# 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. LLUIS VIRTO ALBERT**

Vilanova i la Geltrú, 1999

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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA.DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Memoria para aspirar al grado de Doctor

# 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

A José, Irene y Elena, por su paciencia y comprensión.

## AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a todas aquellas personas y entidades que me han ayudado y sin las cuales no hubiera sido posible la realización de esta Tesis.

Al Dr. Luis Virto Albert, director de la Tesis, por su dedicación, ayuda y apoyo, mostrados en todo momento.

Al Sr. Francesc Comelles del Centro Superior de Investigaciones Científicas, por su colaboración en la caracterización de la fase fluida.

A la Facultad de Ciencias Geológicas de Barcelona, en especial al Dr. Jordi Serra, por permitirme la utilización del analizador de tamaño de partícula por difración de rayo láser.

Al Dr. Salvador Montserrat del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la UPC, por su ayuda en la caracterización térmica de las fases sólidas.

Al Departamento de Mecánica de Fluidos de la UPC por la cesión de sus instalaciones. Así como a mis compañeros/as por sus ánimos y apoyos recibidos.

Al Instituto de Investigación Textil de Terrassa, por permitir la utilización de la instrumentación necesaria para el establecimiento de la longitud media de fibra.

Al Sr. José Miguel López Cidoncha por la ayuda prestada en diferentes ámbitos de la edición de la Tesis.

A todos ellos, muchas gracias.

*1.3.- RESUMEN.* ..... *45*

*1.4.- REFERENCIAS.* ..... *47*

***CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LOS MEDIOS POROSOS***

*2.1.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MEDIOS POROSOS.* ..... *49*

*2.1.1.- Porosidad.* ..... *49*

*2.1.2.- Densidad.* ..... *50*

*2.2.- ESTUDIO FLUIDODINÁMICO DE LOS MEDIOS POROSOS.* ..... *51*

*2.2.1.- Aplicación del promediado volumétrico a las ecuaciones de Navier-Stokes en medios porosos.* ..... *51*

*2.2.2.- Estudio experimental del comportamiento fluidodinámico de los medios porosos.* ..... *54*

*2.2.2.1.- Caracterización fluidodinámica del medio poroso saturado con agua destilada.* ..... *54*

*2.2.2.2.- Confrontación de los resultados experimentales de permeabilidad intrínseca con modelo teóricos.* ..... *63*

*2.2.2.3.- Caracterización fluidodinámica del medio poroso saturado con agua destilada a la que se ha añadido tensioactivo.* ..... *68*

*2.3.- RESUMEN Y APRECIACIONES.* ..... *75*

*2.3.1.- Influencia de la adición de tensioactivo al agua en la conductividad hidráulica del medio poroso.* ..... *75*

*2.3.2.- Reducción de permeabilidad inducida por sorción de tensioactivo.* ..... *77*

*2.4.- CONCLUSIONES* ..... *79*

*2.5.- REFERENCIAS.* ..... *84*

*CAPÍTULO III: DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA*

*3.1.- INTRODUCCIÓN.* ..... *85*

*3.1.1.- Aplicación del promediado volumétrico al estudio del campo de temperaturas en un medio poroso.* ..... *86*

*3.1.2.- Aplicación del promediado volumétrico a la ecuación de la energía en medios porosos.* ..... *90*

*3.2.- APLICACIÓN DEL PROMEDIADO VOLUMÉTRICO AL ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA EN MEDIOS POROSOS.* ..... *91*

*3.2.1.- Sistemas bifásicos.* ..... *93*

*3.2.1.1.- Mínima y máxima conductividad posibles de mezclas.* ..... *94*

*3.2.1.2.- Modelo en materiales granulares.* ..... *97*

*3.2.2.- Sistemas trifásicos.* ..... *98*

*3.3.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD Y DIFUSIVIDAD TÉRMICAS EFECTIVAS. ..... 100*

*3.3.1.- Métodos de cálculo de la conductividad y difusividad térmicas efectivas de medios porosos saturados a partir de datos experimentales. ..... 100*

*3.3.2.- Equipo experimental. ..... 103*

*3.3.3.- Metodología experimental. ..... 106*

*3.3.4.- Evolución del campo de temperaturas del medio poroso saturado en el transcurso del tiempo. ..... 107*

*3.3.4.1.- Medio poroso constituido por Bronce. ..... 107*
*3.3.4.2.- Medio poroso constituido por Acero. ..... 111*
*3.3.4.3.- Medio poroso constituido por Arena. ..... 115*
*3.3.4.4.- Medio poroso constituido por Algodón. ..... 119*

*3.3.5.- Cálculo de la conductividad y difusividad térmicas efectivas de los medios porosos considerados. ..... 129*

*3.3.5.1.- Régimen Permanente. ..... 137*
*3.3.5.2.- Régimen Transitorio. ..... 138*
*3.3.5.3.- Contrastación con modelos teóricos. ..... 164*

*3.4.- RESUMEN Y APRECIACIONES. ..... 174*

*3.5.- REFERENCIAS. ..... 177*

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


***4.1.- DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.*** ..... ***179***

***4.1.1.-*** *Célula de medición.* ..... ***179***

***4.1.2.-*** *Instrumentos de medida.* ..... ***181***

***4.1.3.-*** *Metodología experimental.* ..... ***185***

***4.2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DE EBULLICIÓN EN LOS MEDIOS POROSOS.*** ..... ***187***

***4.2.1.-*** *Medio poroso constituido por Bronce.* ..... ***187***

***4.2.1.1.-*** *Fluido saturante: Agua destilada.* ..... ***187***

***4.2.1.2.-*** *Fluido saturante: Solución acuosa de tensioactivo.* ..... ***189***

***4.2.2.-*** *Medio poroso constituido por Acero Inoxidable.* ..... ***191***

***4.2.2.1.-*** *Fluido saturante: Agua destilada.* ..... ***191***

***4.2.2.2.-*** *Fluido saturante: Solución acuosa de tensioactivo.* ..... ***194***

***4.2.3.-*** *Medio poroso constituido por Arena.* ..... ***195***

***4.2.3.1.-*** *Fluido saturante: Agua destilada.* ..... ***195***

***4.2.3.2.-*** *Fluido saturante: Solución acuosa de tensioactivo.* ..... ***198***

***4.2.4.-*** *Medio poroso constituido por Algodón.* ..... ***200***

***4.2.4.1.-*** *Porosidad: 0,83.* ..... ***200***

***4.2.4.2.-*** *Porosidad: 0,88.* ..... ***205***

***4.2.4.3.-*** *Porosidad: 0,92.* ..... ***209***

***4.3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE MEDIOS POROSOS SATURADOS HASTA EBULLICIÓN-"DRYOUT" DE SU FASE LÍQUIDA: RESUMEN Y APRECIACIONES GENERALES.***

***4.3.1.-*** *Dilatación térmica de las fases del MPS.* ..... ***214***

***4.3.2.-*** *Calentamiento del MPS.* ..... ***219***

***4.3.3.-*** *Evaporación.* ..... ***235***

***4.3.4.-*** *Ebullición.* ..... ***242***

***4.3.5.-*** *"Dryout".* ..... ***244***

***4.3.6.-*** *Presiones fluidoestáticas y de vapor en el medio poroso. Posición de la entrefase vapor-líquido subenfriado.* ..... ***247***

***4.3.7.-*** *Heterogeneidad. Histéresis de flujo crítico de calor. Basculamiento.* ..... ***267***

***4.3.7.1.-*** *Efectos de heterogeneidad.* ..... ***267***

***4.3.7.2.-*** *Histéresis de flujo específico crítico de calor.* ..... ***271***

***4.3.7.3.-*** *Basculamiento.* ..... ***273***

***4.4.- REFERENCIAS.*** ..... ***280***

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

***5.1.- INTRODUCCIÓN.*** ..... ***281***

***5.2.- 1ª ETAPA: CALENTAMIENTO PROGRESIVO DEL MPS.*** ..... ***282***

*5.3.- 2ª ETAPA: CAMBIO DE FASE Y PROPAGACIÓN DE UN FRENTE DE VAPOR. ..... 286*

*5.3.1.- Formación de burbujas. ..... 290*
*5.3.2.- Zona bifásica. ..... 293*
*5.3.3.- Frente de vapor. ..... 300*

*5.4.- 3ª ETAPA: APARICIÓN DE "DRYOUT". ..... 304*

*5.4.1.- "Dryout". ..... 305*
*5.4.2.- Formación de canales. ..... 309*

*5.5.- REFERENCIAS. ..... 312*

*CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES. ..... 313*

*BIBLIOGRAFÍA GENERAL. ..... 325*

*NOMENCLATURA. ..... 335*

## *ÍNDICE DE ANEXOS*

*ANEXO 1.- Capítulo 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 2.- Capítulo 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 3.- Capítulo IV*

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

*3.2.- Datos experimentales de alturas piezométricas y volumen de líquido en la cubeta, correspondientes al medio poroso a base de arena y agua destilada.*

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

*3.4.- Datos experimentales de alturas piezométricas y volumen de líquido en la cubeta, correspondientes al medio poroso a base de arena y solución de tensioactivo.*

*3.5.- Cálculo del volumen de líquido en la cubeta debido a dilatación.*

*3.5.1.- Arena + Agua destilada.*

*3.5.2.- Arena + Solución de tensioactivo.*

*3.6.- Cálculo de la altura media de la entrefase y de la presión fluidoestá-tica.*

*3.6.1.- Arena + Agua destilada.*

*3.6.2.- Arena + Solución de tensioactivo.*

*ANEXO 4.- Planos*

*Permeámetro:*

*PLANO Nº 1.0.- Permeámetro. Conjunto.*
*PLANO Nº 1.1.- Permeámetro. Cilindro contenedor de muestra.*
*PLANO Nº 1.2.- Permeámetro. Pieza inferior.*
*PLANO Nº 1.3.- Depósito superior.*

*Célula conductivimétrica:*

*PLANO Nº 2.0.- Célula conductivimétrica. Conjunto.*
*PLANO Nº 2.1.- Célula conductivimétrica. Cilindro contenedor de muestra.*
*PLANO Nº 2.2.- Célula conductivimétrica. Placa calefactora.*
*PLANO Nº 2.3.- Célula conductivimétrica. Placa inferior refrigerante.*
*PLANO Nº 2.4.- Célula conductivimétrica. Pieza portadora de la célula.*
*PLANO Nº 2.5.- Célula conductivimétrica. Tapaderas superior e inferior.*
*PLANO Nº 2.6.- Célula conductivimétrica. Soporte de la célula.*

*Célula de ebullición:*

*PLANO Nº 3.0.- Célula de ebullición. Conjunto.*
*PLANO Nº 3.1.- Célula de ebullición. Plataforma.*
*PLANO Nº 3.2.- Célula de ebullición. Placa calefactora.*
*PLANO Nº 3.3.- Célula de ebullición. Cilindro contenedor de muestra.*
*PLANO Nº 3.4.- Célula de ebullición. Cubeta.*
*PLANO Nº 3.5.- Célula de ebullición. Soporte.*
*PLANO Nº 3.6.- Célula de ebullición. Placa inferior.*

***ANEXO 5.- Fotografías***

*Foto 1.- Permeámetro de nivel constante y flujo ascendente.*

*Foto 2.- Permeámetro. Célula contenedora del MPS.*

*Foto 3.- Multimanómetro vertical conectado a las tomas de presión del permeámetro.*

*Foto 4.- Elementos constitutivos de la célula conductivimétrica.*

*Foto 5.- Célula conductivimétrica. Cilindro contenedor del MPS.*

*Foto 6.- Célula conductivimétrica. Placa inferior con los conductos de entrada y salida de la cámara de agua de refrigeración.*

*Foto 7.- Instalación de la célula conductivimétrica.*

*Foto 8.- Célula conductivimétrica. Placa calefactora.*

*Foto 9.- Célula conductivimétrica instalada en el cilindro exterior.*

*Foto 10.- Conjunto de la célula de medición para el estudio del calentamiento de los MPS.*

*Foto 11.- Cubeta de líquido subenfriado con limnímetro.*

*Foto 12.- Dispositivo experimental para el estudio del calentamiento de los MPS hasta ebullición-"dryout" de su fase líquida.*

*Foto 13.- Ensayo visual del proceso de calentamiento del medio poroso constituido por arena.*

# INTRODUCCIÓN

Un medio poroso es un sistema heterogéneo constituido por una matriz sólida formada por materiales granulares y/o fibrilares, consolidada o no, que encierra un sistema disperso de espacios vacíos, denominados poros, total o parcialmente conectados, que pueden ser ocupados por fluido en sus diferentes estados: gas/vapor, líquido y mezclas bifásicas. No obstante su carácter heterogéneo, el sistema puede ser considerado como un continuo siempre que se tenga en cuenta adecuadamente el papel de cada fase en los fenómenos de transporte y transferencia de masa y de calor que en él ocurran.

Desde la publicación del libro de Darcy en 1856, que expone los resultados de su trabajo sobre el flujo de agua a través de lechos de arena, hasta la reciente aparición de la obra "Transport Phenomena in Porous Media" (1998), editada por Derek B. Ingham y Ioan Pop, son innumerables las publicaciones de todo tipo: manuales, libros, "proceedings", artículos, etc., realizadas por un número muy considerable de notables investigadores y estudiosos sobre el tema. Citando sólo a unos pocos, encontramos a Knudsen (1909), Muskat y Meres (1936), Carman-Kozeny (1937), Leverett (1941), Brinkman (1947), Ergun (1952), Taylor (1953), Scheidegger (1954), Aris (1956), De Josselin De Jong (1958), Saffman (1959), Weekman y Myers (1965), Luikov (1966), Slattery (1970), Sondergeld y Turcotte (1977), Carbonell y Whitaker (1984), Singh y Kaviany (1991).

Como sucede en otros ámbitos de la ciencia aplicada, el desarrollo del conocimiento del flujo de fluidos y de la transferencia de calor en medios porosos está siendo el resultado de una combinación de aportaciones empíricas directas y de la elaboración de modelos teóricos a partir de principios fundamentales. Así, en un principio, hasta los años 1900, los tratamientos tienen carácter macroscópico pero, a partir de los años 1900, se inicia un interés creciente por el estudio de los fenómenos de transporte a nivel del poro (análisis microscópico), motivado por los nuevos descubrimientos sobre fuerzas de superficie y dinámica de los fenómenos de humectación/deshumectación.

Para la mayoría de los medios porosos de interés las dimensiones de poro son pequeñas, lo que acentúa los efectos de tensión superficial en caso de medios porosos parcialmente saturados o no saturados, y, además, dificulta la medida de los valores de las variables del sistema, tal como la presión de cada fase individual, la velocidad del fluido a nivel del poro y la geometría de la entrefase líquido-vapor/gas.

El medio poroso, como medio multifase, está compuesto de fases en cada una de las cuales las propiedades son continuas, siendo discontinuas en el dominio total que corresponde al sistema. Si la escala de longitud de la fase dispersada es menor que la escala del dispositivo de medida, tal como un termopar, entonces la medida local refleja un valor promedio más bien que un verdadero valor interior de fase. Esto sugiere pues que los conceptos fundamentales, que se mantienen en cada fase a una escala mucho menor que la de la medida local, sean promediados para establecer un nuevo medio continuo que esté definido en la misma escala que la de la medida multifase.

Así en los sistemas multifase se definen tres escalas. La escala macroscópica, que es la asociada con las dimensiones globales del sistema. La escala microscópica, que es mucho menor que las dimensiones de los vacíos entre la matriz sólida discreta. Y una escala intermedia denominada mesoscópica.

A nivel de la escala macroscópica las variables dependientes son únicamente funciones del tiempo. A nivel de la escala microscópica, las variables dependientes son funciones de la posición dentro de los intersticios y del tiempo. A escala mesoscópica, las variables dependientes son funciones de la posición en el medio poroso y del tiempo, por lo que un dispositivo de medida medirá más bien un valor local promedio en el medio poroso más que un verdadero valor de fase interior.

Por consiguiente, las magnitudes fundamentales de cada fase a escala microscópica deben ser promediadas para establecer un nuevo continuo que esté definido en la misma escala que la de la medida multifase (escala mesoscópica).

No obstante, promediando las ecuaciones fundamentales para cada fase, se pierde en cada una de ellas la información acerca de los detalles de las condiciones a la escala microscópica; por ejemplo, la forma y el área de la superficie de los poros, y los perfiles de velocidad de la corriente en su interior.

El procedimiento de promediación consiste en seleccionar un volumen elemental representativo, VER, entendiendo por tal el mínimo volumen que cabe tomar del medio poroso para que en él se encuentren representadas todas las propiedades del mismo y de los procesos de transporte y transferencia que son objeto de estudio.

El algoritmo de promediación en volumen (Slattery (1969); Whitaker (1969)), se usa en el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan los procesos de transporte en los medios porosos. Los dos promedios de una determinada función de posición, que frecuentemente se emplean en las ecuaciones correspondientes a este tipo de procesos, son los llamados promedio volumétrico local y promedio intrínseco de fase.

Para cualquier función de posición, $\psi$, (velocidad, densidad, presión, temperatura, etc) asociada con el fluido, Slattery (1969) dedujo el siguiente teorema entre gradientes de medias y medias de gradientes para funciones definidas en la fase sólida y en la fase vacía y que sufren una discontinuidad escalón en la entrefase

$$<\nabla\psi>=\nabla<\psi>+\frac{1}{V}\int_{A_e}\psi.\hat{n}.dA$$

donde el promedio volumétrico local de $\psi$ está definido como

$$<\psi>=\frac{1}{V}\int_{V}\psi.dV$$

donde A es la superficie que limita el volumen V y $A_e$ es el área de la entrefase sólido-fluido contenida en el interior de V.

El promedio volumétrico de $\psi$ (asociada con la fase i) está definido como

$$<\psi_i>=\frac{1}{V}.\int_{V_i}\psi.dV=\varepsilon_i\frac{1}{V_i}\int_{V_i}\psi_i.dV=\varepsilon_i.<\psi_i>^i$$

donde $V_i$ es el volumen ocupado por la fase i dentro de V, $\varepsilon_i$ es la fracción volumétrica ocupada por la fase i respecto a V, y $<\psi_i>^i$ es el promediado intrínseco de fase i.

Así, para el análisis del flujo de calor y masa a través de un medio heterogéneo a escala macroscópica, se utilizan propiedades promediadas en volumen (propiedades efectivas), tales como la capacidad calorífica efectiva $<\rho C_p>$ y la conductividad térmica efectiva $<\lambda> \equiv \lambda_e$. .

El estudio de los fenómenos de transporte y transferencia de masa y de calor en medios porosos saturados y no saturados ha devenido de creciente interés por sus implicaciones en las áreas de ingeniería química, ambiental, mecánica, petrolera, geotérmica, etc.

Muchos son los procesos tecnológicos relacionados con los fenómenos anteriormente enumerados. Entre ellos cabe citar los asociados con:

- Reactores de lecho empaquetado catalítico e inerte.
- Filtrado.
- Secado.
- Transferencia de masa a través de membranas.
- Flujo de crudo y de gas en yacimientos.
- Producción intensificada de crudo.
- Producción de gas natural.
- Enfriamiento por transpiración.
- Tubos de calor de mecha porosa.
- Incentivación de transferencia de calor por superficies porosas.
- Energía geotérmica.
- Fluidotermia de reactores nucleares que utilizan refrigerantes gaseosos.
- Quemadores porosos radiantes.
- Convertidores catalíticos.
- Hidráulica subterránea.
- Migración de contaminantes en acuíferos.
- Intrusión salina en acuíferos costeros.
- Almacenamiento subterráneo de residuos radioactivos.
- Irrigación.
- Remediación de suelos por inyección de vapor.
- Movimiento de humedad y de calor a través de materiales de construcción.
- etc.

En todas estas aplicaciones el correcto dimensionamiento del equipo y la adecuada operación de los procesos requiere de una herramienta que nos permita conocer de antemano, con la mayor exactitud y fiabilidad posibles, el comportamiento entrada-salida del sistema. Esta herramienta es el modelo. El modelo es una versión simplificada del sistema real complejo, que simula el comportamiento de aquellas partes del sistema real que son relevantes en el problema. El primer paso al elaborar un modelo para un problema dado, en un medio poroso concreto, es declarar las hipótesis simplificadoras que transforman el sistema real en el modelo, lo que constituye el modelo conceptual. Después se representa el modelo en un formato matemático. En la mayor parte de casos de interés práctico, debido a la complejidad del problema, la única solución posible es la numérica.

Ningún modelo puede ser utilizado a no ser que los valores numéricos de los diversos coeficientes que en él aparecen sean conocidos. Estos o bien son determinados experimentalmente o bien son estimados resolviendo el "problema inverso". Aunque se dispone actualmente de algunos métodos para resolver el problema inverso, quedan todavía por resolver muchos interrogantes, entre los que cabe mencionar la cuestión de unicidad y los criterios para obtener el conjunto óptimo de coeficientes. Resulta pues que la determinación experimental de parámetros tan importantes en los problemas de transporte y transferencia de masa y calor en medios porosos como son la permeabilidad intrínseca del medio, su conductividad térmica efectiva, su difusividad de masa, etc, continúa siendo un objetivo de suma importancia, más habida cuenta de la heterogeneidad inherente en el medio poroso real.

Así, por ejemplo, sabido que la conductividad térmica efectiva de un medio poroso depende de la conductividad térmica de cada fase, de la estructura del propio medio poroso y de la conductancia de entrefase, aun siendo varios los modelos matemáticos desarrollados para definir y cuantificar dicha magnitud, la dispersión entre los valores calculados con el modelo y los obtenidos experimentalmente es todavía muy considerable.

REFERENCIAS

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SONDERGELD, C.H.; D.L. TURCOTTE (1977): "*An experimental study of two phase convection in a porous medium with applications to geological problems*"
J.Geophysical Res. 82, pp. 2045-2053.

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

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.

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

## ANTECEDENTES

Desde el primer estudio de Schrock, Fernández y Kesavan (1970) [24] sobre transferencia de calor de ebullición en medios porosos saturados por líquido, han aparecido en la literatura varios estudios teóricos y experimentales de ebullición en medios porosos. De los diferentes modos de ebullición, la ebullición de película parece ser el que con mayor facilidad se presta al análisis.

Fukusako, Komoriya y Seki (1986) [9], por un lado, Tung y Dhir (1990) [31], por otro, y también Pasek (1991) [19] han aportado datos sobre ebullición de película saturada en presencia de partículas. Por los resultados obtenidos parece ser que la presencia de matriz sólida no altera de manera significativa la mecánica del proceso de ebullición de película; sin embargo, se ha observado que los coeficientes de transferencia de calor de ebullición de película en presencia de partículas son mucho más altos que sin ellas.

Uno de los primeros estudios teóricos sobre ebullición de película se debe a Parmentier (1979) [18] quien estudio la transferencia de calor a partir de un dique de roca ígnea que penetra un acuífero. Dicho investigador concluye que en ebullición de película $Nu_z \approx \left(Ra_{z,l}\right)^{1/2}$, donde $Ra_{z,l}$ es un número de Rayleigh del líquido definido como

$$Ra_{z,l} = \rho_l . c_{pl} . g . K . z / \upsilon_l . K_m$$

Posteriormente, Cheng y Verma (1981) [5] estudiaron la ebullición de película subenfriada sobre una configuración similar a la de Parmentier sin tantas hipótesis simplificadoras. Sus resultados muestran que el número de Nusselt depende del sobrecalentamiento de pared y del grado de subenfriamiento del líquido. Ninguno de estos estudios teóricos que son de aplicación a situaciones en las que la capa de vapor es mucho más gruesa que el diámetro de las partículas ha sido verificado experimentalmente.

La ebullición nucleada difiere sustancialmente de la ebullición de película. Los contactos establecidos por las partículas que constituyen el medio poroso pueden servir como lugares de nucleación que son activados a bajos sobrecalentamientos de pared.

Además, las partículas pueden aumentar el área de superficie disponible para transferencia de calor, y la diferencia de presión capilar puede aportar una fuerza adicional para el movimiento del vapor lejos de la superficie calentada y del líquido hacia ella.

Los resultados experimentales obtenidos por Schrock, Fukusato y otros, muestran que una disminución del tamaño de partícula repercute en una reducción de los sobrecalentamientos de pared cuando ocurre ebullición nucleada y, además, los flujos específicos de calor aumentan. Cabe dar una posible explicación de este comportamiento suponiendo que el coeficiente medio de transferencia de calor sobre la superficie incluye las contribuciones de las regiones de la superficie ocupadas por líquido y por vapor; o sea,

$$h = h_l\left(1-\alpha_W\right)+h_v\alpha_W$$

La fracción de vacío en la pared, $\alpha_W$, depende del diámetro de la base de las burbujas y de la separación de los lugares de nucleación. Así, $\alpha_W$ ~ Na y Na = $A.\Delta T_W{}^m$, luego $\alpha_W \sim A.\Delta T_W{}^m$, donde $\Delta T_W$ es el sobrecalentamiento de pared y A una constante de proporcionalidad que aumenta a medida que el tamaño de partícula disminuye. Ya que $h_v << h_l$, la influencia del factor (1-$\alpha_W$) en h para sobrecalentamientos pequeños es dominante. Ello conduce a mayores coeficientes de transferencia de calor y de flujo específico de calor en partículas de pequeño tamaño.

Por los estudios experimentales realizados en la década de los 70, particularmente sobre convección bifásica en un medio poroso calentado por su frontera inferior, cabría pensar en la existencia de una capa líquida delgada, una capa de vapor o bien una capa bifásica vapor-líquido. Sondergeld y Turcotte (1978) [26] mencionan la formación de una zona bifásica isoterma por encima del fondo calentado siempre que la temperatura fuera superior a la de saturación, así como la aparición de un flujo vertical a contracorriente vapor-líquido.

Bau y Torrance (1982) [3], han estudiado la ebullición en materiales de baja permeabilidad calentándolos por una zona y enfriando por otra. En su trabajo, esencialmente experimental, relativo al estudio de los fenómenos que aparecen en el proceso de ebullición en materiales porosos de baja permeabilidad, utilizan agua, arena y bolas de vidrio. En él se desarrolla un modelo unidimensional para predecir, a partir de los resultados experimentales, la altura de la zona bifásica y la condición necesaria para que se forme.

Udell (1983) [33], utilizando medios porosos con pequeñas dimensiones de poro, realizó trabajos experimentales que ponían en evidencia la existencia de tres regiones en el medio poroso saturado calentado por su superficie inferior, a temperatura superior a la temperatura de saturación, y enfriado por la superior: una zona en el extremo calentado del medio poroso con los poros ocupados por vapor supercalentado, una zona bifásica isotérmica dominada por flujo a contracorriente y una zona de líquido en el extremo refrigerado.

La ebullición en medios porosos muy compactos (densos, de grosor > $5.10^{-2}$ m) ha sido estudiada por Udell (1985) [34] y por Torrance (1983) [30], y en matrices calentadas por fuentes internas por Stubos y colab. (1988) [27].

Más recientemente, Kim y Choi (1996) [13] analizaron numéricamente la transferencia de calor por convección natural en un medio poroso saturado cubierto por una capa de líquido y calentado desde abajo, pero sin alcanzar las condiciones de cambio de fase. Los efectos del número de Rayleigh y de la relación de espesores entre la capa de líquido superior y el medio poroso saturado, fueron estudiados en relación al comienzo de la convección.

Por otra parte, se ha investigado en varios estudios cómo puede afectar a la potencia de "dryout" parámetros tales como el espesor del lecho, el diámetro de partícula, el enfriamiento por la frontera superior del lecho, etc. Barleon y colbs. (1984) [2] encuentran una débil dependencia del flujo de calor de "dryout", $q_d$, respecto a la altura del lecho. También observaron que $q_d$ variaba aproximadamente como el cuadrado del diámetro de la partícula, siempre que éste fuera menor que 1 mm. En el caso de partículas cuyo diámetro es mayor que 2 mm la dependencia es respecto a la raíz cuadrada del diámetro, lo que en principio parece debido a un cambio de régimen: de laminar a turbulento (Barleon y Werle, 1981 [1]).

Udell (1985) [34] realiza un estudio sobre la transferencia de calor en un medio poroso calentado por un extremo y enfriado por el otro, y desarrolla un análisis unidimensional del fenómeno estacionario teniendo presente la existencia de cambio de fase y el efecto de capilaridad. De todo ello deriva un criterio para la determinación del flujo crítico de calor que define la condición mínima para la existencia de "dryout".

Eckert y Goldstein (1985) [8] estudiaron la ebullición en medios granulares simulando un generador de vapor de un reactor nuclear. En este trabajo se afronta la visualización de las condiciones de ebullición estacionaria y la extensión de la región de "dryout".

Chuah y Carey (1985) [6] llevaron a cabo un estudio teórico del transporte de calor durante la ebullición en un medio poroso de permeabilidad no uniforme, a fin de profundizar en las peculiaridades del fenómeno en relación con sistemas geotérmicos, con la colmatación del espacio de poro por contaminantes en el caso de las estructuras porosas de los tubos de calor, o con las capas de escombros que se forman después de un accidente nuclear, en las que la porosidad varía con la profundidad debido a la carga que soporta la capa y a la sedimentación diferencial de partículas de diferentes tamaños.

Posteriormente, muchos han sido los estudios llevados a cabo sobre ebullición y "dryout" de lechos de partículas cuyo fondo se encuentra sobre una placa impermeable adiabática, con generación de calor en su seno, simulando las situaciones PAHR (Post Accident Heat Removal).

Paralelamente se han hecho notables esfuerzos para modelizar la ebullición y el "dryout" en lechos de partículas. El principal objetivo de los modelos es predecir la potencia de "dryout" incipiente, principalmente el nivel de potencia justo suficiente para causar la aparición de un área seca en el lecho.

Dhir y Catton (1977) [7] presentan un modelo basado en sus experimentos. En dicho modelo la resistencia al flujo de líquido a través del lecho se expresa mediante la ley de Darcy, y la permeabilidad intrínseca se define mediante la fórmula de Kozeny. A su vez, introduciendo una constante empírica para ajustar sus resultados, proponen para el flujo de calor de "dryout" la siguiente expresión:

$$q_d = \frac{0{,}0177.\rho_l.(\rho_l - \rho_v).g.{d_p}^2.\varepsilon^3.h_{lv}}{180.(1-\varepsilon)^2.\mu_l}$$

donde $h_{lv}$ denota la entalpía de vaporización.

Hardee y Nilson (1977) [10] consideran las resistencias combinadas del flujo de líquido y de vapor y desarrollan su criterio de "dryout" en base a las leyes de conservación de masa, de cantidad de movimiento y de energía.

Shires y Stevens (1980) [25] amplían el modelo de Hardee-Nilson para incluir el efecto de fuerzas capilares, proponiendo para $q_d$ la siguiente ecuación

$$q_d = \frac{C.\rho_l.\rho_v.g.{d_p}^2.\varepsilon^3.h_{lv}}{180.(1-\varepsilon)^2.\mu_l}\left[1+\frac{4{,}29.\sigma.(1-\varepsilon)}{\varepsilon.d_p.\rho_l.g.h}\right]$$

donde C es una constante empírica.

Lipinski (1980) [16] fue más lejos presentando un modelo que combina los efectos de flujo laminar y turbulento, asume una fuerza capilar y utiliza las permeabilidades relativas para expresar la fricción en régimen bifásico. En el límite laminar (partícula pequeña) la expresión que define el flujo de calor de "dryout" se reduce a un modelo similar al de Shires-Stevens

$$q_{dL} = \frac{(\rho_l - \rho_v).g.{d_p}^2.\varepsilon^3.h_{lv}}{180.(1-\varepsilon)^2.\left[{v_v}^{0,25} + {v_l}^{0,25}\right]^4}\left[1+\frac{\lambda}{h}\right]$$

donde $$\lambda = \frac{6.\sigma.\cos\theta.(1-\varepsilon)}{\varepsilon.d_p.(\rho_l - \rho_v).g}$$

siendo λ la distancia a la que ascendería el líquido en una capa seca de partículas a partir del fondo en contra de la fuerza gravitacional (define la altura manométrica capilar del sistema). El límite turbulento (partículas grandes) da

$$q_{dT} = 0{,}756.h_{lv}\left[\frac{\rho_v(\rho_l - \rho_v).g.d_p.\varepsilon^3}{(1-\varepsilon).\left[1+\left(\rho_v/\rho_l\right)^{0,25}\right]^4}\right]^{0,5}$$

Lipinski amplia en 1982 [17] su modelo derivando una ecuación diferencial de primer orden para definir el grado de saturación a lo largo del lecho. Un modelo unidimensional similar ha sido publicado por Turland y Moore (1983), que incluye zonas subenfriadas superior e inferior.

El análisis e interpretación de los resultados experimentales disponibles requiere de herramientas matemáticas y numéricas que reúnan ciertos requisitos: la descripción del lecho debe ser completa, se han de tener en cuenta los efectos de capilaridad y se han de modelizar de modo suficientemente preciso el transporte de masa y de energía en las regiones monofásica y bifásica.

La publicación de Ramesh y Torrance (1990) [21], que se refiere al problema de la simulación numérica de los problemas de entrefase móvil, es una notable aportación al estudio paramétrico de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos cuando la región líquida y la región bifásica están acopladas por la dinámica de entrefase, allí donde se produce el cambio de fase. Los mismos autores han estudiado también el problema de la estabilidad del proceso de ebullición [22].

Los esfuerzos llevados a cabo para desarrollar un modelo de simulación numérica de los escenarios PAHR han sido considerables. Así, en base a la idea inicial de Theunissen, P.H. y otros (1985) [29] de utilizar un planteamiento adecuado entálpico para evitar el seguimiento de frontera entre las diferentes zonas de lecho, Kloker y Borsboorn (1988) [14] proponen un esquema numérico que después será adoptado por Stubos (1990) [28]. El resultado fue un código operativo de ordenador que resuelve en dos dimensiones las ecuaciones no estacionarias con un esfuerzo de cálculo razonable (Perez Caseiras, 1989 [20]). En este sentido, se emprendió paralelamente un trabajo de desarrollo de un método numérico para simulación de enfriamiento de escombros PAHR en el Ispra Joint Research Center. Las predicciones del modelo son sensibles a la forma de las relaciones constitutivas utilizadas para los parámetros del problema. La carencia de datos para el caso de lechos de partículas pequeñas y, más aun para lechos fibrilares, no han permitido aplicar fiablemente dichos modelos a la modelización de problemas como los aquí afrontados. El hecho, por otra parte, de que la fase líquida experimente un cambio de propiedades físicas como consecuencia de la adición de tensoactivos dificulta todavía más el problema.

En lo referente a la influencia de la tensión superficial en el proceso de ebullición en medios porosos, son muy escasos los estudios realizados. Sin embargo, son numerosos los estudios experimentales acerca de la influencia de los agentes tensoactivos en el proceso de ebullición del agua "libre". En general, estos estudios indican que el coeficiente de transferencia de calor en la ebullición incrementa con la adición de pequeñas cantidades de tensoactivos ([4],[11],[12],[15],[23],[35],[36],[37]). La existencia de una relación potencial entre el coeficiente de transferencia de calor, h, y la tensión superficial, $\sigma$, ([11],[12]), $h \propto \sigma^n$, donde el exponente n varía entre -2,5 y +1,275 (valores publicados) hace pensar en la posibilidad de obtener cambios significativos del valor de h en ebullición variando la tensión superficial del líquido por adición de tensoactivos. La mayoría de investigadores relacionan un incremento del valor del coeficiente de transferencia de calor con la reducción de la tensión superficial; sin embargo, el mecanismo que causa dicho incremento no está todavía claro.

## REFERENCIAS

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

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

[3] 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

[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.

[5] 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

[6] 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

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

[8] ECKERT, E.R. y GOLDSTEIN (1985)
"*Boiling in unconstricted granular medium*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 28

[9] 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.

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

[11] 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

[12] JONTZ, P.D. & MYERS, J.E. (1960)
"*The effect of dynamic surface tension on nucleated boiling coefficients*", A.I.Ch.E.Journal, 6, pp.34-38

[13] 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

[14] 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.

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

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

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

[18] 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.

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

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

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

[22] 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

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

[24] 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.

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

[26] 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

[27] 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 .

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

[29] 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.

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

[31] 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

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

[33] 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.

[34] UDELL, K.S. (1985)

"*Heat transfer in porous media considering phase change and capillarity-the heat pipe effect*", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 23, nº 2

[35] 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.

[36] WU, W.T. & YANG, Y.M. (1992)

"*Enhanced boiling heat transfer by surfactant additives*". Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Pool and External Flow Boiling.

[37] 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.

Las referencias siguientes han sido consultadas con el fin de contrastar información extraída de otras obras posteriores:

CLAUDEL y colab. (1984)

"*The rate of heat transfer for boiling on porous surface*", Applied Energy, 16

CORNWELL, K., NAIR, B.G. y PATTEN, T.D. (1976)

"*Observation of boiling in porous media*", Int.J.Heat Mass Transfer, 19, pp. 236-238

FERRELL, J.K. y ALLEAVITCH, J. (1970)

"*Vaporization heat transfer in capillary wick estructures*", Chem.Engng.Prog.Symp.Ser. nº 102, 66, pp. 82-91.

KAVALEV, S.A. y LEUKOV, V.A. (1981)

"*Boiling crisis mechanism in porous layer*", Teploenergètika.

MOSS, R.A. y KELLY, A.J. (1970)

"*Neutron radiographic study of limiting planar heat pipe performance*", Int.J.Heat Mass Transfer, 13, pp.491-502

## OBJETIVOS

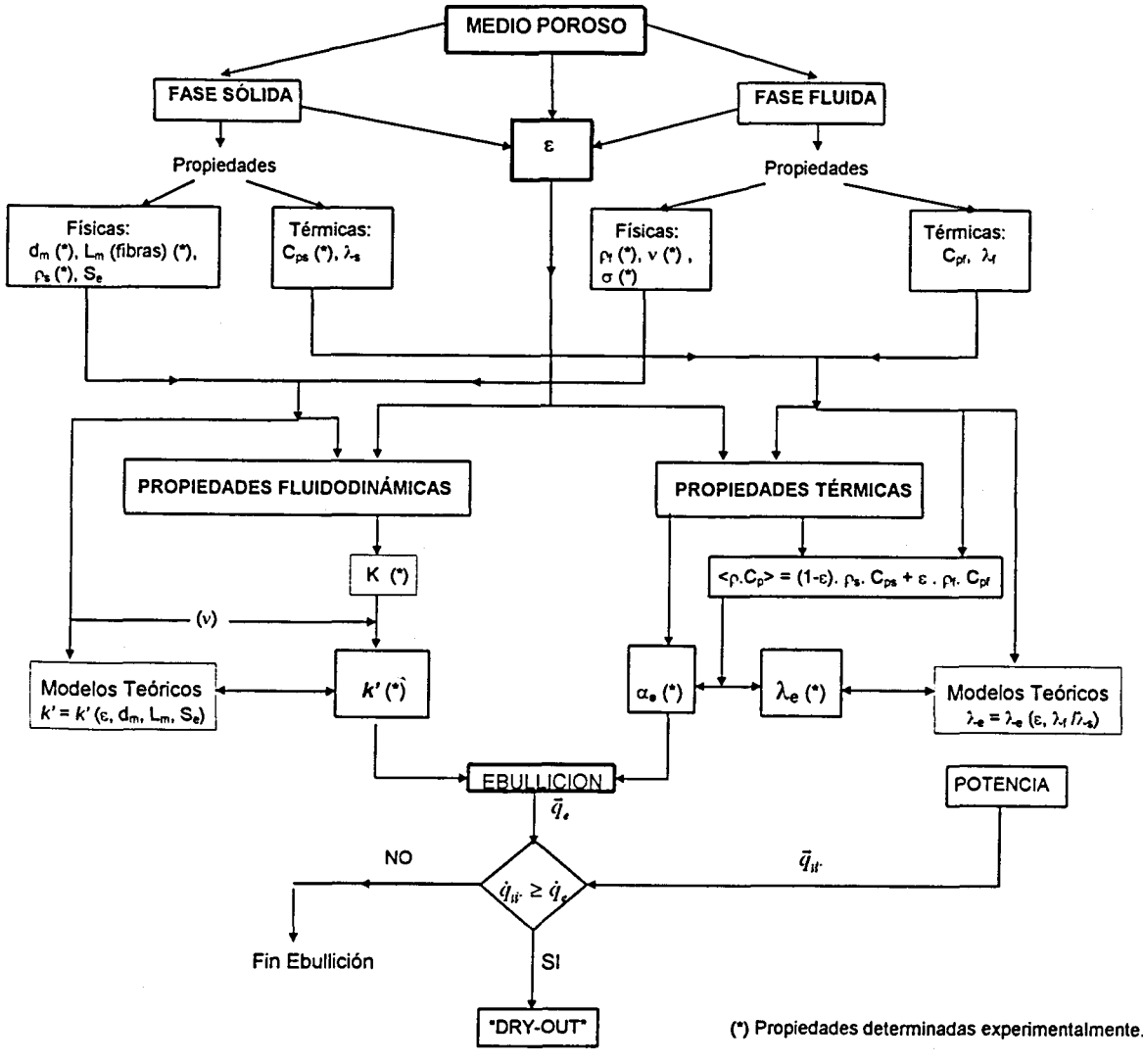
Los objetivos planteados en el desarrollo de esta Tesis han sido establecidos por la necesidad de un mejor conocimiento de la influencia de varios parámetros estructurales del medio poroso, así como de las propiedades de las substancias que constituyen la matriz sólida y la fase fluida saturante, en las características de ebullición de un medio poroso inicialmente saturado, calentado por su frontera inferior y limitado por una capa superior del mismo líquido saturante.

A tal fin, se estudia la influencia de la estructura del medio poroso y de la naturaleza de la substancia que constituye la matriz sólida sobre la permeabilidad del medio poroso al agua y a una solución acuosa de tensioactivo, de baja concentración. Lo mismo se hace respecto de la conductividad térmica y la difusividad térmica efectivas en régimen no estacionario. Por último, utilizando la misma variedad de medios porosos, se estudia el proceso de ebullición hasta que se alcanzan condiciones de "dryout", y se analizan las consecuencias que resultan de la variación de la estructura física del medio poroso, de la naturaleza de la substancia que constituye su matriz sólida, y de las propiedades del fluido saturante.

Con anterioridad al estudio del proceso de calentamiento y de ebullición-"dryout", se realiza la caracterización en primer lugar de las fases constituyentes del medio poroso (fase sólida –partículas metálicas, arena y fibras de algodón- y fase líquida -agua destilada y agua destilada con adición de tensioactivo-). Posteriormente se realiza la parametrización del medio poroso en lo concerniente a su comportamiento fluidodinámico y térmico, con la determinación experimental de su permeabilidad y difusividad térmica efectiva.

Una vez caracterizados los diversos medios porosos, se pasó al estudio del proceso de calentamiento de los medios porosos inicialmente saturados, calentados por su frontera inferior y limitados por una capa superior del mismo líquido saturante a través de una membrana permeable. Dicho estudio permitió determinar la influencia que sobre dicho proceso tienen las propiedades de las fases constituyentes del medio y la estructura del medio poroso.

Un cuadro sinóptico que muestra el proceso desarrollado para la realización de la tesis se muestra en la página siguiente.


MEDIO POROSO
FASE SÓLIDA
ε
FASE FLUIDA
Propiedades
Propiedades
Físicas:
$d_m$ (*), $L_m$ (fibras) (*),
$\rho_s$ (*), $S_e$
Térmicas:
$C_{ps}$ (*), $\lambda_s$
Físicas:
$\rho_f$ (*), $\nu$ (*) ,
$\sigma$ (*)
Térmicas:
$C_{pf}$, $\lambda_f$
PROPIEDADES FLUIDODINÁMICAS
PROPIEDADES TÉRMICAS
K (*)
$\langle \rho.C_p \rangle = (1-\varepsilon).\ \rho_s.\ C_{ps} + \varepsilon\ .\ \rho_f.\ C_{pf}$
(ν)
Modelos Teóricos
$k' = k'(\varepsilon, d_m, L_m, S_e)$
$k'$ (*)
$\alpha_e$ (*)
$\lambda_e$ (*)
Modelos Teóricos
$\lambda_e = \lambda_e(\varepsilon, \lambda_f / \lambda_s)$
EBULLICION
POTENCIA
$\vec{q}_e$
NO
$\dot{q}_{ut} \geq \dot{q}_e$
$\vec{q}_{ut}$
Fin Ebullición
SI
"DRY-OUT"
(*) Propiedades determinadas experimentalmente.

Los objetivos perseguidos en la realización del estudio son por tanto los siguientes:

i) estudio de la influencia de la naturaleza de la substancia constituyente de la matriz sólida y de la estructura del medio poroso sobre la permeabilidad del medio poroso al agua y a una solución de tensioactivo.

ii) estudio de la influencia de la naturaleza de la substancia que constituye la matriz sólida y de la estructura del medio poroso sobre la conductividad térmica y la difusividad térmica efectivas del medio poroso saturado con agua o con solución de tensioactivo.

iii) estudio del proceso de calentamiento de los distintos medios porosos saturados hasta alcanzar la ebullición de su fase líquida y condiciones de "dryout"; estudio de la propagación de un frente de vapor, de la formación de canales de vapor y de la posibilidad de basculamiento de líquido subenfriado en las condiciones próximas a "dryout".

iv) analizar las consecuencias que se derivan de la variación de la estructura física del medio poroso, de la naturaleza de la substancia que constituye la matriz sólida y de las propiedades del fluido saturante.

v) proponer a partir de los resultados obtenidos un modelo físico de dicho proceso.

Cabe señalar que no se ha contemplado, en el marco de esta tesis, la realización de un modelo de simulación por aplicación de métodos numéricos a las ecuaciones que gobiernan el proceso estudiado por considerarse que excedía de los límites del trabajo propuesto. No obstante, con los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis se espera haber conseguido un mayor conocimiento del proceso en estudio que contribuya a una posterior realización de dicho modelo.

# CAPÍTULO I .- CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA DE LOS CONSTITUYENTES DEL MEDIO POROSO


## RESUMEN

En un primer apartado se especifican las principales características físicas de la fase sólida constituyente de los medios porosos considerados (distribución de tamaños de partícula, longitud y diámetro de fibra, densidad, superficie específica, calor específico y conductividad térmica). En un segundo apartado se realiza la caracterización de la fase fluida que estará constituida en primer lugar por agua destilada y en segundo lugar por agua destilada con tensioactivo.
Por último, se discute la incidencia de la incorporación de un agente tensioactivo sobre las características de la fase fluida y sobre las características de entrefase y de transición de fase.


## 1.1.- FASE SÓLIDA

Los materiales sólidos utilizados han sido escogidos con el objeto de disponer de una gama de diferentes tipos de matrices sólidas, tanto en lo referente a su estructura como composición y propiedades. Así se ha dispuesto como fase sólida de: arena ( como medio poroso granular), bronce y acero inoxidable (como medios porosos pulverulentos) y algodón (como medio poroso fibrilar).

Los materiales metálicos fueron suministrados por Sintermetal, S.A. siendo estos acero inoxidable 316 L y bronce (90% Cu, 10% Sn).

La matriz granular estuvo formada esencialmente por granos de cuarzo procedente de arena de playa sometida a un proceso de lavado con el fin de eliminar todas las impurezas susceptibles de modificar sus propiedades físicas y químicas. La matriz fibrilar estuvo constituida por algodón.

Para la caracterización de estos materiales se han tenido en cuenta tanto parámetros de tipo estructural (distribución de tamaño de partícula, longitud y diámetro de fibras, y superficie específica) como parámetros de carácter físico y térmico (densidad, calor específico y conductividad térmica).

A continuación vamos a exponer cómo se ha evaluado cada uno de estos parámetros correspondientes a las distintas matrices sólidas.

### 1.1.1.- Distribución de tamaños de partícula

La determinación de la distribución de tamaños de partícula de los materiales pulverulentos (bronce y acero inoxidable), se realizó mediante un analizador de tamaño de partícula por difracción de rayo láser de la serie COULTER LS de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad de Barcelona.

#### BRONCE

Los resultados para el caso del bronce están representados en la figura 1.1 . Como se observa en la figura 1.1. (A) , el bronce presenta una distribución en volumen del diámetro de partículas unimodal, con un rango desde 161,9 μm a 276,8 μm. La figura 1.1. (B) muestra la curva granulométrica para la misma muestra representando, en escala semilogarítmica, el diámetro de partícula respecto al porcentaje de volumen acumulado de partículas de diámetro superior al indicado. De la curva granulométrica se ha obtenido el diámetro medio de partícula considerando que el 85% de la muestra tiene un diámetro superior a 208,23 μm, mientras el 15% tienen un diámetro superior a 262,84 μm:

$\delta = (262,84 - 208,23)/2 = 27,31$ μm siendo el diámetro medio de $d_m = 235,54$ μm.

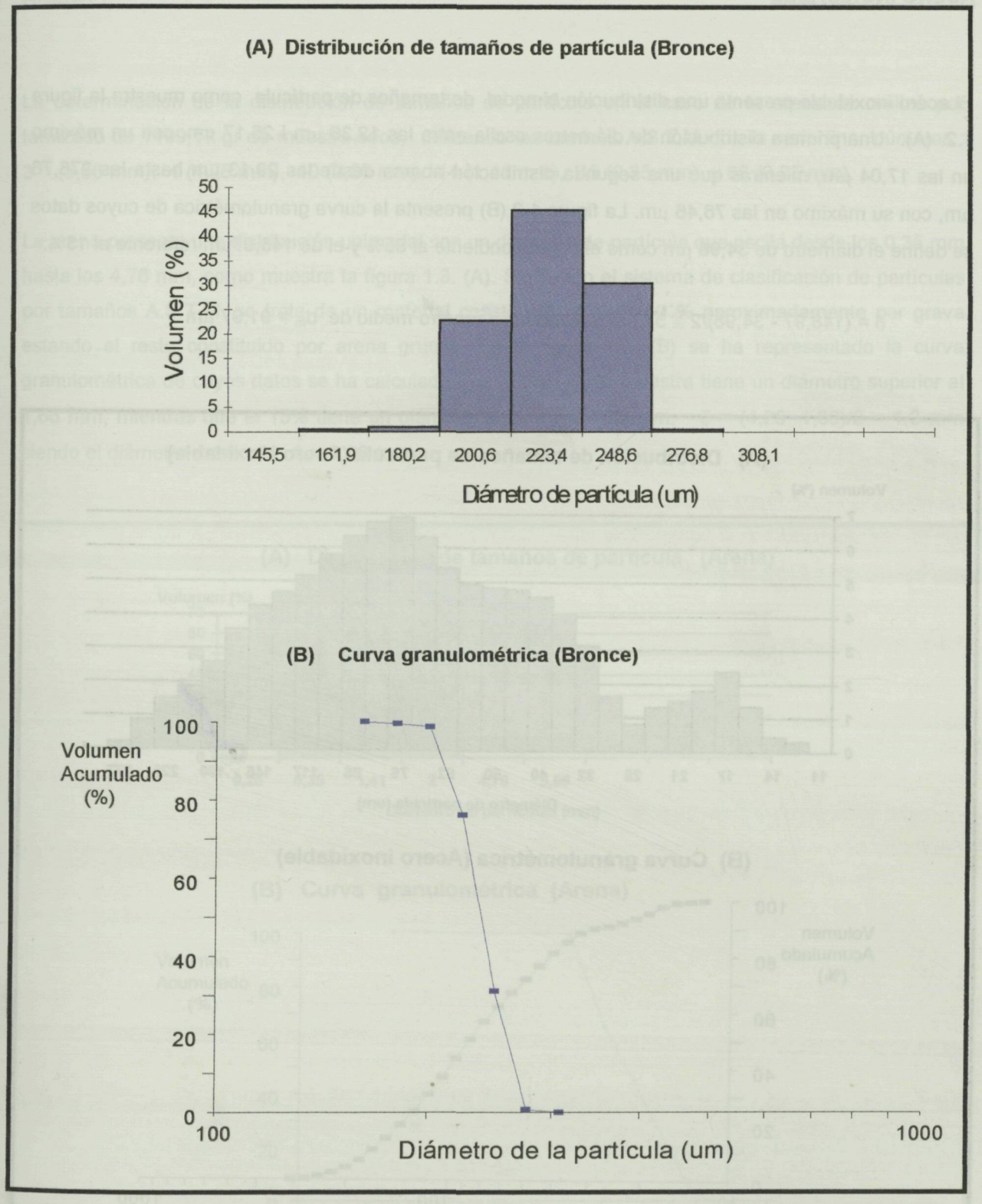



Figura 1.1.- Evaluación de la distribución de tamaños de partícula correspondiente al bronce.

(A) Distribución en volumen de tamaños de partícula.

(B) *Curva granulométrica.*

## ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable presenta una distribución bimodal de tamaños de partícula como muestra la figura 1.2. (A). Una primera distribución de diámetros oscila entre las 12,36 μm i 26,17 μm, con un máximo en las 17,04 μm, mientras que una segunda distribución abarca desde las 29,13 μm hasta las 276,76 μm, con su máximo en las 76,46 μm. La figura 1.2.(B) presenta la curva granulométrica de cuyos datos se define el diámetro de 34,98 μm como el correspondiente al 85% y el de 148,97μm referente al 15%:

$\delta = (148{,}97 - 34{,}98)/2 \cong 57\ \mu m$ siendo el diámetro medio de $d_m = 91{,}97\ \mu m$

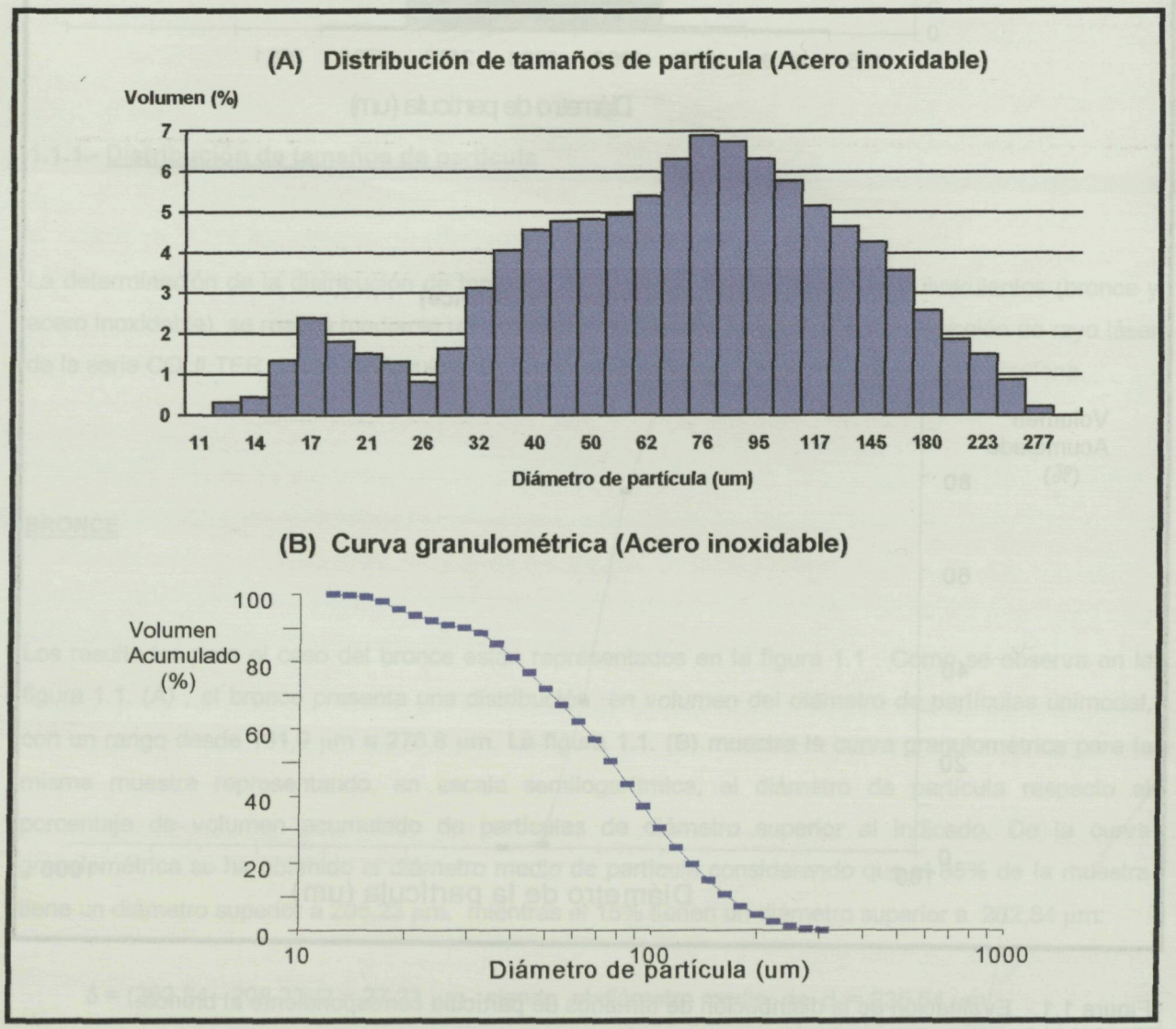



Figura 1.2.- Evaluación de la distribución de tamaños de partícula correspondiente al acero (A) Distribución en volumen de tamaños de partícula. (B) Curva granulométrica.

## ARENA

La determinación de la distribución de tamaños de partícula en el caso de la arena se realizó por tamizado de 1409,17 gr de muestra seca, utilizando los tamices A.S.T.M. de la serie fina números : $3^{1/2}$ (5,66 mm), 4 (4,76 mm), 10 (2,00 mm), 14 (1,41 mm), 45 (0,35 mm) y 60 (0,25 mm).

La arena presenta una distribución unimodal con un diámetro de partícula que oscila desde los 0,35 mm hasta los 4,76 mm, como muestra la figura 1.3. (A). Siguiendo el sistema de clasificación de partículas por tamaños A.S.T.M. se trata de un material constituido en un 61,2 % aproximadamente por grava estando el resto constituido por arena gruesa. En la figura 1.3. (B) se ha representado la curva granulométrica de cuyos datos se ha calculado que el 85% de la muestra tiene un diámetro superior al 1,66 mm, mientras que el 15% tiene un diámetro superior a 4,26 mm: $\delta = (4{,}26 - 1{,}66)/2 = 1{,}3$ mm siendo el diámetro medio de $d_m = 2{,}96$ mm.

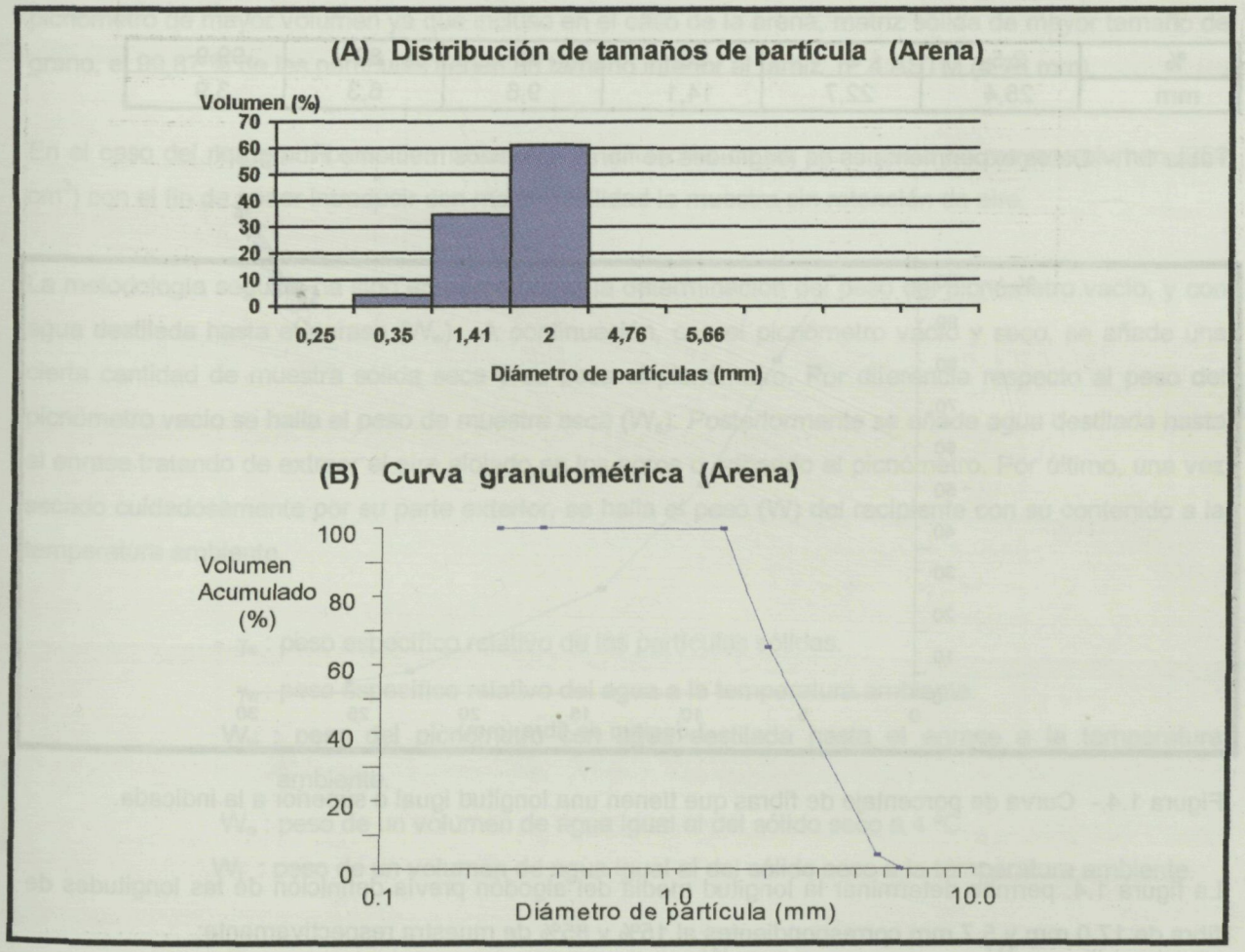



Figura 1.3.- Evaluación de la distribución de tamaños de partícula correspondiente a la arena. A) Distribución en volumen de tamaños de partícula. B) Curva granulométrica.

## ALGODÓN

Para la determinación de los parámetros geométricos de la matriz fibrilar, como son el diámetro y la longitud de las fibras de algodón, se ha contado con las pruebas realizadas por el Instituto de Investigación Textil de Terrassa.

### Longitud de las fibras :

La longitud de las fibras se obtuvo mediante el método electrónico Fibrograph, el cual mide la longitud de la fibra haciendo pasar un estrecho rayo de luz a través de la muestra. La sombra obtenida es directamente proporcional al número de fibras de una determinada longitud.

Los resultados experimentales obtenidos sobre la muestra de algodón son tabulados en la tabla 1.1. y representados en la figura 1.4.

| % | 2,5 | 5 | 25 | 50 | 80 | 99,9 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | 25,4 | 22,7 | 14,1 | 9,6 | 6,3 | 3,9 |

Tabla 1.1.- Datos experimentales de longitudes de fibras obtenidos mediante Fibrograph.

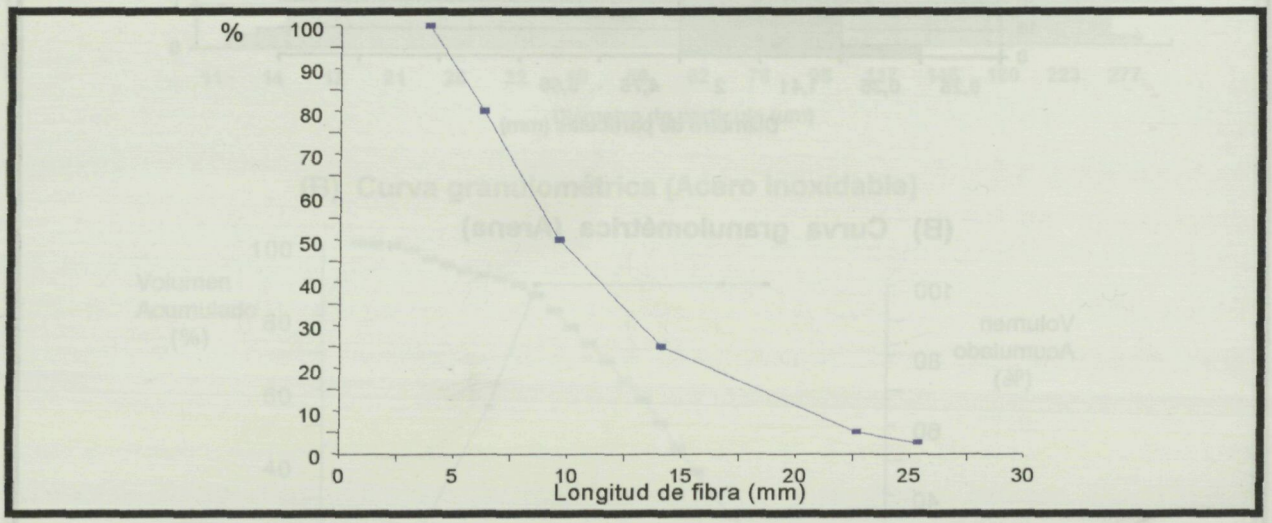



Figura 1.4.- Curva de porcentaje de fibras que tienen una longitud igual o superior a la indicada.

La figura 1.4. permite determinar la longitud media del algodón previa definición de las longitudes de fibra de 17,0 mm y 5,7 mm correspondientes al 15% y 85% de muestra respectivamente:

$\delta = (17,0 - 5,7)/2 = 5,65$ siendo la longitud media de fibra de $L_m = 11,35$ mm

**Diámetro de fibra:**

La determinación del diámetro de las fibras se realizó mediante observación al microscópio. La estructura presentada por el algodón es irregular no siendo constante el diámetro a lo largo de una misma fibra. Tomando la media de una veintena de medidas se obtuvo un diámetro medio de $d_f$ =14,55 μm.

### 1.1.2.- Densidad

La determinación experimental de la densidad de los constituyentes de las diferentes matrices sólidas granulares se ha realizado mediante un picnómetro de 50 $cm^3$, no siendo necesario la utilización de un picnómetro de mayor volumen ya que incluso en el caso de la arena, matriz sólida de mayor tamaño de grano, el 99,87 % de las partículas tienen un tamaño inferior al tamiz nº 4 ASTM (4,76 mm).

En el caso del material fibroso fue necesario la utilización de un picnómetro de mayor volumen (250 $cm^3$) con el fin de poder introducir con mayor facilidad la muestra sin retención de aire.

La metodología seguida ha sido en primer lugar la determinación del peso del picnómetro vacío, y con agua destilada hasta el enrase ($W_w$). A continuación, con el picnómetro vacío y seco, se añade una cierta cantidad de muestra sólida seca y se pesa el picnómetro. Por diferencia respecto al peso del picnómetro vacío se halla el peso de muestra seca ($W_s$). Posteriormente se añade agua destilada hasta el enrase tratando de extraer el aire alojado en los poros o adherido al picnómetro. Por último, una vez secado cuidadosamente por su parte exterior, se halla el peso (W) del recipiente con su contenido a la temperatura ambiente.

$\gamma_s$ : peso específico relativo de las partículas sólidas.

$\gamma_w$ : peso específico relativo del agua a la temperatura ambiente.

$W_w$ : peso del picnómetro con agua destilada hasta el enrase a la temperatura ambiente.

$W_o$ : peso de un volumen de agua igual al del sólido seco a 4 ºC.

$W_t$ : peso de un volumen de agua igual al del sólido seco a la temperatura ambiente.

El peso específico relativo de las partículas será: $\gamma_s = \frac{W_s}{W_o}$ o sea $\gamma_s = \gamma_w \frac{W_s}{W_t}$

$$\gamma_s = \gamma_w \cdot \frac{W_s}{W_w + W_s - W}$$

Los datos experimentales obtenidos se muestran en la tabla 1.2.

| MATERIAL | TEMPERATURA (° C) | $W_s$ (g) | $\gamma_w$ | $W_w$ (g) | W (g) | $\gamma_s$ (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BRONCE | 17 | 20,132 | 0.998804 | 91,91 | 109,748 | 8,7654 |
| | 17 | 10,413 | 0,998804 | 91,91 | 101,062 | 8,2478 |
| | 17 | 40,063 | 0,998804 | 91,91 | 127,358 | 8,6706 |
| | 17 | 30,842 | 0,998804 | 91,91 | 119,179 | 8,6216 |
| | 17 | 48,327 | 0,998804 | 91,91 | 134,712 | 8,7365 |
| | 17 | 78,463 | 0,998804 | 91,91 | 161,305 | 8,6424 |
| ACERO | 19 | 20,387 | 0,998434 | 91,91 | 109,541 | 7,3857 |
| | 19 | 11,346 | 0,998434 | 91,91 | 101,785 | 7,7010 |
| | 19 | 32,176 | 0,998434 | 91,91 | 119,914 | 7,7003 |
| | 19 | 42,006 | 0,998434 | 91,91 | 128,492 | 7,7323 |
| | 19 | 50,590 | 0,998434 | 91,91 | 136,959 | 7,7222 |
| | 19 | 64,906 | 0,998434 | 91,91 | 148,425 | 7,7231 |
| ARENA | 19 | 7,658 | 0,998434 | 91,91 | 96,643 | 2,6140 |
| | 19 | 15,452 | 0,998434 | 91,91 | 101,474 | 2,6202 |
| | 19 | 22,589 | 0,998434 | 91,91 | 105,877 | 2,6158 |
| | 19 | 45,382 | 0,998434 | 91,91 | 119,982 | 2,6176 |
| | 19 | 56,111 | 0,998434 | 91,91 | 126,620 | 2,6178 |
| | 19 | 11,398 | 0,998434 | 91,91 | 98,948 | 2,6101 |
| | 19 | 3,690 | 0.998434 | 91,91 | 94,187 | 2,6074 |
| | 19 | 7,920 | 0,998434 | 91,91 | 96,795 | 2,6055 |
| | 19 | 14,944 | 0,998434 | 91,91 | 101,149 | 2,6153 |
| | 19 | 11,735 | 0,998434 | 91,91 | 99,162 | 2,6136 |
| | 19 | 27,217 | 0,998434 | 91,91 | 108,740 | 2,6162 |
| ALGODÓN | 26 | 1,7 | 0,996814 | 354,0 | 354,10 | 1,059 |
| | 26 | 2,8 | 0,996814 | 354,0 | 354,40 | 1,163 |
| | 26 | 4,5 | 0,996814 | 354,0 | 354,50 | 1,121 |
| | 26 | 1,1 | 0,996814 | 354,0 | 354,30 | 1,371 |
| | 26 | 2,5 | 0,996814 | 354,0 | 354,50 | 1,246 |
| | 26 | 6,4 | 0,996814 | 354,0 | 354,70 | 1,119 |
| | 26 | 7,3 | 0,996814 | 354,0 | 355,10 | 1,174 |
| | 26 | 10,8 | 0,996814 | 354,0 | 355,50 | 1,157 |

Tabla 1.2.- Datos experimentales obtenidos en la determinación de la densidad de los materiales constituyentes de las distintas matrices sólidas.

Los datos obtenidos ($\gamma_s$) hacen referencia al peso específico de las partículas, no obstante dadas las unidades empleadas, la densidad ($\rho_s$) de las partículas viene expresada por el mismo valor numérico.

A partir de los datos anteriores se ha calculado, según una distribución de Student, los intérvalos de confianza correspondientes a la densidad media de los diferentes materiales, considerando un coeficiente de confianza del 95 %. Los resultados se muestran en la tabla 1.3.

| MATERIAL | n-1 | $\rho_s$ (kg/m$^3$) | $S_n$ | p(%) | $t_p$ | Intervalo de confianza (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BRONCE | 5 | **8614,05** | 171,32 | 5 | 2,571 | **8525,96 - 8702,14** |
| ACERO | 5 | **7660,77** | 123,57 | 5 | 2,447 | **7600,29 - 7721,24** |
| ARENA | 10 | **2613,95** | 4,33 | 5 | 2,228 | **2612,98 - 2614,91** |
| ALGODÓN | 7 | **1176,25** | 89,04 | 5 | 2,365 | **1146,17 - 1206,33** |

Tabla 1.3. - Valores de los intervalos de confianza de la densidad de los diferentes materiales, donde n-1 son los grados de libertad, $\rho$ es la media aritmética de los valores experimentales de densidad, $S_n$ es la desviación típica, p (%) es el nivel de significación y $t_p$ es el valor de p por ciento de t para n-1 grados de libertad.

Como se observa en la tabla 1.3. los valores de densidad obtenidos de los diferentes materiales son bastante coherentes con los valores dados por la bibliografía. Así para el bronce (88-90 % Cu, 10-12 % Sn -C90700-) el valor de densidad dado por la bibliografía es de 8650 kg/m$^3$ y para el acero inoxidable austenítico entre 7680 kg/m$^3$ y 8060 kg/m$^3$.

Como se ha comentado anteriormente, el constituyente principal de la arena es cuarzo cuya densidad es de 2640 kg/m$^3$. Y por último el algodón, al que la bibliografía da una densidad de 1470 kg/m$^3$.

### 1.1.3.- Superficie específica

En un principio estaba prevista la determinación de la superficie específica por el método de adsorción (BET), utilizando el aparato Surface Analyzer de Micromeritics, con que cuenta el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa. Ante las dificultades que surgieron en la puesta a punto de la técnica experimental y la falta de repuestos "ad hoc" se tuvo que desistir. Por ello, la determinación de la superficie específica de las distintas matrices sólida se realizó de forma teórica, asimilando las diferentes partículas sólidas a partículas equivalentes de geometría conocida.

**BRONCE**

Las partículas de bronce presentan una forma claramente esférica con un redondeamiento de 0,9 en la clasificación de Krumbein y Sloss (1955) (7).

Para la determinación de la superficie específica de las partículas se han asimilado éstas a una esfera equivalente de diámetro igual al diámetro medio de partícula $d_m$ = 235,5 μm , siendo por tanto su superficie de $1{,}74.10^{-7}$ $m^2$ y su volumen de $6{,}84.10^{-12}$ $m^3$. Por lo que la superficie específica de una partícula de bronce se estima en $S_e = 25443{,}56$ $m^{-1}$.

**ACERO INOXIDABLE**

Las partículas de acero inoxidable muestran una forma más irregular con un redondeamiento de aproximadamente de 0,3 en la clasificación de Krumbein y Sloss (1955) (7).

Asimilando éstas a una esfera equivalente de diámetro el diámetro medio de partícula $d_m$ = 91,97 μm, su superficie es de $2{,}66.10^{-8}$ $m^2$ y su volumen de $4{,}07.10^{-13}$ $m^3$, dando una superficie específica para una partícula de acero de $S_e = 65356{,}26$ $m^{-1}$.

**ARENA**

Los granos de arena presentan una forma aproximadamente esférica con un redondeamiento de 0,5 en la clasificación de Krumbein y Sloss (1955) (7).

Asimilando una esfera equivalente de diámetro el diámetro medio de la arena $d_m$ = 2,96 mm, la superficie de la esfera es de $2{,}75.10^{-5}$ $m^2$ y su volumen de $1{,}36.10^{-8}$ $m^3$, siendo la superficie específica estimada para los granos de arena de $S_e = 2022{,}06$ $m^{-1}$.

ALGODÓN

En el caso de la matriz fibrilar, las fibras de algodón se han asimilado a cilindros con valores de diámetro y longitud los correspondientes a los valores medio de fibra ($d_m$ = 14,55 μm y $L_m$ = 11,35 mm). La superficie del cilindro es de 5,19.$10^{-7}$ $m^2$ y su volumen de 1,89.$10^{-12}$ $m^3$, dando una superficie específica estimada para las fibras de algodón de $S_e$ = 274603,17 $m^{-1}$.

### 1.1.4.- Calor específico

El calor específico de las matrices sólidas granulares (bronce, acero inoxidable y arena) fue analizado experimentalmente en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Se determinaron los calores específicos de dos muestras de cada material, para un rango de temperatura desde 0 °C a 160 °C.

BRONCE

El calor específico del bronce fue determinado en dos muestras de 9,83 mg y 9,28 mg para la muestra 1 y 2, respectivamente. La figura 1.5 muestra la representación de los valores experimentales de calor específico obtenidos respecto a la temperatura de determinación.

Como se puede apreciar en la figura 1.5. los resultados experimentales obtenidos muestran una notable dispersión. Si bien los resultados que corresponden a la muestra 2 tienen un orden de magnitud próximo al valor que se encuentra en la literatura, bien es verdad que los correspondientes a la muestra 1 se desvían considerablemente, no observándose una relación significativa. No se encontró justificación de esta anomalía, por lo que se optó por considerar el calor específico del bronce (88-90% Cu, 10-12 % Sn -C90700-) obtenido a partir de la bibliografía (2):

$$c_p = 376{,}00 \text{ J / kg.K a } 20 \text{ °C}$$

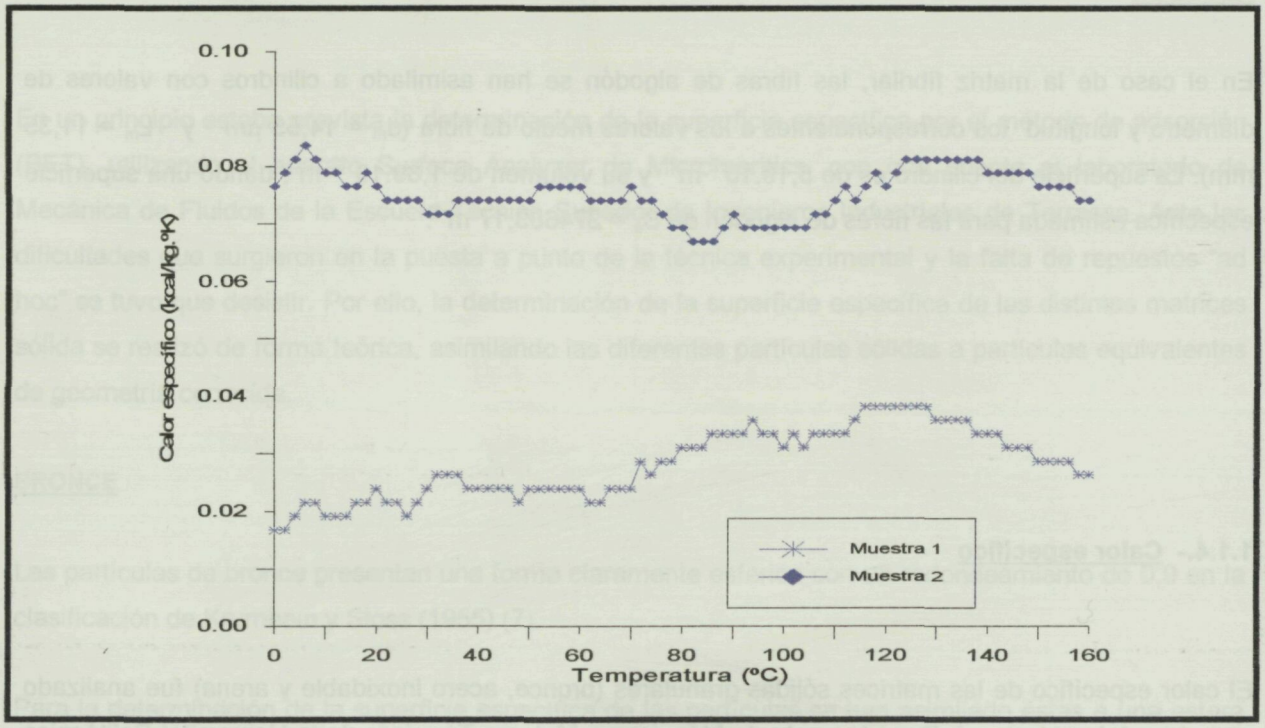



Figura 1.5 .- Representación calor específico respecto temperatura para las muestras de bronce.

## ACERO INOXIDABLE

Las muestras de acero inoxidable tomadas para la determinación del calor específico fueron de 9,77 mg para la muestra 1 y de 9,80 mg para la muestra 2. En la figura 1.6 se ha representado los valores experimentales de calor específico obtenidos frente a la temperatura de determinación. Como en el caso del bronce, los resultados experimentales del acero no reflejan una relación significativa del calor específico con la temperatura, por lo que se ha optado por considerar el calor específico obtenido de la bibliografía (2) referente al acero 316L:

$$c_p = 502{,}01 \text{ J / kg.K} \quad \text{a} \quad 20\ ^{\circ}\text{C}$$

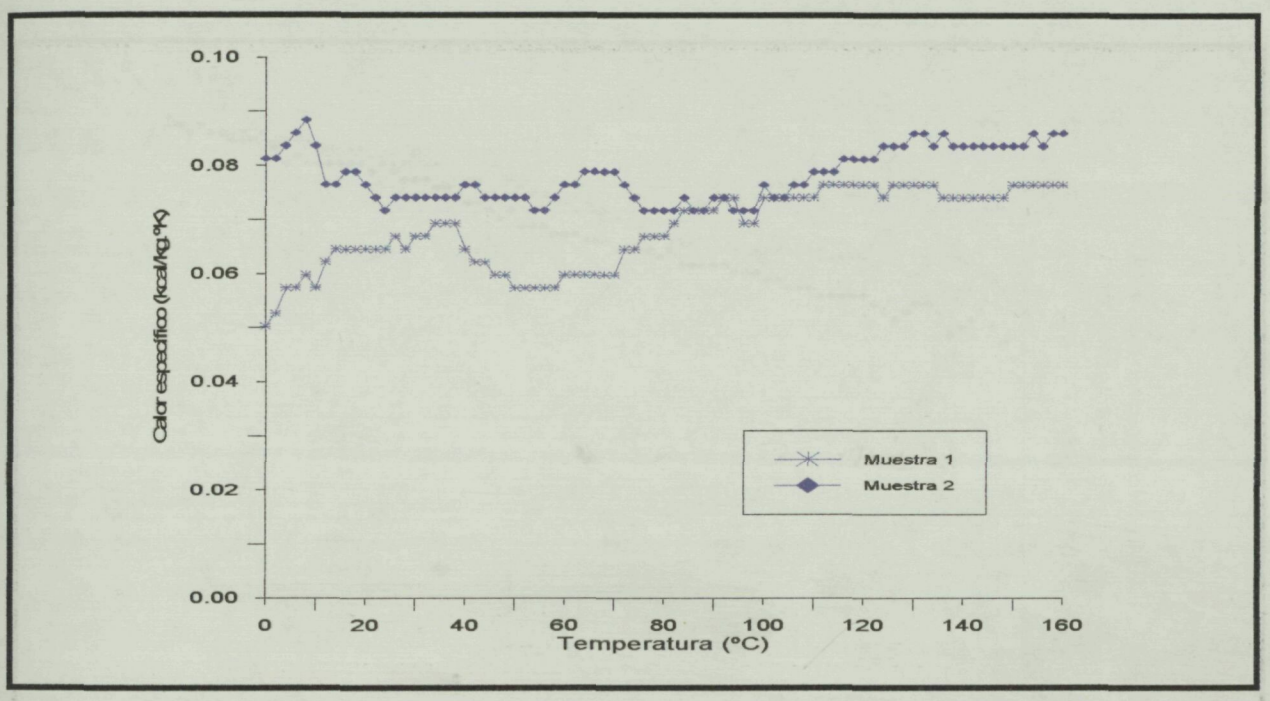



Figura 1.6 .- Representación de los valores de calor específico frente temperatura para las muestras de acero inoxidable.

**ARENA**

Previa realización de las pruebas, las muestras de arena fueron sometidas a un proceso de molturación con el fin de disminuir su tamaño de partícula y prepararlas para ser introducidas en la cápsula de medida. Las muestras utilizadas para la determinación del calor específico fueron de 9,81 mg para la muestra 1 y de 9,26 mg para la muestra 2.

En la figura 1.7 se representan los datos experimentales de calor específico en función de la temperatura para ambas muestras. Calculadas las regresiones lineales correspondientes a cada gráfica se obtuvo:

Muestra 1 :

$c_p$ (kcal/kg.K) = 0,125081 + 3,54118.$10^{-4}$ T (ºC) con un coeficiente de correlación de 0,990

Muestra 2:

$c_p$ (kcal/kg.K) = 0,111518 + 4,28524.$10^{-4}$ T (ºC) con un coeficiente de correlación de 0,994

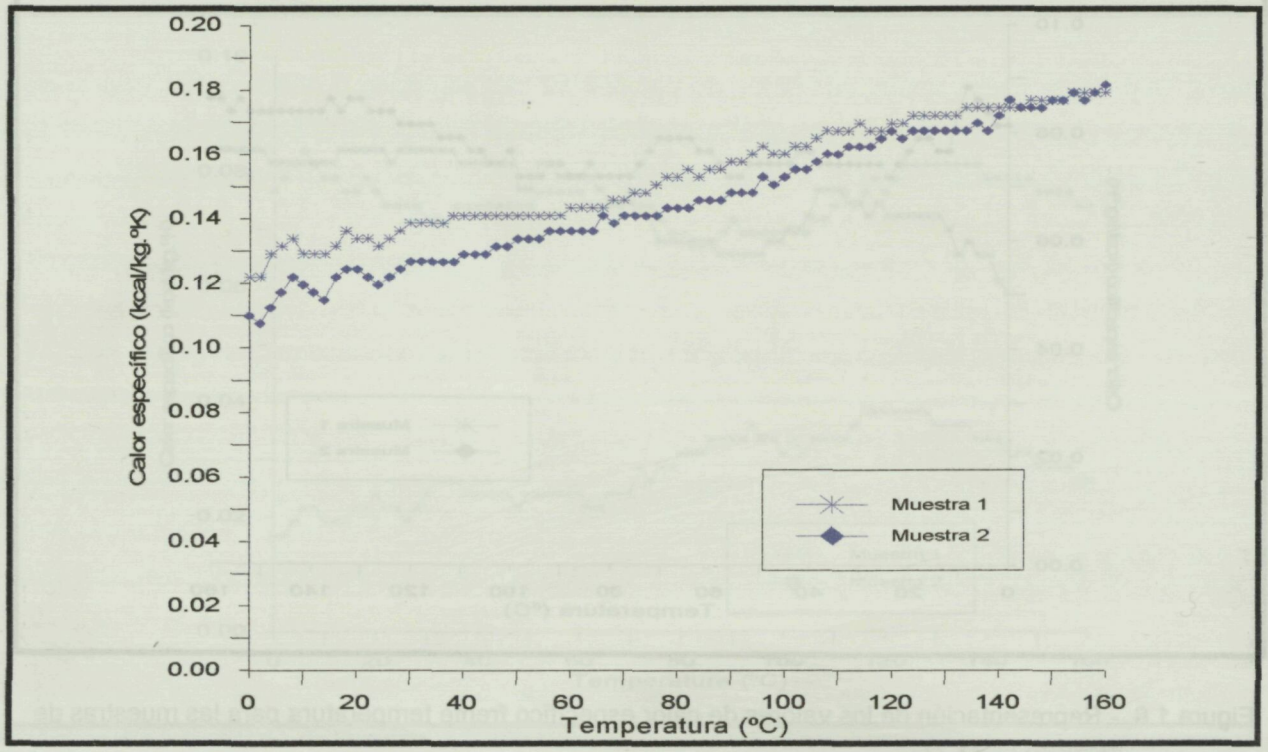



Figura 1.7.- Representación del valor de calor específico respecto a la temperatura correspondientes a las muestras de arena.

Como se aprecia en la figura 1.7., los datos de calor específico de ambas muestras se aproximan a medida que aumenta la temperatura. Para bajas temperaturas se ha optado por realizar una media de los datos y obtener su regresión lineal:

Valores medios:

$$c_p\ (J/kg.K) = 495{,}14465 + 1{,}637874.T\ (ºC)$$ con un coeficiente de correlación de 0,994.

**ALGODÓN**

No se ha podido realizar las pruebas para la determinación del calor específico del algodón por lo que se utilizado el valor dado por la bibliografía (5):

$$c_p = 1329{,}98\ J / kg.K \quad a\ 20\ ºC$$

### 1.1.5.- Conductividad térmica

La conductividad térmica de las diferentes matrices sólidas se han establecido a partir de los valores dados por la bibliografía ((2), (5)) y son mostrados en la tabla 1.4.

| MATRIZ SÓLIDA | T (°C) | λ (J/s.m.K) |
|---|---|---|
| BRONCE (88-90% Cu/10-12% Sn) | 20 | 71,00 |
| ACERO INOXIDABLE | 20<br>100 | 14,53<br>15,70 |
| ARENA | 20 | 0,3139 |
| ALGODÓN | 20 | 0,0589 |

Tabla 1.4.- Valores de conductividad térmica.

## 1.2.- FASE FLUIDA

Los fluidos utilizados como fase fluida saturante del medio poroso han sido agua destilada y agua destilada con adición de un agente tensioactivo.

### 1.2.1.- AGUA DESTILADA

Los parámetros que se han tenido en cuenta para la caracterización del agua destilada utilizada son: densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica.

*** Densidad**

La determinación de la densidad se realizó mediante un densímetro a una temperatura de 20 °C, obteniéndose un valor de densidad relativa de 0,999 referida a agua a 15 °C, siendo por tanto la densidad del agua destilada utilizada de $\rho$ = 998,1kg/m$^3$ a 20 °C. Dada la similitud del valor obtenido con el dado en la bibliografía, se ha optado por considerar como válido el valor de la densidad del agua destilada para diferentes temperaturas obtenido de la bibliografía.

*** Viscosidad**

La determinación de la viscosidad del agua destilada se realizó con un viscosímetro Cannon-Fenske de la serie 50 para líquidos transparentes de la casa Proton. Las medidas se realizaron equilibrando la temperatura del viscosímetro mediante un baño termostático a 40 °C, temperatura para la cual la constante de calibración del viscosímetro es de K = 0,0032993 (mm$^2$/s)/s.

Los resultados experimentales ofrecieron un valor de viscosidad cinemática del agua destilada de 0,661.10$^{-6}$ m$^2$/s, valor corroborado por la bibliografía.

*** Tensión superficial**

Los valores de tensión superficial del agua destilada para diferentes temperaturas han sido obtenidos mediante la correlación lineal de Jasper (1972) (6):

$$\sigma \text{ (mN.m}^{-1}) = 75,83 - 0,1477 \text{ (T °C)}$$

* Calor específico y conductividad térmica

No pudiéndose realizar en el marco de esta tesis una determinación experimental del calor específico y conductividad térmica del agua destilada, se ha optado por los valores dados en la bibliografía (5), y que son mostrados, en parte, en la tabla 1.5.

| TEMPERATURA (°C) | CALOR ESPECÍFICO (J/kg.K) | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (J/s.m.K) |
|---|---|---|
| 10 | 4195,96 | 0,576 |
| 21 | 4181.80 | 0,600 |
| 38 | 4174,00 | 0,630 |
| 66 | 4183,52 | 0,660 |
| 90 | 4202,88 | 0,677 |

Tabla 1.5.- Valores de calor específico y conductividad térmica del agua a diferentes temperaturas.

### 1.2.2.- SOLUCIÓN ACUOSA (AGUA DESTILADA MÁS TENSIOACTIVO)

El tensioactivo utilizado ha sido Nonilfenol oxietilenado con 30 moles de óxido de etileno (30-OE), comercializado por la empresa Albright & Wilson con el nombre de Empilan NP30.

Se trata de un tensioactivo no iónico de fórmula química: $CH_3 (CH_2)_8 C_6H_4 (OCH_2CH_2)_{30}OH$ y peso molecular 1572,142 g. Sólido a temperatura ambiente, presenta su punto de fusión a 40°C, siendo fácilmente soluble en agua a una temperatura de 45 °C. Presenta una densidad a 20 °C de 1,08 $g/cm^3$ y tiene su punto de ebullición superior a 100 °C, según datos facilitados por Albright & Wilson.

La concentración de tensioactivo en disolución ha sido de 0,8 g / litro (la justificación de la elección de esta concentración es comentada en el apartado 1.2.4.).

*** Densidad**

La determinación de la densidad de la solución acuosa de tensioactivo se llevó a cabo mediante un densímetro referido a agua a 15 °C, obteniéndose una densidad relativa de 0,999 siendo la densidad de la solución acuosa de $\rho$ = 998,1 kg/m$^3$ a la temperatura de determinación (20 °C).
Por lo que no se observó variación en la densidad del agua por la introducción del tensioactivo a la concentración de estudio.

*** Viscosidad**

La determinación de la viscosidad del agua destilada con tensioactivo se realizó, como en el caso de agua destilada, con un viscosímetro Cannon-Fenske de la serie 50 para líquidos transparentes de la casa Proton. Las medidas se realizaron equilibrando la temperatura del viscosímetro mediante un baño termostático a 40 °C, temperatura para la cual la constante de calibración del viscosímetro es de K = 0,0032993 (mm$^2$/s)/s.

Los resultados experimentales ofrecieron un valor de viscosidad cinemática del agua con tensioactivo de 0,662.10$^{-6}$ m$^2$/s, por lo que tampoco se observa una variación de la viscosidad debida a la introducción del tensioactivo en el agua a la concentración de estudio.

*** Tensión superficial**

La tensión superficial correspondiente al agua destilada más tensioactivo fue determinada a diferentes temperaturas mediante un tensiómetro de placa (KRÜSS K12) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Departament d'Investigació i Desenvolupament). Dicho tensiómetro se fundamenta en disponer de una fina placa rectangular de platino-iridio-plata de geometría exactamente conocida, la cual se suspende verticalmente sobre la muestra, poniendo el extremo inferior de la placa en contacto con el líquido. La determinación de la fuerza F generada al ascender la placa permite el cálculo de la tensión superficial de la muestra que viene dada por la expresión:

$$\sigma = F / L.\cos\theta$$

siendo $\sigma$ la tensión superficial del líquido, $\theta$ el ángulo de contacto que normalmente es considerado cero para las placas de platino utilizadas, L longitud mojada teniendo en cuenta las dos caras de la placa.
El tensiómetro permite, mediante un baño termostático, la determinación de la tensión superficial de la muestra a diferentes temperaturas. Las temperaturas escogidas para la determinación fueron 25 °C, 40 °C y 60 °C.

Los resultados experimentales de la determinación de la tensión superficial de la solución acuosa a las diferentes temperaturas seleccionadas se recogen en la tabla 1.6.

| TEMPERATURA (ºC) | AGUA DESTILADA + NONILFENOL $\sigma$ ($mN.m^{-1}$) |
|---|---|
| 25 | 43,20 |
| 40 | 41,09 |
| 60 | 38,54 |

Tabla 1.6.- Resultados experimentales de la determinación de la tensión superficial del agua destilada con tensioactivo para diferentes temperaturas.

La dependencia observada de la tensión superficial respecto a la temperatura parece ser lineal, en el rango de temperaturas utilizado, como se ha comprobado para soluciones acuosas de otros tensioactivos (etileno glicol, 2-propanol) (6). La correlación lineal obtenida con un coeficiente de correlación de 0,999 ha sido :

$$\sigma\ (mN.m^{-1}) = 46{,}4151 - 0{,}131243\ (T\ ºC)$$

* **Calor específico y conductividad térmica**

Los valores correspondientes a ambas propiedades se han adoptado como válidas las correspondientes a las del agua destilada dada la pequeña cantidad de nonilfenol presente en el agua y a la imposibilidad de obtener la precisión experimental necesaria para su determinación.

### 1.2.3.- Incidencia de la incorporación de un tensioactivo sobre las características de la fase fluida.

La incorporación del nonilfenol 30-OE al agua destilada, a la concentración de estudio (0,8 g/litro), no parece modificar de forma significativa las propiedades físicas de la fase fluida, a excepción de la tensión superficial.

La modificación estriba en la disminución de la tensión superficial con la adición del tensioactivo. En la figura 1.8. se ha representado la variación de la tensión superficial con la temperatura para el agua destilada y para la solución acuosa obtenida experimentalmente.

Como se puede observar, la incorporación del nonilfenol 30-O.E. al agua destilada produce una reducción de la tensión superficial del 40 % aproximadamente.

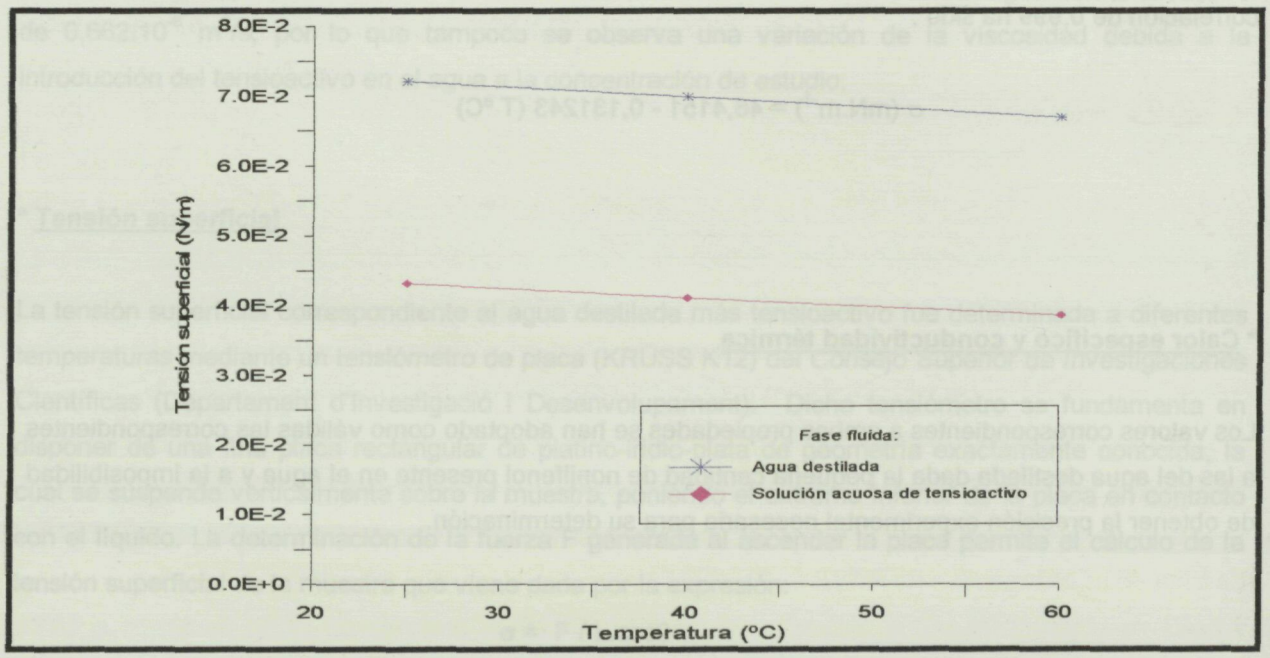



Figura 1.8.- Variación de la tensión superficial con la temperatura para el agua destilada y la solución acuosa de tensioactivo.

### 1.2.4.- Incidencia de la incorporación de un tensioactivo sobre las características de entrefase y de transición de fase.

Como se ha comentado anteriormente, la incorporación de tensioactivo en el agua destilada, a la concentración de trabajo, no parece afectar significativamente a las características físicas propias del agua destilada a excepción de la disminución de su tensión superficial. Disminución que puede tener una gran importancia en lo referente a la modificación de las propiedades de la entrefase sólido-líquido y de la transición de fase.

Para sistemas multicomponentes la tensión superficial depende, a parte de la temperatura, de la naturaleza y concentración del soluto. Cuando un tensioactivo es puesto en disolución, sea agua u otro disolvente, se produce una variación en la forma en que se encuentra en la disolución al aumentar la concentración del mismo ((18), (3)):

- A bajas concentraciones, el tensioactivo tiende a saturar la entrefase, produciéndose una adsorción positiva ($d\sigma$ / dlogc, negativa) y por tanto una disminución progresiva de la tensión superficial ($\sigma$).

- Cuando la concentración alcanza un determinado valor se produce un proceso de agregación de cadenas moleculares denominado micelización. A esta concentración se le da el nombre de CMC ("critical micelle concentration").

- A partir de este momento, cantidades sucesivas de tensioactivo añadido a la disolución dan lugar a variaciones poco significativas de tensión superficial.

Para el caso del Nonilfenol 30-OE, la CMC se alcanza para concentraciones superiores a $2.10^{-4}$ mol / litro, con una tensión superficial de $\sigma \approx 43$ m.N.m$^{-1}$ a una temperatura de 25 °C (3). Considerando una concentración de $5.10^{-4}$ mol / litro, con el objeto de garantizar el haber sobrepasado la CMC y conseguir la mínima tensión superficial posible, la concentración de tensioactivo en la disolución se fijó en 0,8 g/litro.

En lo referente a la incidencia de la disminución de tensión superficial en las características de la transición de fase, uno de los procesos más ampliamente estudiado ha sido su influencia en la formación de burbujas de vapor durante la ebullición ((14), (12), (8), (16), (21), (20), (17), (4), (23), (19), (22), (1) ). Una reducción de la tensión superficial hace que disminuya la presión requerida para la formación de burbujas de vapor como indica la ecuación de Young-Laplace:

$$\Delta P = \sigma \left( (1/r_1) + (1/r_2) \right)$$

donde $\Delta P$ : diferencia de presión entre el interior y exterior de la burbuja ($N/m^2$)

$r_1$ , $r_2$ : radios principales de curvatura (m)

$\sigma$ : tensión superficial (N/m)

Algunas investigaciones también se han orientado al estudio de la influencia de los tensioactivos en la formación de burbujas creadas mecánicamente haciendo pasar un flujo de aire a través de un orificio sumergido en la solución acuosa con tensioactivos ((8), (10)).

El mecanismo de crecimiento de las burbujas puede ser expresado como (16):

$$\frac{dr}{dt} = C.\left(\frac{\lambda.(T - T_{sat})}{h_{lv}.\rho_v}\right).\left(\frac{1}{\sqrt{\pi.\alpha.t}}\right)$$

donde r : radio de burbuja (cm)

t : tiempo (s)

$\lambda$ : conductividad térmica (cal/s.cm.°C)

$h_{lv}$ : calor latente de vaporización (cal/g)

$\rho_v$ : densidad del vapor ($g/cm^3$)

$\alpha$ : difusividad térmica ($cm^2/s$)

T : temperatura (°C)

$T_{sat}$ : temperatura de saturación (°C)

C : parámetro comprendido entre 1 y $\sqrt{3}$

A la vista de los resultados experimentales ((14),(16),(20),(4),(1)), y a pesar de la dispersión de datos al tratarse de pruebas con diferentes tensioactivos, cabe hacer las siguientes observaciones generales respecto a la influencia de la tensión superficial en la formación de burbujas de vapor:

- El volumen de las burbujas de vapor decrece al decrecer la tensión superficial.

- El tiempo de crecimiento de las burbujas decrece al decrecer la tensión superficial.

- El tiempo de retardo (periodo de tiempo entre formación de burbujas para un punto dado) decrece al decrecer la tensión superficial, pudiendo llegar hasta cero en caso de altas concentraciones de tensioactivo.

- La frecuencia, que es el recíproco de la suma de los tiempos de crecimiento y de retardo, incrementa en un orden de magnitud al disminuir la tensión superficial.

La influencia de la tensión superficial en el proceso de ebullición no parece restringirse únicamente al aumento en la formación de burbujas de vapor, sino también en un incremento en la nucleación ((8),(12)), ya que la relación de formación de núcleos de vapor en un líquido caliente es proporcional a $e^{-\sigma^3}$ por lo que pequeños decrecimientos de la tensión superficial pueden causar grandes incrementos en el número de núcleos activos en la solución (12).

En lo referente al proceso de evaporación de agua con tensioactivo próximo a 100 °C (21), se ha observado experimentalmente un decrecimiento de la evaporación respecto al agua pura. Esta reducción en la evaporación es atribuida al decrecimiento, producido por la presencia del tensioactivo, de la convección creada por la tensión superficial que se presenta en la entrefase líquido-vapor. También se ha observado un decrecimiento en la condensación al añadirse un tensioactivo al agua (17).

Algunas investigaciones se han orientado al estudio del proceso de cambio de fase de un fluido con tensioactivo en presencia de una matriz porosa (1). Cuando la transición de fase se presenta en una frontera curva, las presiones a través de la entrefase son diferentes, para una misma temperatura. La diferencia de presiones equilibra las fuerzas de tensión superficial que actúan en la entrefase. Considerando un líquido humectante, la expresión de la presión capilar viene dada por:

$$P_c = P_v - P_l = 2\sigma / r_e$$

on $P_c$ : presión capilar,
$P_v$ : presión del vapor sobrecalentado,
$P_l$ : presión del líquido sobrecalentado
$\sigma$ : tensión superficial,
$r_e$ : radio efectivo de curvatura de la entrefase.

La relación entre la presión capilar y las variables termodinámicas relevantes es dada por la ecuación de Kelvin:

$$\frac{P_v}{P_o} = e^{-\frac{2.\sigma.\cos\theta.V}{r.R.T}}$$

donde $P_v$ : presión de vapor de equilibrio del líquido contenido en un poro de radio r.
$P_o$ : presión de equilibrio del mismo líquido exhibiendo una superficie plana.

$\sigma$ : tensión superficial.

V : volumen molar del líquido.

$\theta$ : ángulo de contacto.

T : temperatura absoluta a la que se encuentra el vapor.

Derivando respecto a r la ecuación anterior, manteniendo constantes T, $P_o$, R, V, $\sigma$ y $\theta$, obtenemos

$$\left(\frac{P_o}{P_v}\right).\left(\frac{d\left(P_v/P_o\right)}{dr}\right) = \frac{2.\sigma.V}{r^2.R.T}\cos\theta$$

La ecuación de Kelvin que relaciona la humedad relativa, $\varphi = {}^{P_v}\!/_{P_o}$ , al radio de los capilares, o de los poros, r, y a la tensión superficial en la entrefase vapor-líquido, permite ilustrar, de manera simple el fenómeno de condensación capilar siempre que $\varphi \geq 0{,}2$ .

Supongamos un capilar parcialmente lleno de líquido en contacto con su vapor. Siempre que el menisco se encuentre suficientemente alejado del extremo del poro, su superficie semiesférica de radio r' está en equilibrio con el vapor cuya presión $P_v$ está dada por la ecuación de Kelvin. Si r ($r = r'.\cos\theta$) es pequeño $P_v << P_{vo} = P_{vs}$ el líquido se encuentra en equilibrio con el vapor no saturado. Cuando la presión de vapor aumenta ($\varphi$ creciente) se produce un fenómeno de condensación en los poros a fin de establecer la presión $P_v$ compatible con el equilibrio mecánico del menisco de radio r'. Si se establece y se mantiene una nueva presión $P_{v1} > P_v$, el proceso de condensación proseguirá hasta que se alcance un nuevo estado de equilibrio, correspondiente a un radio de curvatura de los meniscos $r'_1 > r'$ .

## 1.3.- RESUMEN

Una recopilación de los valores de los parámetros característicos de las fases (sólida y fluida) constituyentes de los medios porosos considerados, se encuentra en las tablas 1.7 y 1.8 de la página siguiente.

## Tabla 1.7.- RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA FASE SÓLIDA

| FASE SÓLIDA | DIÁMETRO MEDIO (m) | LONGITUD FIBRAS (m) | DENSIDAD $\rho$ (kg/m$^3$) | SUPERFICIE ESPECÍFICA $S_e$ (m$^{-1}$) | CALOR ESPECÍFICO C (J/kg.K) a 20 °C | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA $\lambda$ (J/s.m.K) a 20 °C |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BRONCE | $2{,}355.10^{-4}$ | -------- | 8614,05 | 25443,56 | 376,00 | 71,00 |
| ACERO INOX. | $9{,}197.10^{-5}$ | -------- | 7660,77 | 65356,26 | 460.80 | 14,53 |
| ARENA | $2{,}960.10^{-3}$ | -------- | 2613,95 | 2027,03 | 527,90 | $31{,}39.10^{-2}$ |
| ALGODÓN | $1{,}455.10^{-5}$ | $11{,}35.10^{-3}$ | 1176,25 | 274603,17 | 1329,98 | $5{,}89.10^{-2}$ |

## Tabla 1.8.- RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA FASE FLUIDA

| FASE FLUIDA | DENSIDAD $\rho$ (kg/m$^3$) a 20°C | VISCOSIDAD CINEMÁTICA $\nu$ (m$^2$/s) (.10$^{-6}$) a 40 °C | CALOR ESPECÍFICO $C_P$ (J/kg.K) a 20°C | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA $\lambda$ (J/s.m.K) a 20 °C | TENSIÓN SUPERFICIAL (regresión lineal) $\sigma$ (mN.m$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| AGUA DESTILADA | 998,2 | 0,665 | 4182,8 | 0,598 | 75,83 - 0,1477 (T °C) |
| AGUA DESTILADA + NONILFENOL 30-OE | 998,2 | 0,751 | 4182,8 | 0,598 | 46,4151 - 0,131243 (T °C) |

## 1.4.- REFERENCIAS

(1) 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.

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

(3) 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 .

(4) CHANG et al. (1987): "*Dynamic surface effect and nucleate flow boiling of dilute surfactant solutions*". J. Chin. Inst. Chem. Eng. Vol. 18, Nº 2, p.125-130.

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

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

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

(8) JONTZ & MYERS (1960): *"The effect of Dynamic Surface Tension on Nucleate Boiling Coefficients"*. A.I.Ch.E. Journal, Vol. 6, nº 1.

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

(10) 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.

(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 .

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

(13) 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.

(14) 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.

(15) 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.

(16) 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.

(17) 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.

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

(19) 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.

(20) WEI, H. & MAA, J.R. (1982): "*Enhancement of flow boiling heat transfer with polymer additives*". Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 25. Nº 3.

(21) 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.

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

(23) YANG, Y. (1990): "*Dynamic surface effect on boiling of aqueous surfactant solutions*". Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 18, Nº 6.

# CAPÍTULO II.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MEDIOS POROSOS


## RESUMEN

En el presente capítulo se han especificado las características de los diferentes medios porosos estudiados, tanto en lo referente a sus propiedades físicas (porosidad y densidad), como fluidodinámicas (conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca).

Cabe señalar que dada la importancia de la determinación de las propiedades térmicas de los diferentes medios porosos estudiados, se ha creído conveniente la realización de un capítulo referido a dicho tema, por lo que la especificación de las capacidades caloríficas y de las conductividades térmicas efectivas será tratada en el capítulo III.


## 2.1.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MEDIOS POROSOS

### 2.1.1.- Porosidad

Los medios porosos constituidos por las matrices sólidas y los fluidos saturantes caracterizados en el capítulo anterior, han sido estudiados para las porosidades de: bronce ($\varepsilon = 0,36$), acero inoxidable ($\varepsilon = 0,59$), arena ($\varepsilon = 0,38$) y algodón ($\varepsilon = 0,92$, $\varepsilon = 0,88$ y $\varepsilon = 0,83$).

Estas porosidades se han establecido en todos los casos cuantificando los volúmenes de sólido de la muestra y del fluido saturante, dada la dificultad de su determinación mediante la utilización de un porosímetro al tratarse de medios porosos no consolidados.

### 2.1.2.- Densidad

La densidad de los medios porosos granulares dependerá de la forma de las partículas y de su disposición, así como de su coeficiente de uniformidad. Para el caso de los medios porosos granulares estudiados, su densidad fue determinada a partir del volumen total de medio poroso y la masa de matriz sólida que lo constituye. Los resultados experimentales para los diferentes medios porosos se recogen en la tabla 2.1..

| Medio poroso | Porosidad ($\varepsilon$) | Densidad ($kg/m^3$) |
|---|---|---|
| Bronce | 0,36 | 5431,39 |
| Acero | 0,59 | 3163,26 |
| Arena | 0,38 | 1665,38 |

Tabla 2.1.- Resultados experimentales de la densidad de los diferentes medios porosos granulares a las porosidades de estudio.

La corroboración de los resultados de densidad obtenidos, sólo ha sido posible para la arena. El intervalo de densidades que se cita en la literatura para este medio es de 1500 - 1800 $kg/m^3$.

## 2.2.- ESTUDIO FLUIDODINÁMICO DE LOS MEDIOS POROSOS

### 2.2.1.- Aplicación del promediado volumétrico a las ecuaciones de Navier-Stokes en medios porosos.

Slattery (1969) y Whitaker (1969) consideraron el flujo laminar, estacionario, incompresible de un fluido newtoniano de viscosidad constante en un medio poroso rígido.

La ecuación del movimiento de un fluido viscoso (Navier-Stokes) es

$$\rho.\left(\vec{V}.\nabla\right).\vec{V} = -\nabla P^{*} + \mu.\nabla^{2}\vec{V}$$

La ecuación anterior promediada en un VER mediante el algoritmo de Slattery, se expresa:

$$\rho.<\left(\vec{V}.\nabla\right).\vec{V}>= - <\nabla P^{*}> + \mu.<\nabla^{2}\vec{V}>$$

introduciendo como magnitudes de referencia la velocidad de Darcy ($u_D$) y una dimensión característica ($d_p$ ) del dominio de poro, resulta:

$$\vec{u}^{*} = \frac{\vec{V}}{u_D}; \qquad P^{**} = \frac{P^{*}}{\rho.{u_D}^{2}}; \qquad \nabla^{*} = D.\nabla; \qquad \nabla^{*2} = D^{2}.\nabla^{2}$$

luego

$$\rho.{u_D}^{2}.\frac{1}{D}\frac{1}{V}.\int_{V_f}\vec{u}^{*}.\nabla^{*}.\vec{u}^{*}.dV = -\nabla <P^{*}> -\rho.{u_D}^{2}.\frac{1}{D}\frac{1}{V}\int_{A_e}P^{**}.\hat{n}.dA + \mu.u_D\frac{1}{D^{2}}\frac{1}{V}\int_{V_f}\nabla^{*2}.\vec{u}^{*}.dV$$

En definitiva

$$\nabla <P^{*}>= \mu.u_D.\left[\frac{1}{D^{2}}\frac{1}{V}\int_{V_f}\nabla^{*2}.\vec{u}^{*}.dV\right] - \rho.{u_D}^{2}\left[\frac{1}{D}\frac{1}{V}\int_{V_f}\vec{u}^{*}.\nabla^{*}.\vec{u}^{*}.dV + \frac{1}{D}\frac{1}{V}\int_{A_e}P^{**}.\hat{n}.dA\right]$$

Al comparar la ecuación anterior con la de Forchheimer:

$$\frac{dP^*}{dz} = \alpha.\mu.u_D + \beta.\rho.{u_D}^2$$

resulta que α, constante en el intervalo de validez de la ecuación de Forchheimer, identificada por el inverso de la permeabilidad intrínseca, se corresponde con:

$$\alpha = \frac{1}{k'} = -\frac{1}{D^2}\frac{1}{V}\int_{V_f} \nabla^{*2}.\vec{u}^*.dV$$

y β, denominado "parámetro de inercia", se corresponde con:

$$\beta = \frac{1}{D}\frac{1}{V}\int_{V_f} \vec{u}^*.\nabla^*.\vec{u}^*.dV + \frac{1}{D}\frac{1}{V}\int_{A_e} P^{**}.\hat{n}.dA$$

La consecuencia básica es que la ecuación de Forchheimer puede ser considerada, en gran medida como la ecuación correcta en el intervalo práctico completo de caudales a través de medios porosos. La posterior sugerencia de Polubarinova-Kochima (1952) y de Irmay (1958) de incorporar un tercer término de régimen no permanente no parece necesaria:

$$\frac{dP^*}{dz} = \alpha.\mu.u_D + \beta.\rho.{u_D}^2 + \gamma.\rho.\frac{\partial u_D}{\partial t}$$

La ecuación de Forchheimer se puede reordenar así: $-Da = 1 + \mathrm{Re}^{"}$

donde $Da = \dfrac{dP^*}{dz.\alpha.\mu.u_D}$ es el número de Darcy y $\mathrm{Re}^{"} = \dfrac{\beta.\rho.u_D}{\alpha.\mu}$ es el número de Reynolds.

La ecuación de Ergun y sus variantes son formas especiales de la ecuación de Forchheimer en las que los parámetros α y β se expresan en términos de parámetros de la estructura de poro:

$$\alpha = A\left[\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3.{d_p}^2}\right]$$

$$\beta = B\left[\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 . d_p}\right]$$

donde A y B son constantes, y $d_p$ es el diámetro medio de poro.

En ocasiones se habla de la "pasabilidad del lecho" ($\eta$) como el inverso del parámetro de inercia $\beta$:

$$\eta = \frac{d_p . \varepsilon^3}{B(1-\varepsilon)}$$

donde B toma un valor de 1,92 para lechos de arenas (McDonald et al. (1979)).

Por lo que la ecuación de Forchheimer expresada en función de la pasabilidad es

$$\frac{dP^*}{dz} = \alpha . \mu . u_D + \rho . \frac{u_D^{\,2}}{\eta}$$

La aparición de la no linealidad de la ecuación que relaciona la presión con la velocidad parece deberse, según las experiencias más recientes, al hecho de que la resistencia de forma de las partículas sólidas deviene del mismo orden de magnitud que la resistencia superficial debida a rozamiento fluidodinámico. De acuerdo con Joseph, Nield y Papanicolau (1982) la ecuación apropiada para sustituir a la de Darcy es

$$\nabla P = -\frac{\mu}{k'}\vec{V} - C_F . k'^{-1/2} . \rho . \vec{V} . \left|\vec{V}\right|$$

donde $C_F$ es una constante adimensional de resistencia de forma.