frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}} \left\{ 1 + \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}})}{(1 - \varepsilon) + \frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}}(2 + \varepsilon)} \right\}$$
[1]

resultando la misma relación que el límite superior de Maxwell.

a.2.- Límite inferior: $\lambda_s / \lambda_f \ge 1$

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left\{ 1 + \frac{3.(1-\varepsilon).(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1)}{3 + \varepsilon.(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1)} \right\}$$

[2]

resultando la misma expresión que el límite inferior de Maxwell.

b) Miller (1969):

El modelo propuesto por Miller (1969), a diferencia de los anteriores, combina la formulación variacional con la estadística estructural, tratando de tener en cuenta la estructura del medio mediante un parámetro G referido a la forma de la celda unidad.

Condiciones:

 $\lambda_s/\lambda_t \ge 1$, celda unidad simétrica.

1/9 ≤ G ≤ 1/3

G = 1/9 para forma esférica de la celda.

G = 1/3 para forma plana de la celda.

_ 165

Según estas condiciones define dos valores límites de la conductividad térmica efectiva:

b.1.- Límite superior:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left\{ 1 + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1\right) \right\} \cdot F_u(\varepsilon, \frac{\lambda_s}{\lambda_f})$$
[3]

b.2.- Límite inferior:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \left\{ \frac{\lambda_s}{\lambda_f} - (1 - \varepsilon) \cdot (\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1) - \frac{\frac{4}{3} \cdot (\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1)^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon}{1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + 3 \cdot (1 - 2 \cdot \varepsilon) \cdot (\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1) \cdot G} \right\}^{-1}$$
[4]

donde $F_u(\varepsilon, \lambda_s / \lambda_t)$ es:

$$F_{u}(\varepsilon,\frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}}) = 1 - \frac{(1-\varepsilon).(\frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}}-1)^{2}.\varepsilon}{3\left\{1 + (1-\varepsilon).(\frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}}-1)\right\}.\left\{1 + ((1-\varepsilon)+3.(2.\varepsilon-1).G).(\frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f}}-1)\right\}}$$
[5]

- Modelos empíricos:

Para empaquetamientos de partículas esféricas y para el rango completo de valores de λ_s/λ_f (mayor y menor que la unidad), algunas de las correlaciones empíricas dadas son:

a) <u>Kunii y Smith (1960)</u>: Para $0,259 \le \varepsilon \le 0,476$:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \varepsilon + \frac{1 - \varepsilon}{(\phi + \frac{2}{3}\frac{\lambda_f}{\lambda_e})}$$

[6]

siendo:
$$\phi = \phi_2 + \frac{(\varepsilon - 0,259).(\phi_1 - \phi_2)}{0,217}$$

 $\phi_1 = \phi_1(\frac{\lambda_s}{\lambda_f})$
 $\phi_2 = \phi_2(\frac{\lambda_s}{\lambda_f})$

 ϕ_1 y ϕ_2 son funciones empíricas monótonamente decrecientes de λ_s/λ_t . ϕ_1 corresponde a un empaquetamiento cúbico de esferas uniformes (ε = 0,476) y ϕ_2 corresponde a un empaquetamiento tetahédrico de esferas uniformes (ε = 0,259). Para porosidades intermedias los autores calculan ϕ por interpolación lineal entre ϕ_1 y ϕ_2 . Para porosidades inferiores a 0,259 recomiendan considerar ϕ igual a ϕ_2 y para porosidades superiores a 0,476, $\phi = \phi_1$.

b) Krupiczka (1967):

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f}\right)^{+0.280 - 0.757 \cdot \log \varepsilon - 0.057 \cdot \log\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f}\right)}$$
[7]

c) Bauer y Schlünder (1970):

$$\frac{\lambda_{e}}{\lambda_{f}} = 1 - (1 - \varepsilon)^{\frac{1}{2}} + \frac{2 \cdot (1 - \varepsilon)^{\frac{1}{2}}}{1 - (\frac{\lambda_{f}}{\lambda_{s}}) \cdot B} \cdot \left\{ \frac{(1 - \frac{\lambda_{f}}{\lambda_{s}}) \cdot B}{(1 - (\frac{\lambda_{f}}{\lambda_{s}}) \cdot B)^{2}} \cdot \ln(\frac{\lambda_{s}}{\lambda_{f} \cdot B}) - \frac{B + 1}{2} - \frac{B - 1}{1 - (\frac{\lambda_{f}}{\lambda_{s}}) \cdot B} \right\}$$
[8]

donde $B = C. \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{\frac{10}{9}}$ C = 1,25 (esferas)

. 167

d) <u>Schulz (1983)</u>: Modelo válido para $\lambda_s > \lambda_f$:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left(\frac{1 - (\frac{\lambda_e}{\lambda_f}) \cdot r_k}{\varepsilon \cdot (1 - r_k)}\right)^3$$
siendo:
$$r_k = \frac{\lambda_f}{\lambda_k}$$
[9]

- Modelo semiempírico de Hadley (1986), promediado en peso del límite superior de Maxwell:

Hadley (1986) propone un modelo de conductividad en un medio bifásico granular que combina la fórmula de "Maxwell superior" con una expresión obtenida a partir de la introducción de una función ajustable f_o (ε) en una expresión promediada en peso. La expresión de la conductividad térmica efectiva es:

$$\frac{\lambda_{\epsilon}}{\lambda_{f}} = (1 - \alpha) \cdot \frac{\varepsilon \cdot f_{o} + \chi(1 - \varepsilon \cdot f_{o})}{1 - \varepsilon(1 - f_{o}) + \chi \cdot \varepsilon \cdot (1 - f_{o})} + \alpha \cdot \frac{2 \cdot \chi^{2}(1 - \varepsilon) + (1 + 2 \cdot \varepsilon) \cdot \chi}{(2 + \varepsilon) \cdot \chi + 1 - \varepsilon}$$
[10]

donde $\chi = \lambda_s / \lambda_t$, $\alpha = \alpha$ (ϵ) es un parámetro que traduce el efecto del "grado de consolidación", y $f_o = 0.8 + 0.1$. ϵ

Ambas funciones, α y f_o , son halladas a partir de valores experimentales.

Algunos valores de α son:

$\log \alpha = -4,898.\varepsilon;$	0 < ε < 0,0827
$\log \alpha = -0,405 - 3,154.(\epsilon - 0,0827);$	0,0827 < ε < 0,298
log α = - 1,084 - 6,778.(ε - 0,298) ;	0,298 < ε < 0,580

Si se compara la correlación de los modelos empíricos dados anteriormente y el modelo semiempírico de Hadley con resultados experimentales (figura 3.58, extraída de Kaviany (1991)) se observa que para valores moderados de λ_{s}/λ_{f} los cuatro modelos predicen con buena precisión el valor de la conductividad térmica efectiva. Sin embargo, para valores elevados de λ_{s}/λ_{f} sólo la correlación de Hadley la predice correctamente.



Figura 3.58.- Comparación de diversas correlaciones para la conductividad térmica efectiva con resultados experimentales de diversas fuentes (extraída de Kaviany (1991)).

- Modelo para medio fibroso de Bauer (1993):

$$\left(\frac{\lambda_e - \lambda_f}{\lambda_s - \lambda_f}\right) x \left\{\frac{\lambda_e + \left[\left(1 - \sin^2\theta\right) / \left(1 + \sin^2\theta\right)\right] \lambda_f}{\lambda_{s_s} + \left[\left(1 - \sin^2\theta\right) / \left(1 + \sin^2\theta\right)\right] \lambda_f}\right\}^{-\left(\sin^2\theta / \left(1 + \sin^2\theta\right)\right)} = 1 - \varepsilon$$
[11]

donde θ es el ángulo entre el flujo de calor y la orientación de las fibras. Así sin² θ refleja la orientación media de las fibras respecto al flujo de calor macroscópico. Ya que la orientación exacta de las fibras es a menudo desconocida o difícil de determinar, el valor de sin² θ puede servir como un parámetro de ajuste a los datos experimentales. Si las fibras están orientadas aleatoriamente se puede considerar que sin² θ = 2/3.

. 169

Contrastación de los modelos teóricos con los resultados experimentales

De los modelos teóricos mencionados en el apartado anterior, los modelos aplicados para la determinación de la conductividad térmica efectiva de los medios porosos granulares estudiados, han sido:

- Modelo de Maxwell.
- Modelo de Miller.
- Modelos de Krupiczka, de Bauer & Schünder, de Schulz.
- Modelo de Hadley.

Siendo estos los modelos que mejor se adaptan a las características físicas de los modelos porosos granulares considerados. No obstante, la mayoría de modelos están definidos para el caso de partículas esféricas por lo que presentan una mejor adaptación al medio poroso constituido por las partículas de bronce.

La tabla 3.4 presenta los valores de conductividad térmica efectiva obtenidos por aplicación de los diferentes modelos a los medios porosos granulares.

MODELOS	BRONCE (W/m.K)	ACERO (W/m.K)	ARENA (W/m.K)
L.INFERIOR MAXWELL	4,342	2,315	(*)
L.SUPERIOR MAXWELL	38,874	5,294	(*)
L.INFERIOR MILLER G=1/9 (celda esférica)	6,862	2,118	(*)
L.SUPERIOR MILLER G=1/9 (celda esférica)	35,939	4,315	(*)
SCHULZ	9,152	2,242	(*)
KRUPICZKA	6,867	2,125	0,416
BAUER & SCHLÜNDER	6,933	3,897	0,422
HADLEY	7,864	2,741(**)	0,435
Experimental	7,437	3,856	0,357

Tabla 3.4.- Valores teóricos de conductividad térmica efectiva correspondientes a los medios porosos granulares. (*) modelos no aplicables por no cumplir el medio poroso constituido por arena la condición λ_s ($\lambda_f \ge 1$. (**) la porosidad superior considerada para la aplicación del modelo de Hadley es de 0,58, el acero sobrepasa esta porosidad aunque es muy próxima: 0,59.

La tabla 3.5. muestra los valores de difusividades térmicas efectivas correspondientes a los datos de conductividad térmica efectiva anteriores. Estos valores han sido calculados considerando capacidades caloríficas efectivas promediadas temporalmente de los diferentes medios porosos obtenidas a partir de los datos del Anexo 2 (apartado 2.3).

MODELOS	BRONCE <ρ.c _p >: 3,564.10 ⁶ J/m ³ .K	ACERO <ρ.c _p >: 4,005.10 ⁶ J/m ³ .K	ARENA <ρ.c _p >: 2,503.10 ⁸ J/m ³ .K
	α _e (1175)	α_{e} (III /S)	
L.INFERIOR MAXWELL	1,218.10 ⁻⁶	5,779.10 ⁻⁷	(*)
L.SUPERIOR MAXWELL	1,091.10 ⁻⁵	1,322.10 ⁻⁶	(*)
LINFERIOR MILLER	1,926.10 ⁻⁶	5,289.10 ⁻⁷	(*)
G=1/9 (celda esférica)			
L.SUPERIOR MILLER	1,008.10 ⁻⁵	1,077.10 ⁻⁶	(*)
G=1/9 (celda esférica)			
SCHULZ	2,568.10 ⁻⁶	5,598.10-1	(*)
KRUPICZKA	1,865.10 ⁻⁶	5,306.10	1,661.10"
BAUER & SCHLÜNDER	1,763.10 ⁻⁶	9,729.10	1,684.10 ⁻⁷
HADLEY	1,518.10 ⁻⁶	6,842.10 ⁻⁷	1,739.10 ⁻⁷
Experimental	2,092.10 ⁻⁶	9,64.10	1,418.10 ⁻⁷

- Tabla 3.5.- Valores teóricos de difusividad térmica efectiva correspondientes a los medios porosos granulares. (*) modelos no aplicables por no cumplir el medio poroso constituido por arena la condición: $\lambda_s / \lambda_f \ge 1$.
- <u>Bronce</u>.- Los valores de conductividad térmica efectiva obtenidos en régimen permanente son totalmente coherentes con los modelos teóricos de Bauer y Schlunder, Krupiczka, Hadley, etc.
- <u>Acero</u>.- Los valores de conductividad térmica efectiva obtenidos en régimen permanente también son coherentes con los valores dados por los modelos teóricos. El modelo que mejor se adaptaría en este caso sería el de Bauer & Schlüender.
- <u>Arena</u>.- La conductividad térmica efectiva determinada por el método de Nozad et al., da valores ligeramente inferiores a los dados por los modelos teóricos, así experimentalmente la conductividad térmica efectiva es de 0,357 W/m.ºC, mientras que el modelo de Krupiczka es de 0,416 W/mºC.

Para visualizar la coincidencia de valores de conductividad térmica efectiva obtenidos experimentalmente con los correspondientes a diversos modelos, se calcularon las relaciones λ_{e}/λ_{f} y λ_{e}/λ_{f} :

		(Agua)	(Solución de tensioactivo)
	λ_s / λ_l	λ_e/λ_l	λ_e / λ_l
Bronce	118,33	12,54	11,70
Acero	24,22	6,79	6,61
Arena	0,523	0,595	0,55

Y se trasladaron a la figura 3.58, obteniéndose el resultado mostrado en la figura 3.59.



Figura 3.59.- Comparación de los valores de λ₉/λ_f y λ_e/λ_f correspondientes al medio poroso constituido por partículas de bronce (), de acero () y de arena () respecto a las predicciones de diversos modelos.

Para el caso de los medios porosos fibrosos se aplicaron los modelos en serie y en paralelo, obteniendo por tanto los valores mínimo y máximo de conductividad de mezcla para una determinada porosidad, y el modelo de Bauer (1993) específico para medios fibrosos. Los resultados son mostrados en la tabla 3.61.

MODELO	ε : 0,83 λ _e (W/m.K)	ε:0,88 λ _e (W/m.K)	ε : 0,92 λ _e (W/m.K)
SERIE	0,238	0,291	0,355
PARALELO	0,532	0,561	0,583
BAUER	0.474	0.516	0.552
Experimental	0,305	0,295	0,359

Tabla 3.61.- Valores teóricos y experimentales de conductividad térmica efectiva correspondientes a los medios porosos fibrosos.

La tabla 3.62 muestra los valores de difusividades térmicas efectivas correspondientes a los datos de conductividad térmica efectiva anteriores, y que han sido calculados considerando capacidades caloríficas efectivas promediadas temporalmente obtenidas a partir de los datos del Anexo 2 (apartado 2.4) .

MODELO	ε : 0,83 <ρ.ϲ _ρ >: 3,713.10 ⁶ J/m ³ .K α _e (m ² /s)	ε : 0,88 <ρ.c₀>: 3,843.10 ⁶ J/m ³ .K α _e (m ² /s)	ε : 0,92 < _{ρ.cp} >: 3,941.10 ⁶ J/m ³ .K α _e (m ² /s)
SERIE	6,403.10 ⁻⁸	7,571.10 ⁻⁸	8,994.10 ⁻⁸
PARALELO	1,433.10 ⁻⁷	1,458.10 ^{.7}	1,480.107
BAUER	1,277.10 ⁻⁷	1,343.107	1,401.10 ⁻⁷
Experimental	8,22.10 ⁻⁸	7,685.10 ⁻⁸	9,11.10 ⁻⁸

Tabla 3.62.- Valores teóricos de difusividad térmica efectiva correspondientes a los medios porosos fibrosos.

Los valores calculados de difusividad y conductividad térmicas efectivas, para el caso de los medios fibrosos, ^{co}inciden prácticamente con los aportados por el modelo en serie. Únicamente el medio con porosidad ^{inferior} ($\varepsilon = 0,83$) ofrece valores experimentales significativamente superiores a los previstos por el modelo ^{en} serie, aunque siempre dentro del rango de difusividad y conductividad esperados.

_ 173

3.4.- RESUMEN Y APRECIACIONES

Los resultados experimentales obtenidos sobre conductividad térmica efectiva de los medios porosos saturados estudiados se resumen, junto a propiedades físicas y estructurales de los mismos, en la tabla 3.63 (p. 176).

En primer lugar cabe resaltar que los valores de la difusividad térmica efectiva de medios porosos saturados por líquido en condiciones de régimen de conducción estacionario o casi-estacionario son muy próximos a los del líquido (en nuestro caso agua) cuando la relación $\lambda_s / \lambda_l < 1$ (arena-agua; algodón-agua), mientras que si dicha relación es mayor que uno, la difusividad térmica efectiva es un grado de orden superior a la del agua. Por otra parte, la adición de tensioactivo al agua produce una disminución del valor de la difusividad térmica efectiva prácticamente en todos los medios porosos estudiados (el medio poroso en base a algodón con porosidad de 0,83 es una excepción, pero se ha de tener en cuenta la relativa poca fiabilidad de los resultados experimentales habida cuenta de las dificultades encontradas en la preparación del medio poroso).

Otra constatación, a nuestro entender importante, es que en todo medio poroso saturado la difusividad térmica efectiva varía en el transcurso del tiempo para llegar al equilibrio (conducción térmica estacionaria) según una ley del tipo $\alpha_e.t^n \approx cte$. Los valores de n y de la constante dependen de las características del medio poroso. Además, parece evidente que la variación de α_e es tal que tiende a dominar la de la fase sólida en tiempos cortos y la de la fase líquida en tiempos largos si $\alpha_s > \alpha_i$; y, al contrario, si $\alpha_1 > \alpha_s$ (caso del algodón).

Finalmente, cabe destacar que la conductividad térmica efectiva disminuye con la adición de tensioactivo al agua., siendo la máxima reducción de un 7,5 %.

Se sabe que la transferencia de calor entre una superficie calefactora y un medio poroso saturado de líquido en contacto con aquella depende , entre otros factores, de los siguientes:

- (i) la condición física y el estado de la superficie; y
- (ii) la medida en que el líquido humecta la superficie y con que eficacia desplaza el aire atrapado en cavidades.

Es conocido que el incremento de transferencia de calor en un medio sinterizado se debe, aparte otros factores, al radio de poro. Este radio está caracterizado por un radio de poro equivalente dado por

$$r_0 = \frac{2.\sigma}{\rho_l \cdot g.z}$$

donde z es la altura de elevación capilar. Así existe una relación entre el valor de la tensión superficial, la capilaridad y el radio de poro. Por consiguiente tanto la humectación de superficie como el desplazamiento de aire dependen del valor de la tensión superficial y del ángulo de contacto, θ_c , que debe ser menor que 90° para que la humectación sea buena.

Es conocido que los agentes de superficie activa tienden a concentrarse sobre la superficie de sólidos, sobre la que pueden o no estar adsorbidos, de manera que establecen una entrefase sólido-líquido de baja tensión superficial y ángulo de contacto mayor que el crítico. Se trata de la denominada "fase intermedia" cuyo comportamiento fisicoquímico es todavía poco conocido. TABLA 3.63.- RESUMEN DE PROPIEDADES DE FASE Y DE LOS MEDIOS POROSOS.

W Fase solida r p dp Cp λ σ ρ λ σ ρ λ <th></th> <th>MEDIO</th> <th>OSONO</th> <th></th> <th>Propied</th> <th>ades fas-</th> <th>e sólida (</th> <th>20°C)</th> <th>Propie(</th> <th>dades f</th> <th>ase líquic</th> <th>1a (20°C)</th> <th>Propie</th> <th>dades d</th> <th>el me</th> <th>edio p</th>		MEDIO	OSONO		Propied	ades fas-	e sólida (20°C)	Propie(dades f	ase líquic	1a (20°C)	Propie	dades d	el me	edio p
50 Bronce saturante kg/m³ mm J/kg/K W/m.K 10^3 kg/m³ J/kg/K W/m.K 50 Bronce Agua destilada 0,36 8614 0,235 376 71 72,88 936 4181,8 0,600 50 Saturante Agua destilada 0,59 7660,8 0,025 502,01 14,53 72,88 936 4181,8 0,600 50 Acero inox. Agua destilada 0,59 7660,8 0,002 502,01 14,53 72,88 936 4181,8 0,600 50 Arena Solución de T. 0,59 7660,8 0,002 502,01 14,53 72,88 936 4181,8 0,600 50 Arena Agua destilada 0,38 2614 2,96 516,78 0,314 72,88 936 4181,8 0,600 50 Arena Agua destilada 0,92 216,78 0,314 72,88 936 4181,8 0,600	≥	Fase sólida	Fase líquida	ы ц	, d	ę	ပီ	۲	b	ح	ථ	r	<0Co>		۳.	he ue
S0 Bronce 71 72,68 506 4181,8 0,600 50 Sa = 25443,56 m ¹ Solucion de T. 0,36 8614 0,235 376 71 72,88 506 4181,8 0,600 50 Acero inox. Solucion de T. 0,36 8614 0,235 376 71 43,80 z			saturante		kg/m ³	E	J/kg.K	W/m.K	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	kg/m³	J/kg.K	W/m.K	J/m ³ .K	W/m.K		(m ² /s)
50 Solución de T. 0,36 8614 0,235 376 71 43,80 x x x 50 Acero inox. Agua destilada 0,59 7660,8 0,002 502,01 14,53 72,88 908 4181,8 0,600 50 Arena Solución de T. 0,59 7660,8 0,002 502,01 14,53 72,88 908 4181,8 0,600 50 Arena Agua destilada 0,38 2614 2,96 516,78 0,314 72,88 908 4181,8 0,600 50 Arena Agua destilada 0,38 2614 2,96 516,78 0,314 72,88 908 4181,8 0,600 56 S16,76 0,314 72,88 908 4181,8 0,600 56 S16,76 0,314 236 1330 0,0589 72,88 908 4181,8 0,600 56 S16,76 0,1455 1330 0,0589 72,88	8	Bronce S . = 25443,56 m ⁻¹	Agua destilada	0,36	8614	0,235	376	71	72,88	88	4181,8	0,600	3,565.10 ⁶	7,437	N	,092.10 ^{°6}
50 Acero inox. Agua destilada 0,59 7660,8 0,092 502,01 14,53 72,88 938 4181,8 0,600 50 Solución de T. 0,59 7660,8 0,092 502,01 14,53 43,80 \approx	ន		Solución de T.	0,36	8614	0,235	376	71	43,80	u	z	n	3,566.10 [°]	6,962	-	57.10 [°]
50 Solución de T. 0.59 7660.8 0.032 502.01 14.53 43.80 ∞ ∞ 50 Arena Agua destilada 0,38 2614 2.96 516,78 0,314 72,88 938 4181,8 0,600 50 $N = 2222,06 \text{ m}^{-1}$ Solución de T. 0,38 2614 2.96 516,78 0,314 43,80 ∞ ∞ ∞ 50 Algoadón Agua destilada 0,92 1176,25 0,01455 1330 0,0569 72,88 938 4181,8 0,600 25 Algoadón Agua destilada 0,92 1176,25 0,01455 1330 0,0569 72,88 938 4181,8 0,600 25 Agua destilada 0,88 1176,25 0,01455 1330 0,05699 72,88 938 4181,8 0,600 25 Agua destilada 0,88 1176,25 0,01455 1330 0,05699 72,89 938 4181,8 0,600 <tr< th=""><th>ន</th><td>Acero inox. S• = 65356,26 m⁻¹</td><td>Agua destilada</td><td>0,59</td><td>7660,8</td><td>0,092</td><td>502,01</td><td>14,53</td><td>72,88</td><td>866 866</td><td>4181,8</td><td>0,600</td><td>3,999.10[°]</td><td>3,856</td><td>o O</td><td>64.10[°]</td></tr<>	ន	Acero inox. S• = 65356,26 m ⁻¹	Agua destilada	0,59	7660,8	0,092	502,01	14,53	72,88	866 866	4181,8	0,600	3,999.10 [°]	3,856	o O	64.10 [°]
50 Arena Agua destilada 0,38 2614 2.96 516,78 0,314 72,88 938 4181,8 0,600 50 S.= $2022,06 m^1$ Solución de T. 0,38 2614 2,96 516,78 0,314 43,80 \approx	ន		Solución de T.	0,59	7660,8	0,092	502,01	14,53	43,80	z	2	u	3,999.10 ⁻⁶	3,831	0,0	8.10
50 Solución de T. 0.38 2614 2.96 516.78 0.314 43.80 \approx \approx \approx 25 Algodón Agua destilada 0,92 1176,25 0,01455 1330 0,0569 72,88 938 4181,8 0,600 25 S _* = 274603,17 m ⁻¹ Solución de T. 0,92 1176,25 0,01455 1330 0,0569 43,80 \approx	ß	Arena S . = 2022,06 m ⁻¹	Agua destilada	8£'0	2614	2,96	516,78	0,314	72,88	88 86	4181,8	0,600	2,518.10 ⁶	0.357	1.41	8.10 ⁻⁷
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	ន		Solución de T.	0,38	2614	2,96	516,78	0,314	43,80	u	z	a	2,554,10°	0.330	1.20	210
25 Solución de T. 0.92 1176,25 0.01455 1330 0.0589 43,80 z z z 25 Agua destilada 0,88 1176,25 0.01455 1330 0.0589 72,88 938 4181,8 0,600 25 Solución de T. 0,88 1176,25 0.01455 1330 0.0589 43,80 z z z 25 Agua destilada 0,83 1176,25 0.01455 1330 0.0589 72,88 938 4181,8 0,600 25 Agua destilada 0,83 1176,25 0.01455 1330 0.0589 72,88 938 4181,8 0,600 25 Solución de T 0,83 1176,25 0.01455 1330 0.0589 72,88 938 4181,8 0,600 25 Solución de T 0,83 1176,25 0.01455 1330 0.0580 72,88 938 4181,8 0,600	ĸ	Algodón S. = 274673 17 m ⁻¹	Agua destilada	0,92	1176,25	0,01455	1330	0,0689	72,88	88 88	4181,8	0,600	3,941.10 ⁻⁶	0.359	0.91	1.10
25 Agua destilada 0,88 1176,25 0,01455 1330 0,0589 72,88 938 4181,8 0,600 25 Solución de T. 0,88 1176,25 0,01455 1330 0,0589 43,80 ×	35		Solución de T.	0,92	1176,25	0,01455	1330	0,0589	43,80	a	a	a	3,949.10 ⁻⁶	0.344	0.87	1.10
25 Solución de T. 0,88 1176,25 0,01455 1330 0,0589 43,80 ×	ß		Agua destilada	0,88	1176,25	0,01455	1330	0,0589	72,88	88 88	4181,8	0,600	3,841.10 ⁶	0.295	0.70	010
25 Agua destilada 0,83 1176,25 0,01455 1330 0,0589 72,88 998 4181,8 0,600 25 Solución de T 1 0,83 1176,25 0,01455 1330 0,0580 43,80 2 2 2	R		Solución de T.	0,88	1176,25	0,01455	1330	0,0689	43,80	æ	2	a			1	.
25 Solución de T. 0.83 1176 25 0.01455 1330 0.0589 43.80 ~ 1 ~ ~	ห		Agua destilada	0,83	1176,25	0,01455	1330	0,0589	72,88	88	4181,8	0,600	3,710.10	0.305	0.82	2.10
	ĸ		Solución de T.	0,83	1176,25	0,01455	1330	0,0589	43,80	u	z	a	3,697.10 ⁶	0.369	0.98	8.10

Difinitidadaa da faaa (00 00).		2.		(Agua) (S	solución tensioactivo)
Contraction and the lase (20 °C):		a (m ⁻ /s)	25 / 21	λe / λι	λe / λι
	Agua	1,4377.10 ⁻⁷			
	Acero inox.	37,7815.10 ⁻⁷	24,217	6,787	6,615
	Algodón	0,300.10 ⁻⁷	0,098	0,598	0,573
	Arena	2,4260.10 ⁻⁷	0,523	0,595	0,55
	Bronce	219,2126.10 ⁻⁷	118,333	12,545	11,70

3.5.- REFERENCIAS:

- 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.
- 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.
- 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.
- DULNEV, G.N.; V.V: NOVIKOV (1979): "Conductivity of heterogeneous systems". J. Engng. Phys., Vol. 36, p. 901
- HADLEY, G.R. (1986): "Thermal conductivity of packed metal powders". Int.J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 6, p.909
- 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.

- LUIKOV, A.V.; A.G. SHASHKOV, et al. (1968): "*Thermal conductivity of porous systems*". Int.J. Heat Mass Transfer, No.11, p.117
- 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.
- 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.
- SCHULZ, B. (1981): "Thermal conductivity of porous and highly porous materials". High Temp-High Pressures, Vol. 13, p. 649

. 177

- SHULMAN, Z.P.; L.N. NOVICHYONOK; E.P. BELSKAYA, et al. (1982): "Thermal conductivity of metalfilled systems". Int.J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 5, p. 643
- VACHON, R.I. (1979): "Thermal conductivity of heterogeneous mixtures and lunar soils". Contract NASA-26579. Auburn University.

-

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

RESUMEN

En el presente capitulo se describe la instrumentación experimental y la metodología seguida para el estudio del proceso de calentamiento de medios porosos saturados hasta ebullición-"dryout" del fluido saturante (agua destilada o solución acuosa).

Se muestran los resultados obtenidos y se da una primera interpretación de los mismos.

4.1.- DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACION Y DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1.1.- Célula de medición

La célula de medición (ver Anexo 4, plano 3.0), donde se situó el medio poroso, consta de un cilindro de acero inoxidable de 2 mm de grosor, 15 cm de diámetro interior y 17 cm de altura. Su interior fue recubierto por pintura resistente a alta temperatura, permitiendo la experimentación con medio poroso constituido por partículas de bronce, sin que éste se alterara por descomposición galvánica (ver Anexo 4, plano 3.3).

En su parte superior se situó un filtro constituido por tres capas de tela de nylon de baja porosidad y, sobre el mismo, una placa de aluminio perforada de 2 mm de grosor con una superficie total de 176,71 cm², ofreciendo una superficie libre o de paso de 74,61 cm².

La colocación de la placa perforada y el filtro evitan un posible desplazamiento ascendente de la matriz porosa como consecuencia de los procesos relacionados con la ebullición del fluido saturante.

Por encima de la placa perforada se instaló una cubeta de hierro (plano 3.4 -Anexo 4-), de 5 cm de altura y 16,8 cm de diámetro interno, sujeta mediante tuercas al cilindro inferior y con una junta de teflón entre ambos. Posteriormente se comprobó que una altura de 5 cm era insuficiente, dado el volumen de agua en ocasiones desplazado, por lo que se añadió otra cubeta, solidaria a la anterior mediante junta de teflón y tuercas, también de hierro de 10 cm de altura y 16,5 cm de diámetro. La diferencia de diámetros entre ambas cubetas (3 mm) siempre se tuvo presente en los cálculos de volúmenes desplazados.

Por su parte inferior, el cilindro está limitado por una pieza cilíndrica de aluminio de 14,8 cm de diámetro, 4 cm de altura total y que se introduce 3 cm en el interior del cilindro. En su parte inferior tiene tres cavidades para el alojamiento de termopares, que permitieron medir la temperatura a diferentes profundidades y radios en la placa. Lateralmente presenta un rebaje para la ubicación de una junta tórica de viton, de 6 mm de grosor y de 14 cm de diámetro, que garantiza la estanqueidad del cilindro. Dado que esta pieza inferior es la que estará en contacto con la resistencia eléctrica que será la fuente de calor, nos referiremos a ella como "placa calefactora" (ver plano 3.2 -Anexo 4-)..

La resistencia eléctrica utilizada es de tipo monotubo en espiral plana de 220 voltios, estando en contacto directo con la placa calefactora a la cual se sujetó mediante tres argollas solidarias a un aro de aluminio exterior que a su vez se unió al cilindro mediante tuercas (ver planos 3.5 y 3.6 del Anexo 4).

Todo el conjunto se situó en un soporte de aluminio con cuatro patas de altura regulable, lo que permitió una correcta nivelación del conjunto (plano 3.1 del Anexo 4)..

Tanto el cilindro contenedor del medio poroso así como la placa calefactora y la resistencia eléctrica fueron recubiertos con múltiples capas de material aislante para evitar en todo lo posible las pérdidas de calor (Fotografía 10 del Anexo 5).

4.1.2.- Instrumentos de medida

Las variables a medir durante la experimentación fueron fundamentalmente la presión y la temperatura a diferentes posiciones en el interior del medio poroso, así como el volumen de fluido saturante desplazado hacia la cubeta superior.

La medición de la presión se realizó mediante la ubicación de cuatro tubos piezométricos, tres de los cuales fueron tubos de acero inoxidable de 3 mm de diámetro externo y de 2 mm de diámetro interno (se trata de los denominados manómetros 1, 2 y 3). La situación concreta de estos tres piezómetros dentro del medio poroso se encuentra en la tabla 1 y se visualiza en la Fig. 1 (ver plano 3.4 -Anexo 4-).

Un cuarto tubo de acero inoxidable de 8 mm de diámetro externo y 6 mm de diámetro interno se situó en el centro del cilindro. Dicho tubo a su vez contiene de forma concéntrica otro tubo interior de acero inoxidable de las mismas características que los anteriores. El tubo interno tiene su obertura en su extremo inferior situado a 0,471 cm de la placa calefactora. Mientras que el tubo externo presenta 3 oberturas laterales circulares de 4 mm de diámetro situadas a 3,364 cm de la placa calefactora (manómetro 4).

Dadas las características de la célula, el medio poroso tuvo que ser introducido por la parte inferior del cilindro. Por tanto, para asegurar una correcta saturación del medio poroso, se introducía previamente la matriz sólida seca (una vez pesada) en el interior del cilindro en posición inversa. Una vez tapado y restituida su posición normal, la saturación del medio se realizó mediante la introducción del fluido saturante a través del tubo interior al manómetro 4.

Para asegurar la correcta saturación, en todos los casos el volumen de fluido saturante a introducir era calculado previamente y verificado posteriormente a su introducción.

Las medidas de presión se realizaron mediante un multimanómetro de inclinación regulable. Utilizando un líquido manométrico de densidad relativa 0,88 en las dos primeras experiencias (acero y arena). Para el resto de pruebas se utilizó mercurio como fluido manométrico.

Manómetro	Profundidad (cm) (*)	Radial (cm) (**)
1	10,762	3,0
2	7,416	3,0
3	3,922	3,0
4	3,364	0

 Tabla 1.- Situación radial y en profundidad de los diferentes manómetros. (*) distancia respecto a la placa calefactora. (**) distancia respecto al centro del cilindro.

En lo referente a la medición de la temperatura, se utilizaron un total de ocho termopares, de los cuales el primero (termopar 1), se situó en la cubeta próximo a la placa perforada. Los cuatro siguientes termopares se ubicaron en el interior del medio poroso. Y por último los tres termopares restantes se colocaron a diferentes profundidades en la placa calefactora (a 1,5 cm (termopar 6), 2,5 cm (termopar 7) y 3,5 cm (termopar 8) de distancia respecto a la superficie inferior de la placa calefactora). Radialmente el termopar 7 se situó en el centro de la placa y los termopares 6 y 8 alineados a 1,5 cm a ambos lados del anterior. (Ver plano 3.2 -Anexo 4-).

Los termopares ubicados en el interior del medio poroso se dispusieron a las profundidades y situaciones radiales mostradas en la tabla 2 y figura 4.1..

Matriz	Fluido	Termopar	Profundidad (cm) (*)	Radial (cm) (**)
BRONCE	Agua destilada	2	10,764	4,0
	-	3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
	Solución acuosa	2	10,764	4,0
		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
ACERO	Agua destilada	2	11,300	4,0
		3	7,102	6,4
		4	4,310	4,0
		5	0,334	1,5
	Solución acuosa	2	10,764	4,0
		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
ARENA	Agua destilada	2	11,300	4,0
		3	7,102	6,4
		4	4,310	4,0
		5	0.334	1,5
	Solución acuosa	2	11,300	4,0
		3	7,102	6,4
		4	4,310	4,0
		5	0,334	1,5

Tabla 2- Profundidad y situación radial de los termopares situados en el interior de los diferentes medios porosos. (*)distancia a la placa calefactora. (**)distancia al centro del cilindro. (Ver continuación, p.183)

Matriz	Fluido	Termopar	Profundidad (cm) (*)	Radial (cm) (**)
ALGODÓN				
ε = 0,83	Agua destilada	2	10,764	4,0
-		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
	Solución acuosa	2	10,284	4,0
		3	8.824	6,4
		4	5,374	4,0
		5	2,310	1,5
ε = 0,88	Agua destilada	2	10,764	4,0
		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
	Solución acuosa	2	10,764	4,0
,		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5
ε = 0,92	Agua destilada	2	6,664	4,0
		3	0,064	6,4
		4	0.964	4,0
		5	0,164	1,5
	Solución acuosa	2	10,764	4,0
		3	7,416	6,4
		4	3,922	4,0
		5	1,732	1,5

Tabla 2- Profundidad y situación radial de los termopares situados en el interior de los diferentes medios porosos. (*) distancia respecto a la placa calefactora. (**) distancia respecto al centro del cilindro. (Continuación)



Figura 4.1. .- Esquema de situación de los termopares y los manómetros.

. 183

El volumen de fluido desplazado fue determinado a partir de la medición de la altura de líquido contenido en la cubeta, mediante un limnímetro con una precisión de \pm 0,05 cm (fotografía 11 -Anexo 5-).

El conjunto del dispositivo experimental se esquematiza en la figura 4.2 y se puede visualizar en la foto 12 -Anexo 5-.





4.1.3.- Metodología experimental

Como se comentó en el apartado anterior, el medio poroso debe ser introducido por la parte inferior del cilindro, colocando en primer lugar la matriz sólida seca (previamente pesada), para posteriormente saturarla mediante la introducción por gravedad del volumen de fluido saturante (previamente medido), a través del tubo interior central al manómetro 4, con su extremo a 0,471 cm de la placa calefactora.

La saturación del medio poroso se realizó en todos los casos de forma muy lenta y gradual, como consecuencia de que la obertura del tubo de alimentación estaba situada a muy poca distancia de la base del medio poroso, y a que la introducción del fluido se realizó únicamente por gravedad. Este método de saturación permitió la expulsión del aire de forma paulatina a medida que se saturaba el medio poroso. Una idea de la lentitud del proceso de saturación se tiene considerando que para el caso del medio poroso constituido por partículas de acero (porosidad de 0,59), el proceso de saturación abarcó aproximadamente 22 horas.

Para asegurar la saturación del medio poroso, el volumen de fluido introducido fue siempre superior al necesario para una correcta saturación. Una vez saturado el medio poroso se verificaba el volumen de fluido introducido en el medio mediante la diferencia entre el volumen total introducido y el volumen de fluido contenido finalmente en el tubo de alimentación y el volumen de fluido contenido en la cubeta.

En el caso de los medios fibrosos, dado su carácter marcadamente hidrofóbico, la matriz sólida debía de ser saturada fuera de la célula (asegurando la correcta extracción del aire), para posteriormente introducirla en el interior de la cubeta y seguir la misma metodología que en el resto de medios. En este caso, para la comprobación del volumen de líquido saturante introducido se tenía en cuenta el que previamente se había utilizado para su saturación externa.

Todas las pruebas realizadas tuvieron cuatro horas de duración, durante las cuales se registraron valores de temperatura, presión y altura de líquido en el interior de la cubeta a medida que era calentado el medio poroso.

Mediante el data logger, se registraron los valores de temperatura correspondientes a cada uno de los termopares en intervalos de un minuto. Mientras que los valores de presión para los diferentes manómetros y la altura de líquido en la cubeta fueron registrados manualmente en intervalos de tiempo que oscilaron, en general, entre dos y cinco minutos.

La potencia suministrada a los medios porosos fue controlada mediante un transformador regulable, y ^{un} watímetro (se contó también con un amperímetro y un voltímetro). La potencia suministrada fue de ³⁰⁰ W para los medios porosos granulares y fibrosos saturados con agua destilada, y de 150 W para ^{los} medios porosos fibrosos saturados con solución acuosa de tensioactivo. La disminución de potencia en el caso de los medios fibrosos con tensioactivo fue consecuencia de la comprobación de que para una potencia de 300 W la placa calefactora alcanzaba una temperatura excesivamente elevada.

4.2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DE EBULLICIÓN EN LOS MEDIOS POROSOS

4.2.1.- Medio poroso constituido por: BRONCE

La cantidad de matriz seca introducida en la célula fue de 14,615 Kg, siendo el volumen de fluido saturante a introducir de 954,429 cm³, obteniendo una porosidad de 0,36. Como se ha comentado con anterioridad, la potencia suministrada al medio fue de 300 W.

Es importante señalar que durante la experimentación con medio poroso constituido por partículas de bronce se utilizó el tubo interior central (usado para la saturación del medio) como manómetro denominándolo manómetro 5.

4.2.1.1.- Fluido saturante: AGUA DESTILADA

Durante la realización de la experiencia, se pudieron tomar los valores de las condiciones ambientales de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, siendo éstos los siguientes:

Temperatura ambiente: 21,5 °C Presión atmosférica: 760 mm Hg Humedad relativa: 80 %

Cabe indicar que durante la experimentación los termopares 6 y 8, interiores de la placa calefactora, no funcionaron como consecuencia de su rotura. Por lo que la temperatura de la placa calefactora sólo pudo ser determinada por el termopar 7.

Los resultados de la experimentación referentes a temperaturas, presiones y volúmenes de líquido en la cubeta son visualizados en las figuras 4.3., 4.4. y 4.5..





Figura 4.3.- Variación temporal de la temperatura en los diferentes termopares.



Figura 4.4.- Variación temporal de las presiones registradas por los distintos manómetros.





Figura 4.5..- Variación temporal del volumen de líquido en la cubeta.

4.2.1.2.- Fluido saturante: SOLUCIÓN ACUOSA

La porosidad como en el caso de agua destilada como fluido saturante fue de 0,36. Las condiciones ambientales de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, durante la experiencia fueron:

Temperatura ambiente: 20,2 °C Presión atmosférica: 767 mm Hg Humedad relativa: 74 %

Los resultados de la experiencia se encuentran visualizados en las figuras 4.6., 4.7. y 4.8.





Figura 4.6..- Variación temporal de las temperaturas registradas por los diferentes termopares.



Figura 4.7.- Variación temporal de la presión medida por los diferentes manómetros.

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

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



Figura 4.8.- Variación temporal del volumen de líquido contenido en la cubeta.

4.2.2.- Medio poroso constituido por: ACERO INOXIDABLE

La cantidad de matriz seca introducida en la célula fue de 8,327 Kg, siendo el volumen de fluido saturante a introducir de 1564,204 cm³, dando una porosidad de 0,59. La potencia suministrada al medio fue de 300 W.

4.2.2.1.- Fluido saturante: AGUA DESTILADA

La temperatura ambiente durante la realización de la prueba fue de 25,2 °C. Los resultados de la experimentación se encuentra son visualizados en las figuras 4.9., 4.10., 4.11. y 4.12..

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



Figura 4.9.- Variación temporal de la temperatura registrada por los diferentes termopares.



Figura 4.10.- Variación temporal de la presión registrada por los manómetros.

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



Figura 4.11.- Ampliación de la variación de presión de los manómetros 1, 2 y 3.



Figura 4.12.- Variación temporal del volumen de agua en la cubeta.

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

4.2.2.2.- Fluido saturante: SOLUCIÓN ACUOSA

La porosidad fue de 0,59, como en el caso del agua destilada como fluido saturante. La temperatura ambiente durante la realización de la prueba fue de 22,2 °C. Los resultados de la experimentación son visualizados en las figuras 4.13., 4.14. y 4.15..



Figura 4.13..- Variación temporal de las temperaturas registradas por los diferentes termopares.



Figura 4.14.- Variación temporal de las presiones registradas por los distintos manómetros.





4.2.3.- Medio poroso constituido por: ARENA

La masa de matriz seca introducida en la célula fue de 4,293 Kg, siendo el volumen de fluido saturante a introducir de 1007,45 cm³, obteniéndose una porosidad de 0,38. La potencia suministrada al medio fue de 300 W.

4.2.2.1.- Fluido saturante: AGUA DESTILADA

La temperatura ambiente durante la realización de la prueba fue de 27,5 °C. Los resultados de la experimentación se encuentra recogidos, a modo de ejemplo, en el anexo 3 (apartados 3.1 y 3.2) y son visualizados en las figuras 4.16., 4.17., 4.18. y 4.19.. CAPÍTULO IV.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE MEDIOS POROSOS SATURADOS HASTA EBULLICIÓN-"DRYOUT DE SU FASE LÍQUIDA



Figura 4.16.- Variación temporal de la temperatura registrada por los termopares durante la experimentación.



Figura 4.17.- Detalle de las variaciones de la temperatura mostrada por los diferentes termopares.

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







Figura 4.19.- variación temporal del volumen de líquido contenido en la cubeta.

4.2.3.2.- Fluido saturante: SOLUCIÓN ACUOSA

La porosidad fue, como en el caso del agua destilada como fluido saturante, de 0,38. La temperatura ambiente durante la realización de la prueba fue de 27 °C.

Los resultados de la experimentación se encuentra recogidos, a modo de ejemplo, en el anexo 3 (apartados 3.3 y 3.4) y son visualizados en las figuras 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23.



Figura 4.20.- Variación temporal de temperatura.



Figura 4.21.- Detalle de la variación de temperatura registrada por los distintos termopares.

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



Figura 4.22.- Variación temporal de presión de los diferentes manómetros.



Figura 4.23.- Variación temporal del volumen de líquido contenido en la cubeta.

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