

ESTUDIO DEL SECADO DE SOLIDOS POROSOS

Trabajo presentado para aspirar el Grado de Doctor
en Ciencias, Especialidad de Químicas, por

Fernando Valdes Sanz

Realizado en la Dirección del Profesor Agregado
D. Fernando Cancho Rubio, Director de la
Cátedra de Física y Química de la Facultad de Ciencias de
esta Universidad, bajo la dirección del Profesor Dr. D. Antonio Martín
García, Director de la Cátedra de Física y Química de la Facultad de Ciencias de
esta Universidad, en el curso de 1961-62.

Presidente: D. D. Rafael Cortés García

Vocales: D. D. Fernando Cancho Rubio

D. D. Gonzalo Sánchez Uña

D. D. Federico Díaz Rodríguez

ESTUDIO DEL SECADO DE SOLIDOS POROSOS

Calificación: SOBRESALIENTE "CUM LAUDE"



ESTUDIO DEL SECADO DE SOLIDOS POROSOS

Tesis presentada para aspirar al Grado de Doctor
en Ciencias, Sección de Químicas, por

Fernando Valdés Sanz

Realizada bajo la dirección del Profesor Agregado
del Departamento de Química Técnica Dr. D. Antonio Martín-
Martín y el Prof. Dr. D. Emilio Molina Grima y juzgada el-
día 27 de febrero de 1.981 en la Facultad de Ciencias de -
esta Universidad, por el siguiente tribunal :

Presidente : Prof. Dr. D. Fermín Capitán García

Vocales : Prof. Dr. D. Fernando Camacho Rubio
Prof. Dr. D. Antonio Martín Martín
Prof. Dr. D. Gonzalo Vázquez Uña

Secretario : Prof. Dr. D. Federico Díaz Rodríguez

Calificación obtenida ; SOBRESALIENTE "CUM LAUDE"

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

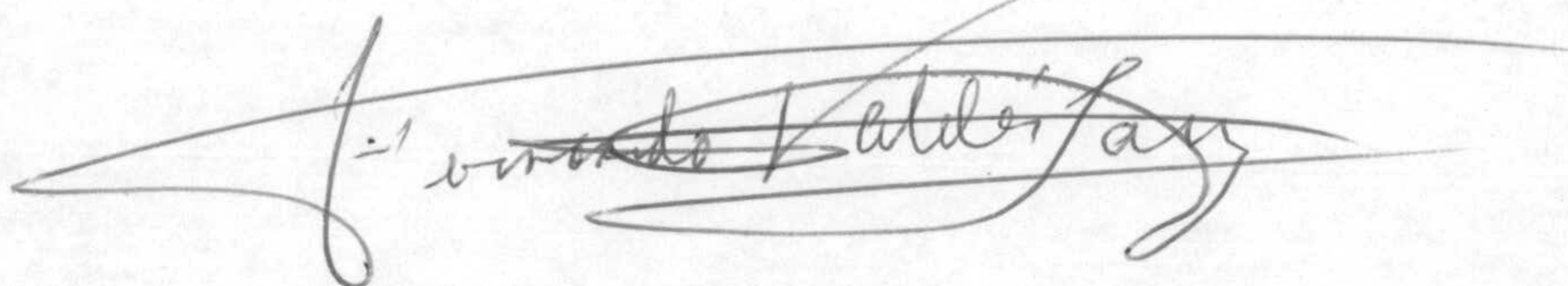
SECCION DE QUIMICAS

DEPARTAMENTO DE QUIMICA TECNICA

ESTUDIO DEL SECADO DE SOLIDOS POROSOS

Trabajo presentado para aspirar al grado
DOCTOR EN CIENCIAS (Sección de Químicas)

Fdo. : Fernando Valdés Sanz
Ldo. en Ciencias (Sección de Químicas)
Granada, Febrero 1.981



LOS DIRECTORES DE LA TESIS



Prof. Dr. D. Antonio Martín
Martín.- Profesor Agregado
del Departamento de Química
Técnica de la Facultad de -
Ciencias de la Universidad
de Granada.



Dr. D. Emilio Molina
Grima.- Profesor del
Departamento de Quími-
ca Técnica del Colegio
Universitario de Alme-
ría.



T
12
14

A mi mujer

I N D I C E

AGRADECIMIENTO	8
1. RESUMEN	9
2. CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE EL SECADO. . . .	12
2.1. Humedades de equilibrio.	14
2.2. Los fenómenos de transporte en las opera - ciones de secado	17
2.2.1. Transferencia de calor	18
2.2.1.1. Transferencia de calor desde el seno - del aire a la superficie del sólido.	18
2.2.1.2. Transmisión de calor por el interior - del sólido	21
2.2.2. Transferencia de materia	22
2.2.2.1. Transferencia de vapor de agua a tra - vés de la fase gaseosa	23
2.2.2.2. Desplazamiento del agua por el inte - rior de un sólido.	27
2.3. Modelos matemáticos.	34
2.3.1. Modelo de difusión	35
2.3.2. Modelo de flujo capilar.	36
2.4. Objeto y alcance de esta investigación	40
3. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	43
3.1. Determinación de las humedades de equili - brio	44
3.2. Aparato utilizado en el estudio cinético - del secado	44

3.3. Determinación de la temperatura media en los materiales utilizados.	50
4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS	51
4.1. Materiales	52
4.2. Procedimientos	53
4.2.1. Determinación de las humedades de equilibrio	53
4.2.2. Humidificación previa de los materiales.	54
4.2.3. Estudio experimental del secado.	54
4.2.4. Determinación de la temperatura media en las esferas de alúmina	55
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	56
5.1. Humedades de equilibrio.	57
5.2. Estudio experimental del secado.	57
5.2.1. Elección del espesor de lecho.	57
5.2.2. Influencia de la velocidad másica del aire	57
5.2.3. Influencia de la temperatura	65
5.3. Transmisión de calor en los materiales utilizados.	65
5.3.1. Variación de la temperatura media en las esferas de alúminas	78
6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.	83
6.1. Humedades de equilibrio.	84
6.1.1. Correlación de los resultados experimentales mediante la ecuación de Brunauer - Emmett y Teller (B.E.T.)	85

6.1.2. Correlación de los resultados experimentales mediante la ecuación de Henderson.	89
6.1.3. Cálculo del calor diferencial de adsorción de vapor de agua sobre las esferas de alúmina fundida.	95
6.1.4. Cálculo del área superficial de los materiales ensayados	99
6.2. Estudio experimental del secado.	101
6.2.1. Elección del espesor de lecho idóneo	101
6.2.2. Influencia de la velocidad másica del aire	108
6.2.2.1. Período de velocidad de secado constante	108
6.2.2.2. Período de velocidad de secado decreciente.	125
6.2.3. Influencia de la temperatura	128
6.2.4. Modelo de secado.	135
6.2.4.1. Resolución de las ecuaciones por integración numérica	139
6.2.4.2. Ecuaciones auxiliares para la resolución del modelos.	145
6.2.4.3. Otros parámetros del modelo.	149
6.2.4.3.1. Determinación de la difusividad (α) y conductividad térmica (K_s) del sólido	149
6.2.4.3.2. Determinación de los coeficientes individuales de transferencia de calor, h , y de materia, k_g , en la superficie del sólido	151

6.2.4.3.3.	Determinación de la presión parcial del vapor de agua en el aire utilizado (P_a)	152
6.2.4.3.4.	Determinación del calor específico- C_p del sólido	152
6.2.4.4.	Cálculo de la distribución de humedades y temperaturas en el interior del sólido: Organigrama de cálculo. . . .	153
6.2.4.5.	Comparación de los resultados experimentales.	157
7.	APENDICE	180
7.1.	Cálculo del valor medio del calor integral de adsorción (λ_{ads}) para la formación de una monocapa.	181
7.2.	Discretización de la ecuación general de Transferencia de materia.	182
7.3.	Cálculo de los distintos parámetros que intervienen en la ecuación del modelo de secado no isotérmico.	186
7.3.1.	Cálculo de la velocidad másica de secado.	186
7.3.2.	Cálculo del coeficiente de difusión efectivo	188
7.3.3.	Cálculo de D_0 y E para los materiales ensayados	192
7.3.4.	Cálculo de las constantes que intervienen en la ecuación de la presión de vapor del agua pura (A y B)	192

7.3.5. Cálculo de la difusividad y conducti- vidad térmica (α y K_s).	195
7.3.6. Cálculo de los coeficientes individua- les de transferencia de calor, h, y - materia, k_g .	199
7.3.7. Cálculo del calor específico.	200
7.3.8. Resultados obtenidos para la presión- parcial de vapor de agua en el aire - (P_a).	203
7.4. Regla de estabilidad (determinación de- los parámetros M y N)	204
7.5. Método de iteración utilizado	206
7.6, Listados de los programas de cálculo - utilizados.	209
7.6.1. Programa para el modelo de secado no isotérmico.	209
7.6.2. Programa para el cálculo del coefi- - ciente de difusión efectiva	213
8. CONCLUSIONES	214
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	218
NOMENCLATURA	228

Quiero agradecer en primer lugar al profesor Dr. D. Fernando Camacho Rubio, Jefe del Departamento de Química Técnica, su especial interés y apoyo en la realización de la presente investigación.

Al profesor Dr. D. Antonio Martín Martín su constante apoyo y ayuda en la realización del presente trabajo.

Especialmente al profesor Dr. D. Emilio Molina Grima su ayuda y aporte de ideas que han sido básicas para la buena conclusión del trabajo.

Agradezco, por último, la ayuda prestada a todos los compañeros del Colegio Universitario muy particularmente al profesor D. José Martínez Aroza, por su entrega en la puesta a punto del programa de cálculo del modelo.

A todos mi más sincero agradecimiento.

1.- RESUMEN

Se estudia, experimentalmente, el equilibrio y la cinética del secado de esferas de alúmina en una gama de seis tamaños comprendidos entre 1" y 3/16".

Los resultados obtenidos en la determinación de las humedades de equilibrio se han correlacionado por las ecuaciones de B.E.T. y Henderson. A partir de las constantes de la ecuación de B.E.T., se han determinado la superficie específica del sólido y el calor integral de adsorción para la formación de una capa monomolecular.

Suponiendo que la ecuación de Henderson representa las propiedades higroscópicas de los productos estudiados, a temperatura distinta de la ensayada, se ha calculado el calor diferencial de adsorción del vapor de agua sobre los materiales utilizados.

Durante el estudio cinético de todos los tamaños utilizados se han puesto de manifiesto los clásicos períodos de "velocidad de secado constante" y "velocidad de secado decreciente".

Admitiendo que, durante el período de velocidad de secado constante, la cinética del proceso está controlada por la transferencia de calor en el exterior de las partículas, se propone una ecuación que correlaciona la velocidad de secado con el tamaño de partícula, velocidad másica y condiciones del aire utilizado.

El estudio de la influencia de la velocidad másica del aire, sobre la cinética del secado, pone de manifiesto

que esta variable deja de ser controlante a valores superiores a 9300 Kg/h.m^2 .

Se propone un modelo matemático, constituido por dos ecuaciones básicas (conservación de materia y energía) y las condiciones límites adecuadas, capaz de reproducir las variaciones de humedad y temperaturas medias en los sólidos que se secan, tanto durante el período de velocidad de secado constante como durante el período de velocidad de secado decre - ciente.

Finalmente, se han determinado todas las propiedades del sólido necesarias para la resolución numérica del modelo al que se alude en el párrafo precedente.

2.- CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE EL SECADO

Secar un sólido significa, en general, eliminar una cantidad relativamente pequeña de agua o de otro líquido, contenidos en el mismo, con el fin de alcanzar un valor residual aceptablemente pequeño. El secado es generalmente la etapa final de un proceso y el producto queda así dispuesto para su envasado final. Las razones para secar un sólido son múltiples pero de ordinario son algunas de las siguientes: - 1) facilitar la manipulación en algunos tratamientos posteriores; 2) permitir la utilización satisfactoria del producto final; 3) reducir los costes de transporte; 4) aumentar la capacidad de algún aparato de proceso; 5) conservar el producto durante su almacenamiento y transporte; 6) aumentar el valor de los subproductos, etc.

El secado comúnmente va precedido por un proceso de eliminación mecánica del líquido, ya que en este tipo de procesos es menor el consumo de energía.

La eliminación del líquido, mediante secado, exige un aporte calorífico. La transferencia de calor se produce predominantemente por conducción o convección, pues aunque es cierto que en todos los procesos de secado se transfiere calor por radiación es raro que sea éste el mecanismo que predomine. El secado por conducción difiere del secado por convección. En el primer caso, el sólido húmedo se sitúa en un recipiente que tiene una salida para el vapor; frecuentemente se mantiene el recipiente a presión reducida con el objeto de aumentar la fuerza impulsora. En el caso de secado por convección el gas caliente se hace circular sobre la su-

perficie del sólido húmedo, proporcionando los dos efectos, comunicar calor y eliminar el vapor formado.

En el estudio teórico del secado se precisan, esencialmente, dos tipos de relaciones: las estáticas y las cinéticas que se analizan, seguidamente, de modo individualizado.

2.1.- HUMEDADES DE EQUILIBRIO.

El agua contenida en un sólido húmedo ejerce una presión de vapor, en la interfase sólido-gas, que depende de la naturaleza del sólido y de la temperatura. Si se sitúa un sólido higroscópico en contacto con una atmósfera de humedad relativa conocida y de temperatura constante, ganará o perderá agua hasta alcanzar un contenido en humedad determinado. En este momento, la presión de vapor que ejerce el sólido higroscópico en la interfase, será igual a la presión de vapor del agua en el ambiente que le rodea, es decir, el sólido húmedo y el aire estarán en equilibrio; el porcentaje de agua que contiene el sólido es su humedad de equilibrio, a las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire en que discurre el experimento.

Al representar gráficamente en coordenadas cartesianas las humedades de equilibrio, frente a las distintas humedades relativas, a temperatura constante, se obtienen curvas con forma de S (1, 2, 3, 4, 5) que se denominan isoterms de equilibrio, similares a las isoterms de adsorción,

en las que aparece también el fenómeno de histéresis característico de éstas. Ambas circunstancias, parecen indicar que el agua queda retenida en el sólido por un fenómeno de adsorción-física. Si esto fuera así, la ecuación que resulta al aplicar la teoría de B.E.T. (6), que postula la adsorción física en capas moleculares, a la fijación de agua en un sólido, sería:

$$X_e = X_1 \frac{k \cdot \varphi \cdot [1 - (m+1) \varphi^m + m \varphi^{m+1}]}{1 - \varphi [1 + (k-1) \varphi^m - k \varphi^{m+1}]} \quad [2.1]$$

donde:

X_e = humedad de equilibrio (kg agua/100 kg sólido seco).

X_1 = humedad del sólido correspondiente a la adsorción de una capa monomolecular (kg agua/100 kg sólido seco).

φ = humedad relativa (tanto por uno).

m = número de capas permisibles.

k = constante relacionada con el calor integral de adsorción para la formación de una monocapa, $(\lambda_{ads})_1$, por la ecuación:

$$k = \exp \left[\frac{(\lambda_{ads})_1 - \lambda_0}{R \cdot T} \right]$$

siendo λ_0 el calor de condensación del vapor de agua.

En condiciones tales, que no exista limitación al número de capas que puedan adsorberse ($m = \infty$), la ecuación anterior, se convierte en:

$$X_e = X_1 \frac{k \cdot \psi}{(1-\psi)(1-\psi+k\psi)} \quad [2.2]$$

Se ha comprobado que esta ecuación representa con bastante fidelidad los resultados experimentales en el intervalo de 0-50% de humedad relativa del aire (7, 8, 9).

Para valores de la humedad relativa del aire superiores al 60-70%, varios autores (10, 11, 12), opinan que la fijación de agua en los sólidos porosos, se debe a la condensación capilar (13).

Henderson (14, 15), basándose en que la adsorción física es el mecanismo predominante en la retención de agua por el sólido, ha propuesto la ecuación siguiente para correlacionar la humedad de equilibrio con la humedad relativa ambiente y la temperatura:

$$1-\psi = \exp \left[-c(t+273)x_e^n \right] \quad [2.3]$$

en la que:

c y n = constantes características del material.

Esta ecuación, parece ser que reproduce bastante bien las isotermas de equilibrio para valores de la humedad relativa de equilibrio comprendida en el intervalo 10-75% (7, 16). Su utilidad estriba en que mediante ella se puede estimar el comportamiento de un sólido higroscópico a temperaturas distintas a las que se obtuvieron las constantes c y n, características de la ecuación. Por otro lado satisface las siguientes características de las isotermas de equilibrio: 1) la humedad relativa de equilibrio es cero, para con-

tenidos en humedad cero; 2) la humedad de equilibrio se aproxima a infinito, cuando la humedad relativa tiende a la saturación; 3) la pendiente de la curva se aproxima al infinito, cuando la humedad relativa tiende hacia cero o al cien por cien.

Finalmente, Rockland (17) trató de correlacionar los datos de equilibrio mediante la ecuación (2-3), modificada en la forma siguiente:

$$n \cdot \log X_e + Y = \log [\log (1/1-\psi)] \quad [2.4]$$

donde Y es una constante cuyo valor es: $-\log (c.T/2,3)$. Al representar $\log (1/1-\psi)$, en papel doble logarítmico frente a X_e , obtenía una serie de puntos sobre los que podían trazarse dos o mas rectas de distinta pendiente que se cortaban. Este hecho supuso era debido a que la fijación tenía lugar en dos o mas etapas, desarrollándose cada una de ellas, según mecanismos distintos.

2.2.- LOS FENOMENOS DE TRANSPORTE EN LA OPERACION DE SECADO.

Durante el secado de un sólido con aire caliente, se producen simultáneamente los tres fenómenos de transporte: Transmisión de calor, para evaporar el agua, desde el aire al sólido y a través de éste. Transferencia de materia (agua) por el interior del sólido y desde la superficie de éste al seno del aire. Transporte de impulso mecánico como consecuencia de los gradientes de velocidad que se establecen al circular el aire a través de un lecho. La velocidad de secado depende normalmente

de la rapidez con que se desarrollen los dos primeros. Por otra parte la transferencia de impulso mecánico, está íntimamente relacionada con las características de la bomba soplante que ha de impulsar el aire utilizado para el secado y solo influye sobre el valor que pueden tomar los coeficientes de transferencia de materia y calor, en la superficie del sólido, durante el proceso de secado.

2.2.1.- TRANSFERENCIA DE CALOR.

En un secadero de lecho fijo el calor se transmite desde el aire (único foco calorífico) a la sustancia que se va a secar por convección y conducción. El primero de ellos predomina en el transporte entre la fase gaseosa y la superficie de sólido a secar y el segundo desde la superficie del sólido hacia su interior.

2.2.1.1.- TRANSFERENCIA DE CALOR DESDE EL SENO DEL AIRE A LA SUPERFICIE DEL SOLIDO.

La velocidad de transferencia de calor desde un fluido en movimiento con temperatura uniforme t_a , a una superficie sólida de área dA y temperatura t_s , en contacto con él, se puede calcular (18, 19, 20, 21, 22, 23, 24) mediante la ecuación;

$$dq = h \cdot dA \cdot (t_a - t_s) \quad [2.5]$$

donde:

dq = velocidad de transmisión de calor en el área considerada (Kcal/h).

h = coeficiente individual de transferencia de calor
(Kcal/h.m².°C).

Se han propuesto diversas ecuaciones semiempíricas para la determinación del coeficiente h en casos análogos a los estudiados en este trabajo, es decir para gases circulando a través de un lecho de partículas esféricas.

Mc Adams (18) para transmisión de calor entre esferas y aire, propone:

$$\frac{h \cdot D_p}{K_f} = 0,37 \left[\frac{D_p \cdot G}{\mu_f} \right]^{0,6} \quad [2.4]$$

en la que:

D_p = diámetro de las esferas (m).

G = velocidad másica del aire (Kg/h.m²).

K_f y μ_f = conductividad y viscosidad del aire a la temperatura:

$t_f = 1/2 (t_a + t_s)$, expresadas en Kcal/h.m.°C y Kg/h.m respectivamente.

Ganson, Thodos y Houguen (25) y Wilke y Houguen (26), para circulación de aire a través de un lecho granular, dedujeron las ecuaciones:

$$\frac{h}{C_p \cdot G} \left[\frac{C_p \cdot \mu}{K} \right]^{2/3} = 1,064 (R_e)^{-0,41} \quad [2.7]$$

válida para valores de $R_e = \frac{D_p \cdot G}{\mu} > 350$ y

$$\frac{h}{C_p \cdot G} \left[\frac{C_p \cdot \mu}{K} \right]^{2/3} = 1,95 (R_e)^{-0,51} \quad [2.8]$$



para valores de $Re < 350$; siendo C_p el calor específico a presión constante del gas.

Bennett y Myers (23), sugieren se emplee la ecuación propuesta por Ranz (27), para el cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor, desde un lecho de esferas a un gas que circula a través del mismo. La ecuación tiene la forma:

$$\frac{h \cdot D_p}{K} = 2 + (0,6) \left[\frac{C_p \cdot \mu}{K} \right]^{1/3} \left[\frac{D_p \cdot \rho (10,73) V_m}{\mu} \right]^{1/3} \quad [2.9]$$

en la que las propiedades físicas del fluido (C_p , ρ , μ , y K), se calculan a la temperatura másica media del gas y V_m es la velocidad superficial del fluido (caudal volumétrico/sección del lecho).

Otros autores (28, 29, 30), para el mismo caso, proponen la ecuación:

$$h = C \frac{G^n}{D_p^{1-n}} C_s^{1/3} \quad [2.10]$$

en la que C es una constante y C_s el calor húmedo del aire.

Por último Yoshida (31), para un sistema análogo a los anteriores, propone las ecuaciones:

$$\frac{h}{C_p \cdot G} \left[\frac{C_p \cdot \mu}{K} \right]_f^{2/3} = 0,91 (Re)^{-0,51} \cdot \psi \quad [2.11]$$

para $Re < 50$ y

$$\frac{h}{C_p \cdot G} \left[\frac{C_p \cdot \mu}{K} \right]_f^{2/3} = 0,61 (Re)^{-0,41} \cdot \psi \quad [2.12]$$

para $R_e > 50$

en las que:

$$R_e = \frac{G}{a \cdot \mu_f \cdot \psi}$$

$a = \frac{\text{m}^2 \text{ de superficie de transmisión de calor}}{\text{m}^3 \text{ de lecho de partículas}}$

ψ = coeficiente empírico que depende de la forma de la partícula. Para esferas $\psi = 1$.

El subíndice f indica que las propiedades están evaluadas a la temperatura de película.

2.2.1.2.- TRANSMISION DE CALOR POR EL INTERIOR DEL SOLIDO.

Al introducir una esfera en una corriente de aire caliente se establece un gradiente de temperaturas entre la superficie de la misma y su interior que origina un flujo calorífico por conducción en estado no estacionario. Considerando que la conductividad térmica del sólido es la misma en todas direcciones, la ecuación representativa del fenómeno, puede escribirse como (32):

$$\frac{\delta t_s}{\delta \theta} = \alpha \left[\frac{2}{r} \frac{\delta t_s}{\delta r} + \frac{\delta^2 t_s}{\delta r^2} \right]$$

en la que:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \text{difusividad térmica (m}^2/\text{h)}$$

θ = tiempo de secado (h)

R = radio de la esfera (m)

2.2.2.- TRANSFERENCIA DE MATERIA.

Cuando se sitúa un sólido húmedo en una corriente de aire seco aquél se deshidrata, transfiriendo agua desde su interior a la corriente gaseosa. Ahora bien, este fenómeno de transferencia se lleva a cabo en dos etapas sucesivas y simultáneas; en la primera, el agua se desplaza por el interior del sólido, hasta su superficie; en la segunda, el vapor de agua formado se transfiere desde la superficie del sólido al seno del gas.

En ocasiones, se supone que el vapor de agua no encuentra prácticamente resistencia alguna en su desplazamiento en el aire, por lo que se mezcla inmediatamente formando un conjunto homogéneo de modo que las condiciones en la interfase gas-sólido (temperatura y humedad relativa), coinciden prácticamente con las de la masa gaseosa que rodea al sólido. Esta hipótesis nunca es totalmente cierta aunque, en primera aproximación, puede aceptarse en aquellos casos en que la transferencia de agua a través del sólido es mucho más lenta que a través del gas.

Normalmente, cuando se seca un sólido muy húmedo, hay un período inicial durante el cual la velocidad de secado viene controlada por la rapidez con que se desarrolle el fenómeno de transferencia desde la interfase al seno del gas, siendo independiente de las características del material que se seca. A continuación, aparece un período en el que la naturaleza y contenido en humedad del sólido influyen decisivamente

te en la velocidad de secado, que está íntimamente relacionada con la velocidad con que se desplaza el agua por el interior del sólido (7, 9, 11, 14, 33, 34, 35, 36, 37).

Estas dos fases se conocen como período de secado de velocidad constante y período de secado de velocidad decreciente, respectivamente, si la operación de secado se lleva a cabo con aire cuyas propiedades físicas se mantienen constantes.

La velocidad de transferencia de vapor de agua a través de la fase gaseosa, depende de las propiedades físicas y características dinámicas del aire usado, principalmente de la temperatura, presión, humedad relativa, velocidad y dirección, así como de la forma y tamaño del sólido, siendo en cambio independiente de las propiedades del cuerpo húmedo. Por otra parte, los factores que determinan el movimiento del agua dentro del sólido, no dependen de las condiciones reinantes en el ambiente exterior, sino de las propiedades de aquél: contenido en humedad, estructura, etc. A continuación, se estudian ambas etapas por separado.

2.2.2.1.- TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA A TRAVES DE LA FASE GASEOSA.

En un instante dado, la velocidad de transferencia de agua (N_A), desde una superficie sólida (de área dA), a un fluido que circula en contacto con ella, se puede calcular (38, 39, 40, 41, 42) por la expresión:

$$N_A = k_g (P_{ai} - P_a) \quad [2.14]$$

siendo:

N_A = velocidad de transferencia de vapor de agua -
(mol-Kg/h.m²).

k_g = coeficiente individual local de transferencia -
de materia (mol-Kg/h.m².atm).

P_{ai} , P_a = presión parcial de vapor de agua en la interfa-
se y presión másica media de vapor de agua en -
el seno del gas, respectivamente (atm).

El coeficiente individual k_g , depende de la veloci-
dad, dirección y propiedades físicas del aire que se ha utili-
zado para el secado, así como del tamaño y forma de las partí-
culas.

Para el cálculo de k_g , en caso análogo al estudia -
do en esta investigación, Ganson, Thodos y Houguen (25) y -
Wilke y Houguen (26), para circulación de gases a través de un
lecho de partículas esféricas húmedas, proponen las ecuaciones
siguientes:

$$J_D = \frac{k_g \cdot R \cdot T}{G/\rho} (Sc)^{2/3} = 1,82 \left[\frac{D_p \cdot G}{\mu} \right]^{-0,51} \quad [2.15]$$

para valores de $Re = \frac{D_p \cdot G}{\mu} < 350$ y

$$J_D = \frac{k_g \cdot R \cdot T}{G/\rho} (Sc)^{2/3} = 0,989 \left[\frac{D_p \cdot G}{\mu} \right]^{-0,41} \quad [2.16]$$

para valores de $Re > 350$

Donde:

R = constante de los gases (atm.m³/mol-Kg.°K)

T = temperatura absoluta (°K)

$$Sc = \text{módulo de Schmidt} = \mu/\rho \cdot D_G$$

D_G = coeficiente de difusión del soluto, en el seno del gas (m^2/h)

Taeker y Houguen (43), correlacionaron los resultados obtenidos al secar un lecho granular, mediante la ecuación:

$$J_D = \frac{k_g \cdot R \cdot T}{G/\rho} (Sc)^{2/3} = 1,070 \left[\frac{A_p \cdot G}{\mu} \right]^{-0,41} \quad [2.17]$$

en la que A_p , es el área de una de las partículas que forman el lecho.

Bradshaw (44) al estudiar el secado, con aire, de un lecho de esferas porosas propuso la ecuación:

$$\frac{k_g \cdot R \cdot T}{G/\rho} (Sc)^{2/3} = 1,90 \left[\frac{D_p \cdot G}{\mu} \right]^{-0,50} \quad [2.18]$$

Finalmente, el coeficiente individual de transferencia de materia k_g está relacionado con el de calor h por la expresión siguiente (29):

$$\frac{h}{k_g \cdot M_a \cdot P} = C_s \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0,56} \quad [2.19]$$

que para el sistema aire agua se transforma en:

$$\frac{h}{k_g \cdot M_a \cdot P} = C_s \quad [2.20]$$

donde:

M_a = peso molecular del aire (Kg/mol-Kg)

P = presión total (atm)

C_s = calor húmedo del aire (Kcal/Kg.°C)

La ecuación 2.14 puede expresarse, haciendo las modificaciones oportunas, de modo que relacione la velocidad de secado con el gradiente de humedades absolutas del aire utilizado en la forma:

$$\frac{-dX}{d\theta} = \frac{k' a}{\rho_s} (X_{Ai} - X_A) \quad [2.21]$$

en la que:

X = contenido en humedad del material (Kg agua/Kg sólido seco)

a = superficie interfacial por unidad de volumen - de lecho de material (m^2/m^3)

X_A = humedad absoluta del aire de secado (Kg agua/Kg sólido seco)

X_{Ai} = humedad absoluta del aire en la interfase - (Kg agua/Kg sólido seco)

ρ_s = densidad aparente del material seco (Kg material seco/ m^3 lecho material)

k' = coeficiente individual de transferencia de materia ($Kg \text{ agua}/h \cdot m^2 \cdot \Delta x$), que está relacionado con el coeficiente k_g de la ecuación 2.14 por la igualdad:

$$k' = k_g \cdot M_a \cdot (P - P_a)_{ml} \quad [2.22]$$

donde:

M_a = peso molecular del aire seco (Kg/mol-Kg)

P = presión total (atm.)

$$(P - P_a)_{ml} = \frac{(P - P_a) - (P - P_{ai})}{\ln \frac{P - P_a}{P - P_{ai}}}$$

2.2.2.2.- DESPLAZAMIENTO DEL AGUA POR EL INTERIOR DE UN SOLIDO.

El desplazamiento del agua por el interior de un sólido, durante el secado, ha sido estudiado por gran número de investigadores. Unos opinan que dicho fenómeno tiene lugar por difusión molecular, mientras que otros opinan que se debe a un flujo capilar.

La primera hipótesis elaborada por Sherwood y colaboradores (45, 46), supone que las leyes de difusión se aplican perfectamente al secado. Sin embargo Fisher (47) llegó a la conclusión que se debía considerar la influencia de fuerzas superficiales, sobre todo en el secado de materiales granulares. Por otro lado, Ceaglske y Houguen (49), atacaron vigorosamente la teoría de Sherwood y colaboradores pues creían que ésta conducía a una idea equivocada acerca de la distribución de humedad en un sólido durante el secado, estos investigadores se declararon partidarios de la teoría del flujo capilar.

Lykow (50) y otros muchos investigadores, definen la teoría que durante el secado de un sólido húmedo existe una fase inicial durante la cual el agua se desplaza a través de los poros y capilares del mismo bajo la influencia, principalmente, de fuerzas superficiales y por último, existe-

una segunda fase en la que la humedad ligada, se difunde a través del sólido casi seco.

Görling (51), propone cinco mecanismos físicos distintos, para representar el desplazamiento del agua por el interior del sólido durante el secado:

- Movimiento del líquido bajo la acción de fuerzas capilares
- Difusión del líquido, debido a un gradiente de concentraciones
- Difusión superficial en capas de líquido adsorbidas sobre la superficie del sólido
- Difusión del vapor de agua, a través de poros llenos de aire, como consecuencia de gradientes de presiones parciales
- Circulación del vapor de agua, bajo diferencias de presión total (en secado a presión reducida).

Marshall y Friedman (52) aceptan los dos mecanismos primeros de Görling y además les añaden como posibles:

- Circulación de líquido debida a las fuerzas de gravedad
- Circulación originada por una serie de vaporizaciones y condensaciones consecutivas.

De todos los mecanismos propuestos, los que encuentran mayor número de partidarios son el de flujo capilar y el de desplazamiento del agua por difusión (en fase líquida o vapor).

(a) Movimiento del líquido por acción de fuerzas superficiales: Teoría del flujo capilar.

Muchos sólidos contienen en su interior un gran número de poros capilares de diferentes tamaños y comunicados entre sí que se extienden en todas direcciones, desplazándose a través de éstos la humedad libre por un mecanismo en el que interviene la tensión superficial (41). En los primeros instantes del secado, todos los poros están llenos de agua pero conforme avanza el proceso, el agua se evapora en la superficie externa del sólido y esto da lugar a la aparición de un menisco en cada poro (10, 7, 35, 54, 55 y 56) como consecuencia de las fuerzas interfaciales que se desarrollan entre el agua y el sólido.

La intensidad de fuerzas capilares en un punto dado de un poro depende de la curvatura del menisco y ésta es función de la sección transversal del poro; los poros pequeños desarrollan fuerzas capilares mayores que los poros grandes y por consiguiente los primeros podrán extraer el agua de los segundos. A medida que se agota el agua de la superficie, los poros grandes empiezan a vaciarse y el aire entra hacia el interior del sólido ocupando el volúmen del agua desplazada.

Krischer (47) opina que las etapas iniciales del secado, cuando el contenido en humedad del sólido es mayor, están controladas por el flujo capilar. Görling (51) utiliza la siguiente expresión para correlacionar los resultados experimentales cuando la transferencia de materia tiene lugar exclusivamente por flujo capilar.

$$\bar{G}_w = -K_w \rho_s \frac{dx}{dz} \quad [2.23]$$

en la que

G_w = velocidad de transferencia de materia (Kg agua/
/h.m²)

K_w = conductividad de humedad (m²/h)

z = distancia (m).

La expresión 2.23 es análoga a la ley de difusión de Fick e indica que el flujo de agua es proporcional a un gradiente de humedad. El parámetro más difícil de evaluar en la ecuación anterior es la conductividad de humedad, K_w , pues agrupa los diferentes efectos que sobre la transferencia de materia producen la tensión superficial y viscosidad del líquido; además, se ha comprobado experimentalmente, que su valor depende del contenido en agua en cada instante (51).

Berger y Pei (58), basándose en la teoría de Kricher han hecho modificaciones y extensiones de la misma, llegando a predecir la velocidad de secado a partir de parámetros físicos, tanto del aire como del material a secar.

(b) Movimiento del agua por acción de un gradiente de concentraciones o de presiones parciales: Teoría de la difusión.

Según la teoría de la difusión el agua se puede desplazar en fase líquida o como vapor a través de los poros de la sustancia.

(b.1) Desplazamiento del agua en fase líquida a través -

del sólido.

La difusión del agua en fase líquida es consecuencia del gradiente de concentraciones establecido entre el interior del sólido y su superficie. Pueden distinguirse los casos siguientes:

- Difusión molecular en estado estacionario (período de velocidad de secado constante)
- Difusión molecular en estado no estacionario (período de velocidad de secado decreciente).

En el primer caso, los datos de secado pueden correlacionarse (32, 51) mediante la expresión:

$$N_w = -D \frac{dc}{dz} \quad [2.24]$$

siendo:

N_w = velocidad de difusión (mol-Kg agua/h.m²)

D = difusividad del agua a través del sólido (m²/h)

c = concentración de agua (mol-Kg/m³)

esta ecuación puede expresarse en función del contenido en humedad del sólido, adoptando la forma:

$$G_w = -D \rho_s \frac{dx}{dz} \quad [2.25]$$

Algunos autores han tratado de aplicar estas ecuaciones al secado de diversos materiales, encontrando que sus resultados experimentales eran compatibles con el mecanismo de difusión del agua a través del sólido, pero observaron, que la difusividad variaba sensiblemente con el contenido de humedad del sólido (45, 59, 60, 89).

En el segundo, se pueden correlacionar los resultados experimentales aplicando la ley general de difusión de Fick. Para una esfera, la expresión es (32).:

$$\frac{\delta X}{\delta \theta} = D_e \left[\frac{2}{r} \frac{\delta X}{\delta r} + \frac{\delta^2 X}{\delta r^2} \right] \quad [2.26]$$

donde D_e es el coeficiente de difusión efectivo del agua a través del sólido y X es la humedad puntual en la posición r .

(b.2) Difusión del vapor de agua a través de los poros o canales del sólido.

La difusión del vapor de agua a lo largo de los poros del sólido es un fenómeno que se produce como consecuencia de que los poros o canales del sólido están llenos de aire durante el secado y en consecuencia el vapor del agua producido en las paredes se difunde a través del aire estancado de los lugares de mayor a los de menor concentración. La velocidad de transporte, en este caso, puede calcularse (51, 57, 61) por la expresión:

$$N_w = - \frac{D_G}{\emptyset} \frac{1}{RT} \frac{P}{P - P_v} \frac{dP_v}{dz} \quad [2.27]$$

donde:

D_G = coeficiente de difusión del vapor de agua en el seno del aire (m^2/h)

P = presión atmosférica (atm)

P_v = presión parcial del vapor de agua (atm)

\emptyset = factor de resistencia, adimensional, que depende no solo de la estructura del material (de la mayor o menor sinuosidad de los canales) sino también, de la higroscopicidad del sólido -

poroso y su contenido en agua. Van Arsdel - -
 presenta una tabla de valores de ϕ para disting
 tos materiales.

Nakamura y colaboradores (62), en sus estudios so-
 bre transferencia de materia en el secado de sólidos porosos,
 postulan que en la operación de secado, se transfiere simultán
 neamente agua líquida y vapor de agua proponiendo para corre-
 lacionar los resultados experimentales las ecuaciones siguient
 es:

- para la transferencia de agua líquida

$$\frac{\delta X}{\delta \theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\delta}{\delta r} \left[D_e r^2 \left(\frac{\delta X}{\delta r} \right) \right] - \frac{R_{loc}}{\rho_0} \quad [2.28]$$

- para la transferencia de vapor de agua

$$\frac{\delta v}{\delta \theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\delta}{\delta r} \left[D_v r^2 \left(\frac{\delta v}{\delta r} \right) \right] + \frac{R_{loc}}{\rho_0} \quad [2.29]$$

Siendo la velocidad local de evaporación, R_{loc} , -
 igual a:

$$R_{loc} = K_{evap} a_i (V' - V) \rho_0 \quad [2.30]$$

ecuaciones en las que

D_e = coeficiente de difusión efectivo de transferenci
 cia de agua líquida (m^2/h)

D_v = coeficiente de difusión efectivo de transferenci
 cia de vapor.

R_{loc} = velocidad local de evaporación ($Kg \text{ agua}/m^3 h$)

K_{evap} = constante de velocidad local de evaporación -
 (m/h)

a_i = área específica efectiva de evaporación inter-
 na $\frac{m^2}{m}$

ρ_0 = densidad del sólido

V = contenido en vapor de agua Kg/Kg s.s.

La relación entre el contenido de vapor (V) y la presión de vapor (P_v) dentro del sólido, viene dada por la expresión:

$$V = (\epsilon M_w P_v) / (\rho_0 RT)$$

donde:

ϵ = porosidad del sólido

M_w = peso molecular del agua

R = constante de los gases $m^3 \text{ atm/mol-Kg.}^\circ K$

V' = contenido en vapor de agua cuando el sólido está saturado Kg/Kgs.s.

2.3.- MODELOS MATEMATICOS DE SECADO.

El secado de sólidos, como se puede deducir de los apartados anteriores, es una operación básica de gran complejidad. Por consiguiente en la bibliografía aparecen diversos modelos matemáticos, mas o menos afortunados, que en base a los fundamentos expuestos, tratan de reflejar el comportamiento de los distintos sólidos ensayados durante el secado.

Como ya se ha expuesto, atendiendo al modo de desplazarse el agua por el interior del sólido, los modelos propuestos se pueden dividir en dos grandes grupos: de difusión y de flujo capilar.

2.3.1.- MODELOS DE DIFUSION.

Los postulados básicos de los diferentes modelos de difusión son que el desplazamiento del agua por el interior del sólido se realiza, en fase líquida o en fase gaseosa, por el efecto de un gradiente de concentraciones o presiones parciales y que el sólido es isótropo respecto a la difusión.

En la bibliografía, se ha encontrado a un numeroso grupo de investigadores, entre los que destacan Sherwood y colaboradores (45, 46, 63, 64, 65, 66) que suponen, para correlacionar los resultados experimentales del secado, que el proceso es isotérmico y está controlado por la difusión en fase líquida del agua por el interior del sólido. Este modelo ha sido utilizado con éxito por diversos autores; Escardino y colaboradores (67, 68, 69), Jason (59), Saravacòs y Charm (60), Selim y Seagrave (48) y Chirife (70), encontraron que sus resultados experimentales son compatibles con esta hipótesis.

Bimbenet, Depeyre y Le Maguer (71) propugnan un modelo combinando las ecuaciones de transferencia de materia y energía. Los resultados obtenidos permiten pensar que a pesar de su relativa sencillez es válido en el período de velocidad de secado constante y decreciente, por otra parte, es posible adaptarlo a condiciones límites muy diversas:

- perfiles de humedad y temperatura iniciales no planos
- variación de temperatura y humedad del aire de secado en el transcurso del tiempo

- utilización de coeficientes de transferencia de materia cuyo valor depende del contenido de humedad, etc.

Otro grupo de autores (72, 73, 74) suponen al sólido dividido en una zona húmeda y otra seca. La zona húmeda es la interior y su resistencia a la transferencia de materia, - es pequeña. La zona seca, está separada de la húmeda por una interfase en la cual se produce la evaporación del agua y desde aquí se desplaza por difusión hasta la superficie del sólido.

2.3.2.- MODELOS DE FLUJO CAPILAR.

Los autores que propugnan este modelo (75, 76, 77) admiten que el desplazamiento de agua, en el interior del sólido, ocurre en fase líquida por capilaridad hasta la superficie del sólido, donde se evapora y desde aquí el vapor difunde hasta el seno de la corriente gaseosa. Puesto que el régimen de secado no es isotérmico, es necesario acudir a las - ecuaciones generales de transporte de calor y materia para reproducir científicamente el proceso.

Berger y Pei (58), proponen una variante del modelo anterior ya que suponen un doble mecanismo para el desplazamiento del agua por el interior del sólido, pues las hipótesis básicas del mismo suponen la existencia de un flujo capilar de líquido debido a un gradiente en el contenido de agua - acompañado de una difusión del vapor a través de los poros de

bido a un gradiente de presiones parciales.

Las ecuaciones que proponen para el mismo son las siguientes:

- para la transferencia de líquido

$$K_L \rho_L \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} - \dot{m}_{ev} = \rho_L \frac{\delta u}{\delta \theta} \quad [2.31]$$

donde:

K_L = conductividad del líquido m^2/h

ρ_L = densidad del líquido Kg/m^3

u = contenido de líquido m^3 agua/ m^3 sólido

\dot{m}_{ev} = velocidad de evaporación $Kg/m^3 h$

x = coordenada de longitud m

θ = tiempo

- para la transferencia de vapor

$$K_v \frac{\delta}{\delta x} \left[(\epsilon - u) \frac{\delta \rho_v}{\delta x} \right] + \dot{m}_{ev} = \frac{\delta}{\delta \theta} [(\epsilon - u) \rho_v] \quad [2.32]$$

donde:

K_v = difusividad del vapor m^2/h

ϵ = porosidad del sólido m^3 aire/ m^3 sólido

ρ_v = densidad del vapor Kg/m^3

- para la transferencia de calor

$$\alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\lambda}{\rho_s c_s} \left\{ K_v \left[(\epsilon - u) \frac{\delta^2 \rho_v}{\delta x^2} - \frac{\delta u}{\delta x} \frac{\delta \rho_v}{\delta x} \right] - (\epsilon - u) \frac{\delta \rho_v}{\delta \theta} + \rho_v \frac{\delta u}{\delta \theta} \right\} = \frac{\delta T}{\delta \theta} \quad [2.33]$$

donde:

α = difusividad térmica del sólido m^2/h

T = temperatura $^{\circ}K$

λ = calor latente de vaporización $Kcal/Kg$

ρ_s = densidad del sólido Kg/m^3

C_s = capacidad calorífica del sólido $Kcal/^{\circ}K Kg$

Dependiendo del grado de secado del material, este modelo, utiliza una modificación de la ecuación de Clausius - Clapeyron o la ecuación correspondiente a la isoterma de adsorción para relacionar la densidad del vapor con el contenido en humedad y la temperatura del sólido. Los resultados obtenidos por estos autores ponen de manifiesto que durante el período de velocidad de secado constante, la velocidad de secado está controlada por la transferencia de calor en el exterior del sólido, estando regida la duración de este período por el flujo de líquido hacia la superficie, de forma que este compense la velocidad de evaporación en la misma; este período finaliza una vez que el contenido de líquido en la superficie cae por debajo de su valor máximo de adsorción. Otra conclusión a la que llegan con este modelo es que en el período de velocidad de secado decreciente tiene una influencia considerable la transferencia de vapor en el interior del sólido, hasta el punto de que es este parámetro quien controla el proceso dentro de este período.

Nakamura y Sugiyama (62), para el secado de sólidos porosos, proponen un modelo matemático para correlacionar los resultados experimentales basado en las siguientes ecuaciones:

- para la transferencia de calor por el interior del sólido en estado no estacionario acompañada de evaporación:

$$c_p \rho_s \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[k_s r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right] - \lambda R_{loc} \quad [2.34]$$

donde $\lambda =$ calor latente de vaporización del agua - $\frac{k_{cal}}{k_{gr}}$.

- Para la transferencia de agua líquida y de vapor - de agua las ecuaciones 2.28 y 2.29.

Puede observarse, que el modelo es análogo al pro-
puesto por Berger excepto en la ecuación de transferencia de
agua líquida (ec. 2.28), pues aquí, los autores, propugnan -
que la transferencia de agua tiene lugar por difusión mien- -
tras que en el modelo anterior la transferencia de agua lo -
era por capilaridad.

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones diferen-
ciales fundamentales 2.28, 2.29 y 2.34 junto con la ecuación
2.30 de velocidad local de evaporación, bajo una serie de con-
diciones límites (62), se pueden obtener las variaciones de -
temperatura y contenido en agua del sólido a lo largo del pro-
ceso de secado. Este modelo refleja mejor la realidad que el
anterior sobre todo para el período de velocidad de secado de-
creciente.

2.4.- OBJETO Y ALCANCE DE ESTA INVESTIGACION.

El secado es una Operación Básica de la Ingeniería Química que se ha utilizado, ampliamente, dentro de la industria química y que en las dos últimas décadas se ha extendido, con gran profusión, a la "industria de los alimentos"; ésta, por otra parte, ha experimentado un impulso poderoso a consecuencia del cambio estructural experimentado por la sociedad que ha pasado, en su mayoría, de rural a urbana y por la utilización creciente de los principios de la "ciencia de los alimentos".

Los alimentos, tanto de origen vegetal como animal, son sustancias muy complejas constituidos, principalmente, por hidratos de carbono, grasas, proteínas, sales minerales y una gran proporción de agua. La presencia conjunta del agua con estos principios inmediatos hace posible que sobre ellos se desarrolle una extensa flora microbiana responsable de multitud de alteraciones que van desde cambios de sabor o cualidades nutritivas hasta la producción de sustancias tóxicas para el organismo humano. Aún eliminando la acción ejercida por los microorganismos, la presencia del agua o de ésta y las enzimas del propio alimento, también ocasionarían alteraciones como las de Maillard o el pardeamiento enzimático (91). Dado que el agua de los alimentos es la responsable del mayor número de alteraciones sufridas por éstos, desde muy antiguo, se ha venido utilizando el secado, por acción conjunta del sol y aire, para la preservación de los alimentos. Evidentemente, salvo raras excepciones, este procedimiento es inviable en la

actualidad por la necesidad de espacio y mano de obra que precisa, además de depender fuértemente de las condiciones climáticas; por éllo, desde el principio de la "era industrial" se comenzaron a utilizar secaderos de aire caliente.

Los problemas a resolver para el secado industrial de un producto son muy variados:

- a) Elección del tipo de secadero adecuado al producto que se quiere deshidratar.
- b) Necesidad o no de tratamientos previos para mejorar la calidad del producto final.
- c) Consumo de energía por unidad de masa de producto procesado.
- d) Dependencia de las características organelépticas y microbiológicas del tipo de proceso experimentado por el alimento a su paso por el secadero.
- e) Condiciones de almacenamiento adecuadas para una buena conservación.

Es evidente que la contestación urgente y precisa de estas cuestiones requiere tanto un estudio del alimento en sí ("ciencia de los alimentos") como de la operación de transformación ("Tecnología de los Alimentos").

La complejidad bioquímica, la geometría singular y la variabilidad en la composición de los alimentos hacen muy difícil el tratamiento ingenieril del secado, operación ya de por sí bastante engorrosa, como se ha podido comprobar en la lectura de los párrafos precedentes. Por éllo, en este traba-

jo se han soslayado, deliberadamente, algunos de estos factores con objeto de no hacer inabordable la resolución del problema desde un punto de vista científico; de esta forma se obtiene una primera aproximación racional que en muchos casos - ha resultado satisfactoria (67, 68, 69).

De acuerdo con las consideraciones precedentes, en el presente trabajo, se estudian experimentalmente los equilibrios y cinética del secado de esferas de material inorgánico en una gama de seis tamaños comprendidos entre 1" y 3/16". A partir de los resultados obtenidos, se proponen modelos, con base teórica, para correlacionar los resultados obtenidos en los dos aspectos abordados: equilibrio y cinética.

La determinación de la isoterma de equilibrio es de gran interés ya que permite predecir la humedad residual aconsejable para una buena conservación del producto deshidratado (92, 93, 94, 95).

Finalmente, el disponer de un modelo cinético capaz de simular, a partir de cierto número de parámetros fáciles de determinar, los valores de humedad y temperaturas tiene interés para el dimensionado del secadero correspondiente así como para poder predecir la historia que experimentará el producto a su paso por el aparato, lo cual permite intuir - cierto tipo de alteraciones debidas a la temperatura y/o humedad tales como la desnaturalización de proteínas, variación - en el contenido vitamínico o microbiológico (96) y las reacciones de Maillard (91).

3.- DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

3.1.- DETERMINACION DE LAS HUMEDADES DE EQUILIBRIO

Para su determinación, se utilizó el dispositivo - de Evans y Cristchfield (78) y empleado por diversos investigadores (1, 8, 53). Consiste, esencialmente, en una serie de - frascos de boca ancha cerrados herméticamente por una tapade- ra de material plástico con una junta de goma figura 3.1 ; - en el fondo de estos frascos se sitúan soluciones saturadas - de diversas sales, las cuales crean en las cámaras superiores de las mismas un ambiente de humedad relativa perfectamente - conocida, a la temperatura de operación (25°C). En la tapade- ra de los frascos se practicó un orificio en el que se acopló perfectamente un tapón de caucho, atravesado por un alambre, del que pendía una cestilla de hierro galvanizado. Dentro de ellas se colocaron los pesasustancias que contenían los mate- riales que se estudiaron. Estos materiales habían sido previa- mente deshidratados y triturados. Periódicamente se realiza - ban pesadas, desacoplando la tapadera del frasco y pesando - las muestras en el pesasustancias.

Para la deshidratación de las muestras se utilizó - una estufa tipo universal de aire forzado, marca Selecta, de 3000 W. y para mantener las disoluciones se utilizó una estu- fa de cultivos marca Tarma de 4000 W.

3.2.- APARATO UTILIZADO EN EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO.

Se esquematiza en la figura 3.2. El material a se-

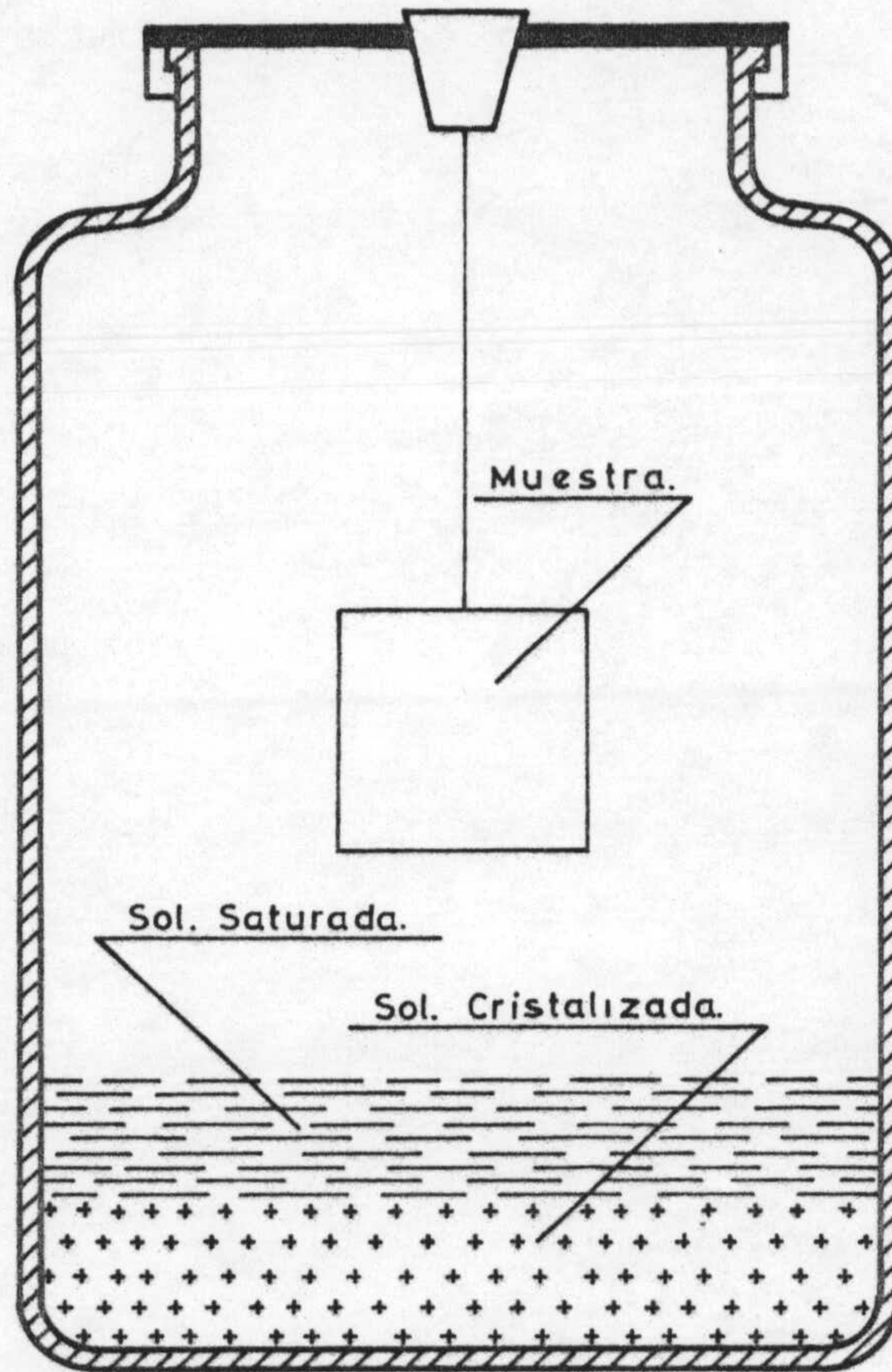


Fig.3.1-Dispositivo experimental empleado en la determinacion de la humedad de equilibrio.

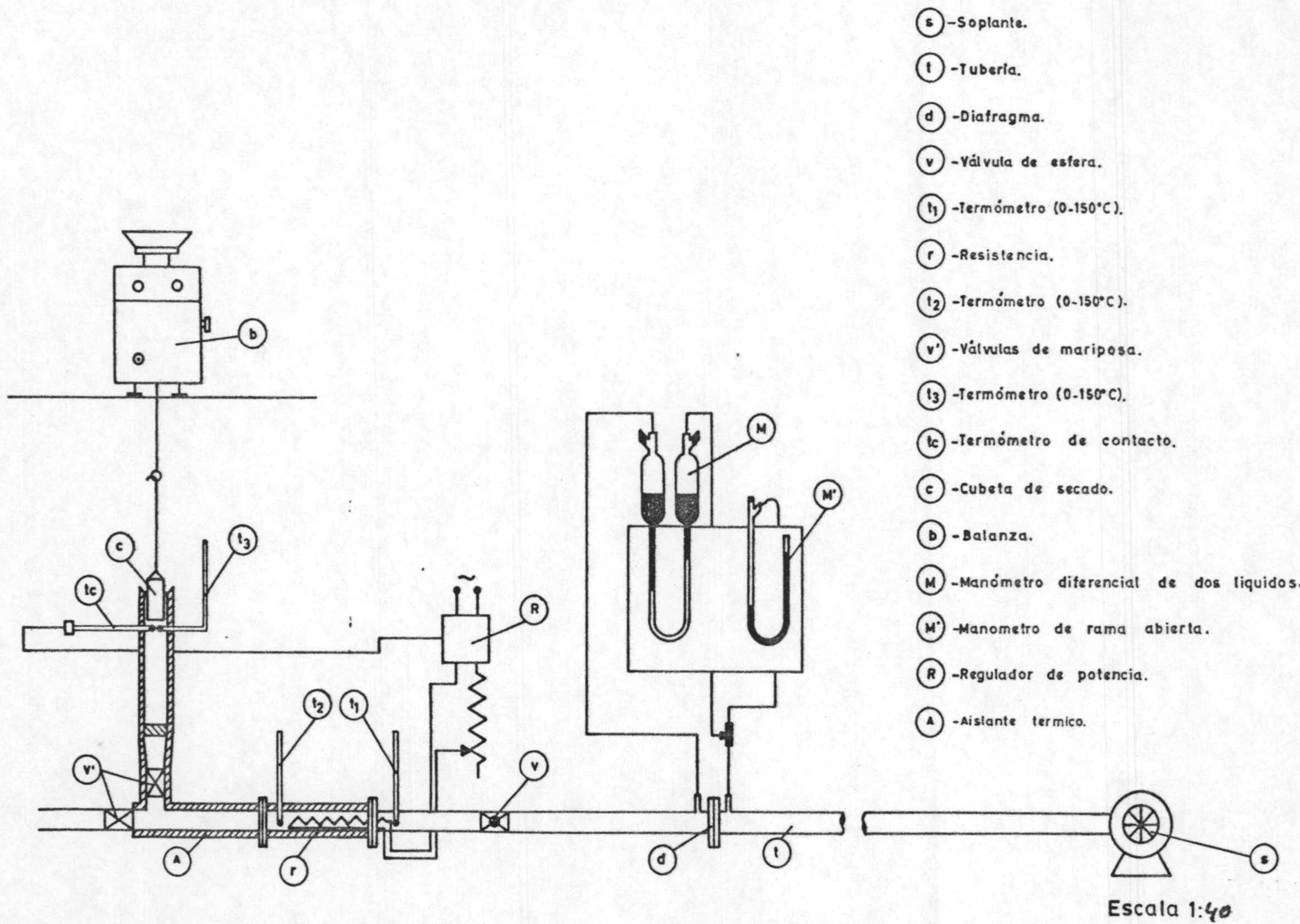


Fig. 3.2.-Dispositivo empleado en el estudio experimental del secado.

car, se situó en una cubeta de aluminio, en cuyo fondo existía una malla metálica que tenía la misión de servir de soporte y distribuir uniformemente el aire de secado. Se adoptó la forma circular por considerar habría de presentar menos espacios muertos que la rectangular.

La cubeta llevaba unos tirantes de hilo de cobre que se colgaban del gancho de una balanza monoplato lo que permitía efectuar las pesadas con gran rapidez y exactitud, asimismo, tenía adherida una banda de caucho, para que una vez acoplada a la instalación de secado todo el caudal de aire circulase a través de los materiales a secar.

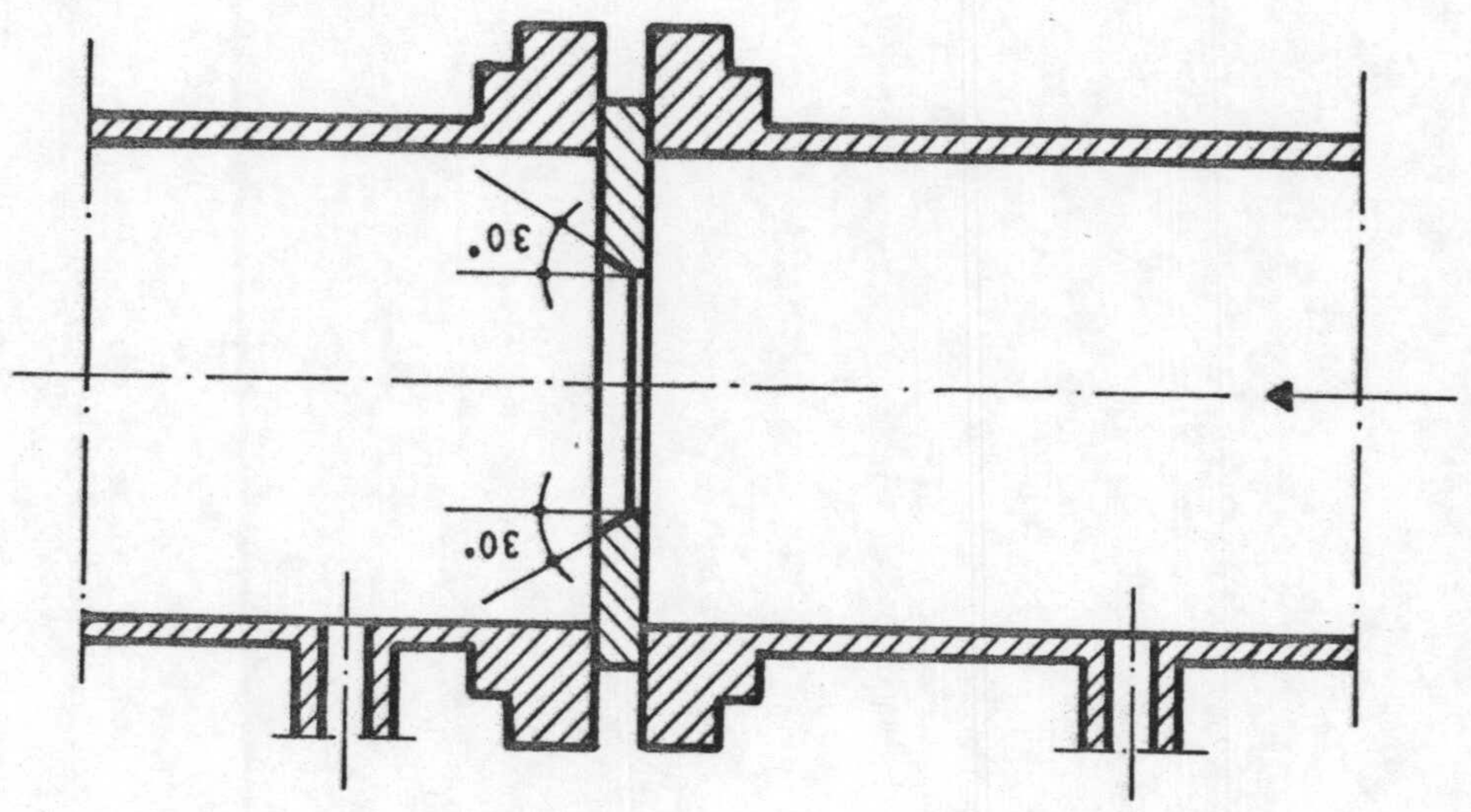
El aire de secado, que se impulsaba por una soplante (S) pasando por el tubo (t), llegaba hasta el material contenido en la cubeta.

El caudal de aire se reguló mediante una válvula de esfera (V) y se determinó con un diafragma (d) figura 3.3., previamente calibrado, conectado a un manómetro diferencial de dos líquidos (alcohol isoamílico-agua). Un manómetro en U de rama abierta (M'), que usaba agua como líquido manométrico, permitía la medida de la presión estática del aire antes de entrar en el diafragma.

El aire se calentaba al pasar por un conjunto de cuatro resistencias, de 1000 vatios cada una, conectadas independientemente a un regulador de potencia, de 8000 vatios, pudiendo así controlar la temperatura del aire de secado, la cual se medía por un termómetro (t_3) colocado inmediatamente-

Fig. 3.3.-Dispositivo experimental empleado en la medida del caudal de aire.

Escala 1:2



antes del lecho de materiales a secar. Un termómetro de contacto (t_c), conectado al regulador, sirvió de ayuda para controlar más fácilmente la temperatura en los experimentos.

Las dos válvulas de mariposa (V'), permiten realizar las distintas pesadas de manera fiable pues accionándolas, se conseguía que el aire de secado no pasase por la columna en el momento de realizar la pesada.

Con objeto de obtener un caudal suficiente de aire para cada experimento, se utilizó una soplante marca CASALS, de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ y 400 m. c. a. de presión, acoplada a un motor SIEMENS, de 0,75 C.V.

La humedad del aire utilizado se determinó con la ayuda de un higrómetro de Daniell instalado en el laboratorio, que determinaba el punto de rocío por enfriamiento de un recipiente con termómetro incorporado. Mediante una tabla adjunta se podía entonces determinar la humedad relativa conociendo la temperatura ambiente.

Tanto el tubo por el que circulaba el aire (7,62 cm. de diámetro interno), como la columna de secado (81 cm. de altura y 10 cm. de diámetro interno), fueron construidos de hierro forjado. Esta última en su base llevaba una malla de cobre, que distribuía uniformemente el aire, e iba asentada sobre un tronco de cono.

La instalación fue recubierta con un aislante térmico (A) a partir del tramo del tubo en que se encontraban las resistencias.

3.3.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LOS MATERIALES UTILIZADOS.

Se realizó con el auxilio de dos termopares de cobre-constantan, conectados a un registro gráfico de temperatura, uno situado en el seno del aire caliente y otro a lo largo del radio de la esfera del material utilizado. El aparato de medida, poseía una escala desde -60 hasta 140°C, por lo que se pudo trabajar a todas las temperaturas ensayadas.

4.- MATERIALES Y PROCEDIMIENTO



4.- MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

4.1.- MATERIALES

Se utilizaron soportes catalíticos de forma esférica, constituidos básicamente por alúmina fundida, que fueron suministrados por la firma inglesa Norton Chemical Process Ltd., de 1, 3/4, 1/2, 3/8, 5/16, y 3/16 de pulgada de diámetro. Las características del material quedan recogidas en la Tabla 4.1.

T A B L A 4.1

Propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados.

Propiedades Físicas		Propiedades Químicas (porcentual)	
Porosidad %	38-46	Al ₂ O ₃	85,2
		SiO ₂	13,5
Absorción agua %	17-25	Fe ₂ O ₃	0,2
		TiO ₂	0,2
Densidad g/c.c.	1,9-2,2	CaO	0,03
		MgO	0,1
		Na ₂ O	0,3
Superficie específica m ² /g	0,200-0,500	K ₂ O	0,45
		ZrO ₂ +HfO ₂	0,05

4.2.- PROCEDIMIENTO.

4.2.1.- DETERMINACION DE LAS HUMEDADES DE EQUILIBRIO.

Para la determinación de cada curva de equilibrio se preparó una colección de nueve frascos que se numeraron del 1 al 9. En estos frascos se introdujeron, hasta una altura de tres cm. a partir del fondo, las soluciones acuosas de las sales que se detallan en la tabla 4.2. De esta forma, al introducir posteriormente la cestilla portadora del pesasus - tancias que contenía el material triturado, la disolución no - contaminaba a éstos.

T A B L A 4.2

Disoluciones saturadas empleadas para obtener una atmósfera de humedad relativa constante.

Nº frasco	Sal disuelta	Humedad relativa a 25°C (%)
1	Hidróxido Potásico	8
2	Acetato Potásico	22
3	Cloruro Magnésico	33
4	Carbonato Potásico	43
5	Nitrato Magnésico	53
6	Nitrito Sódico	65
7	Cloruro Sódico	75
8	Cloruro Potásico	85
9	Sulfato Potásico	97

Después de tarar los pesasustancias, se introducían en ellos las muestras previamente trituradas perfectamente secas. Una vez pesado el conjunto (pesasustancias mas muestras), se introducían colocados en sus correspondientes cestas, en los frascos de humedad conocida, los cuales se almacenaban en una estufa de cultivos a 25°C. Las muestras se pesaban periódicamente, hasta conseguir una pesada constante. Las humedades de equilibrio se determinaron por la relación entre el agua retenida y el peso inicial de muestra.

4.2.2.- HUMIDIFICACION PREVIA DE LOS MATERIALES.

Las esferas de alúmina fundida se humedecían antes de cada experimento de secado introduciéndolas en agua destilada a ebullición, durante una hora; una vez que se había enfriado el agua, se extendían sobre un papel de filtro, que retenía la humedad superficial de las mismas, de esta forma quedaban listas para el experimento.

4.2.3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO.

Durante cada experimento de secado, se mantuvieron constantes las propiedades físicas del aire (temperatura, humedad y velocidad másica). El modo de operar en cada caso, se resume a continuación:

En primer lugar se abría la válvula de esfera que daba paso al aire procedente de la soplante, estabilizando el caudal previsto. Con la lectura en el higrómetro existente en

el laboratorio, se determinó su humedad relativa. A continuación, actuando sobre el regulador de potencia, se regulaba la temperatura del aire que había de atravesar el lecho de esferas. Esta temperatura se controló con el termómetro colocado inmediatamente antes de la cubeta de secado. En élla se colocaron las esferas de alúmina fundida húmedas hasta cubrir el espesor de lecho utilizado en el experimento. Finalmente se suspendió la cubeta del gancho de la balanza y se procedió a determinar el peso inicial del material húmedo.

Dado que el caudal y temperatura del aire estaban regulados inmediatamente se acopló la cubeta a la columna y se inició el experimento. Periódicamente se determinó la pérdida de peso experimentada por el lecho, lo cual equivalía a la cantidad de agua eliminada.

4.2.4.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA EN LAS ESFERAS DE ALUMINA.

Una vez fijadas la velocidad másica y la temperatura del aire se colocaron en la cubeta las esferas hasta cubrir el espesor de lecho utilizado en el experimento. A continuación se introdujo uno de los termopares en el interior de una de las esferas y el otro se expuso a la corriente de aire de esta forma en el registro gráfico se ponía de manifiesto la diferencia de temperaturas entre ambos termopares. Como la temperatura del aire era conocida se podía conocer, en cada instante, la temperatura en el interior de la esfera.

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1.- HUMEDADES DE EQUILIBRIO.

Se han determinado las humedades de equilibrio, para los seis tamaños de esferas utilizados. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 5.1.

5.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO.

5.2.1.- ELECCION DEL ESPESOR DE LECHO.

Con vistas a utilizar en ulteriores experimentos - una altura de lecho (en la cubeta del aparato utilizado), tal que el contenido en humedad del conjunto fuera representativa del contenido medio en humedad de cada esfera y que, al mismo tiempo, supusiera trabajar con una cantidad de material lo suficientemente grande para que el error de pesada fuera el menor posible, se realizaron varios experimentos de secado modificando en cada uno de ellos la altura del lecho y manteniendo constantes las demás condiciones de operación. En las tablas 5.2 a 5.7 se detallan los valores de las alturas de lecho ensayadas y las condiciones de operación reinantes en cada experimento.

5.2.2.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL AIRE.

Para estudiar la influencia de la velocidad másica, sobre la velocidad de secado, se realizaron varios experimentos cambiando de uno a otro la magnitud de esta variable y - manteniendo constantes las demás condiciones. Los experimen -

T A B L A 5-1

Variación de las humedades de equilibrio (X_e)* con la humedad relativa ambiente a 25°C.

Diámetro esfera, D_p (pulgadas)	Humedad Relativa ambiente expresada en tanto por uno								
	0,08	0,22	0,33	0,43	0,53	0,65	0,75	0,85	0,97
1	0,006	0,009	0,009	0,011	0,012	0,015	0,010	0,029	0,511
3/4	0,005	0,009	0,011	0,010	0,013	0,027	0,018	0,031	0,421
1/2	0,006	0,009	0,010	0,009	0,021	0,018	0,021	0,046	0,567
3/8	0,006	0,009	0,008	0,013	0,015	0,018	0,020	0,095	0,351
5/16	0,003	0,005	0,008	0,011	0,013	0,017	0,018	0,020	0,359
3/16	0,006	0,006	0,008	0,012	0,016	0,015	0,020	0,036	0,359

* X_e = humedad de equilibrio (Kg. de agua/100 Kg. de sólido seco).

T A B L A 5.2

Variación del contenido en humedad de las esferas de 1" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del espesor de lecho.

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 8,5 cm. (4 capas) $\psi = 0,18$	L= 6,5 cm. (3 capas) $\psi = 0,38$	L= 4 cm. (2 capas) $\psi = 0,38$	L= 2 cm. (1 capa) $\psi = 0,38$
	X	X	X	X
0	0,202	0,194	0,194	0,198
2	0,178	0,172	0,168	0,183
4	0,157	0,134	0,147	0,167
6		0,132	0,127	0,151
7	0,127			
10		0,091	0,088	0,120
11	0,085			
14		0,054	0,050	0,088
15	0,050			
18		0,027	0,025	0,057
19	0,025			
22		0,016	0,015	0,032
23	0,015			
26		0,010	0,010	0,021
27	0,009			
30		0,005	0,006	0,014
31	0,005			
34		0,003	0,002	0,010
35	0,002			
38		0,001	0,001	0,007
39	0,001			
42		0,001	0,001	
45	0,001			0,003
50				0,001

T A B L A 5.3

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/4" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del es pesor de lecho.

Temperatura del aire de secado: $t_a = 60^{\circ}\text{C}$.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 6 cm. $\psi = 0,61$	L= 4,5 cm. $\psi = 0,67$	L= 3 cm. $\psi = 0,5$	L= 1,5 cm. $\psi = 0,5$
	X	X	X	X
0	0,195	0,186	0,187	0,186
2	0,169	0,155	0,161	0,163
4	0,146	0,140	0,135	0,141
6	0,124	0,119	0,111	0,119
8	0,102	0,097	0,087	0,106
10	0,081	0,077	0,069	0,089
12	0,062	0,058	0,051	0,070
14	0,046	0,043	0,038	0,051
16	0,035	0,035	0,030	0,038
18	0,027	0,029	0,023	0,030
20	0,022	0,024	0,017	0,025
22	0,017	0,021	0,015	0,020
24	0,013	0,018	0,012	0,017
26	0,011	0,015	0,011	0,014
28	0,009	0,013	0,009	0,012
30	0,008	0,012	0,009	0,010
32	0,007	0,011	0,008	0,010
34	0,006	0,010	0,007	0,009
36		0,009	0,007	0,009
38		0,009	0,006	
39	0,005			
40		0,009	0,006	
41				0,006
42			0,004	
44	0,004			

T A B L A 5.4

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 1/2" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del es pesor se lecho.

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^{\circ}\text{C}$.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 5 cm. $\varphi = 0,28$	L= 4 cm. $\varphi = 0,52$	L= 3 cm. $\varphi = 0,28$	L= 2 cm. $\varphi = 0,28$
	X	X	X	X
0	0,196	0,190	0,193	0,203
2	0,150	0,143	0,140	0,145
4	0,106	0,095	0,089	0,089
6	0,065	0,054	0,046	0,041
8	0,033	0,028	0,018	0,017
10	0,016	0,013	0,007	0,008
12	0,007	0,007	0,003	0,003
14	0,003	0,003	0,002	0,002
16	0,002	0,002	0,001	0,002
18	0,001	0,001	0,001	0,001
20	0,001	0,001	0,001	0,001

T A B L A 5.5

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/8" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del es pesor de lecho.

Temperatura del aire de secado: $t_a = 40^{\circ}\text{C}$.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 8 cm. $\psi = 0,38$	L= 6 cm. $\psi = 0,62$	L= 5 cm. $\psi = 0,62$	L= 4 cm. $\psi = 0,62$	L= 3 cm. $\psi = 0,62$	L= 2 c $\psi = 0,6$
	X	X	X	X	X	X
0	0,199	0,198	0,197	0,208	0,203	0,202
2	0,164	0,147	0,138	0,144	0,133	0,129
4	0,113	0,098	0,084	0,083	0,062	0,059
6	0,077	0,055	0,040	0,034	0,022	0,015
8	0,044	0,025	0,014	0,011	0,005	0,003
10	0,022	0,009	0,003	0,003	0,001	0,001
12	0,007	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001
14	0,002	0,001	0,001	0,001		
16	0,001	0,001				
18	0,001					

T A B L A 5.6

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 5/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del - espesor de lecho.

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Velocidad másica: 9.300 kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 5 cm. $\varphi = 0,61$	L= 4 cm. $\varphi = 0,61$	L= 3 cm. $\varphi = 0,61$	L= 2 cm. $\varphi = 0,61$
	X	X	X	X
0	0,166	0,162	0,176	0,168
1	.	0,131	0,124	0,121
2	0,108	0,100	0,085	0,082
4	0,057	0,046	0,026	0,021
6	0,019	0,013	0,002	0,002
8	0,003	0,001	0,001	0,001
10	0,001	0,001	0,001	0,001
12	0,001			

T A B L A 5.7

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia del - espesor de lecho.

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m^2 .

θ (min.)	L= 5 cm.	L= 4 cm.	L= 3 cm.	L= 2 cm.	L= 1 cm.
	$\psi = 0,64$	$\psi = 0,64$	$\psi = 0,64$	$\psi = 0,64$	$\psi = 0,64$
	X	X	X	X	X
0	0,158	0,156	0,154	0,150	0,164
1	0,130	0,125	0,108	0,090	0,095
2	0,102	0,090	0,069	0,037	0,035
4	0,052	0,029	0,011	0,002	0,002
6	0,014	0,003	0,001	0,001	0,001
8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
10	0,001	0,001			

- tos se realizaron con los seis tamaños de esferas descritos - en el apartado 4.1.

Las tablas 5.8 a 5.13 muestran las velocidades mási cas ensayadas, las condiciones de operación y los resultados- medios obtenidos.

5.2.3.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.

Para estudiar la influencia de esta variable, se realizaron cinco experimentos de secado, utilizando aire a - distintas temperaturas (40, 50, 60, 70 y 80°C) con cada uno - de los seis tamaños de las esferas ensayadas. En todos los ex perimentos se utilizó una velocidad másica del aire de 9.300 Kg/h.m² y un espesor de lecho que correspondía con aquél en - el que se había encontrado que la variación del contenido de humedad con el tiempo, no parecía resultar afectada al modifi car dicha variable.

Los resultados obtenidos se detallan en las tablas 5.14 a 5.19.

5.3.- TRANSMISION DE CALOR EN LOS MATERIALES UTILI- ZADOS.

T A B L A 5.8

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 1" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G^*).

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Espesor de lecho: 6,5 cm. (3 capas).

θ (min.)	$G = 5.200$	$G = 8.225$	$G = 9.300$	$G = 10.870$
	$\varphi = 0,47$	$\varphi = 0,47$	$\varphi = 0,38$	$\varphi = 0,28$
	X	X	X	X
0	0,202	0,200	0,194	0,201
2	0,189	0,183	0,172	0,175
4	0,175	0,164	0,152	0,153
6	0,162	0,147	0,132	0,131
8	0,149	0,130	0,111	0,110
10	0,135	0,113	0,091	0,089
12	0,122	0,096	0,072	0,068
14	0,109	0,080	0,054	0,051
16	0,097	0,060	0,038	0,035
18	0,084	0,045	0,027	0,026
20	0,071	0,035	0,020	0,020
22	0,060	0,026	0,016	0,016
24	0,048		0,012	0,012
26	0,038		0,009	0,009
30	0,025	0,012	0,005	0,005
40	0,006	0,004	0,001	
50	0,002	0,001		
60	0,001	0,001		
70	0,001			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5.9

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/4" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G^*).

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Espesor de lecho: 4,5 cm. (3 capas).

θ (min.)	$G = 5.360$	$G = 8.200$	$G = 9.300$	$G = 10.830$
	$\varphi = 0,67$	$\varphi = 0,67$	$\varphi = 0,67$	$\varphi = 0,67$
	X	X	X	X
0	0,193	0,190	0,186	0,186
2	0,176	0,168	0,155	0,161
4	0,161	0,148	0,140	0,136
6	0,146	0,124	0,119	0,113
8	0,130	0,098	0,097	0,091
10	0,115	0,075	0,067	0,069
12	0,100	0,057	0,058	0,052
14	0,086	0,043	0,043	0,042
16	0,072	0,035	0,035	0,035
18	0,058	0,029	0,029	0,030
20	0,046	0,025	0,024	0,026
22	0,037	0,021	0,021	0,024
24	0,030	0,019	0,017	0,021
26	0,025	0,016	0,015	0,019
28	0,021	0,015	0,013	0,018
30	0,018	0,013	0,012	0,017
40	0,010	0,010	0,010	0,014
50	0,007	0,008	0,007	
60	0,006	0,006	0,006	0,012
70	0,005	0,004	0,005	0,012
80	0,004	0,002		
85	0,004			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5.10

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 1/2" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G^*).

Temperatura del aire de secado: $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Espesor de lecho: 3 cm.

θ (min.)	$G = 5.200$	$G = 8.220$	$G = 9.300$	$G = 11.300$
	$\varphi = 0,52$	$\varphi = 0,52$	$\varphi = 0,28$	$\varphi = 0,52$
	X	X	X	X
0	0,201	0,189	0,193	0,193
2	0,174	0,145	0,140	0,136
4	0,144	0,101	0,089	0,081
6	0,118	0,060	0,043	0,038
8	0,089	0,030	0,018	0,016
10	0,062	0,015	0,007	0,008
12	0,041	0,007	0,003	0,008
18	0,007	0,002	0,001	0,002
20	0,004	0,001	0,001	
26	0,002	0,001		
33	0,002			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5.11

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/8" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G*).

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^{\circ}\text{C}$.

Espesor de lecho: 3 cm.

θ (min.)	G= 6.040 $\varphi = 0,34$	G= 9.300 $\varphi = 0,38$	G= 9.880 $\varphi = 0,34$	G= 10.840 $\varphi = 0,34$
	X	X	X	X
0	0,206	0,203	0,192	0,205
2	0,150	0,133	0,125	0,130
4	0,098	0,064	0,068	0,059
6	0,054	0,022	0,039	0,016
8	0,023	0,005	0,004	0,003
10		0,001	0,001	0,001
11	0,005			
12		0,0002	0,001	0,001
13	0,002			
14		0,0002		
15	0,001			
17	0,001			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5.12

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 5/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G*).

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^\circ\text{C}$.

Espesor de lecho: 3 cm.

θ (min.)	G= 5.800 $\psi = 0,65$	G= 7.900 $\psi = 0,65$	G= 9.300 $\psi = 0,65$	G= 10.890 $\psi = 0,65$
	X	X	X	X
0	0,169	0,166	0,171	0,170
1	0,122	0,134	0,130	0,123
2	0,089	0,048	0,087	0,082
4	0,058	0,042	0,022	0,021
6	0,025	0,009	0,002	0,002
8	0,008	0,002	0,001	0,001
10	0,002	0,001		
12	0,002	0,001		
14	0,001			
16	0,001			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5.13

Variación del contenido en humedad de las esferas - de 3/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la velocidad másica del aire (G*).

Temperatura del aire de secado $t_a = 60^{\circ}\text{C}$.

Espesor de lecho: 2 cm.

θ (min.)	G= 5.800 $\psi = 0,75$	G= 7.800 $\psi = 0,75$	G= 9.300 $\psi = 0,64$	G= 10.070 $\psi = 0,75$
	X	X	X	X
0	0,147	0,152	0,150	0,145
1	0,106	0,100	0,090	0,085
2	0,058	0,054	0,037	0,038
4	0,013	0,006	0,002	0,003
6	0,002	0,002	0,001	0,001
8	0,001	0,002		
10	0,001			

* $G = \text{Kg/h.m}^2$

T A B L A 5-14

Variación del contenido en humedad de las esferas de 1" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la temperatura del aire (t_a)

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espeor de lecho: 6,5 cm. (3 capas)

θ (min)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	$\varphi = 0,52$	$\varphi = 0,52$	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,52$
	X	X	X	X	X
0	0,198	0,202	0,202	0,200	0,198
2	0,191	0,187	0,185	0,179	0,171
4	0,176	0,171	0,168	0,158	0,143
6	0,164	0,156	0,150	0,136	0,115
8	0,152	0,142	0,132	0,114	0,088
10	0,140	0,129	0,113	0,093	0,051
12	0,126	0,115	0,095	0,073	0,033
14	0,118	0,098	0,078	0,054	0,022
16	0,110	0,085	0,060	0,038	0,018
18	0,101	0,071	0,046	0,027	0,011
20	0,093	0,055	0,034	0,020	0,007
30	0,054	0,020	0,009	0,003	0,001
40	0,021	0,011	0,002	0,001	
50	0,007	0,005	0,001		
60	0,002	0,001			
70	0,001				

T A B L A 5-15

Variación del contenido en humedad de las esferas de 3/4" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la temperatura del aire (t_a).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espesor de lecho: 4,5 cm.

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	$\varphi = 0,60$	$\varphi = 0,77$	$\varphi = 0,67$	$\varphi = 0,72$	$\varphi = 0,60$
	X	X	X	X	X
0	0,184	0,187	0,186	0,180	0,178
2	0,167	0,166	0,155	0,146	0,139
4	0,153	0,149	0,140	0,115	0,104
6	0,141	0,127	0,119	0,086	0,065
8	0,129	0,110	0,097	0,060	0,039
10	0,119	0,092	0,077	0,040	0,024
12	0,108	0,077	0,058	0,028	0,017
14	0,095	0,062	0,043	0,021	0,012
16	0,086	0,050	0,035	0,016	0,008
18	0,078	0,041	0,029	0,012	0,006
20	0,069	0,034	0,024	0,009	0,005
22	0,061	0,030	0,021	0,008	0,004
30	0,040	0,019	0,012	0,005	0,002
40	0,030	0,013	0,008	0,004	0,001
50	0,025	0,011	0,007	0,003	0,001
60	0,020	0,008	0,006	0,002	
70	0,016	0,007	0,005	0,002	
80	0,015	0,006	0,005		
90	0,014	0,006			
100	0,013				

T A B L A 5-16

Variación del contenido en humedad de las esferas-
de 1/2" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la
temperatura del aire (t_a).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espesor de lecho: 3 cm

θ (min.)	$t_a = 40^{\circ}\text{C}$	$t_a = 50^{\circ}\text{C}$	$t_a = 60^{\circ}\text{C}$	$t_a = 70^{\circ}\text{C}$	$t_a = 80^{\circ}\text{C}$
	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,48$	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,62$
	X	X	X	X	X
0	0,193	0,198	0,181	0,192	0,184
2	0,167		0,137	0,136	0,121
4	0,145	0,127	0,094	0,082	0,059
6	0,117	0,093	0,052	0,036	0,019
8	0,095	0,057	0,025	0,013	0,001
10	0,074	0,031	0,013	0,004	0,001
12	0,045	0,019	0,007	0,001	
14	0,033	0,012	0,003	0,001	
16	0,022	0,008	0,002		
18	0,017	0,005	0,002		
20	0,014	0,004			
28	0,006	0,002			
36	0,003				

T A B L A 5-17

Variación del contenido en humedad de las esferas-
de 3/8" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la
temperatura del aire (t_a).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espesor de lecho: 3 cm.

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	$\varphi = 0,18$	$\varphi = 0,18$	$\varphi = 0,18$	$\varphi = 0,18$	$\varphi = 0,18$
	X	X	X	X	X
0	0,188	0,194	0,185	0,180	0,191
2	0,139	0,132	0,112	0,093	0,086
4	0,098	0,078	0,050	0,025	0,006
6	0,060	0,033	0,016	0,003	0,001
8	0,033	0,013	0,004	0,002	0,001
10	0,017	0,004	0,002	0,001	
12	0,009	0,002	0,001	0,001	
14		0,001	0,001		
16	0,003	0,001			
20	0,001				
22	0,001				

T A B L A 5-18

Variación del contenido en humedad de las esferas de 5/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la temperatura del aire (t_a).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espesor de lecho: 3 cm.

θ (min.)	$t_a = 40^{\circ}\text{C}$	$t_a = 50^{\circ}\text{C}$	$t_a = 60^{\circ}\text{C}$	$t_a = 70^{\circ}\text{C}$	$t_a = 80^{\circ}\text{C}$
	$\varphi = 0,65$	$\varphi = 0,65$	$\varphi = 0,65$	$\varphi = 0,65$	$\varphi = 0,65$
	X	X	X	X	X
0	0,170	0,161	0,171	0,168	0,167
1	0,138	0,135	0,120	0,120	0,112
2	0,111	0,097	0,087	0,074	0,059
4	0,075	0,047	0,022	0,017	0,005
6	0,044	0,015	0,002	0,002	0,001
8	0,020	0,004	0,001	0,001	0,001
10	0,008	0,001	0,001	0,001	
12	0,003	0,001			
14	0,001				
16	0,001				



T A B L A 5-19

Variación del contenido en humedad de las esferas de 3/16" de diámetro con el tiempo de secado: Influencia de la temperatura del aire (t_a).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

Espesor de lecho: 2 cm.

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	$\varphi = 0,75$	$\varphi = 0,75$	$\varphi = 0,64$	$\varphi = 0,75$	$\varphi = 0,75$
	X	X	X	X	X
0	0,152	0,155	0,150	0,154	0,147
1	0,120	0,110	0,090	0,082	0,067
2	0,094	0,074	0,037	0,028	0,013
4	0,049	0,019	0,002	0,002	0,001
6	0,019	0,004	0,001	0,001	0,001
8	0,006	0,002	0,001	0,001	
10	0,002	0,002			
12	0,001				
14	0,001				

5.3.1.- VARIACION DE LA TEMPERATURA EN LAS ESFERAS
DE ALUMINA.

Con objeto de medir la variación de la temperatura de las esferas a lo largo del tiempo de secado, se realizaron una serie de experimentos cuyos resultados se exponen en las tablas 5.20 a 5.23. Las condiciones de operación (espesor de lecho, velocidad másica, temperatura del aire utilizado), fueron idénticas a las descritas en el párrafo 5.2.3.

Debido a las dificultades experimentales surgidas con las esferas más pequeñas ($3/16''$ y $5/16''$) estos experimentos sólo se realizaron para los otros cuatro tamaños.

T A B L A 5-20

Variación de la temperatura media de las esferas-
de 1" de diámetro con el tiempo de secado.

Espesor de lecho: 6,5 cm (3 capas).

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m².

θ (min)	$t_a = 40^{\circ}\text{C}$	$t_a = 50^{\circ}\text{C}$	$t_a = 60^{\circ}\text{C}$	$t_a = 70^{\circ}\text{C}$	$t_a = 80^{\circ}\text{C}$
	t_s	t_s	t_s	t_s	t_s
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
1	28,93	30,68	33,30	34,67	33,12
2	29,01	30,72	34,00	35,50	34,79
4	29,03		34,18	36,33	35,67
6	29,18	30,77	34,68	37,67	36,17
8	29,37		35,01	38,17	37,39
10	29,40	31,10	35,31	39,50	42,32
12			35,65	42,17	54,36
14		31,14	36,50	47,67	61,74
16		32,27	37,98	53,67	67,27
18		33,10	41,48	58,00	70,59
20	29,62	34,68	45,96	61,50	72,79
22		36,77	49,98	63,25	74,59
24		39,52	52,78	65,08	77,52
26		42,10	55,05	66,00	79,54
28		43,43	56,76	66,75	
30	30,33	44,77	57,63	67,58	
36		46,93	59,25	68,67	
38			59,50		
40	33,87	47,52			
50	37,43	48,93			
60	38,98				
70	39,67				
75	39,95				

T A B L A 5-21

Variación de la temperatura media de las esferas -
(t_s) de 3/4" de diámetro con el tiempo de secado.

Espesor de lecho: 4,5 cm. (3 capas).

Velocidad másica: 9.300 kg/h.m².

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	t_s	t_s	t_s	t_s	t_s
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
1	28,70	31,88	31,75	35,67	35,53
2	28,80	32,25	33,50	36,00	37,08
4	28,90	32,63	35,30	37,08	38,55
6	29,10	33,00	36,65	38,83	42,27
8	29,40	33,50	38,37	44,00	52,97
10	29,65	34,13	41,50	51,67	65,05
12		35,38	45,00	57,17	71,20
14		37,50	48,20	61,58	73,95
16		40,25	51,25	64,00	77,00
18		42,75	53,37	65,17	79,62
20	33,98	44,75	54,90	66,17	79,95
22		46,00	56,50	67,59	
24		46,50	57,50	68,17	
26		47,13	57,75	68,75	
28		47,38	58,50		
30	37,60	47,75	58,57		
32		48,25	59,25		
34		48,38	59,87		
40	39,03	48,50			
50	39,71				
60	39,80				

T A B L A 5-22

Variación de la temperatura media de las esferas -
(t_s) de 1/2" de diámetro con el tiempo de secado.

Espesor de lecho: 3 cm.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m².

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	t_s	t_s	t_s	t_s	t_s
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
1	29,00	30,58	32,90	34,25	36,18
2	29,01	30,61	33,77	35,13	37,48
3				35,75	39,58
4	29,07	31,25	35,23	37,25	44,95
5				42,00	54,58
6	29,23	31,58	38,60	46,38	62,93
7				53,00	68,95
8	29,85	32,83	43,42	57,88	73,03
9				61,50	78,58
10	30,20	35,83	49,29	63,50	
11				65,13	
12		40,17	53,50	67,50	
13				69,00	
14		43,92	56,00	69,50	
15				69,75	
16		45,67	57,87		
18		46,17	58,87		
20	36,18	47,33	59,57		
22		47,75	59,80		
24		48,17			
26		48,33			
28		48,33			
30	38,97	49,08			
40	39,67				

T A B L A 5-23

Variación de la temperatura media de las esferas -
(t_s) de 3/8" de diámetro con el tiempo de secado.

Espesor de lecho: 3 cm.

Velocidad másica: 9.300 Kg/h.m²

θ (min.)	$t_a = 40^\circ\text{C}$	$t_a = 50^\circ\text{C}$	$t_a = 60^\circ\text{C}$	$t_a = 70^\circ\text{C}$	$t_a = 80^\circ\text{C}$
	t_s	t_s	t_s	t_s	t_s
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
1	30,47	32,33	35,45	33,67	41,21
2	30,62	32,42	36,36	35,67	43,80
3				38,42	48,98
4	30,82	33,25	39,49	43,67	64,08
5				52,00	72,28
6	31,15	35,83	50,35	57,67	78,01
7				61,00	79,51
8	31,80	40,83	56,03	64,50	79,98
9				66,17	
10	33,20	44,83	58,98	66,72	
11			59,92	66,90	
12	35,18	47,08	60,00		
14	37,27	48,17			
16	38,27	49,08			
18		49,33			
20	39,32				
26	39,95				

6.- DISCUSION DE RESULTADOS

6.1.- HUMEDADES DE EQUILIBRIO.

Los resultados experimentales que muestran la variación de la humedad de equilibrio, X_e , en función de la humedad relativa ambiente, ψ , a 25°C. para los distintos tamaños del material utilizado, se encuentran en la tabla 5.1; su observación pone de manifiesto que para cada valor de ψ , existen varios valores de X_e , pero que, por otra parte el rango de variación de la humedad de equilibrio no es muy extenso, por lo cual se decidió tomar como valor de la misma la media aritmética de los valores obtenidos para los diversos tamaños experimentados.

T A B L A 6.1

Valores medios de X_e y de $\psi/X_e(1-\psi)$

ψ	\bar{X}_e	$\psi/X_e(1-\psi)$
0,08	0,006	15,810
0,22	0,008	35,703
0,33	0,009	54,726
0,43	0,010	70,503
0,53	0,014	81,715
0,65	0,017	112,554
0,75	0,020	153,061
0,85	0,043	133,333
0,97	0,043	75,510

En la figura 6.1, se han representado en la forma de X_e frente a ψ , los valores medios de las humedades de equilibrio para cada valor de ψ . La forma sigmoïdal de esta curva es característica de un gran número de materiales (1, 2, 3, - 79, 80, 81). En la zona de bajas humedades relativas, se observa que la curva es cóncava respecto al eje de abscisas, a medida que aumenta la humedad relativa se produce un cambio de concavidad, siendo de destacar el que la pendiente de la curva crece conforme lo hace la humedad relativa, a partir del punto de inflexión. A bajas presiones de vapor de agua (bajas humedades relativas) la cantidad de agua retenida por cantidad de sólido es pequeña. Cuando las presiones parciales son elevadas (altas humedades relativas), la cantidad retenida se va elevando y tiende a crecer continuamente; por otra parte la cantidad total de agua retenida por unidad de peso de sólido seco es relativamente elevada. Estos hechos parecen indicar que el agua es retenida por el sólido mediante adsorción física y por élllo los resultados experimentales pueden correlacionarse mediante las ecuaciones de B.E.T. y Henderson, como se indicó en la sección 2.1.

6.1.1.- CORRELACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES MEDIANTE LA ECUACION DE BRUNAUER EMMETT Y TELLER (B.E.T.)

Ordenando los términos de la ecuación 2.2 , resulta:

$$\psi/X_e(1-\psi) = (K-1/X_1.K)\psi + 1/X_1.K \quad [6.1]$$

Valores medios
 $X_e \cdot 10^3 \text{ Kg. agua}$ / 100 Kg.s.s.

$t. = 25^\circ \text{C.}$

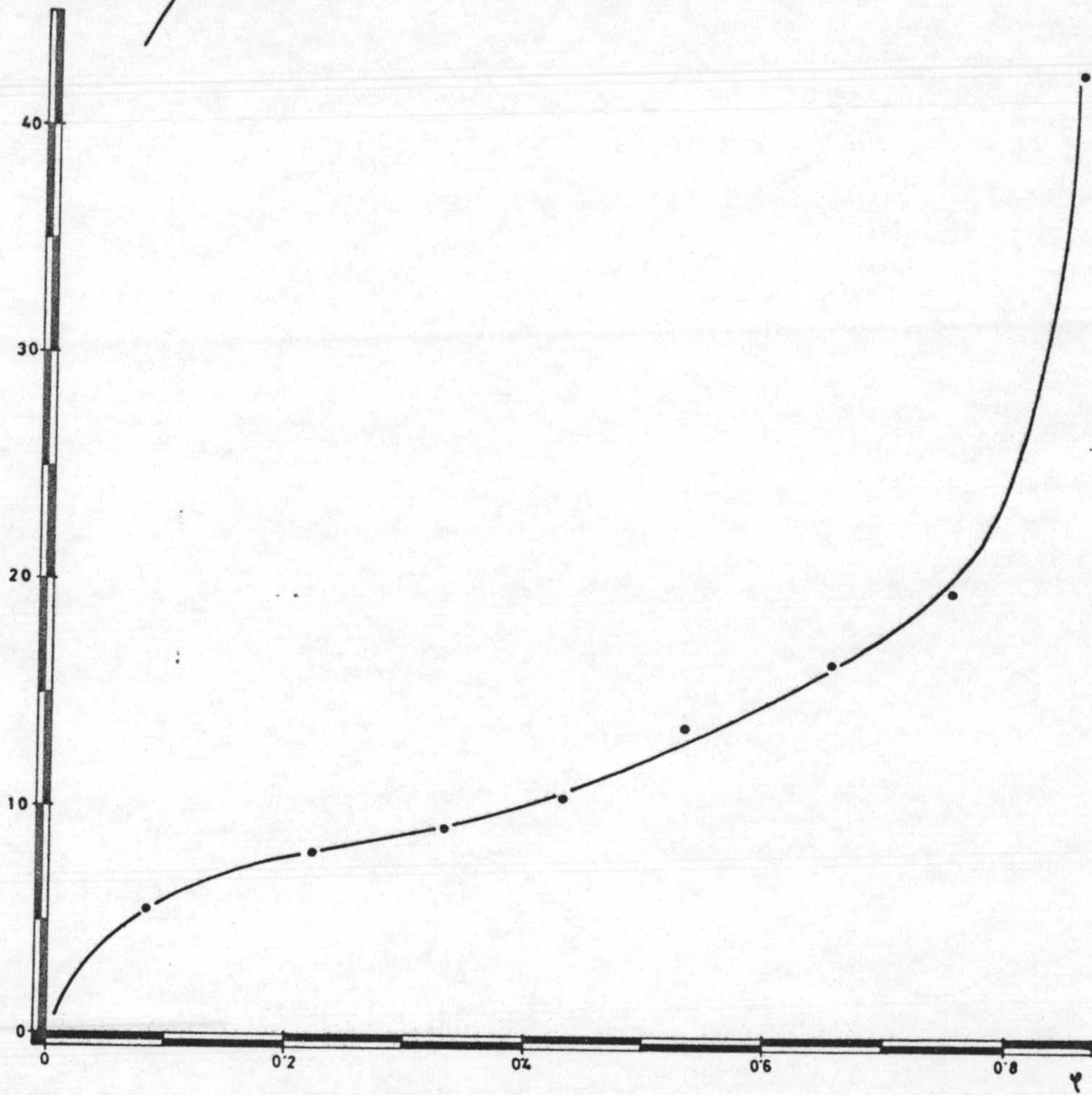


Fig. 6.1.- Isotherma de absorción de vapor de agua sobre los materiales utilizados.

Donde K, es una constante relacionada con el calor de adsorción y X_1 representa la humedad que contiene el sólido cuando ha adsorbido una capa monomolecular de agua. Tanto K como X_1 , son constantes que dependen de la naturaleza del material.

Si esta ecuación se adaptase a los resultados experimentales, al representar en coordenadas lineales el cociente $\psi/X_e(1-\psi)$ frente a ψ , debería resultar una línea recta de cuya pendiente y ordenada en el origen se podría deducir el valor de las constantes K y X_1 . Efectuando la representación indicada, utilizando los resultados experimentales que figuran en la tabla 6.1, los puntos obtenidos quedaron prácticamente alineados según una recta única en el intervalo de humedades relativas del aire de 0 a 53% (figura 6.2). Ajustando por mínimos cuadrados, a una recta, los puntos correspondientes a este intervalo se obtuvieron los valores siguientes para la ordenada en el origen y pendiente de la misma:

$$\frac{1}{K \cdot X_1} = 0,48$$

$$\frac{K-1}{K \cdot X_1} = 164,34$$

De estas dos igualdades, se dedujeron los valores:

$$K = 342,10$$

$$X_1 = 0,0061 \text{ kg agua/100 kg sólido seco.}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 6.1 y operando en la misma, se obtiene:

$$X_e = \frac{2,09 \psi}{(1-\psi) \cdot (1-\psi + 342,10 \psi)} \quad [6.2]$$

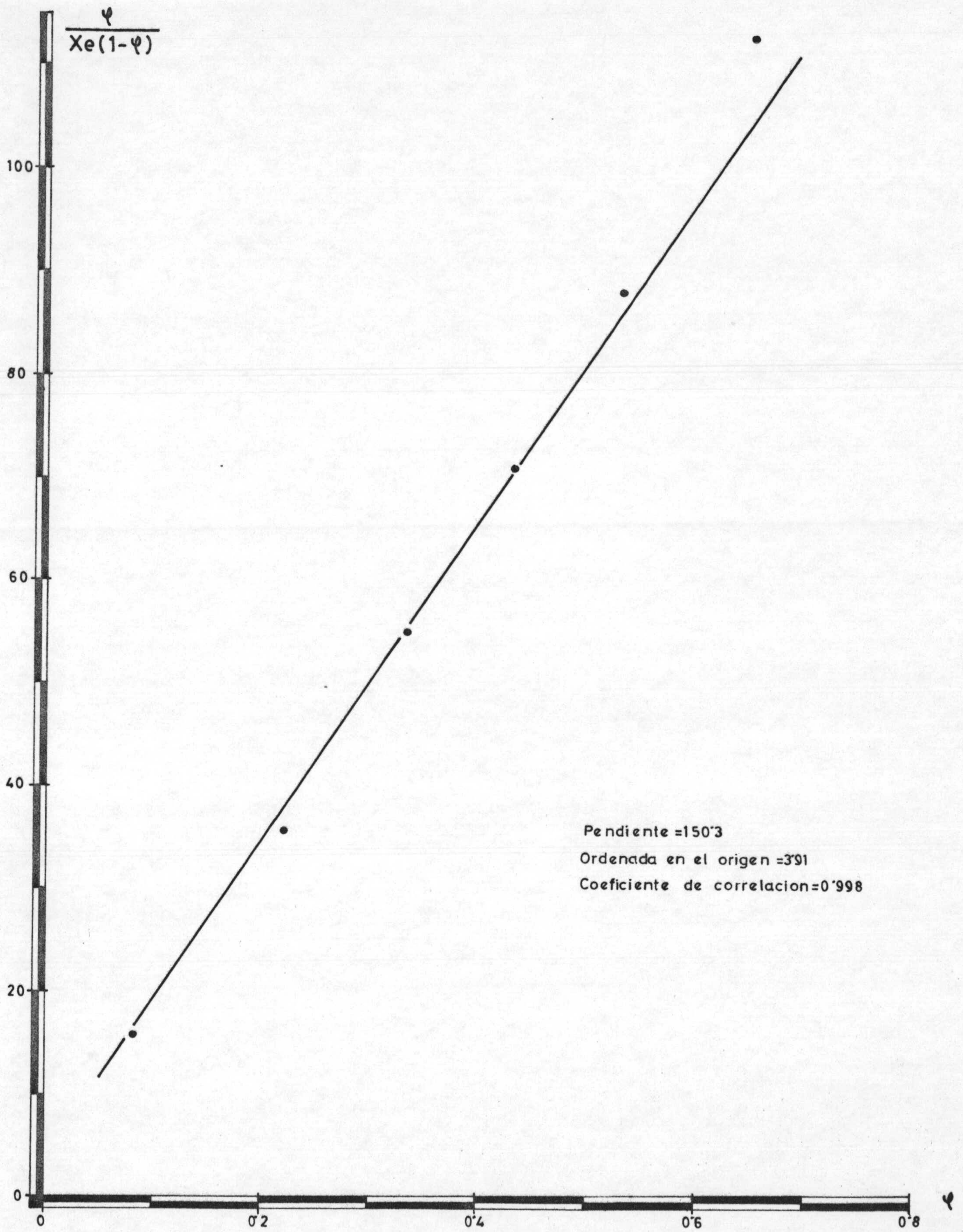


Fig. 6.2.- Correlación de los resultados experimentales mediante la ecuación de B.E.T.

ecuación que relaciona la humedad de equilibrio con la humedad relativa ambiente, para los materiales ensayados. Dando valores arbitrarios a ψ , en la ecuación, se obtienen los correspondientes a X_e (tabla 6.2). Representando en coordenadas lineales estos últimos frente a los primeros, resultó la curva a trazos discontinuos de la figura 6.3. Como puede observarse, estos valores se adaptan bien a los resultados experimentales en el intervalo de los valores de ψ comprendidos entre el 0 y el 53%, de acuerdo con la bibliografía (7, 11).

T A B L A 6.2

Valores de X_e , deducidos de la ecuación de B.E.T.

ψ	X_e
0,08	0,006
0,22	0,008
0,33	0,009
0,43	0,011
0,53	0,013
0,65	0,017
0,75	0,024

6.1.2.- CORRELACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES
MEDIANTE LA ECUACION DE HENDERSON.

Tomando dos veces logaritmos en la ecuación 2.3 y ordenando términos, resulta:

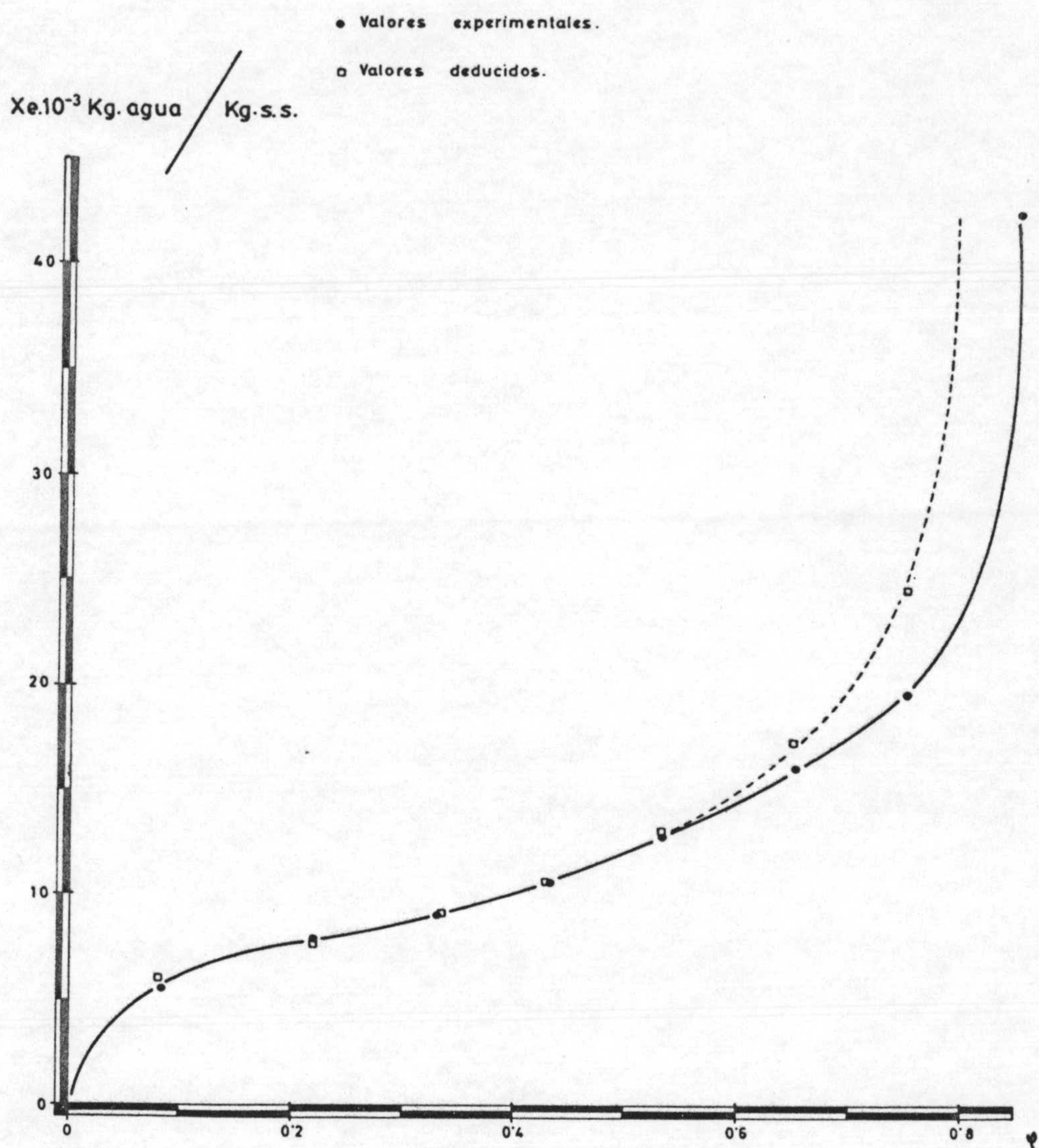


Fig. 6.3.- Comparación entre los resultados experimentales y los deducidos a partir de la ecuación de B. E. T. ($t = 25^{\circ} \text{C.}$).

$$\log [\log(1/1-\varphi)] = n \log X_e + \log \left[\frac{c(273+t)}{2,3} \right] \quad [6.3]$$

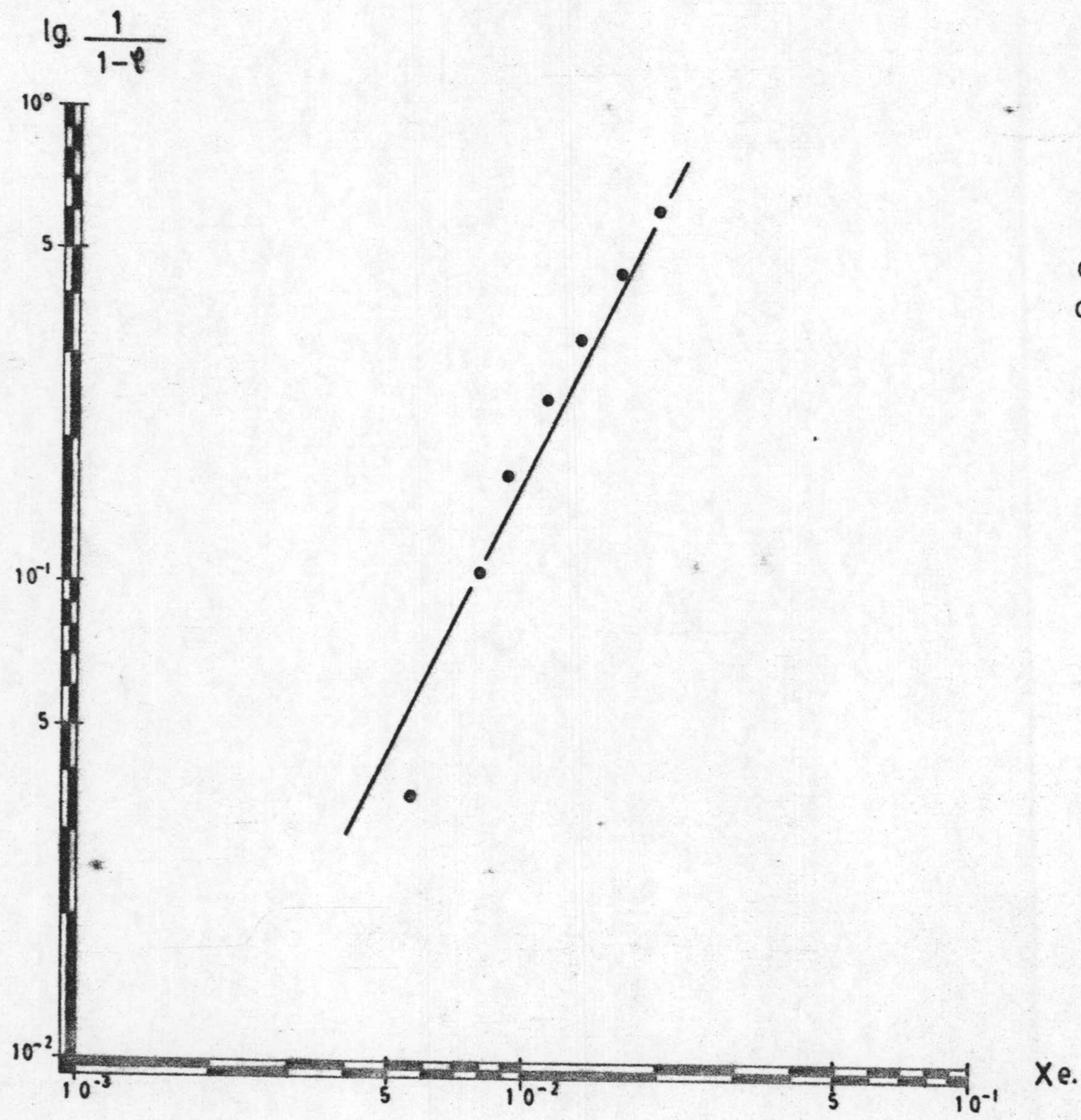
Al representar las parejas de valores correspondientes de X_e y φ (obtenidos en condiciones isotérmicas) en coordenadas logarítmicas, en la forma $-\log(1-\varphi)$ frente a X_e , debe resultar una línea recta de pendiente n y ordenada en el origen $\log [c(273+t)/2,3]$. Tomando los valores experimentales medios de X_e y los correspondientes de φ de la tabla 6.1 y representándolos en la forma indicada (tabla 6.3), los puntos quedan alineados sobre una línea recta en el intervalo de valores de φ comprendido entre el 0 y el 65% (figura 6.4).

T A B L A 6.3

Correlación de los resultados experimentales de X_e , mediante la ecuación de Henderson. ($t = 25^\circ\text{C}$).

φ	$\lg(1/1-\varphi)$	X_e
0,08	0,036	0,006
0,22	0,108	0,008
0,33	0,174	0,009
0,43	0,244	0,011
0,53	0,328	0,014
0,65	0,456	0,017
0,75	0,602	0,020

Ajustando dicha recta por mínimos cuadrados, se obtuvieron como valores de la pendiente y ordenada en el origen: $n = 2,16$ y $\log [c(273+t)/2,3] = 3,57$, respectivamente. De esta última expresión, teniendo en cuenta que los experimentos se lle



Pendiente. = 216
 Ordenada en el origen. = 357
 Coeficiente de correlacion. = 0.978

Fig.6.4-Correlacion de los resultados experimentales mediante la ecuacion de Henderson (t=25°C.).

varon a cabo a una temperatura de 25°C., se dedujo para la constante c el valor c= 28,7. Sustituyendo los parámetros c y n en la ecuación 6.3, se tiene:

$$1-\psi = \exp \left[-28,7(273+t)X_e^{2,16} \right] \quad [6.4]$$

que relaciona los valores de X_e y ψ para los materiales ensayados. Fijando el valor de la temperatura en 25°C y dando valores a X_e , en la ecuación 6.4, se obtuvieron los correspondientes de ψ tabla 6.4. Representándolos en la forma X_e frente a ψ , en coordenadas lineales, resulta la curva de trazos discontinuos que aparece en la figura 6.5; como puede apreciarse se adapta bien a los resultados experimentales en el intervalo de los valores de ψ comprendidos entre el 0 y el 65%.

T A B L A 6.4

Valores de X_e , deducidos de la ecuación de Henderson ($t= 25^\circ\text{C}$).

ψ	X_e
0,08	0,005
0,22	0,008
0,33	0,010
0,43	0,012
0,53	0,013
0,65	0,016
0,75	0,018
0,85	0,021

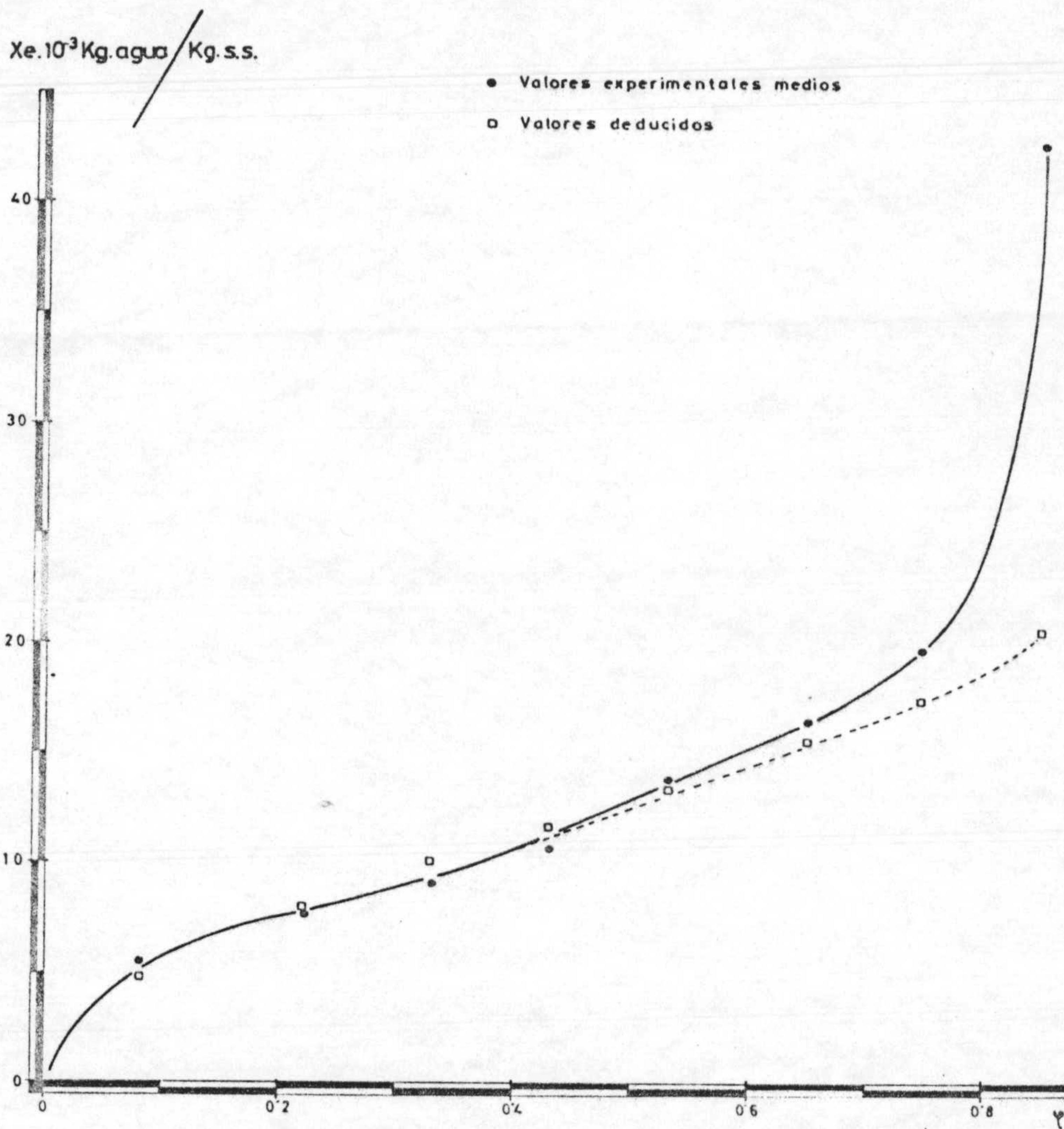


Fig. 6.5.- Comparación entre los resultados experimentales y los deducidos a partir de la ecuación de Henderson ($t=25^{\circ}\text{C.}$).

6.1.3.- CALCULO DEL CALOR DIFERENCIAL DE ADSORCION -
DEL VAPOR DE AGUA, SOBRE LAS ESFERAS DE ALU-
MINA FUNDIDA.

Admitiendo que la ecuación 6.4 reproduce las hume-
dades de equilibrio, a cualquier temperatura, puede deducirse
fácilmente la variación del calor diferencial de adsorción -
del agua sobre los materiales utilizados. En efecto, si en la
ecuación 6.4 se sustituye la humedad relativa φ por su valor-
en función de la presión parcial de vapor de agua (P_a) y la -
presión de saturación (P_a^0), resulta:

$$1 - P_a/P_a^0 = \exp(-28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})$$

despejando P_a y tomando logaritmos neperianos, se
tiene:

$$\ln P_a = \ln P_a^0 + \ln [1 - \exp(28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})]$$

y diferenciando con respecto a la temperatura T:

$$\frac{d(\ln P_a)}{dT} = \frac{d(\ln P_a^0)}{dT} + \frac{\exp(-28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})}{1 - \exp(-28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})} \cdot 28,7 X_e^{2,16}$$

[6.5]

Si se aplica la ecuación de Clausius-Clapeyron, a
la vaporización del agua pura, se puede escribir:

$$d(\ln P_a^0)/dT = \lambda_0/R \cdot T^2$$

[6.6]

en la que:

λ_0 = calor latente molar de vaporización del agua -
pura a la temperatura T.

R = constante de los gases.



Por otra parte aplicando la misma ecuación al agua adsorbida en equilibrio con su vapor, resulta:

$$d(\ln P_a)/dT = \lambda_{ads}/R.T^2 \quad [6.7]$$

en la que:

λ_{ads} = calor diferencial de adsorción, a la temperatura T. Kcal/mol-g de agua ábsorbida .

Teniendo en cuenta las ecuaciones 6.6 y 6.7 y sustituyendo en 6.5, resulta:

$$\lambda_{ads} = \lambda_0 + \frac{\exp(-28,7.T.X_e^{2,16})}{1-\exp(-28,7.T.X_e^{2,16})} \cdot 28,7.X_e^{2,16}.R.T^2 \quad [6.8]$$

y de las ecuaciones 6.8 y 6.4, se obtiene la expresión:

$$\lambda_{ads} = \lambda_0 + (1-\varphi/\varphi). 28,7.X_e^{2,16}.R.T^2 \quad [6.9]$$

esta ecuación relaciona, a una temperatura dada, el calor diferencial de adsorción con el contenido de humedad en el equilibrio para los materiales utilizados. En la tabla 6.5 figuran los valores del calor diferencial de adsorción, obtenido mediante la ecuación 6.9, para distintos valores de X_e ; estos mismos se representan en la figura 6.6 donde se observa que el valor de λ_{ads} decrece, conforme aumenta el contenido de humedad de equilibrio, tendiendo al valor de 10,5 Kcal/mol que corresponde al calor de condensación del agua pura; por otra parte, a bajos valores de la humedad de equilibrio el valor del calor diferencial de adsorción es superior a 11 Kcal/mol de agua adsorbida, valor próximo a 10,5 Kcal/mol; estos hechos ponen de manifiesto la débil unión existente entre el agua y los sólidos ensayados por lo que se puede pensar que -

el agua es retenida mediante un proceso de adsorción física-tal como se apuntaba en el apartado 6.1.

T A B L A 6.5

Variación del calor diferencial de adsorción con el contenido de humedad en el equilibrio.

$$\lambda_0 = 10,51 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}, \quad T = 298^\circ\text{K}, \quad R = 1,98 \times 10^{-3} \frac{\text{Kcal}}{\text{mol-g.}^\circ\text{K}}$$

X_e	$\frac{\text{Kg. agua}}{100 \text{ Kg s.s.}}$	λ_{ads} Kcal/mol
	0,006	11,25
	0,008	11,01
	0,009	10,89
	0,011	10,87
	0,014	10,89
	0,017	10,89
	0,020	10,85

Al hablar de la ecuación de B.E.T., en el párrafo-6.1.1., se decía que la constante K estaba relacionada con el calor integral de adsorción, para la formación de una monocapa; la relación entre ambas magnitudes es la siguiente (10):

$$K = \exp \left[(\lambda_{\text{ads}})_1 - \lambda_0 \right] / R.T \quad [6.10]$$

Sustituyendo el valor de K (342,10) en la ecuación anterior, se tiene a 25°C un valor de $(\lambda_{\text{ads}})_1 = 13,95$ Kcal/mol de agua adsorbida. Esta misma magnitud puede obtenerse hallando el valor medio de la función representada por la ecuación-6.9 en el intervalo de \bar{X} comprendido entre 0 y X_1 . Efectuando

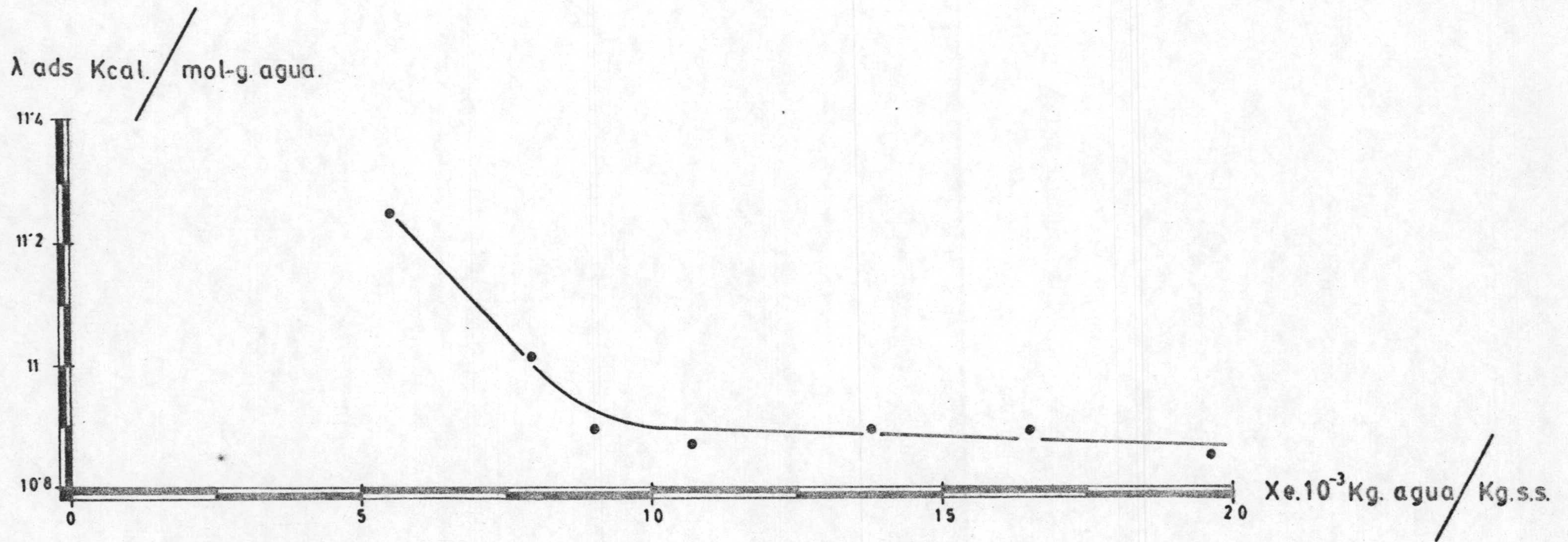


Fig.6.6.- Variacion del calor diferencial de adsorcion con el contenido de humedad.

los cálculos oportunos, tal como se detallan en el apartado 7.1 se obtuvo un valor de 11 Kcal/mol. Esta discrepancia puede ser debida a que la ecuación 6.4, no represente fielmente el comportamiento higroscópico de los sólidos estudiados a otras temperaturas (8), sin embargo el orden de magnitud obtenido en ambos casos indica que la fijación de agua se debe a un proceso de adsorción física.

6.1.4.- CALCULO DEL AREA SUPERFICIAL DE LOS MATERIALES ENSAYADOS.

Por área superficial, se entiende la suma de las áreas internas y externas del sólido, la segunda está formada por las paredes de los poros, hendiduras y cavidades en el interior del material poroso.

En la bibliografía (82) se describe un método de cálculo basado en el valor de la humedad del sólido correspondiente a la adsorción de una capa monomolecular (X_1). Como se ha indicado en la sección 6.1.2., este valor resultó ser igual a 0,0061 Kg de agua/100 Kg s.s. que puede ser convertido fácilmente en moles de agua, teniendo en cuenta el peso molecular de la misma:

$$0,0061 \frac{\text{Kg agua}}{100 \text{ Kg s.s.}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{Kg agua}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{18 \text{ g}} = 0,3398 \frac{\text{mol agua}}{100 \text{ Kg s.s.}}$$

Como un mol de cualquier sustancia tiene N_0 moléculas, siendo N_0 el número de Avogadro, se tiene:

$$0,3398 \frac{\text{mol agua}}{100 \text{ Kg s.s.}} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{mol agua}} =$$

$$= 2,041 \cdot 10^{23} \frac{\text{moléculas adsorbidas}}{100 \text{ Kg s.s.}}$$

La determinación del área ocupada por una molécula ha sido objeto de considerables investigaciones. Emmet y Brunner (83) propusieron para su determinación la expresión:

$$\alpha = 1,09 (M/N_0 \cdot \rho)^{2/3} \quad [6.11]$$

en la que:

α = área por molécula ($\text{cm}^2/\text{molécula}$)

M = peso molecular (g/mol)

N_0 = número de Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol)

ρ = densidad de la molécula adsorbida. Se ha tomado la densidad del agua pura a la temperatura de experimentación, resulta:

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3.$$

Al sustituir estos valores en la ecuación 6.11, - resulta:

$$\alpha = 1,0497 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{molécula}$$

multiplicando este valor por el número de moléculas adsorbidas y refiriéndolas a 1 gramo de sólido seco, resulta un valor para el área de superficie del material utilizado, igual a $0,214 \text{ m}^2/\text{g}$. Valor que está dentro de los límites del área superficial indicados por el fabricante del material y cuyos valores están recogidos en la tabla 4.1.

6.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO.

6.2.1.- ELECCION DEL ESPESOR DE LECHO IDONEO.

En las figuras 6.7 a 6.12 se han representado la variación del contenido de humedad (X) de las esferas de alúmina, en función del tiempo de secado (θ) que figuran en las tablas 5.2 a 5.7, para cada espesor de lecho ensayado. Puede apreciarse que para alturas de lecho inferiores a 3 cm. la variación del contenido de humedad con el tiempo de secado no parece resultar afectada al modificar dicha variable. En estas circunstancias el contenido medio de humedad del lecho, a lo largo de cualquier experimento de secado, debe coincidir prácticamente con la humedad de cada esfera. A la vista de estos resultados se decidió utilizar en experimentos posteriores una altura de lecho de 2 ó 3 cm., equivalentes a una masa de 174 y 277 gramos respectivamente, que teniendo en cuenta el error de la balanza utilizada y las diferencias de pesada que normalmente se apreciaban suponía un error relativo muy pequeño. En las experiencias en las que se utilizaron esferas de 1" y 3/4" respectivamente, mas que hablar de espesor de lecho, se debe hablar de número de capas utilizadas; es significativo el hecho de que cuando se utilizó solo una capa apareció una inversión en los resultados experimentales, de acuerdo con lo que cabría esperar. Puede explicarse este hecho con ayuda de la figura 6.13 en la que las líneas de corriente, para la circulación de un fluido alrededor de la esfera, ponen de manifiesto que en la región opuesta al flujo principal existe un contacto defectuoso entre sólido y fluido,

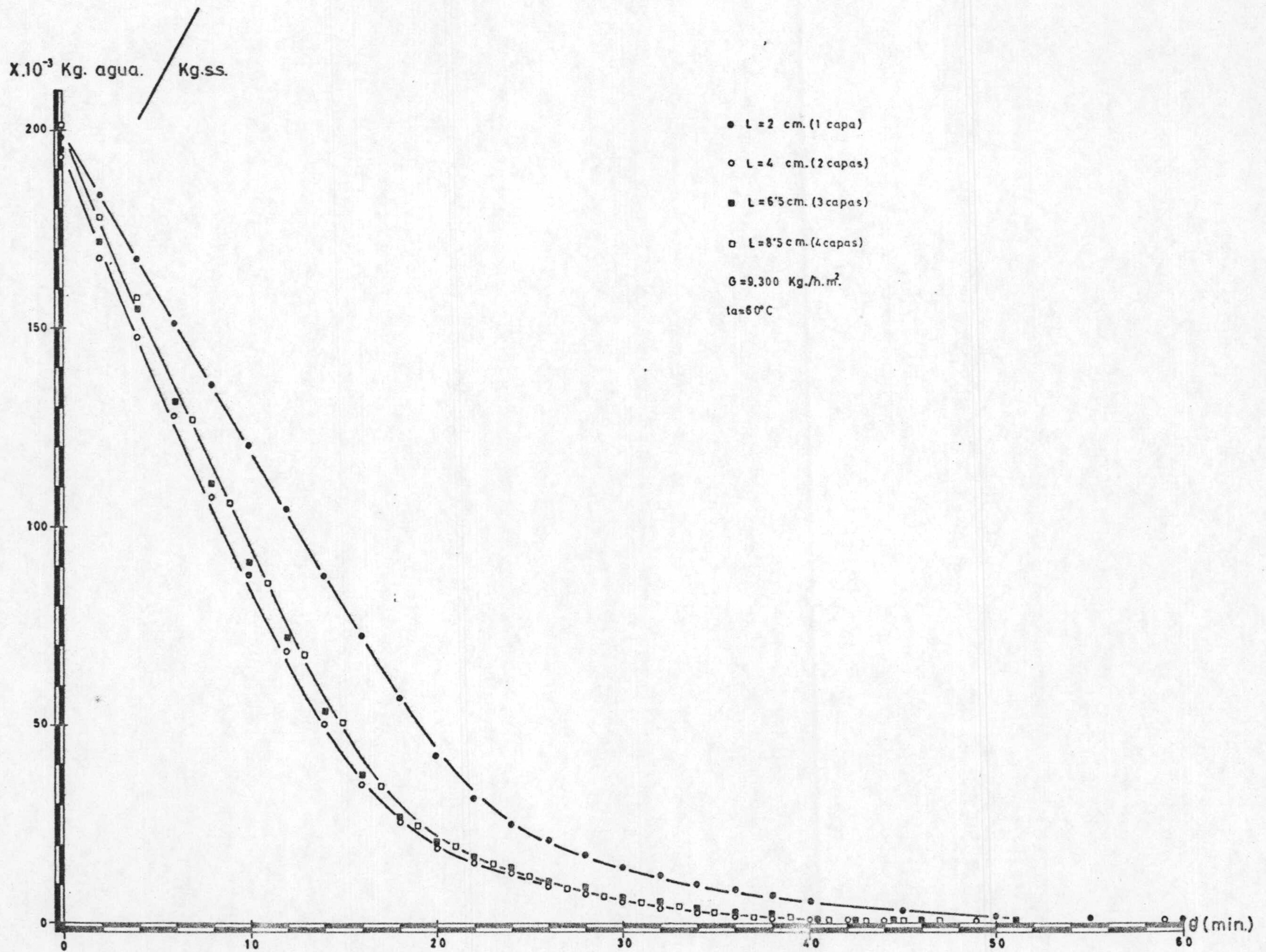


Fig. 6.7. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 1" de diametro.
Influencia del espesor de lecho.

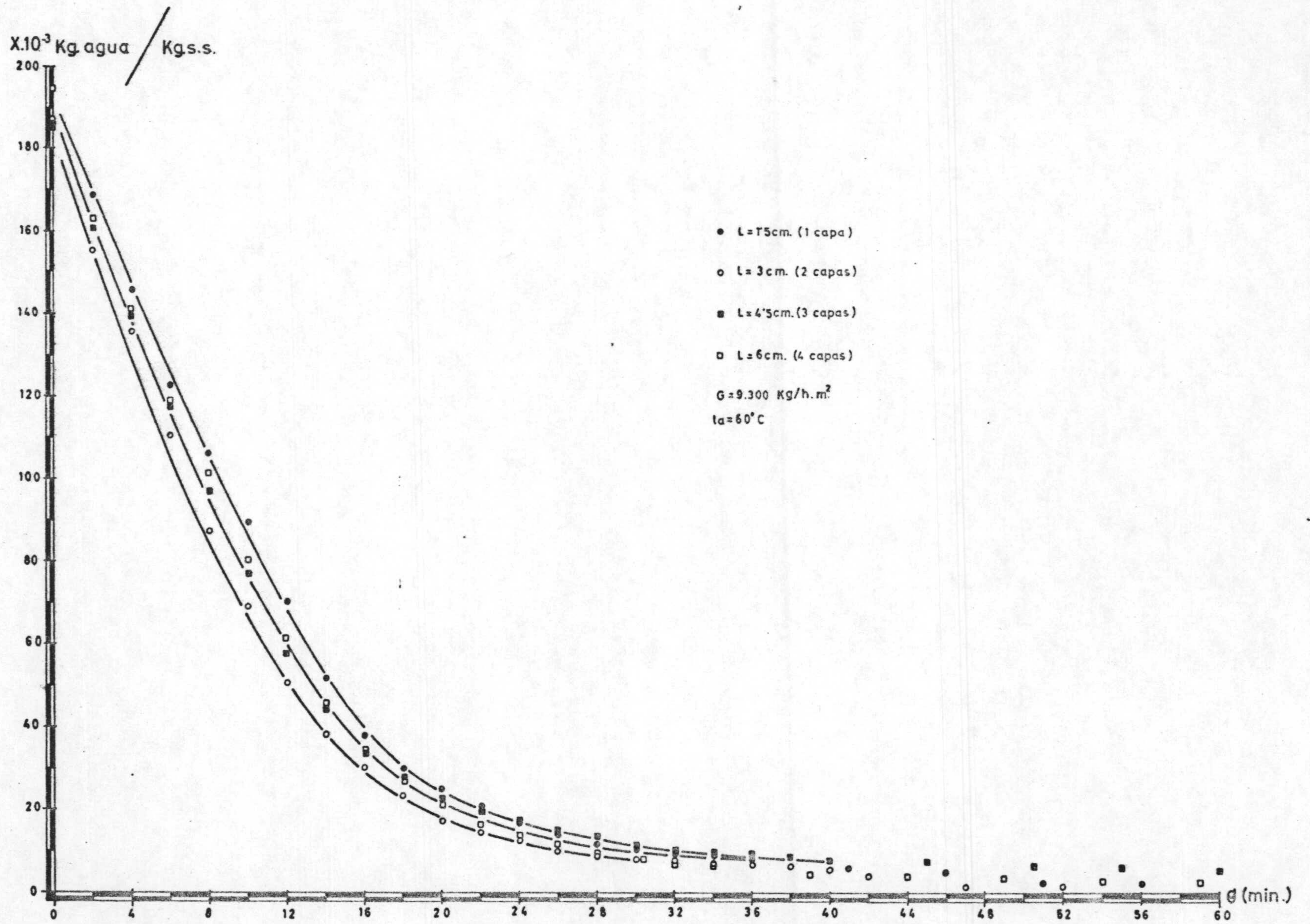


Fig. 6.8. -Variación del contenido de humedad en las esferas de 3/4" de diámetro.
Influencia del espesor de lecho.

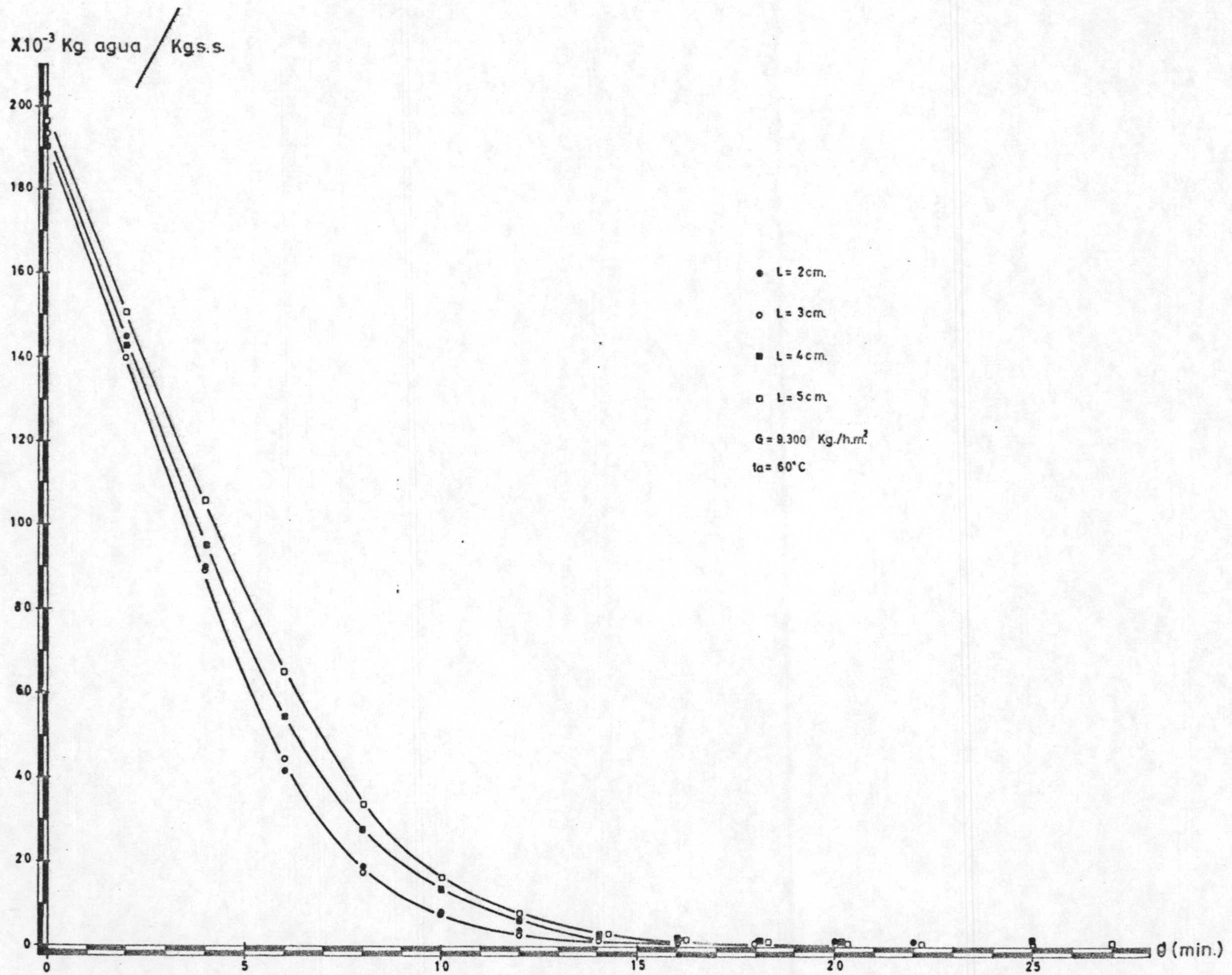
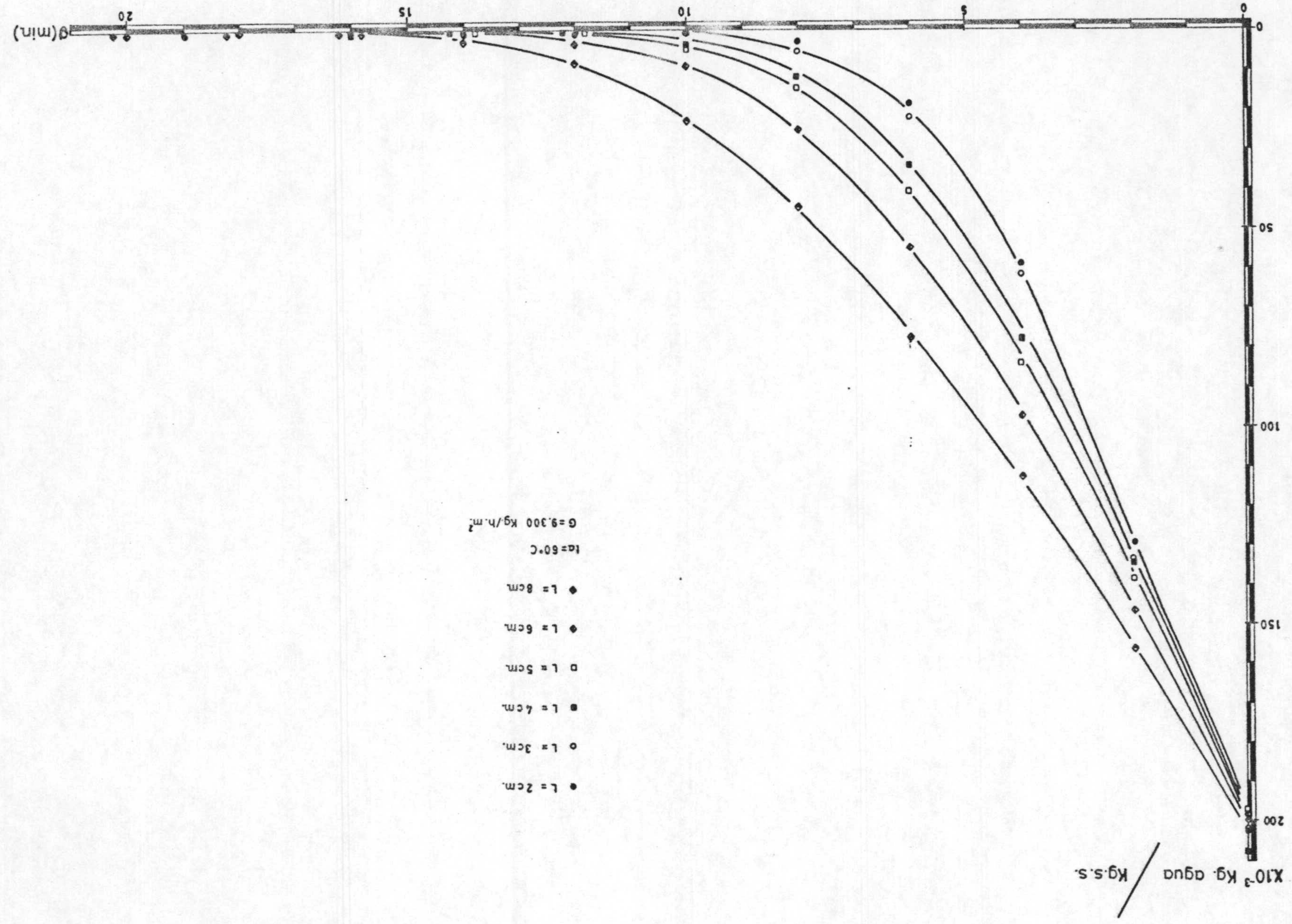


Fig.6.9. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 1/2" de diametro.
Influencia del espesor de lecho.

Fig. 6.10.-Variacion del contenido de humedad en las esteras de 3/8" de diametro.
Influencia del espesor de lecho.



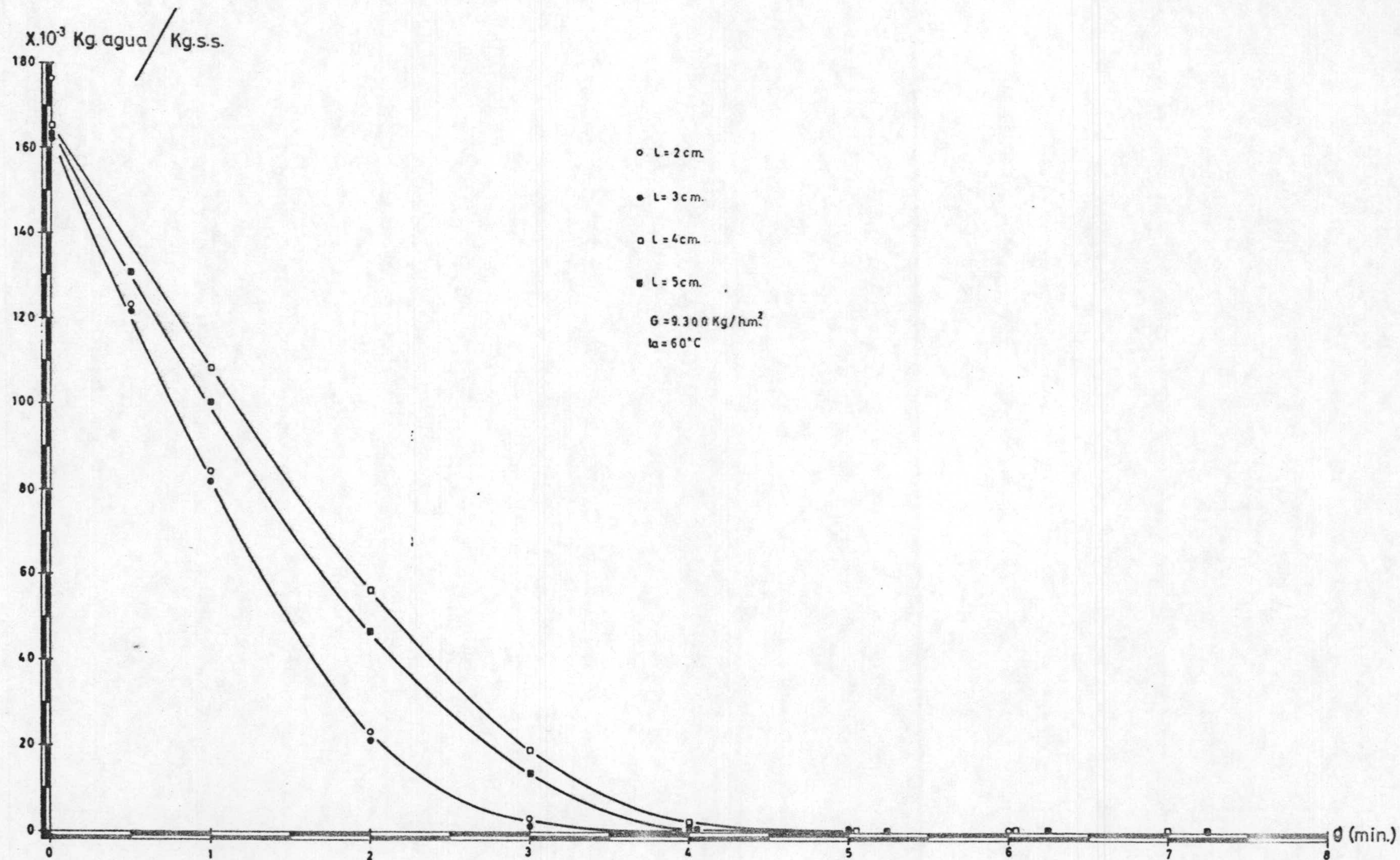


Fig.6.11. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 5/16" de diametro.
Influencia del espesor de lecho.

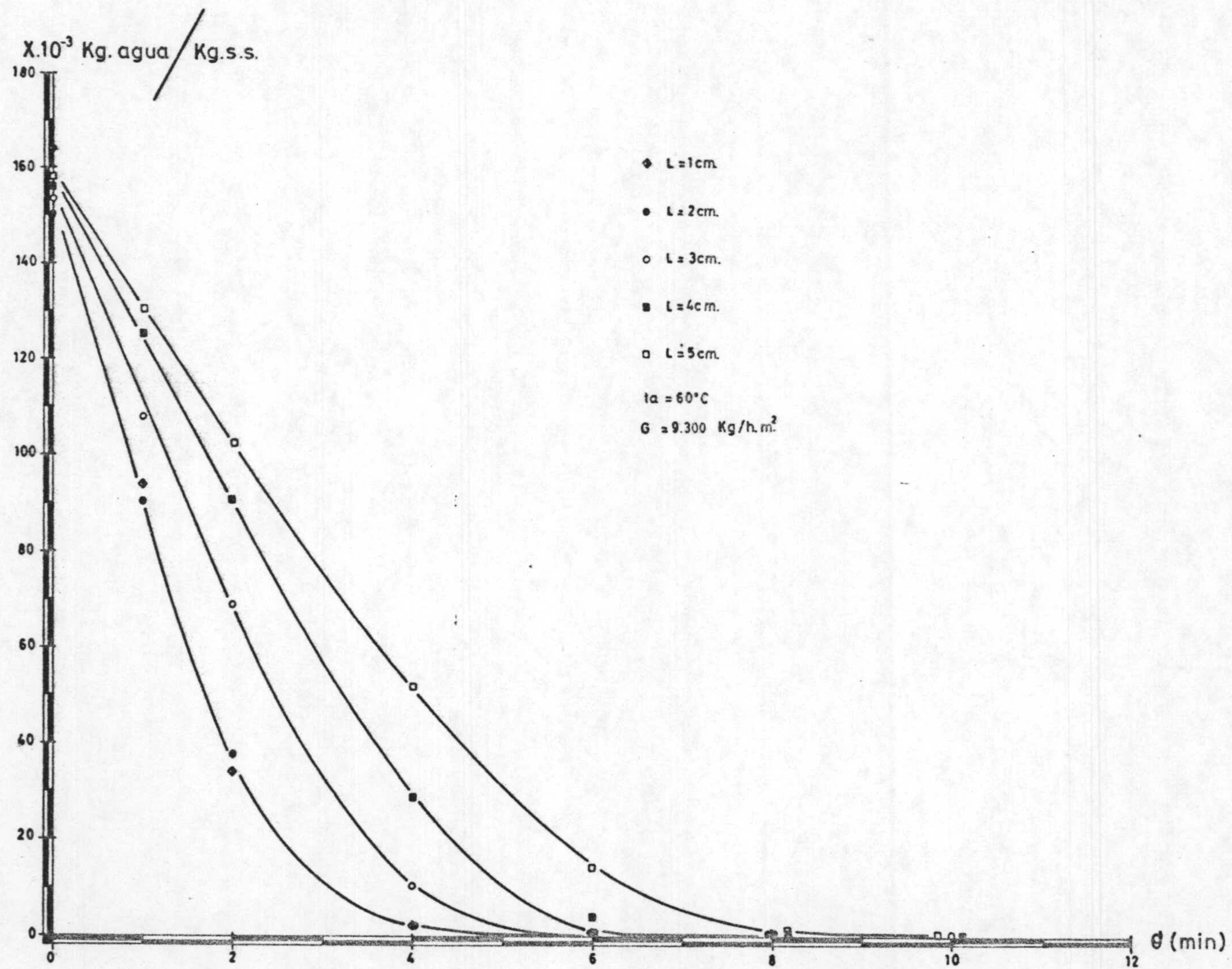


Fig.6.12-Variación del contenido de humedad en las esferas de 3/16" de diámetro.
Influencia del espesor de lecho.

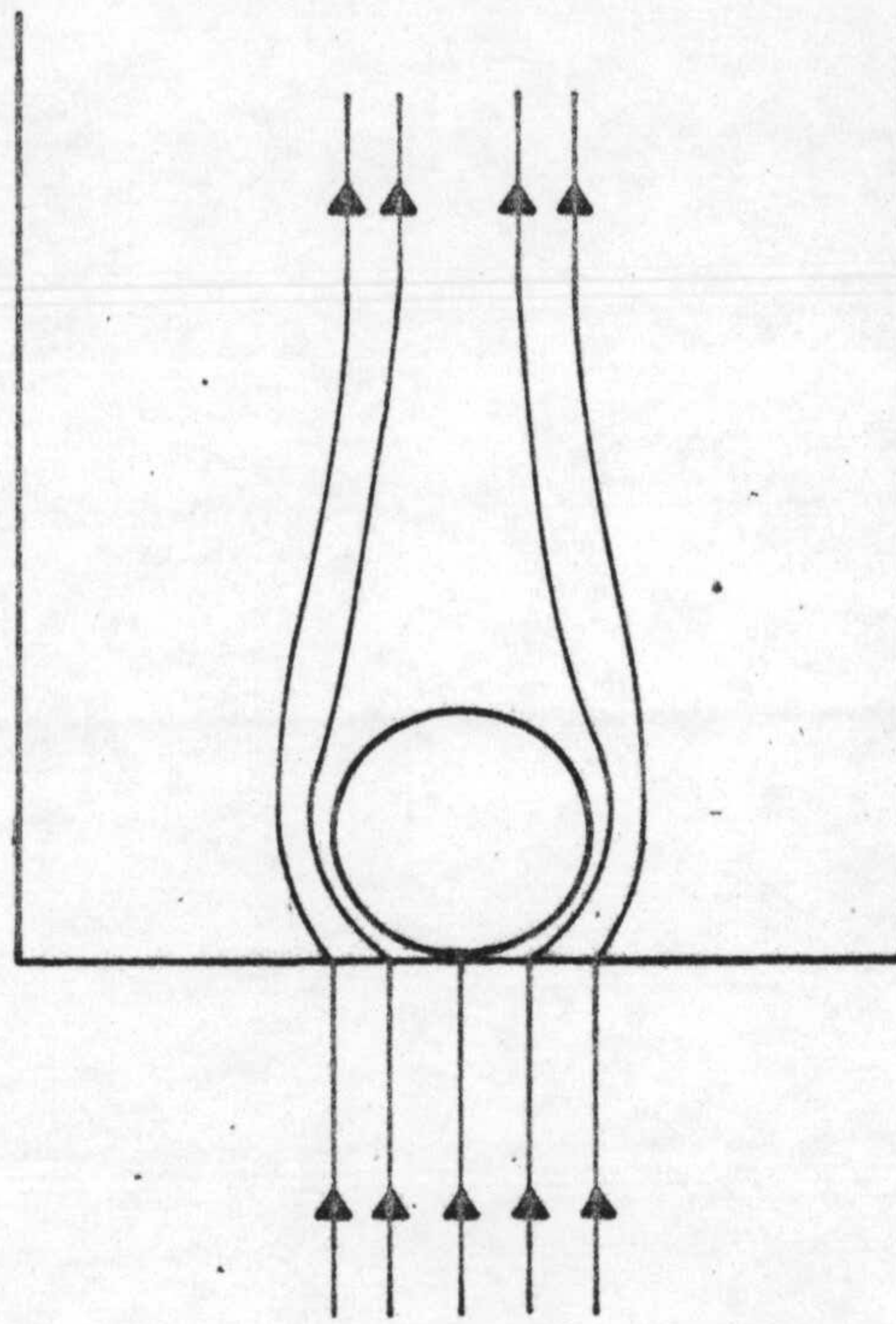


Fig.6.13-Lineas de corriente para la circulacion de un fluido alrededor de una esfera.

circunstancia que queda atenuada cuando el espesor de lecho es el correspondiente a dos capas debido a la reflexión que experimentan las líneas de corriente al chocar con las esferas situadas en la capa superior.

6.2.2.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD MASICA DEL AIRE.

En las figuras 6.14 a 6.19 se han representado en la forma de $X = f(\theta)$, los resultados que se detallan en las tablas 5.8 a 5.13, obtenidas al trabajar con diferentes velocidades másicas del aire de secado. Puede observarse que al aumentar el valor de esta variable crece la pendiente de la curva, es decir la velocidad de secado; en todas ellas se aprecian fácilmente los clásicos períodos de velocidad de secado constante y de secado decreciente, que se estudian a continuación.

6.2.2.1.- PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE.

Para estudiar las características de este período, en las figuras 6.20 a 6.25 se han representado los resultados obtenidos en la forma $(-dX/d\theta) = f(X)$. Las pendientes $-dX/d\theta$ que corresponden a los diferentes valores de X se han determinado a partir de las curvas de las figuras 6.14 a 6.19. En estas representaciones, se aprecian al menos dos tramos en los que existe una dependencia lineal entre la velocidad de secado $(\frac{dX}{d\theta})$ y la humedad (X). El primero de ellos, horizontal, corresponde al período de velocidad de secado constante; el segundo al período de velocidad decreciente.

En el primer período de secado se observa que la velocidad está afectada por el caudal másico lo que se explica por la influencia que ejerce ésta variable sobre los coeficientes h_g y k_g .

Dadas las características de la instalación utilizada puede admitirse que el calor necesario para vaporizar el agua procede exclusivamente del aire, por é ello y teniendo en cuenta que durante el período de velocidad de secado constante se acepta que el fenómeno controlante es la difusión externa, se puede escribir que (35, 84):

$$\left(- \frac{dX}{d\theta}\right) = \frac{h(t_a - t_i) \cdot a}{\rho_s \cdot \lambda_i} = \frac{k_x \cdot a}{\rho_s} (H_i - H_a) \quad [6.12]$$

donde:

K_x = coeficiente de transferencia de materia desde la superficie mojada al aire ($\text{Kg agua/h.m}^2 \Delta H$)

H_i = humedad del aire en la interfase (Kg agua/Kg s.s.)

H_a = humedad del aire de secado ($\text{Kg agua/Kg aire seco}$).

Cualquier forma de la ecuación 6.12 es válida para el período de velocidad constante, pero se ha encontrado que es mucho más fidedigno calcular la velocidad de secado utilizando la ecuación de transmisión de calor, ya que con los errores cometidos usualmente en la determinación de la temperatura se afecta menos la fuerza impulsora de temperaturas que la de humedades.

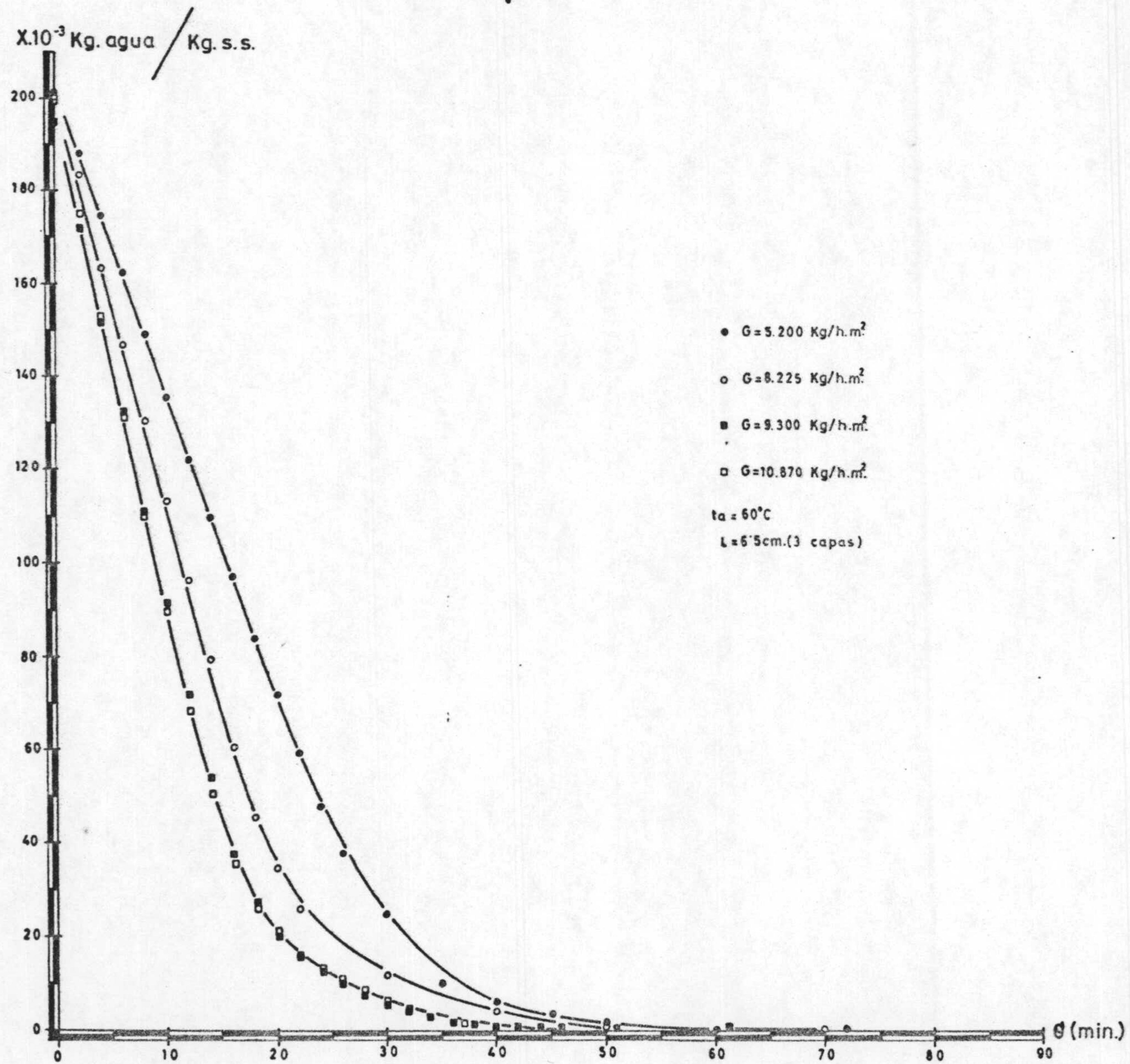


Fig. 6.14. -Variación del contenido de humedad en las esferas de 1" de diámetro. Influencia de la velocidad masica.

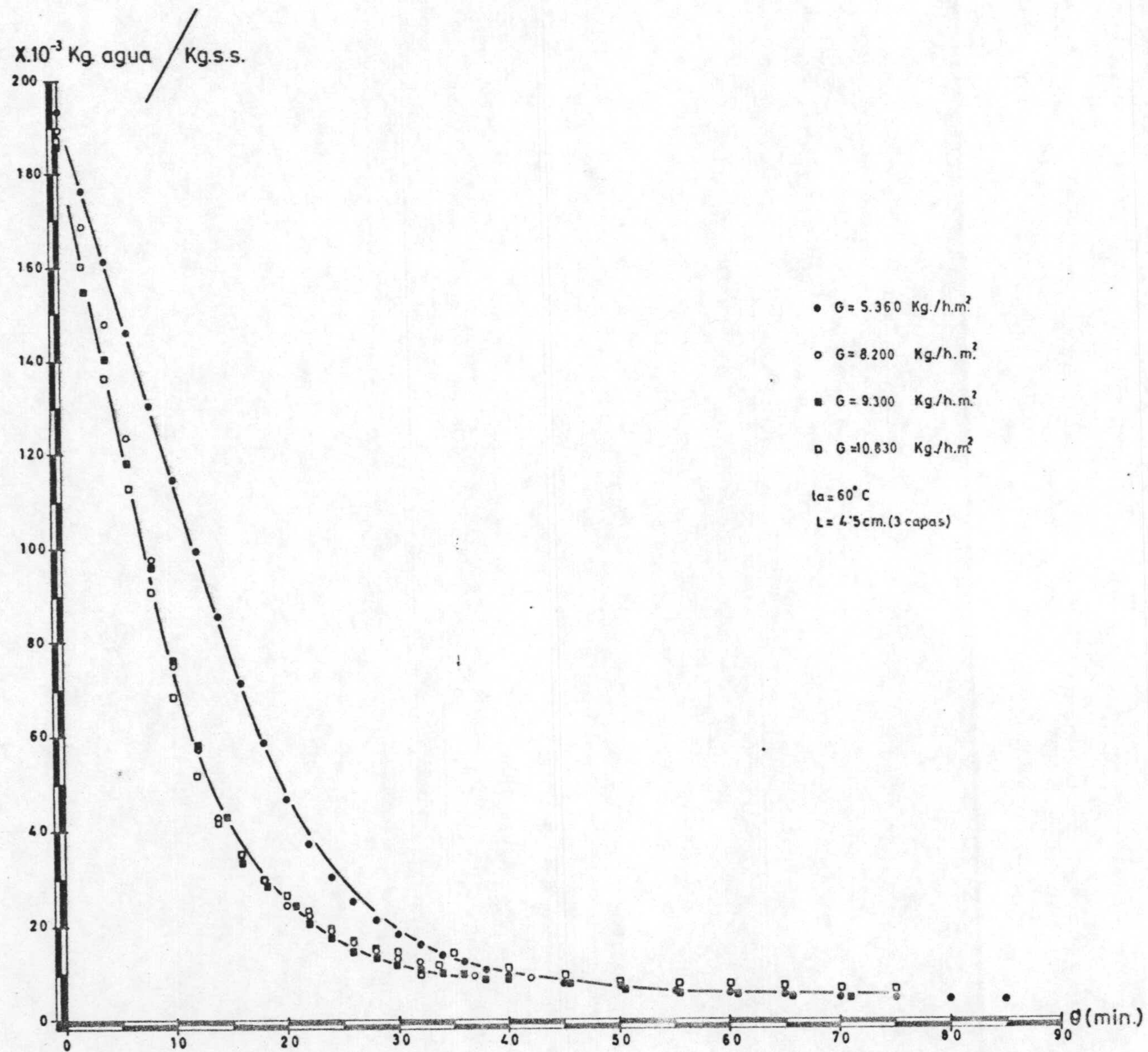


Fig.6.15.-Variacion del contenido de humedad en las esferas de 3/4" de diametro.
Influencia de la velocidad masica.

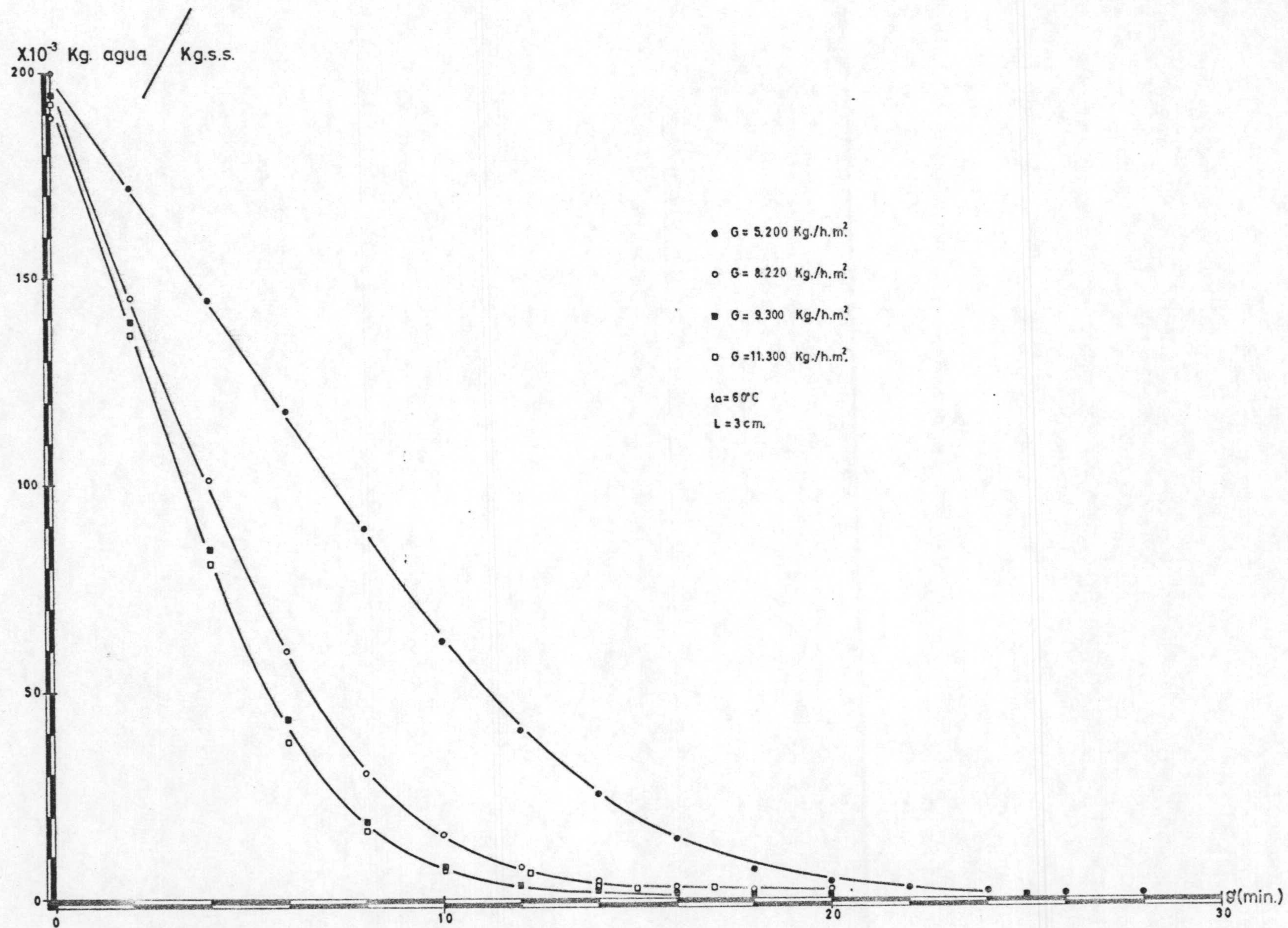


Fig. 6.16. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 1/2" de diametro.
 Influencia de la velocidad masica.

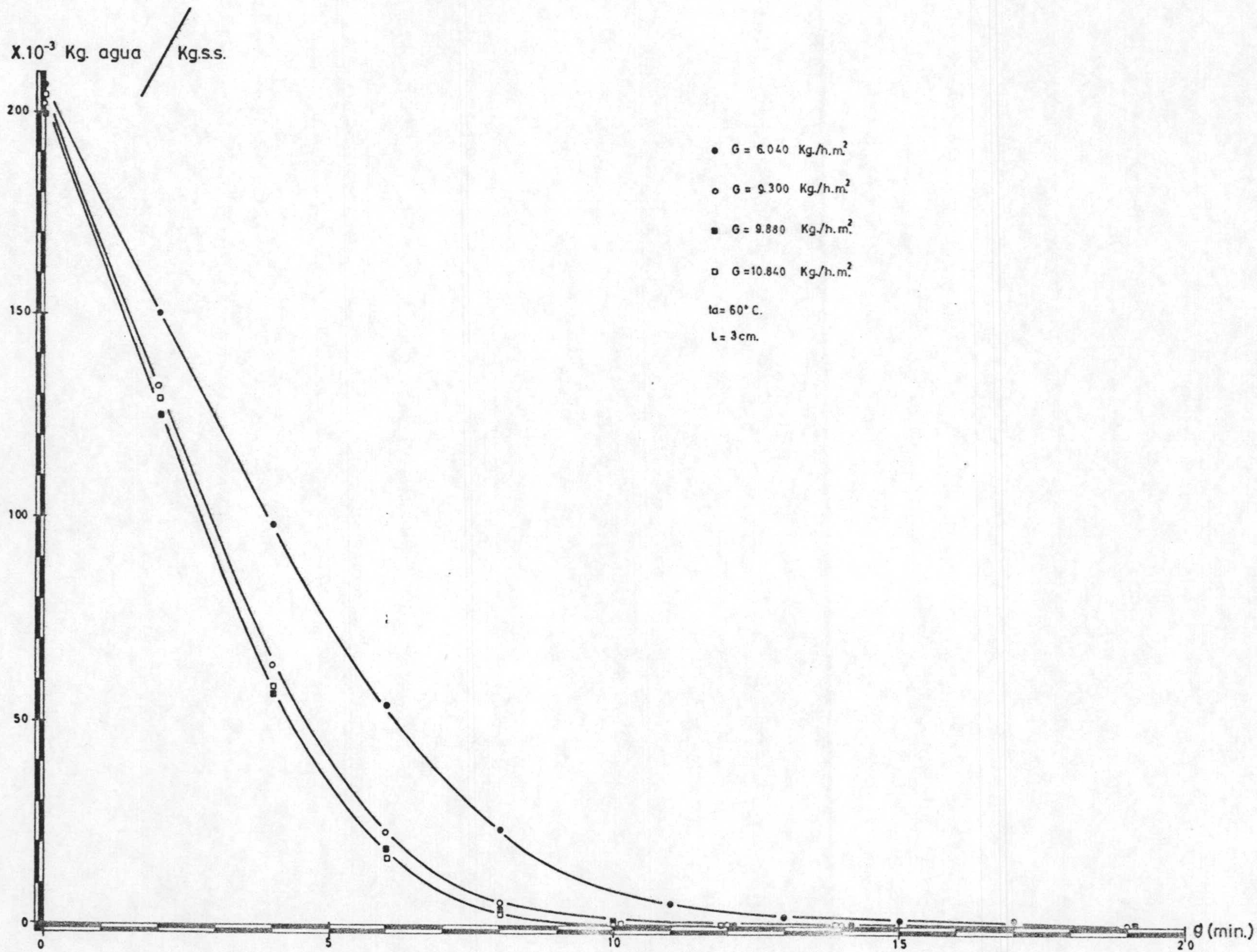


Fig. 6.17. -Variación del contenido de humedad en las esferas de 3/8" de diámetro.
Influencia de la velocidad masica.

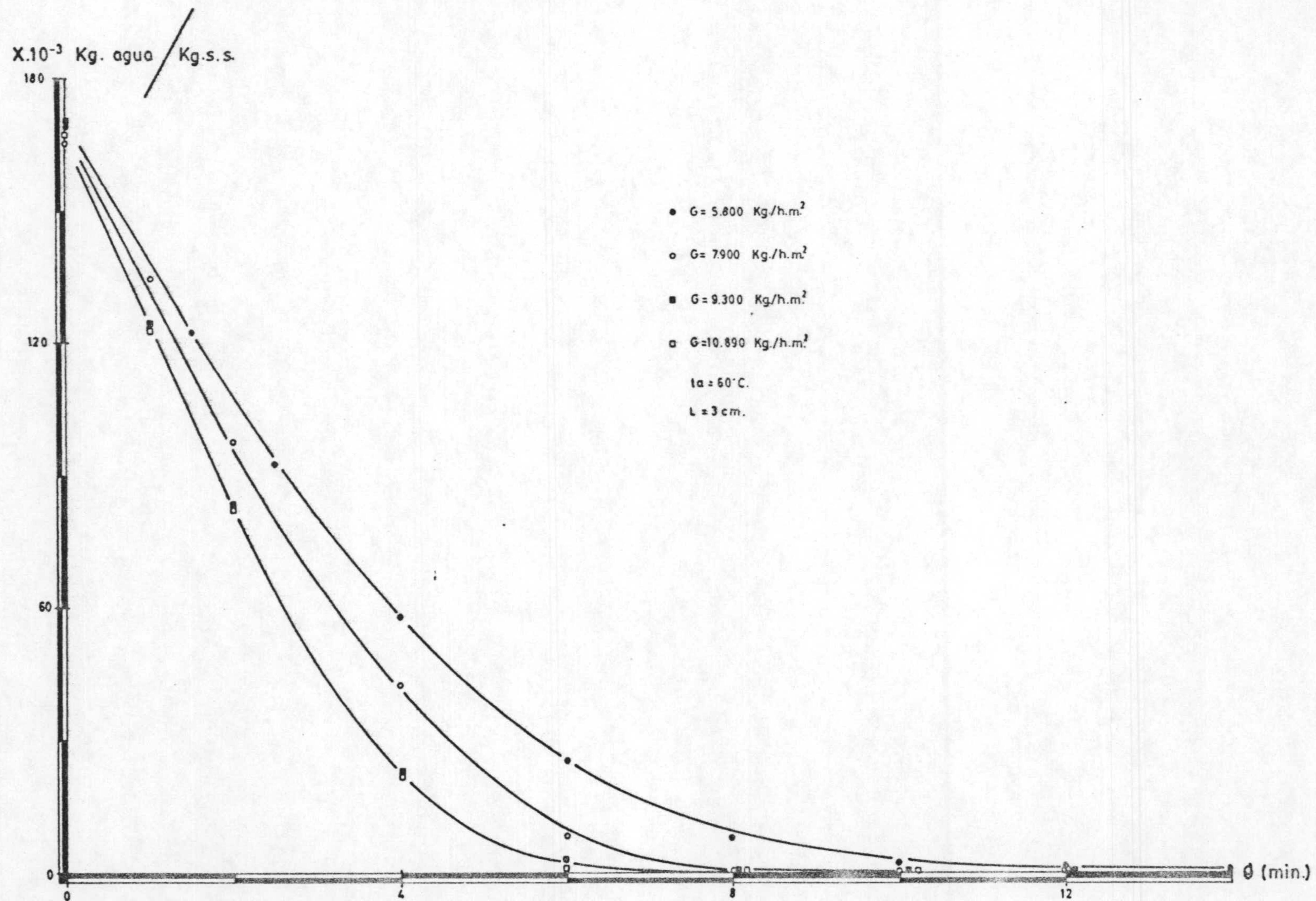


Fig. 6.18-Variación del contenido de humedad en las esferas de 5/16" de diámetro.
Influencia de la velocidad masica.

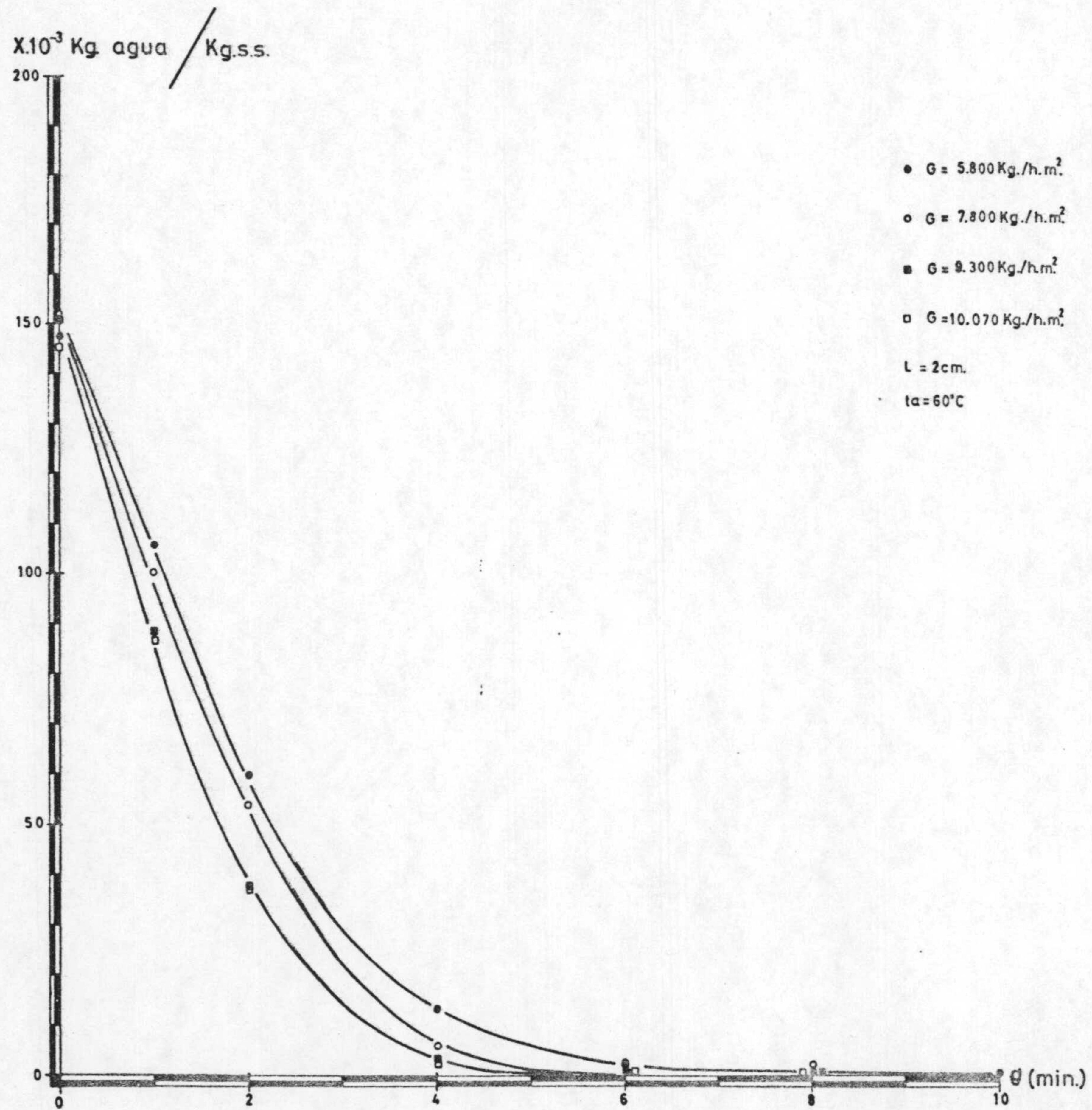


Fig.6.19. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 3/16" de diametro.
 Influencia de la velocidad masica.

$$-\frac{dX}{d\theta} \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. ss. min.}}$$

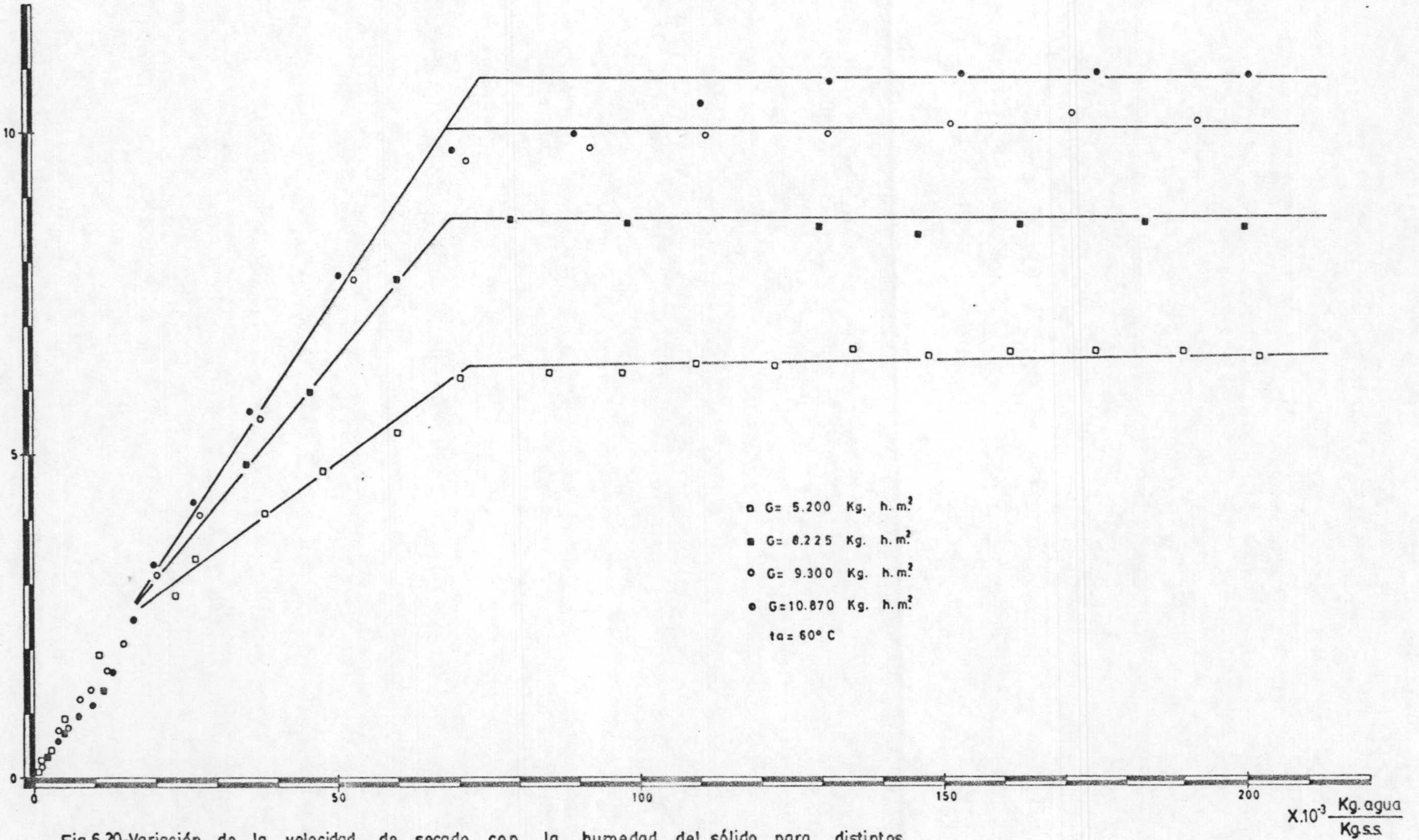


Fig.6.20.-Variación de la velocidad de secado, con la humedad del sólido para distintos valores de G.(Dp.=1").

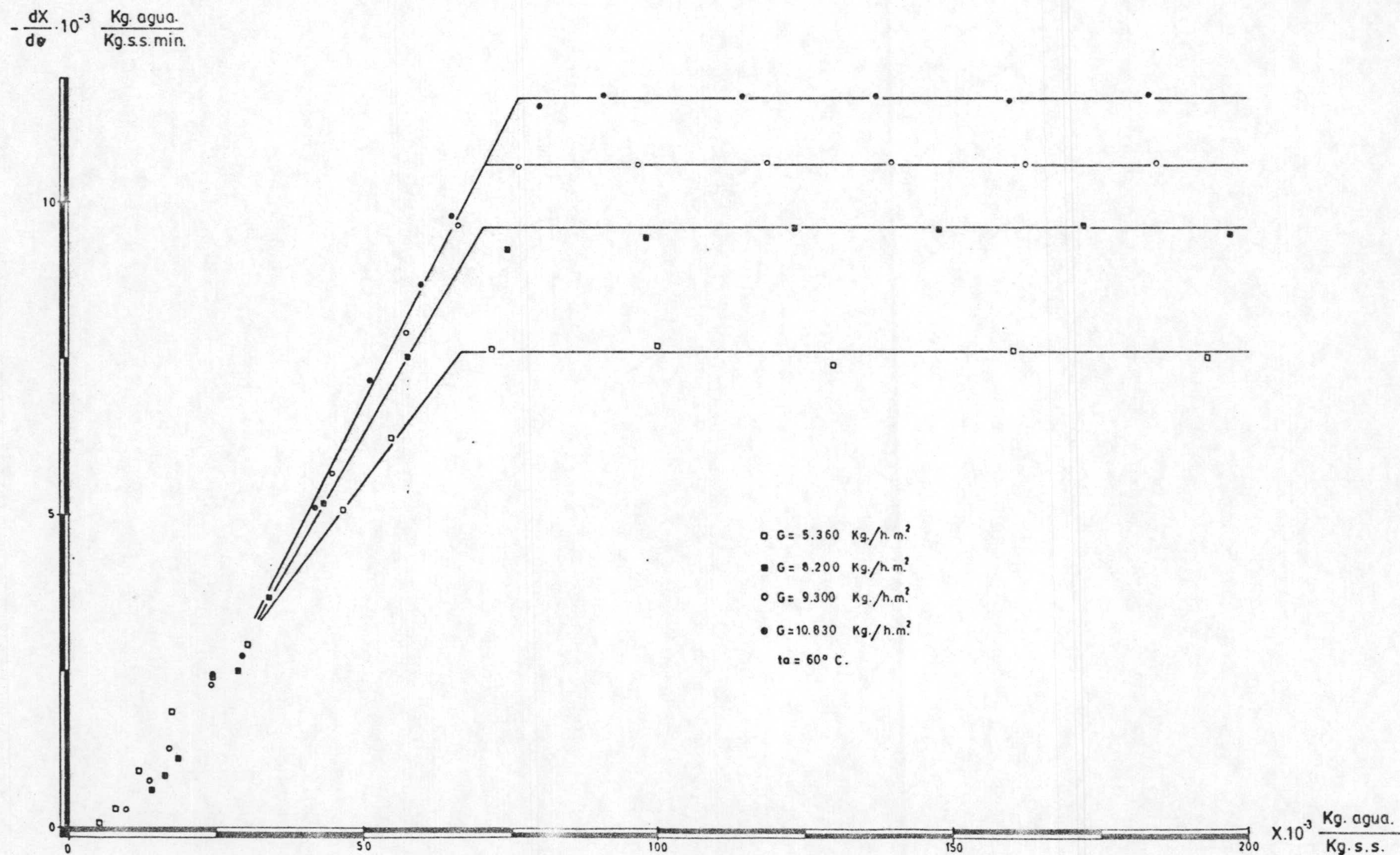


Fig. 6.21-Variación de la velocidad de secado con la humedad del sólido para distintos valores de G. (Dp. = 3/4").

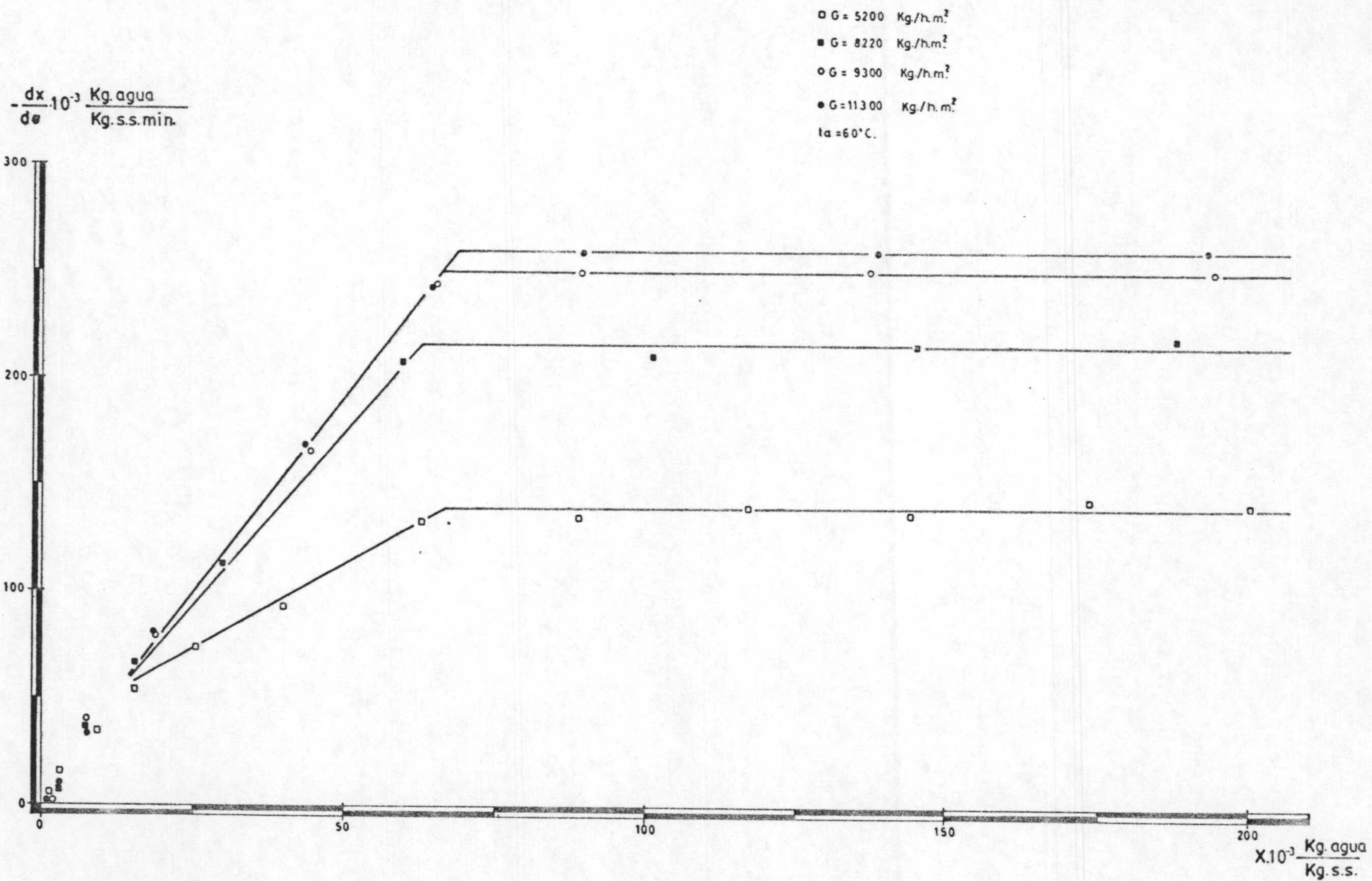


Fig.622-Variacion de la velocidad de secado con la humedad del solido para distintos valores de G(Dp.1/2").

Colegio Universitario de Almería



ESTUDIO DEL SECADO DE SOLIDOS POROSOS



Biblioteca Universitaria de Granada

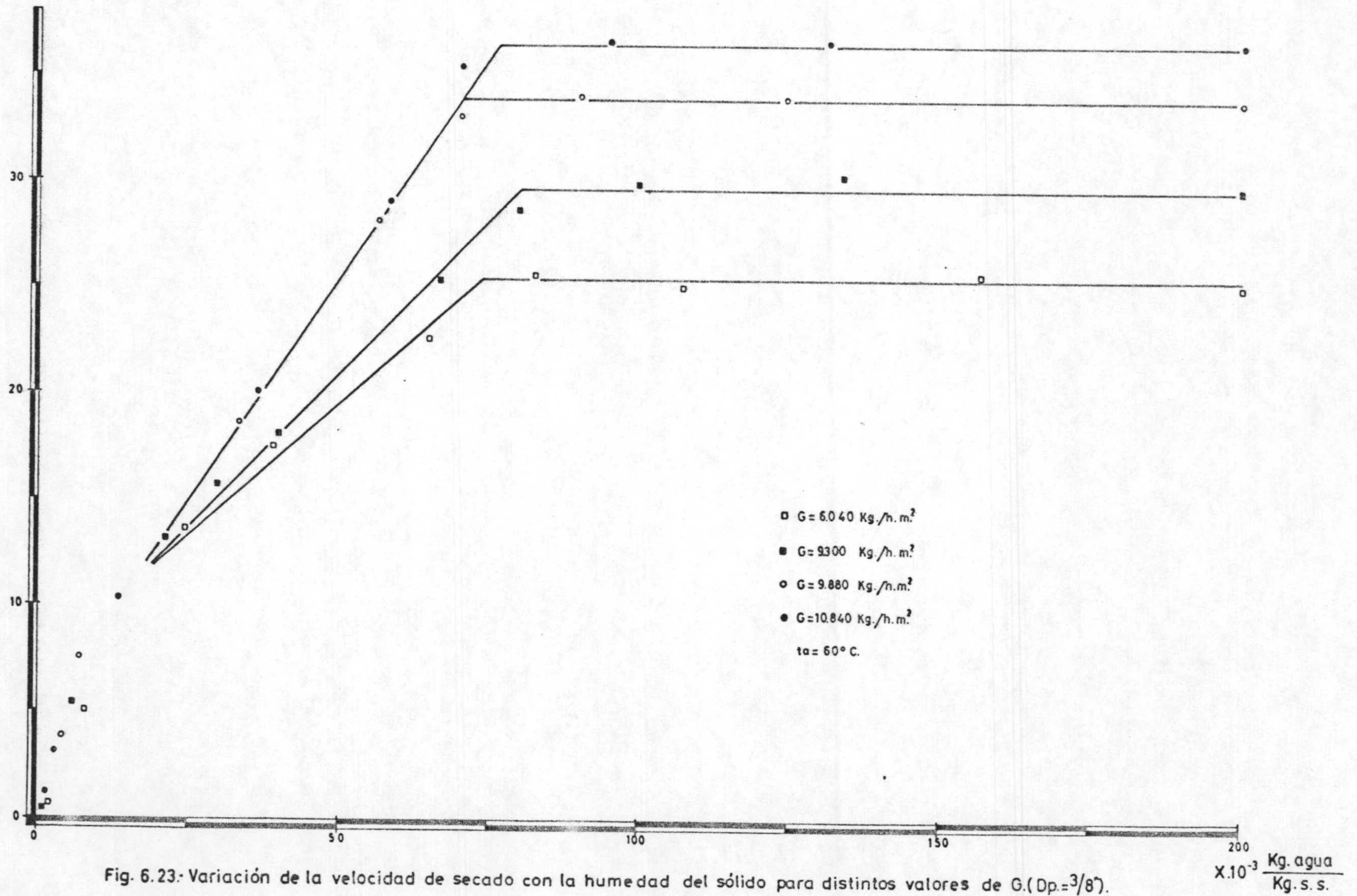


01533584

FERNANDO VALDES SANZ

TESIS DOCTORAL

$$-\frac{dX}{d\theta} \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg.s.s. min.}}$$



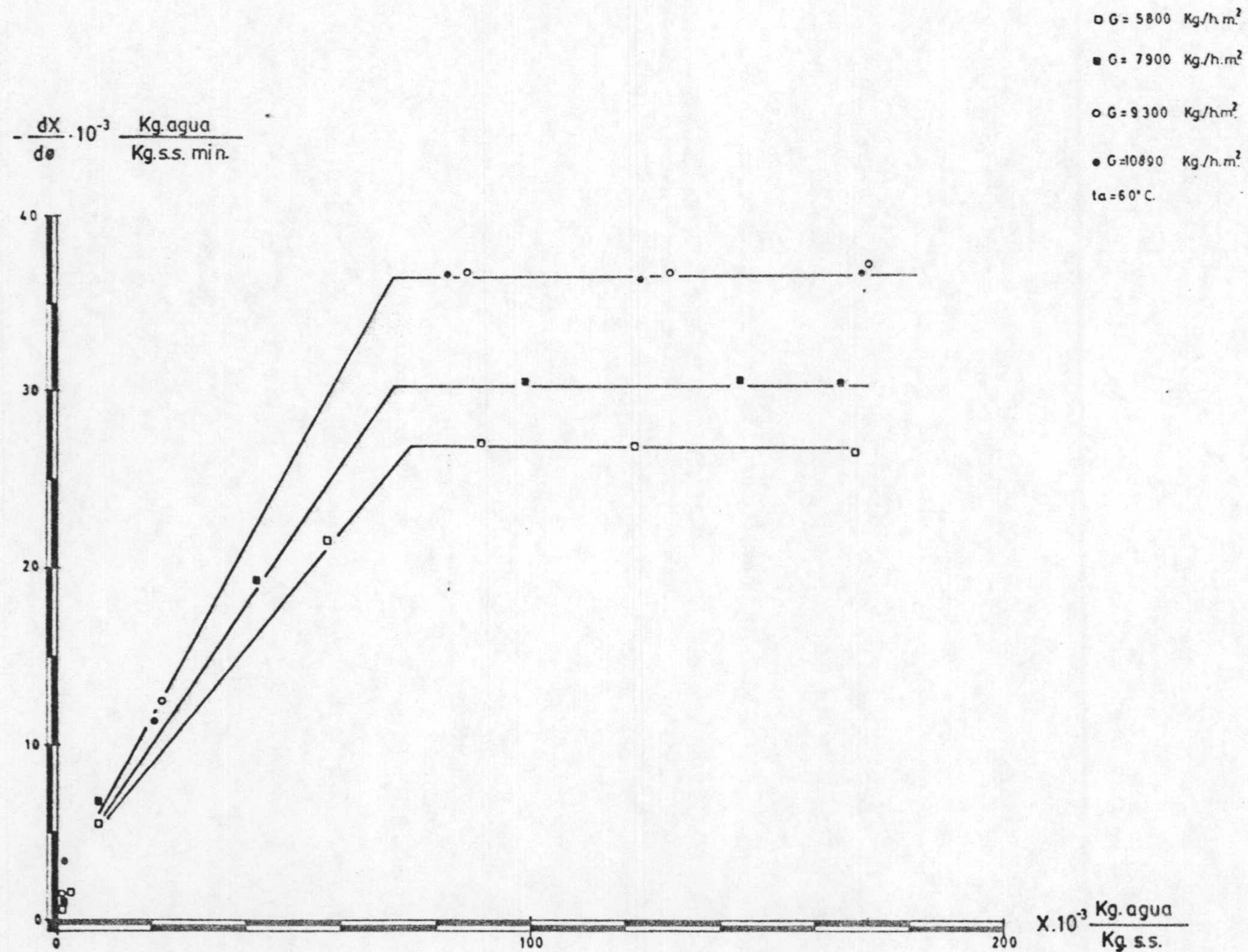


Fig.624.-Variacion de la velocidad de secado con la humedad del solido para distintos valores de G ($D_p = 5/16''$).

$$-\frac{dX}{d\theta} \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg. agua.}}{\text{Kg. s.s. min.}}$$

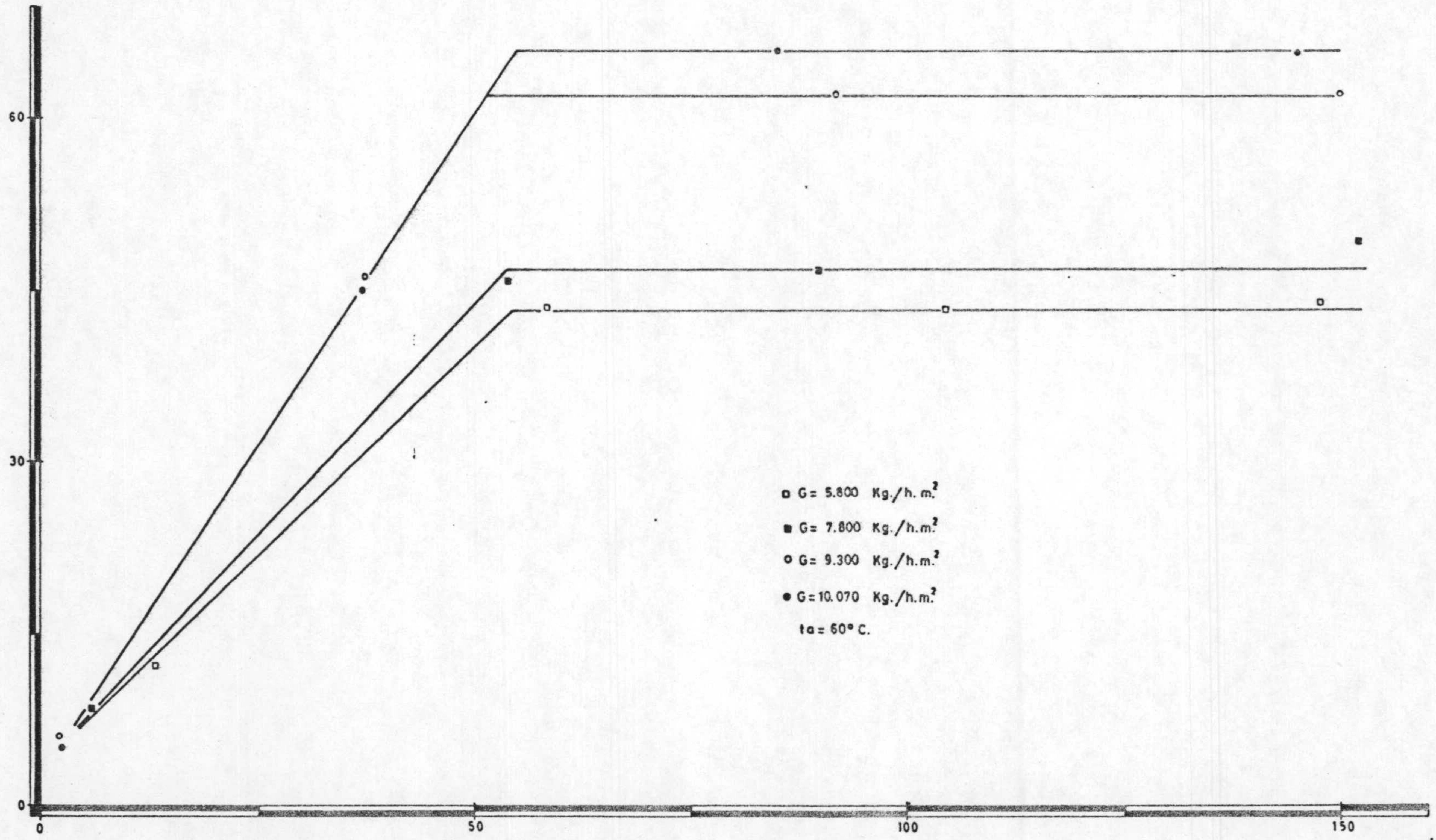


Fig. 6.25.- Variación de la velocidad de secado con la humedad del sólido para distintos valores de G. ($D_p = 3/16''$).

$$X \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg. agua.}}{\text{Kg. s.s.}}$$

El coeficiente individual de transporte de calor puede relacionarse con la velocidad másica del aire (G), el diámetro de la esfera (D_p) y el calor húmedo del aire (C_s), mediante la ecuación (28, 29, 30):

$$h = C \frac{G^n}{D_p^{1-n}} \cdot C_s^{1/3} \quad [6.13]$$

en la que C es una constante y C_s es el calor húmedo del aire.

Puesto que las propiedades del aire no varían apreciablemente de un experimento a otro, la ecuación anterior puede escribirse en la forma:

$$h = C' \frac{G^n}{D_p^{1-n}} \quad [6.14]$$

sustituyendo esta expresión en la 6.12, resulta:

$$-\left(\frac{dX}{d\theta}\right) = \frac{6C' \frac{G^n}{D_p^{1-n}}}{D_p \cdot \lambda \cdot \rho_s} (t_a - t_i) = \frac{C'' \cdot D_p^n \cdot G^n}{D_p^2} (t_a - t_i) \quad [6.15]$$

en la que: $C'' = 6C' / \rho_s \cdot \lambda$. Agrupando, convenientemente, los términos de la ecuación anterior y tomando logaritmos se llega a la expresión:

$$\log \left[\frac{D_p^2 (-dx/d\theta)}{(t_a - t_i)} \right] = \log C'' + n \log (D_p \cdot G) \quad [6.16]$$

Según esta ecuación, al representar las parejas de valores $\left\{ \left[\frac{D_p^2 (-dx/d\theta)}{(t_a - t_i)} \right] \text{ y } (D_p \cdot G) \right\}$, que se encuentran en la tabla 6.6, en papel doble logaritmo debe resultar una línea recta de pendiente n y ordenada en el origen $\log C''$. Efectivamente en la figura 6.26 puede observarse como todos -

T A B L A 6.6

Influencia de la velocidad másica del aire durante el período de velocidad de secado constante.- Correlación de los resultados experimentales mediante la ecuación 6.16

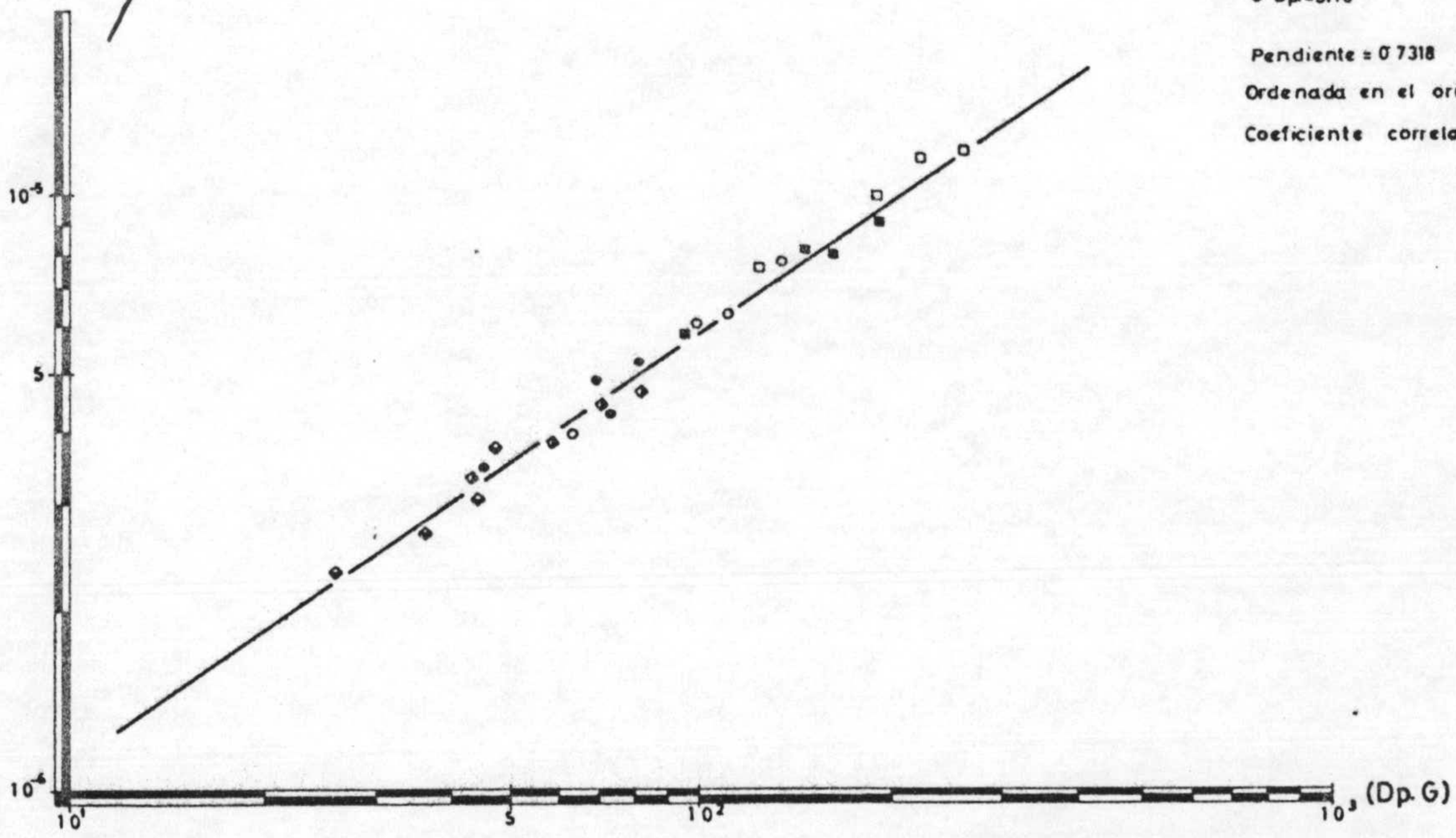
D_p^*	$-\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^{**}$	$t_a - t_{ai}$	$\frac{D_p^2 \left(-\frac{dx}{d\theta}\right)}{t_a - t_i}$	G^{***}	$(D_p \cdot G)$
0,024	0,390	30	$7,56 \times 10^{-6}$	5.200	125,4
0,024	0,516	30	$1,00 \times 10^{-5}$	8.222	198,3
0,024	0,618	31,4	$1,14 \times 10^{-5}$	9.374	226,1
0,024	0,654	33,1	$1,15 \times 10^{-5}$	10.876	262,3
0,018	0,462	27,1	$0,56 \times 10^{-5}$	5.360	97,5
0,018	0,864	29,3	$0,81 \times 10^{-5}$	8.147	145,2
0,018	0,636	26,3	$0,80 \times 10^{-5}$	9.283	168,9
0,018	0,702	25,5	$0,91 \times 10^{-5}$	10.876	197,8
0,012	0,780	29,3	$0,39 \times 10^{-5}$	5.200	62,6
0,012	1,206	29,3	$0,60 \times 10^{-5}$	8.222	99,0
0,012	1,506	33,1	$0,63 \times 10^{-5}$	9.374	112,9
0,012	1,560	29,3	$0,77 \times 10^{-5}$	11.332	136,4
0,010	1,524	32,1	$0,34 \times 10^{-5}$	6.041	45,0
0,010	2,016	31,4	$0,45 \times 10^{-5}$	9.303	69,2
0,010	2,034	32,1	$0,45 \times 10^{-5}$	9.874	73,4
0,010	2,996	32,1	$0,49 \times 10^{-5}$	10.831	80,6
0,007	1,620	29,1	$0,33 \times 10^{-5}$	5.814	43,2
0,007	1,854	27,4	$0,38 \times 10^{-5}$	7.907	58,8
0,007	2,232	27,4	$0,45 \times 10^{-5}$	9.283	69,0
0,007	2,202	26,5	$0,46 \times 10^{-5}$	10.876	80,9
0,005	2,676	26,1	$0,23 \times 10^{-5}$	5.813	26,4
0,005	2,952	23,2	$0,28 \times 10^{-5}$	7.780	36,5
0,005	3,390	24,9	$0,30 \times 10^{-5}$	9.374	44,0
0,005	3,228	29,1	$0,37 \times 10^{-5}$	10.069	47,3

* D_p m

** $\frac{dx}{d\theta}$ Kg agua/Kg s.s. h

*** G Kg aire/h.m²

$$D_p^2 \left(\frac{dx}{d\sigma} \right) / t_a - t_i$$



□ Dp=1"
 ■ Dp=3/4"
 ○ Dp=1/2"
 ● Dp=3/8"
 ◆ Dp=5/16"
 ◇ Dp=3/16"

Pendiente = 0.7318
 Ordenada en el origen = -6.6978
 Coeficiente correlacion = 0.992

Fig. 6.26.- Correlación de los valores experimentales según la ecuación 6.16

los puntos quedan alineados según una línea recta única, que ajustada por mínimos cuadrados conduce a un valor para la ordenada en el origen de $\log C'' = -6,6978$ y una pendiente $n=0,73$. Sustituyendo en la ecuación 6.16 los valores deducidos para las constantes C'' y n resulta la expresión:

$$-\left(\frac{dX}{d\theta}\right) = 2,1 \cdot 10^{-7} \cdot D_p^{-1,27} \cdot G^{0,73} (t_a - t_i) \quad [6.17]$$

que relaciona la velocidad de secado, durante el período de velocidad constante, con el caudal másico y el diámetro de las partículas. En la tabla 6.7 se recogen los resultados de la velocidad de secado calculados a partir de la ecuación 6.17 y se comparan con los obtenidos experimentalmente, encontrándose una concordancia aceptable entre los resultados obtenidos por uno y otro procedimiento. Efectivamente, según se aprecia en la figura 6.27 sólo existe un número de valores experimentales igual a 4% de los totales que se desvía más de un 10%.

6.2.2.2.- PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE.

Tanto en las figuras 6.14 a 6.19 como en las representaciones de $dX/d\theta$ frente a X (figuras 6.20 a 6.25), puede observarse que, una vez sobrepasada la humedad crítica X_c , los puntos representativos de los experimentos realizados con velocidades másicas iguales o superiores a 9.300 Kg/h.m^2 quedan distribuidos a lo largo de una única línea, lo cual indica que a partir de este valor de G , la velocidad de secado no resulta afectada por dicha variable. Esta circunstancia de

T A B L A 6.7

Influencia de la velocidad másica del aire durante el período de velocidad de secado constante.- Comparación entre las velocidades de secado calculados a partir de la ecuación 6.17 y los encontrados experimentalmente.

D_p^*	G^{**}	$(-\frac{dx}{d\theta})^{***}_{exp.}$	$(-\frac{dx}{d\theta})_{ecuación\ 6.17}$
0,024	5.200	0,390	0,358
0,024	8.222	0,516	0,499
0,024	9.374	0,618	0,574
0,024	10.876	0,654	0,673
0,018	5.360	0,462	0,475
0,018	8.147	0,864	0,846
0,018	9.283	0,636	0,705
0,018	10.876	0,722	0,790
0,012	5.200	0,780	0,850
0,012	8.222	1,206	1,183
0,012	9.374	1,506	1,470
0,012	11.332	1,560	1,492
0,010	6.041	1,524	1,761
0,010	9.303	2,160	2,119
0,010	9.874	2,034	1,992
0,010	10.831	2,190	2,084
0,007	5.814	1,920	1,766
0,007	7.907	1,854	1,992
0,007	9.283	2,232	2,236
0,007	10.876	2,202	2,250
0,005	5.813	2,676	2,734
0,005	7.780	2,952	3,375
0,005	9.374	3,390	3,350
0,005	10.069	3,228	3,167

* D_p m

** G Kg aire/h.m²

*** $\frac{dx}{d\theta}$ Kg agua/Kg s.s. h

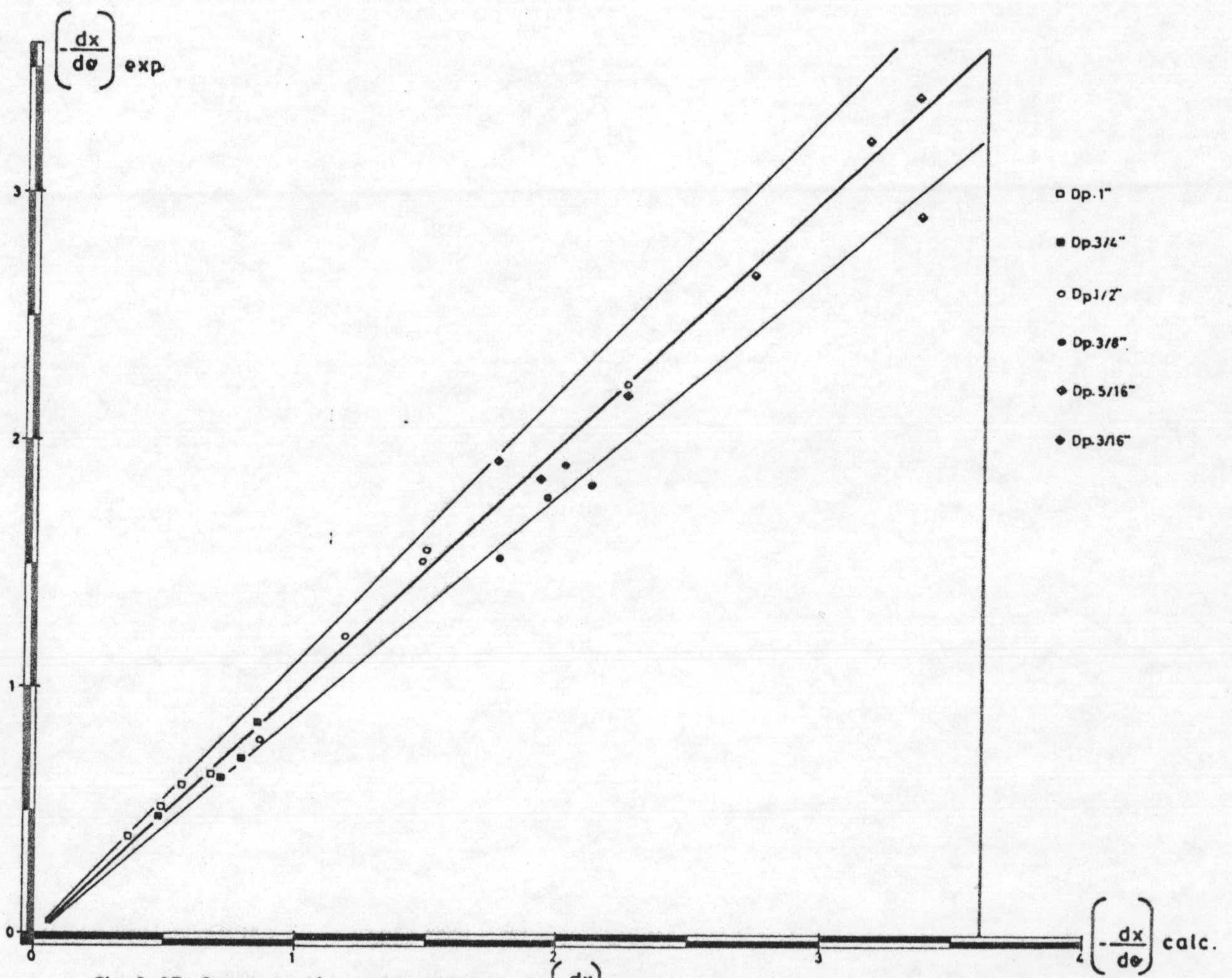


Fig. 6. 27.- Comparación de los valores de $\left(\frac{dx}{d\theta}\right)$ obtenidos mediante la ecuación y los obtenidos experimentalmente.

muestra que el secado de las esferas transcurre dentro de la etapa controlada por el desplazamiento del agua a través del sólido.

6.2.3.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.

En las figuras 6.28 a 6.33, se han representado, en la forma X frente a θ , los resultados experimentales que se detallan en las tablas 5.14 a 5.19, respectivamente. Puede observarse que la pendiente de las curvas (velocidad de secado) crece con la temperatura, circunstancia que era de esperar debido a que existe una proporcionalidad directa entre la temperatura y el coeficiente de difusión.

Los experimentos en los que se obtuvieron estos resultados, se llevaron a cabo utilizando valores de velocidad másica del aire, G, y de espesor de lecho, L, no controlantes.

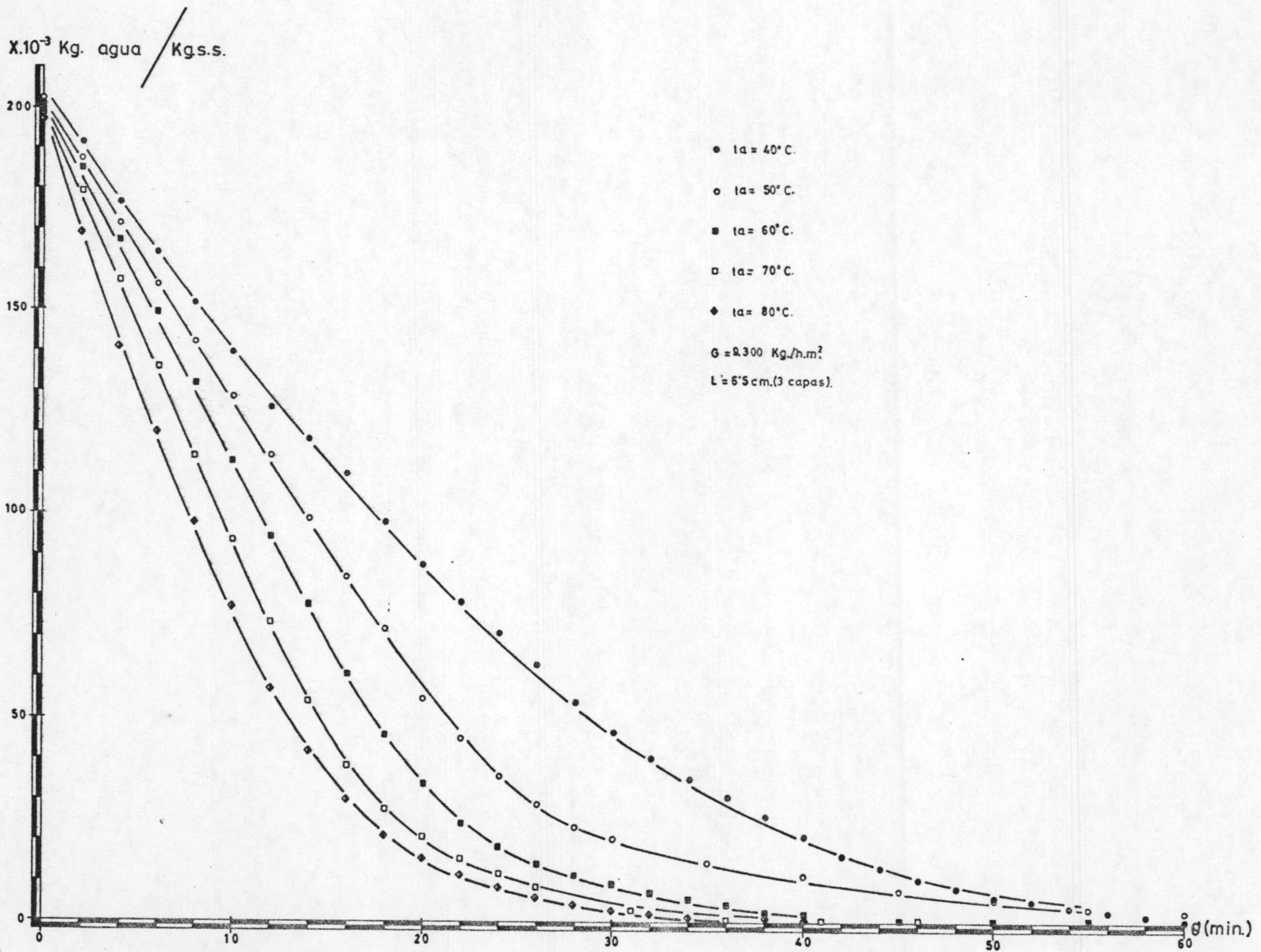


Fig. 6.28.-Variacion del contenido de humedad en las esferas de 1" de diametro. Influencia de la temperatura.



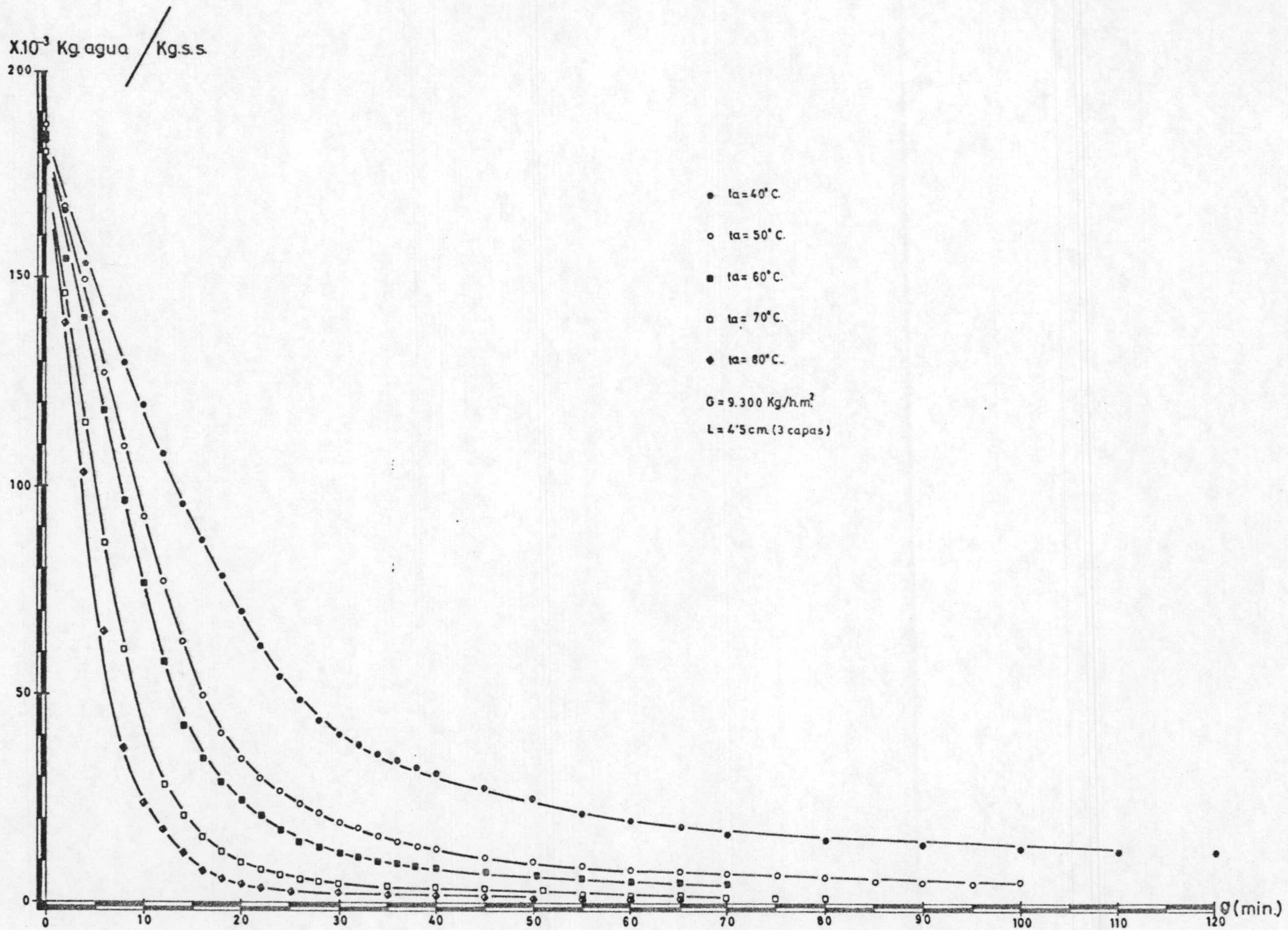


Fig.6.29.-Variación del contenido de humedad en las esferas de 3/4" de diametro.
Influencia de la temperatura.

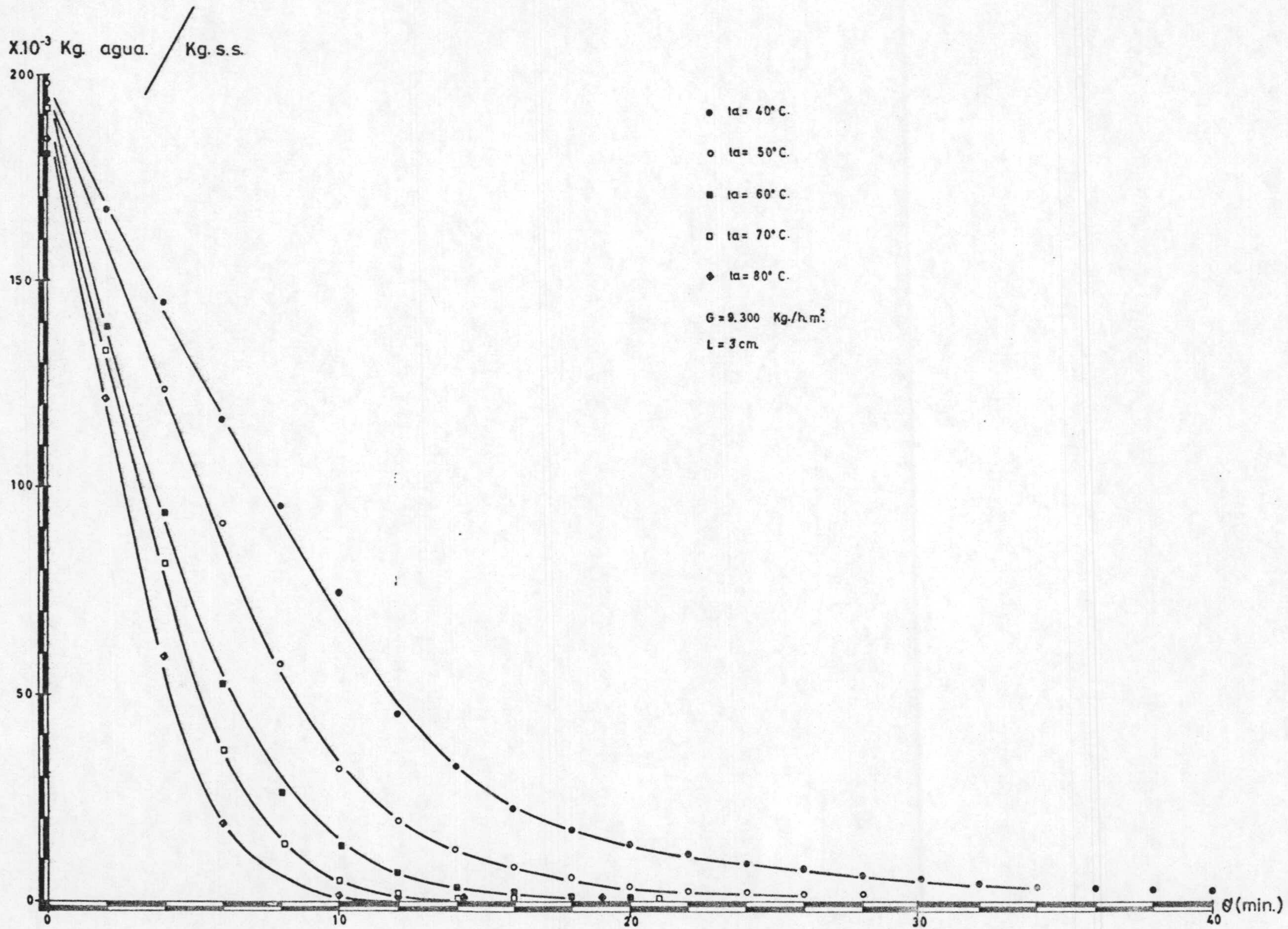


Fig.6.30.-Variacion del contenido de humedad en las esferas de 1/2" de diametro.
 Influencia de la temperatura.

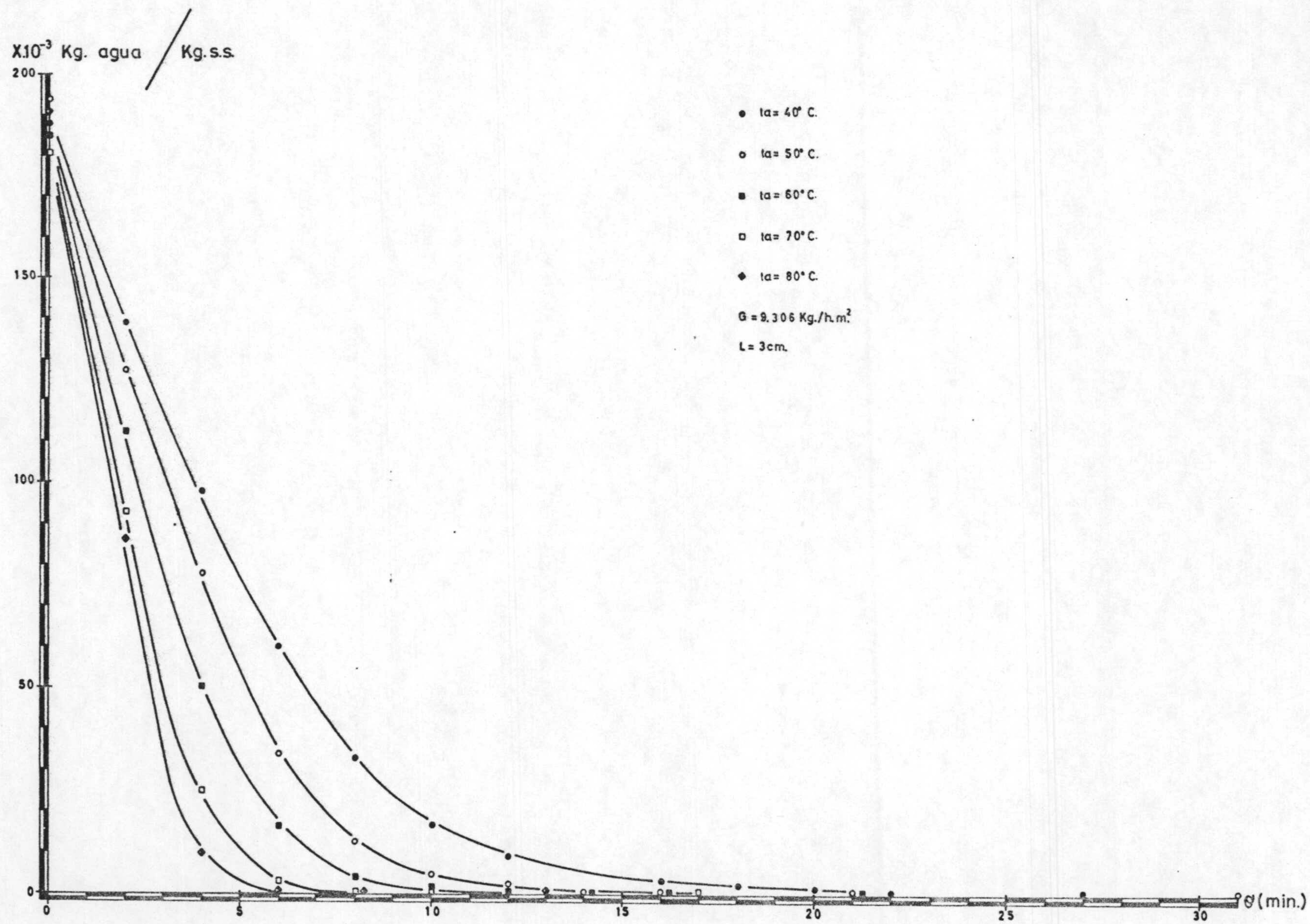


Fig. 6.31. -Variacion del contenido de humedad en las esferas de 3/8" de diametro.
Influencia de la temperatura.

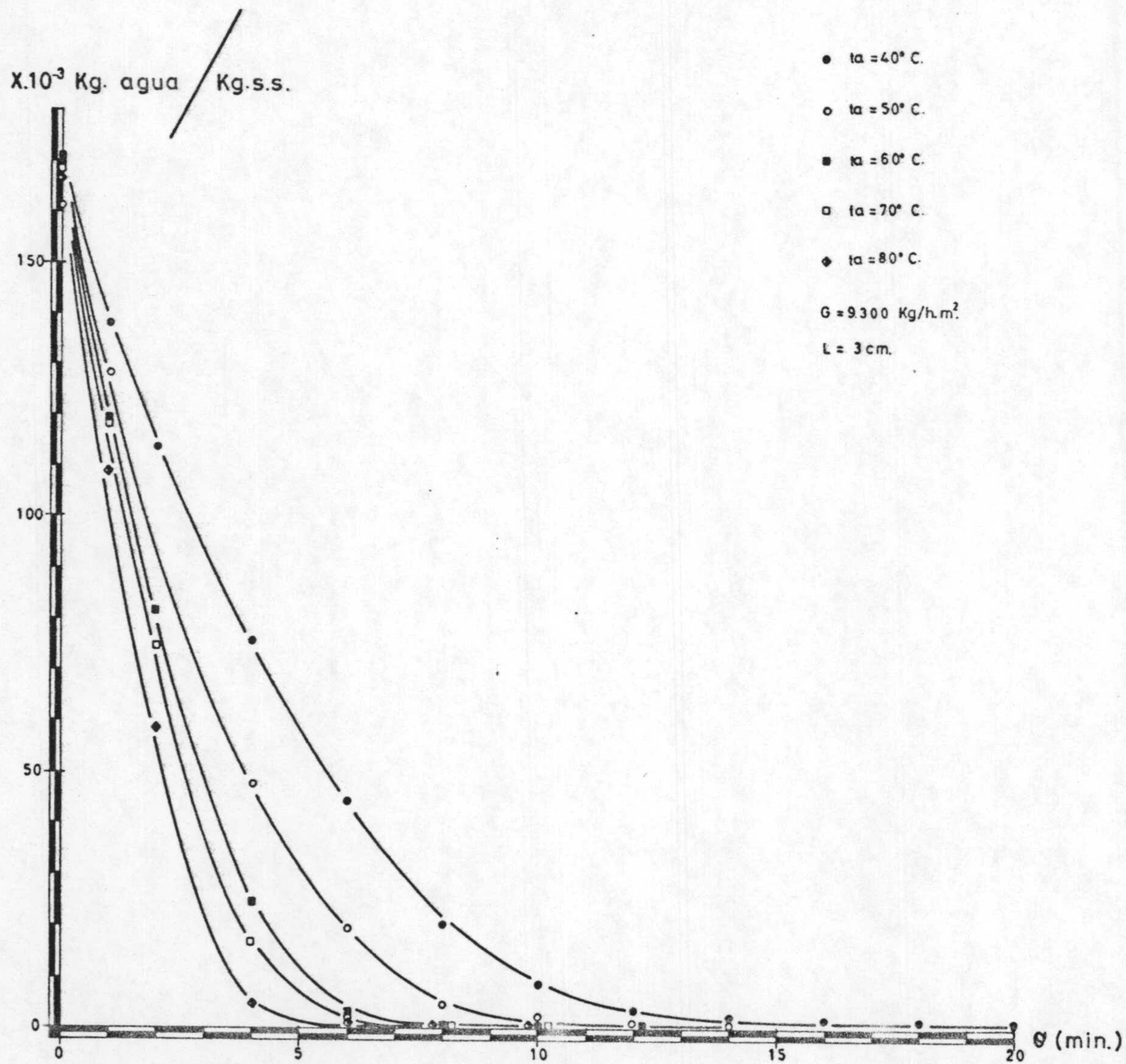


Fig.6.32.-Variacion del contenido de humedad en las esferas de 5/16" de diametro.
Influencia de la temperatura.

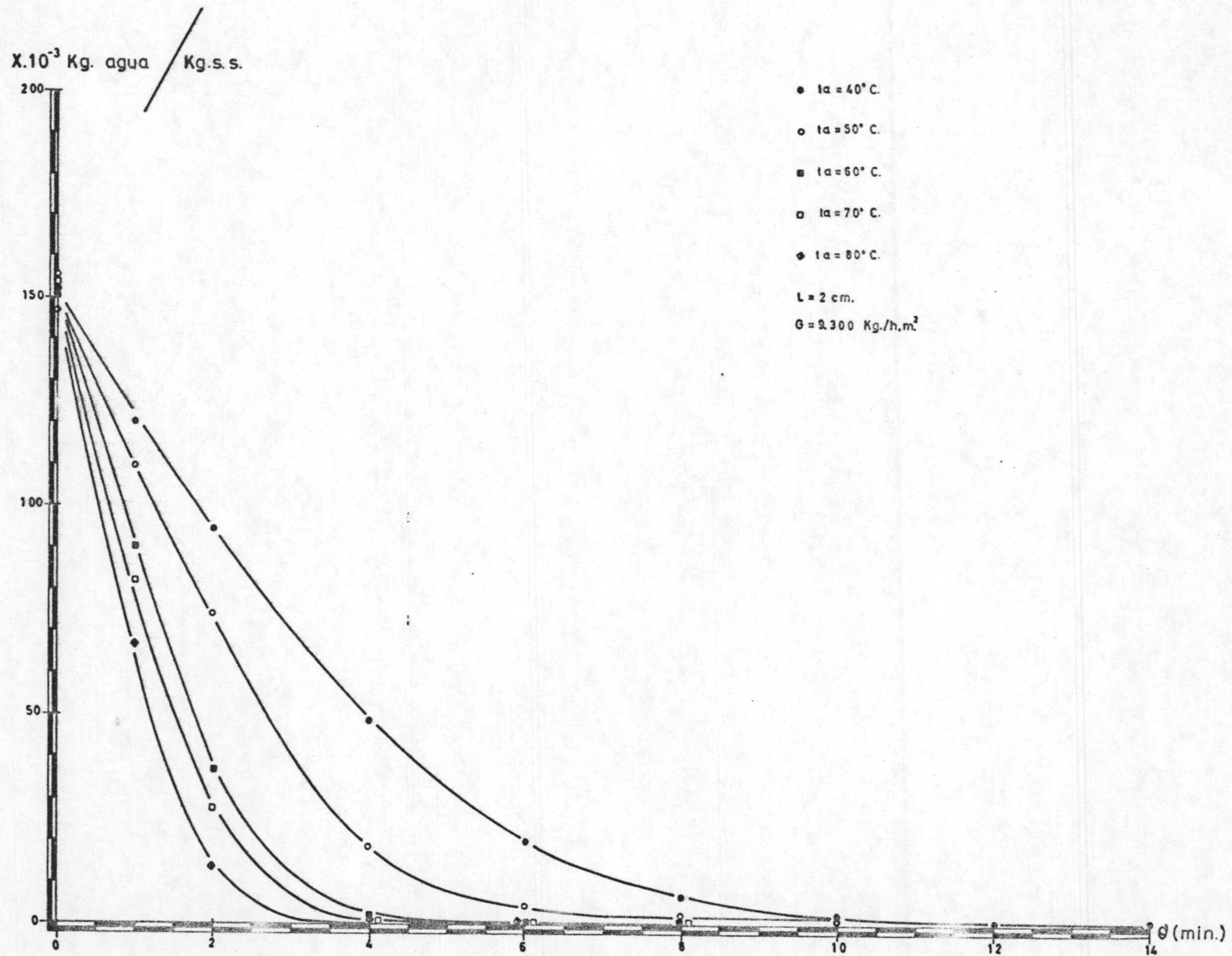


Fig.6.33.-Variacion del contenido de humedad en las esferas de 3/16" de diametro.
 Influencia de la temperatura.

6.2.4.- MODELOS DE SECADO.

Para reproducir los resultados experimentales obtenidos al estudiar la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado, durante el período de velocidad de secado decreciente, se ha utilizado un modelo de secado no isotérmico, ya que se comprobó que la temperatura de los materiales aumentaba gradualmente durante el proceso hasta alcanzar como valor límite la del aire.

Para formular el modelo se tiene en cuenta, simultáneamente, los fenómenos de transferencia de materia y energía, ya que ambos intervienen en el proceso. Las premisas básicas en la formulación del mismo son las siguientes:

1. El desplazamiento del agua desde el interior del sólido hasta la superficie se realiza en estado líquido según un proceso de difusión en estado no estacionario.
2. Los materiales objeto de secado son esferas isotropas.
3. Simultáneamente al secado, el sólido varía su temperatura hasta adquirir, como límite, la del aire.
- 4.- El proceso controlante es la difusión del agua en el interior del sólido a secar.
- 5.- Las condiciones en la interfase sólido-gas permanecen constantes.
- 6.- Las propiedades físicas del sólido (ρ , C_p , K) permanecen constantes a lo largo del proceso.

En la figura 6.34 se ha representado, de manera cualitativa, la variación de los perfiles de humedad y temperatura, en una porción de sólido suficientemente pequeña, así como la nomenclatura utilizada en este modelo.

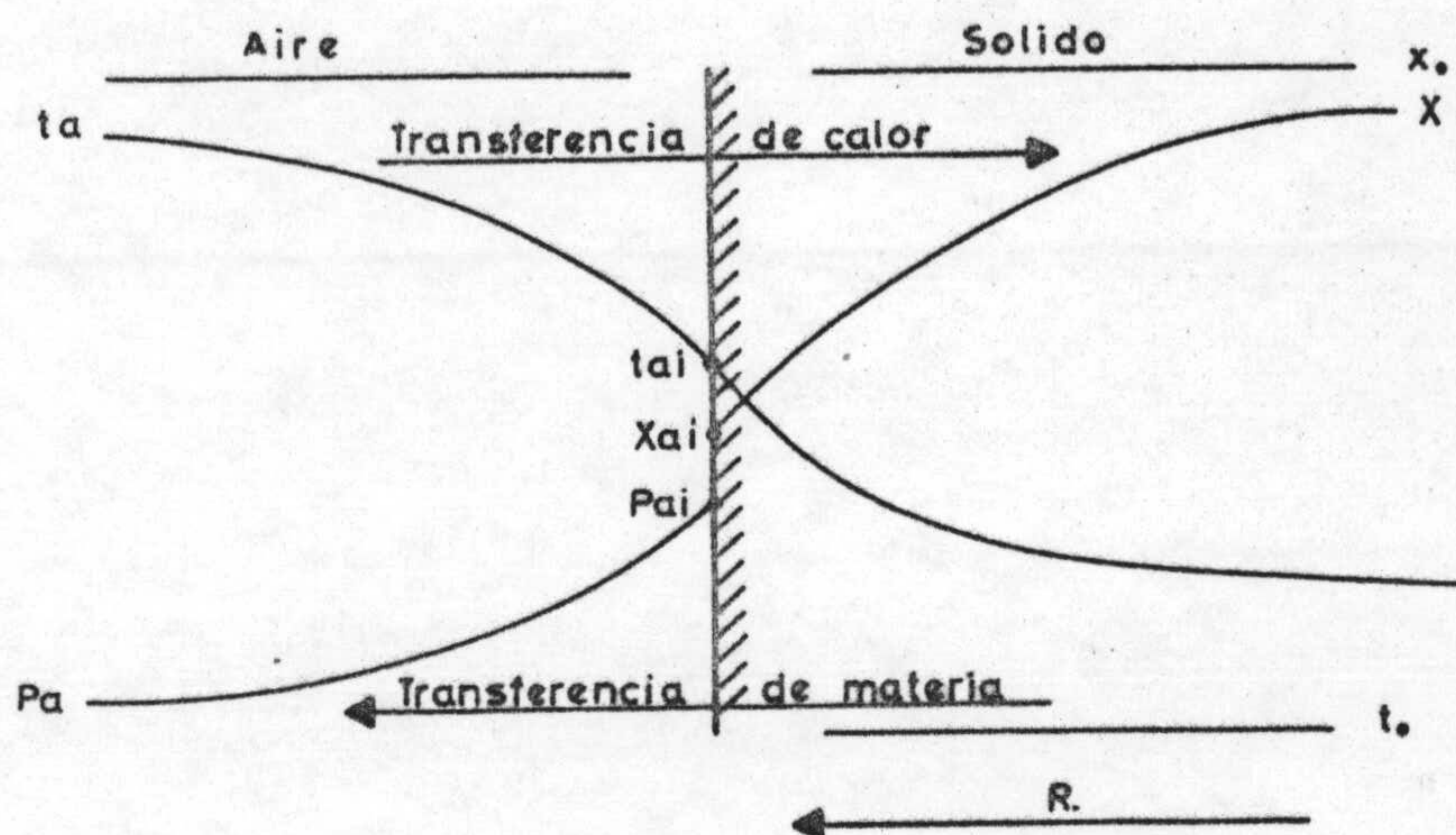


Fig.6.34.-Perfiles de temperatura y humedad para un sólido y el aire que le rodea, en el transcurso del secado.

Admitiendo las hipótesis formuladas anteriormente, la variación de la temperatura del sólido en función del tiempo y de la posición vendrá dada por la ecuación:

$$\frac{\delta t}{\delta x} = \alpha \left[\frac{2}{r} \frac{\delta t}{\delta r} + \frac{\delta^2 t}{\delta r^2} \right] \quad [6.18]$$

donde α es la difusividad térmica del sólido húmedo (m^2/h).

Para la integración de la ecuación 6.18, son necesarias tres condiciones límites (una de tiempo y dos de posición) las cuales se pueden expresar como sigue:

1ª Para $\theta = 0, t = t_0$ para $0 \leq r \leq R$ [6.19]
siendo R el radio de la esfera.

2ª Para $r = 0, \left(\frac{\delta t}{\delta r}\right)_{r=0} = 0$ para $0 \leq \theta \leq \infty$ [6.20]

3ª Para $r = R$, realizando un balance de energía en la superficie del sólido se puede escribir:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo de calor} \\ \text{aportado por} \\ \text{el aire} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de calor} \\ \text{necesario para} \\ \text{vaporizar el} \\ \text{agua de la su-} \\ \text{perficie} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de calor} \\ \text{que se transmi-} \\ \text{te hacia el in-} \\ \text{terior} \end{array} \right]$$

La expresión matemática de este balance es:

$$h(t_a - t_{ai}) = -D_e \cdot \rho_s \cdot \lambda \left(\frac{\delta x}{\delta r}\right)_{r=R} + K_s \left(\frac{\delta t}{\delta r}\right)_{r=R} \quad [6.21]$$

Simultáneamente y de un modo análogo, para describir la evolución de la humedad a través del tiempo y de la posición se precisa otra ecuación, la representativa del trans-

porte de materia en el interior del sólido que de acuerdo con las hipótesis establecidas, se puede escribir:

$$\frac{\delta X}{\delta \theta} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[D_e \cdot r^2 \left(\frac{\delta X}{\delta r} \right) \right] \quad [6.22]$$

Ecuación en la que el coeficiente de difusión efectivo, D_e , no aparece como factor común, debido a su variación a lo largo del radio, a consecuencia de los gradientes de temperatura en el interior del sólido que se seca. Para la integración de la ecuación precedente se precisan las tres condiciones límites siguientes:

$$1^a \text{ Para } \theta = 0, \quad X = X_0 \text{ para } 0 \leq r \leq R \quad [6.23]$$

$$2^a \text{ Para } r = 0, \quad \left(\frac{\delta X}{\delta r} \right)_{r=0} = 0 \text{ para } 0 \leq \theta \leq \infty \quad [6.24]$$

3^a Para $r = R$, realizando un balance de materia en la superficie, se puede escribir:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Flujo de agua que lle} \\ \text{ga a la superficie} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de agua que se} \\ \text{transfiere a través} \\ \text{de la interfase} \end{array} \right]$$

cuya expresión matemática es:

$$-D_e \cdot \rho_s \left(\frac{\delta X}{\delta r} \right)_{r=R} = k_g (P_{ai} - P_a) \quad [6.25]$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones diferenciales 6.18 y 6.22 bajo las condiciones límites 6.19, 6.20, 6.21, 6.23, 6.24 y 6.25 se pueden obtener las variaciones de temperatura y humedad en función de la posición y del tiempo. Para abordar la resolución de este modelo, dada la gran dificultad que presenta la integración analítica y simultánea de

las ecuaciones 6.18 y 6.22, se utiliza el método de incrementos finitos.

6.2.4.1.- RESOLUCION DE LAS ECUACIONES POR INTEGRACION NUMERICA.

Para integrar las ecuaciones 6.18 y 6.22 por el método de las diferencias finitas, se supone dividido el radio de la esfera en N partes. Si se llama j a un punto del mismo, los situados a su derecha son $j+1$, $j+2$, etc. y los situados a su izquierda $j-1$, $j-2$, etc. Con respecto a la otra variable (tiempo) se supone dividida en M partes y a cada una de estas divisiones se le contabiliza como k , $k+1$, $k+2$, etc. De esta manera $X_{j,k}$ significa la humedad en la posición j y en el tiempo k . En la figura 6.35 se han recogido estas consideraciones previas.

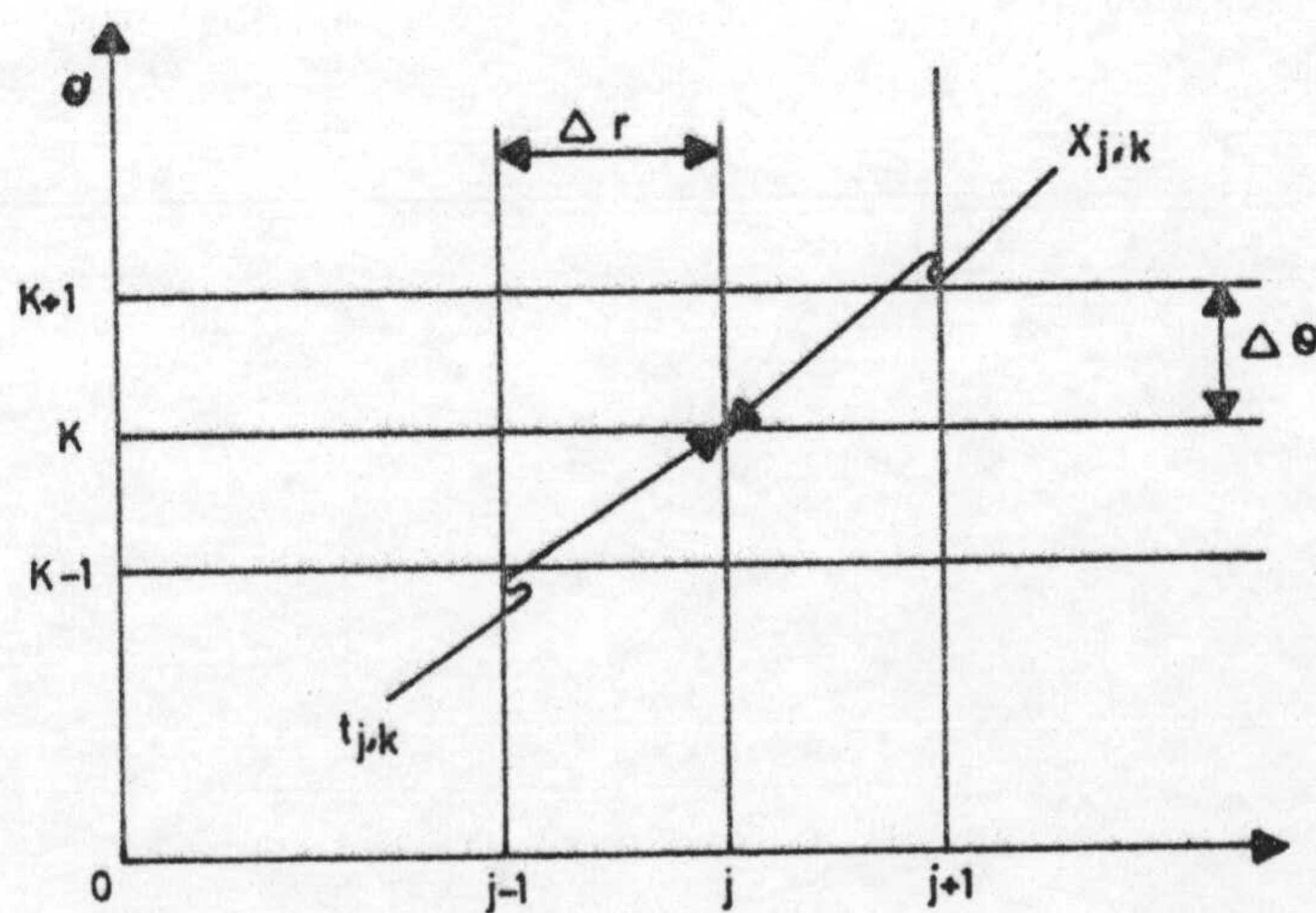


Fig.6.35-Puntos empleados en la formación de diferencias finitas para sustituir por las derivadas parciales.

La discretización de las ecuaciones diferenciales 6.18 y 6.22 se realiza fácilmente mediante series de Taylor - en las que se desprecian los términos de segundo orden y superiores. (85, 86). De esta forma se obtiene:

$$\frac{\delta t_{j,k}}{\delta \theta} = \frac{t_{j,k+1} - t_{j,k}}{\Delta \theta} \quad [6.26]$$

$$\frac{\delta X_{j,k}}{\delta \theta} = \frac{X_{j,k+1} - X_{j,k}}{\Delta \theta} \quad [6.27]$$

$$\frac{\delta t_{j,k}}{\delta r} = \frac{t_{j+1,k} - t_{j,k}}{\Delta r} \quad [6.28]$$

$$\frac{\delta X_{j,k}}{\delta r} = \frac{X_{j+1,k} - X_{j,k}}{\Delta r} \quad [6.29]$$

$$\frac{\delta^2 t_{j,k}}{\delta r^2} = \frac{t_{j+1,k} - 2t_{j,k} + t_{j-1,k}}{\Delta r^2} \quad [6.30]$$

$$\frac{\delta^2 X_{j,k}}{\delta r^2} = \frac{X_{j+1,k} - 2X_{j,k} + X_{j-1,k}}{\Delta r^2} \quad [6.31]$$

Sustituyendo las ecuaciones 6.26, 6.28 y 6.30 en la ecuación 6.18 y teniendo en cuenta que $r = j \cdot \Delta r$, donde j varía de cero a N , se tiene:

$$\frac{t_{j,k+1} - t_{j,k}}{\Delta \theta} = \alpha \left[\frac{2}{j \cdot \Delta r} \left(\frac{t_{j+1,k} - t_{j,k}}{\Delta r} \right) + \frac{t_{j+1,k} - 2t_{j,k} + t_{j-1,k}}{\Delta r^2} \right] \quad [6.32]$$

ordenando los términos de esta ecuación, se transforma en:

$$t_{j,k+1} = t_{j,k} + \frac{\alpha \cdot \Delta \theta}{\Delta r^2} \left[\left(\frac{2}{j} + 1 \right) t_{j+1,k} - \left(2 + \frac{2}{j} \right) t_{j,k} + t_{j-1,k} \right] \quad [6.33]$$

ecuación que permite calcular la distribución de temperatura - en el tiempo $k+1$ conocida la del tiempo anterior k . Esta ecua-

ción sólo es válida para valores de j comprendidos en el intervalo de $j=1$ a $j=n-1$; no es aplicable ni al centro ($j=0$) ni a la superficie ($j=n$) de la esfera.

En el centro, $j=0$, se tiene como condición límite $(\frac{\delta t_{j,k}}{\delta r})_{r=0} = 0$ para $0 \leq \theta \leq \infty$ lo que conduce a una indeterminación en el primer término del segundo miembro de la ecuación 6.18. Para eliminarla se aplica la regla de L'Hôpital. Así:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\frac{\delta t}{\delta r}}{r} = \frac{\delta^2 t}{\delta r^2}$$

y por tanto la ecuación 6.18, quedará de la forma:

$$\frac{\delta t_{0,k}}{\delta \theta} = \alpha \left[2 \frac{\frac{\delta}{\delta r} (\frac{\delta t_{0,k}}{\delta r})}{\frac{\delta}{\delta r} r} + \frac{\delta^2 t_{0,k}}{\delta r^2} \right] = 3\alpha \frac{\delta^2 t_{0,k}}{\delta r^2} \quad [6.34]$$

Sustituyendo en la ecuación 6.34 los valores de $\frac{\delta t_{0,k}}{\delta \theta}$ y $\frac{\delta^2 t_{0,k}}{\delta r^2}$ dados por las ecuaciones 6.26 y 3.30, respectivamente, se tiene:

$$\frac{t_{0,k+1} - t_{0,k}}{\Delta \theta} = 3\alpha \left(\frac{t_{1,k} - 2t_{0,k} + t_{-1,k}}{\Delta r^2} \right) \quad [6.35]$$

por simetría $t_{1,k} = t_{-1,k}$. Ordenando los términos de la ecuación anterior se tiene:

$$t_{0,k+1} = t_{0,k} + \frac{6\alpha \Delta \theta}{\Delta r^2} (t_{1,k} - t_{0,k}) \quad [6.36]$$

ecuación que permite calcular la temperatura en el centro de-

la esfera, para cualquier valor del tiempo $k+1$, utilizando las correspondientes a $j=0$ y $j=1$ en el tiempo anterior k .

Como se ha indicado, anteriormente, la ecuación 6.33 tampoco es aplicable a la superficie pues se apoya en el punto $j+1$ situado fuera del sistema. Por ello, se recurre al cálculo de $t_{j,k+1}$ apoyándose en los puntos $j-1$ y $j-2$.

En la superficie, $j=N$, se tiene como condición límite (ecuación 6.21)

$$h(t_a - t_{n,k+1}) = -D_e \cdot \rho_s \cdot \lambda \left(\frac{\delta x_{n,k+1}}{\delta r} \right) + K_s \left(\frac{\delta t_{n,k+1}}{\delta r} \right)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 6.25, balance de materia aplicado a la superficie, se tiene:

$$- \left(\frac{\delta x_{n,k+1}}{\delta r} \right) = \frac{k_g (P_{ai} - P_a)}{D_e \cdot \rho_s}$$

y sustituyendo en la ecuación anterior, resulta:

$$h(t_a - t_{n,k+1}) = k_g (P_{ai} - P) \lambda + K_s \left(\frac{\delta t_{n,k+1}}{\delta r} \right) \quad [6.37]$$

despejando $\left(\frac{\delta t_{n,k+1}}{\delta r} \right)$ de la ecuación 6.37:

$$\left(\frac{\delta t_{n,k+1}}{\delta r} \right) = \frac{h(t_a - t_{n,k+1}) - k_g (P_{ai,k+1} - P_a) \lambda}{K_s} \quad [6.38]$$

Por otra parte, desarrollando en series de Taylor la temperatura al tiempo $k+1$ en las posiciones $r-2\Delta r$ y $r-\Delta r$, se tiene:

$$t(r-\Delta r, \theta) = t_{r, \theta} - \Delta r \left(\frac{\delta t_{k+1}}{\delta r} \right) + \frac{\Delta r^2}{2} \left(\frac{\delta^2 t_{k+1}}{\delta r^2} \right) \quad [6.39]$$

$$t(r-2\Delta r, \theta) = t_{r, \theta} - 2\Delta r \left(\frac{\delta t_{k+1}}{\delta r} \right) + 2\Delta r^2 \left(\frac{\delta^2 t_{k+1}}{\delta r^2} \right) \quad [6.40]$$

multiplicando las ecuaciones 6.39 y 6.40 por 4 y -1 respectivamente y sumando ambas se tiene:

$$\left(\frac{\delta t_{n, k+1}}{\delta r} \right) = \frac{3t_{n, k+1} - 4t_{n-1, k+1} + t_{n-2, k+1}}{2\Delta r} \quad [6.41]$$

en la que se ha sustituido $r-\Delta r$ por $n-1$, $r-2\Delta r$ por $n-2$ y θ por $k+1$.

Combinando las ecuaciones 6.38 y 6.41, después de ordenar los términos, se llega a:

$$t_{n, k+1} = \frac{2\Delta r [ht_a - k_g (P_{ai} - P_a)\lambda] + K_s (4t_{n-1, k+1} - t_{n-2, k+1})}{2\Delta r h + 3K_s} \quad [6.42]$$

ecuación que se utiliza para calcular la temperatura en la superficie en el tiempo $k+1$ apoyándose en temperaturas de los puntos $n-1$ y $n-2$ situados en el interior de la esfera.

La discretización de la ecuación de transferencia de materia (ecuación 6.22) se efectúa de manera análoga, sustituyendo en la misma las ecuaciones 6.27, 6.29 y 6.31, pudiendo entonces escribirse en la forma (ver apartado 7.2):

$$X_{j, k+1} = X_{j, k} + \frac{D_{ej, k} \Delta t}{\Delta r^2} \left[\left(\frac{2}{j} + 1 + \frac{D_{ej+1, k} - D_{ej, k}}{D_{ej, k}} \right) X_{j+1, k} - \left(\frac{2}{j} + 2 + \frac{D_{ej+1, k} - D_{ej, k}}{D_{ej, k}} \right) X_{j, k} + X_{j-1, k} \right] \quad [6.43]$$

expresión que permite calcular la humedad en el tiempo $k+1$ conociendo la distribución de humedades en el tiempo k . Esta ecuación, por las mismas razones que se dieron para la ecuación 6.33, sólo es aplicable desde $j=0$ hasta $j=n-1$.

Para el centro, $(\frac{\delta X}{\delta r})_{r=0} = 0$, operando de forma análoga a como se hizo con la ecuación de transferencia de calor (ecuación 6.18), se obtiene (ver apartado 7.2):

$$X_{0,k+1} = X_{0,k} + \frac{6D_{e0,k} \cdot \Delta \theta}{\Delta r^2} (X_{1,k} - X_{0,k}) \quad [6.44]$$

ecuación análoga a la 6.36 y que se utiliza para el cálculo de la humedad en el centro del material, $j=0$, apoyándose en las humedades correspondientes al centro y a la primera división del radio en el tiempo anterior k .

Como se ha indicado anteriormente, la ecuación 6.43 tampoco es aplicable a la superficie pues se apoya en un punto, $X_{j+1,k}$, situado fuera del sistema. Por élllo se recurre al cálculo de $X_{j,k+1}$ apoyándose en los puntos $j-1$ y $j-2$. Teniendo en cuenta la ecuación 6.25 y habida cuenta que el desarrollo truncado en series de Taylor de la función $X=f(r,\theta)$ conduce a una expresión análoga a la obtenida para la función $t=f(r,\theta)$ (ecuación 6.41), se puede escribir:

$$\left(\frac{\delta X_{n,k+1}}{\delta r}\right) = \frac{k_g (P_{ai,k+1} - P_a)}{D_{e,k+1} \cdot \rho_s} = \frac{4X_{n-1,k+1} - 3X_{n,k+1} - X_{n-2,k+1}}{2\Delta r}$$

de donde:

$$X_{n,k+1} = \frac{4X_{n-1,k+1} - X_{n-2,k+1} - \frac{2\Delta r k_g}{D_{e,k+1} \cdot \rho_s} (P_{ai,k+1} - P_a)}{3} \quad [6.45]$$

ecuación que permite calcular la humedad del sólido en la superficie, en el tiempo $k+1$, conocida la humedad en el interior del mismo.

Por tanto a partir de las ecuaciones 6.33, 6.36, 6.42, 6.43, 6.44 y 6.45 se puede calcular la distribución de humedades y temperaturas en el interior del sólido, pudiéndose realizar con ellas la simulación del secado de los materiales utilizados.

6.2.4.2.- ECUACIONES AUXILIARES PARA LA RESOLUCION DEL MODELO.

El conjunto de las ecuaciones expuestas anteriormente no puede resolverse sin antes definir dos expresiones auxiliares, una que relacione el coeficiente de difusión efectivo, D_e , con la temperatura del sólido y otra que relacione la presión de vapor en la interfase, P_{ai} , con la temperatura de la misma, ya que a lo largo del proceso ambas magnitudes varían gradualmente.

El coeficiente de difusión de un líquido a través de un sólido varía exponencialmente con la temperatura absoluta (87) según una ecuación de la forma:

$$D_e = D_0 \cdot \exp(-E/RT) \quad [6.46]$$

Por tanto, al representar $\log D_e$ frente a la inversa de la temperatura del sólido (expresada en $^{\circ}K$), debe resultar una línea recta de cuya pendiente y ordenada en el origen se pueden obtener los valores de E/R y D_0 , respectivamente.

Admitiendo las hipótesis iniciales enunciadas en el párrafo 6.2.4. (el agua se desplaza en fase líquida y el sólido es isótropo respecto a la difusión) la ecuación representativa del proceso en régimen isotérmico, sería:

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = D_e \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) = D_e \nabla^2 c$$

que una vez integrada, para una geometría esférica, queda de la forma (ver apartado 7.3.2):

$$\frac{\bar{X} - \bar{X}_e}{\bar{X}_o - \bar{X}_e} = \frac{6}{\pi^2} \left(e^{-\frac{\pi^2}{R^2} D_e \cdot \theta} + \frac{1}{4} e^{-\frac{4\pi^2}{R^2} D_e \cdot \theta} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9\pi^2}{R^2} D_e \cdot \theta} + \dots \right) \quad [6.47]$$

donde \bar{X} representa la humedad media del sólido a un tiempo θ .

Esta ecuación sólo es aplicable cuando no existan gradientes térmicos en el interior del sólido. Para calcular los valores de D_e , a partir de la ecuación anterior, se utilizaron los valores de \bar{X} correspondientes a la humedad crítica, X_c , (final del período de velocidad de secado constante e inicio del de velocidad de secado decreciente) ya que en ese momento la temperatura del sólido aún permanece constante y además se inicia el control de la difusión del agua por el interior del sólido. Sustituyendo, en la ecuación 6.47, las parejas de valores (X_c y θ_c) para cada tamaño y temperatura, se calcularon los respectivos coeficientes de difusión D_e que permitieron, posteriormente, llevar a cabo la representación de $\log D_e$ frente a $1/T$ de la que se dedujeron los valores de E/R y D_o . Una descripción detallada del cálculo así como el listado del programa utilizado se encuentran en la sección 7.

La presión de vapor del agua pura, también varía exponencialmente con la temperatura. En el intervalo de temperaturas ensayadas (desde 40 hasta 80°C), se ha comprobado que P_{ai}^* se ajusta a una ecuación del tipo:

$$P_{ai}^* = A \exp[-B/(t+273)] \quad [6.48]$$

donde A y B, son dos constantes que se han determinado por regresión lineal, a partir de los valores de la presión de vapor del agua pura en función de la temperatura (tabla 7.2).

La utilización de la ecuación 6.48 para el cálculo de la presión de vapor del agua en la interfase, P_{ai}^* , implica admitir que la humedad relativa del aire en la interfase es igual a la unidad. Se ha encontrado que su utilización en la simulación del secado, de los materiales ensayados, presenta graves inconvenientes, pues se observaba que, después de un cierto tiempo, la humedad del sólido se volvía negativa y la temperatura en la interfase sólido-gas no conseguía sobrepasar el valor de la temperatura húmeda del aire utilizado en cada experimento. Un hecho análogo se ha descrito en la bibliografía (71).

Estos resultados, que no tenían ningún sentido físico, hicieron pensar en la posible utilización incorrecta de la ecuación 6.48, ya que lo más probable es que, una vez transcurridos los primeros instantes del secado, la humedad superficial sea ligada y en consecuencia, su presión de vapor será inferior a la del agua pura $P_{ai} < P_{ai}^*$ con lo que la ecuación 6.48 deja de ser aplicable. Como el coeficiente $P_{ai}/P_{ai}^* = \psi$, sustituyendo en la ecuación 2.3, se llega a la ecuación:

$$P_{ai} = P_{ai}^* \left\{ 1 - \exp \left[-28,7 (t_s + 273) \cdot \bar{X}^2, 2 \right] \right\} \quad [6.49]$$

y teniendo en cuenta que P_{ai} está relacionada con la temperatura de la interfase mediante la ecuación 6.48, la ecuación se transforma en:

$$P_{ai,k+1} = A \exp \frac{-B}{(t_{n,k+1} + 273)} \left\{ 1 - \exp \left[-28,7 (t_s + 273) \cdot \bar{X}^2, 2 \right] \right\} [6.50]$$

adoptándose la misma, en el modelo, para relacionar la presión de vapor del agua en la interfase con la temperatura del sólido y su humedad.

6.2.4.3.- OTROS PARAMETROS DEL MODELO.

Una observación de nuevo de las ecuaciones anteriores pone de manifiesto que en las mismas intervienen los siguientes parámetros cuya determinación previa es necesaria antes de efectuar cualquier simulación del secado:

- Coeficiente individual de transferencia de calor en la superficie del sólido (h).
- Coeficiente individual de transferencia de materia en la superficie del sólido (k_g).
- Difusividad térmica del sólido (α)
- Conductividad térmica del sólido (K_s)
- Calor específico del sólido (C_p)
- Densidad del sólido (ρ_s)
- Presión parcial de vapor de agua en el aire utilizado (P_a).

Exceptuando el valor de densidad del sólido, pues se utilizó el suministrado por el fabricante (tabla 4.1), a continuación se describe la determinación de cada uno de estos parámetros.

6.2.4.3.1.- DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD (α) Y CONDUCTIVIDAD TERMICA (K_s) DEL SOLIDO.

Dado que al introducir las esferas de alúmina en la corriente de aire caliente se establecía un gradiente de temperaturas entre la superficie del sólido y su interior que originaba un flujo calorífico por conducción en estado no es-

tacionario, era de aplicación, en este caso, la ecuación siguiente (35, 90):

$$\frac{\delta t}{\delta \theta} = \alpha \nabla^2 T \quad [6.51]$$

que una vez integrada con las condiciones límites: 1) Temperatura uniforme en la esfera a tiempo cero; 2) Temperatura superficial de la esfera igual a la de la masa del aire; 3) Distribución simétrica de temperaturas en el sólido, para el caso de una esfera de radio R, queda:

$$\frac{t_a - t_s}{t_a - t_o} = 0,0608 \exp(-9,87 N_{Fo}) + 0,152 \exp(-39,5 N_{Fo}) + 0,067 \exp(-88,8 N_{Fo}) + \dots$$

donde N_{Fo} es el número de Fourier = $\frac{\alpha \cdot \theta}{R^2}$

Con los resultados experimentales obtenidos de temperatura media del sólido, t_s , con el tiempo de secado (tablas 5.20 a 5.23), se calculó el primer término de la ecuación anterior y de él se calculó el correspondiente de N_{Fo} a partir del cual se determinaba el valor de la difusividad térmica del sólido. Una vez obtenido el valor de α , se determinó la conductividad térmica de las esferas a partir de la ecuación:

$$\alpha = \frac{K_s}{\rho_s \cdot C_p}$$

En el apartado 7.3.5. se encuentran tabulados los valores de α , así como los correspondientes de K_s que se han utilizado en la simulación de los experimentos de secado.

Se comprobó, de forma experimental, que excepto en

los primeros instantes de secado (3 ó 4 primeros minutos), los valores de α y por tanto los de K_s obtenidos para el sólido húmedo eran muy parecidos a los encontrados para el material totalmente seco, circunstancia que era de esperar si se tiene en cuenta el bajo poder adsorbente, para el agua, del material utilizado.

6.2.4.3.2.- DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, h , Y DE MATERIA, k_g , EN LA SUPERFICIE DEL SOLIDO.

Debido a que las condiciones en la interfase sólido-gas se mantenían constantes a lo largo del secado, ver párrafo 6.2.4, se utilizó para la determinación de los coeficientes individuales de transferencia de calor la ecuación 6.12 correspondiente al período de velocidad de secado constante, de la que una vez despejado, h , queda:

$$h = \frac{\left(-\frac{dX}{d\theta}\right) \cdot \rho_s \cdot \lambda_i \cdot D_p}{6(t_a - t_i)} \quad [6.52]$$

El coeficiente individual de transferencia de materia se determinó con la ayuda de la ecuación de Lewis (ecuación 2.20), que relaciona éste con el coeficiente individual de transferencia de calor, h , para el sistema aire-agua. En el apartado 7.3.6 se encuentran tabulados los valores de h y k_g obtenidos para cada tamaño de material y cada temperatura ensayada.

6.2.4.3.3.- DETERMINACION DE LA PRESION PARCIAL DEL VAPOR DE AGUA EN EL AIRE UTILIZADO (P_a)

A partir de los valores de humedad relativa del aire y temperatura ambiente, mediante el diagrama Psicrométrico, se calculó la humedad absoluta (Y). Dado que esta magnitud está relacionada con la presión parcial de vapor en el aire por la ecuación:

$$Y = 0,62 \frac{P_a}{\pi - P_a} \quad [6.53]$$

se puede calcular P_a siempre que se conozca la presión total a que está circulando el aire por el secadero. Los resultados obtenidos para P_a en cada experimento de secado se detallan en el apartado 7.3.7.

6.2.4.3.4.- DETERMINACION DEL CALOR ESPECIFICO, C_p , DEL SOLIDO

El cálculo de esta magnitud para el sólido totalmente seco se realizó siguiendo el método de las mezclas (97, 98), ampliamente descrito en la bibliografía, que se basa en el intercambio calorífico producido entre dos cuerpos que están a temperaturas distintas cuando se ponen en contacto. Un resumen del mismo se encuentra en el apartado 7.3.8.

El valor medio obtenido para el calor específico del sólido fue de 0,53 Cal/g.°C.

6.2.4.4.- CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE HUMEDADES Y TEMPERATURAS EN EL INTERIOR DEL SOLIDO: ORGANIGRAMA DE CALCULO.

Para calcular la distribución de humedades en el interior del sólido a partir de las ecuaciones del modelo (ecuaciones 6.33, 6.36, 6.42, 6.43, 6.44, 6.45) y de las dos ecuaciones auxiliares (ecuaciones 6.46 y 6.50), es necesario definir Δr y $\Delta \theta$. La elección de los valores de $\Delta \theta, \Delta r$ habrá de atender a las condiciones siguientes:

- Estabilidad en la integración de las ecuaciones de transferencia de materia y calor. Estabilidad significa que el error asociado al empleo de incrementos finitos, no debe crecer cuando progresa el proceso de cálculo. Para éllo han de elegirse los valores de las expresiones: $\frac{D_e \cdot \Delta \theta}{\Delta r^2}$ y $\frac{\alpha \Delta \theta}{\Delta r^2}$ de modo que no aparezca ningún coeficiente negativo en cualquiera de las ecuaciones del modelo. Las ecuaciones anteriores son estables si ambos coeficientes son iguales o menores que 1/6. (88).
- Tiempo de cálculo. Para un tiempo determinado de secado, este crece conforme disminuye Δr y $\Delta \theta$.
- Precisión en el cálculo. Esta será mayor cuanto menores sean los valores de Δr y $\Delta \theta$. Es decir, si Δr y $\Delta \theta$ tienden a cero, los errores inherentes al método numérico disminuyen y en consecuencia los valores obtenidos analítica y numéricamente serán mas coincidentes.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores y puesto que los valores obtenidos para el coeficiente de difusión efectivo, D_e , siempre fueron mucho menores que los valores de la difusividad térmica del sólido, α , basta con que $\frac{\alpha \Delta \theta}{\Delta r^2} \leq \frac{1}{6}$ para que se cumpla siempre que $\frac{D_e \cdot \Delta \theta}{\Delta r^2}$ sea menor o igual a 1/6. Por tanto, una vez determinada la difusividad térmica del sólido, α , y para un valor de Δr , previamente fijado, se despeja el valor correspondiente $\Delta \theta$. Una vez fijados ambos incrementos, se deduce fácilmente el número de divisiones del radio, N , y el número de divisiones del tiempo, M , (téngase en cuenta que $N\Delta r = R$ y que $M\Delta \theta =$ tiempo total de la operación de secado, L_T).

Una vez que se disponía de toda la información necesaria para realizar la simulación de cada experimento, se programaron y ejecutaron los cálculos mediante un ordenador de mesa Hewlett Packard modelo HP 85 en lenguaje Basic; el organigrama de cálculo se muestra en la figura 6.36.

Para acelerar la convergencia de la iteración que se produce en la ecuación 6.42 $t_{n,k+1} = f(P_{ai,k+1})$ en la que $P_{ai,k+1}$ es función a su vez de $t_{n,k+1}$, se emplea el método de Newton-Raphson (88) que resuelve la ecuación $g(t) = 0$ por la iteración:

$$t_1 = t - \frac{g(t)}{g'(t)}$$

donde:

$$g(t) = 2\Delta r \left\{ h t_a - \lambda k_g [P_{ai}(t) - P_a] \right\} + K_s [4t_{n-1,k+1} - t_{n-2,k+1}] - (2\Delta r h + 3K_s) t \quad [6.54]$$

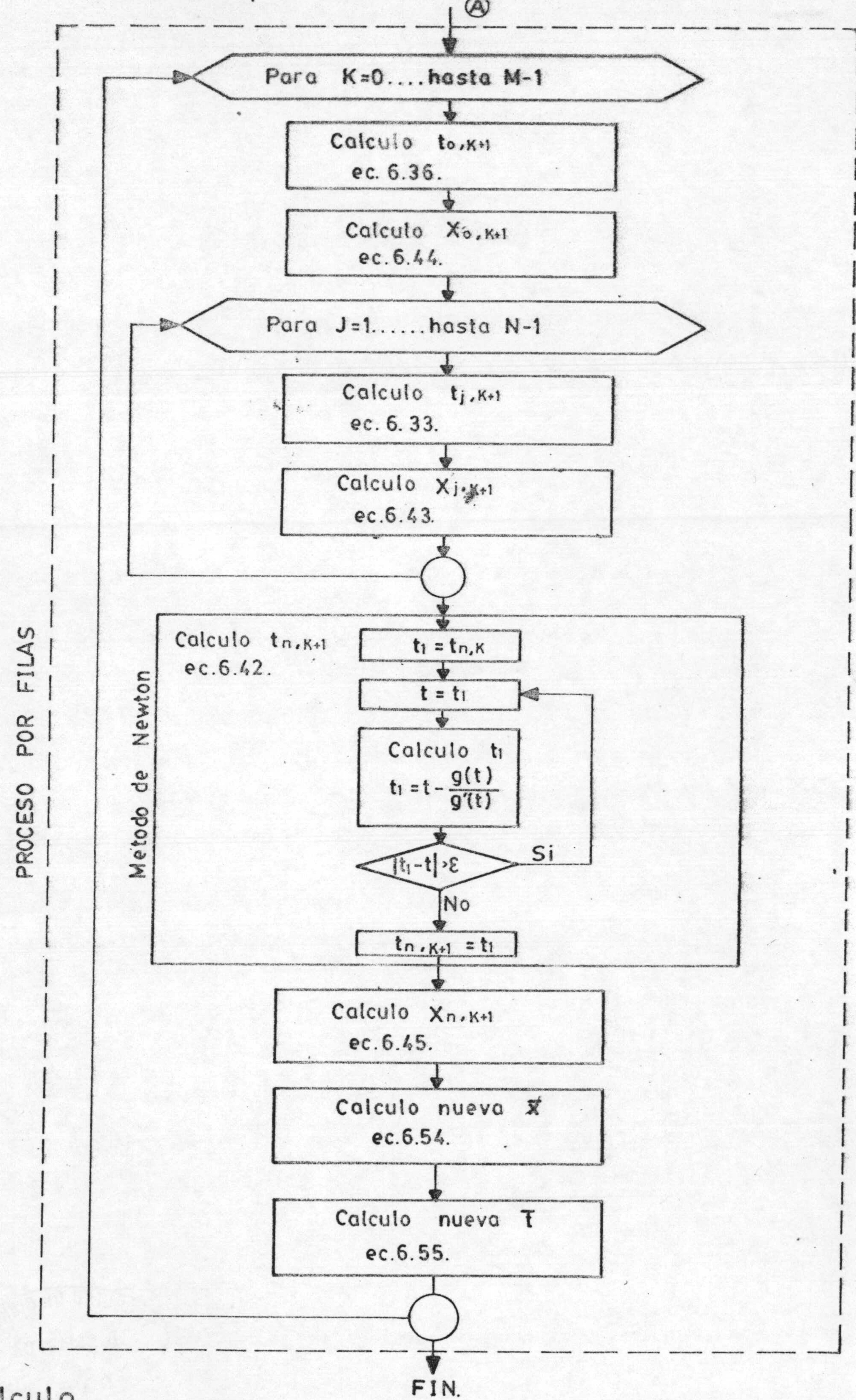
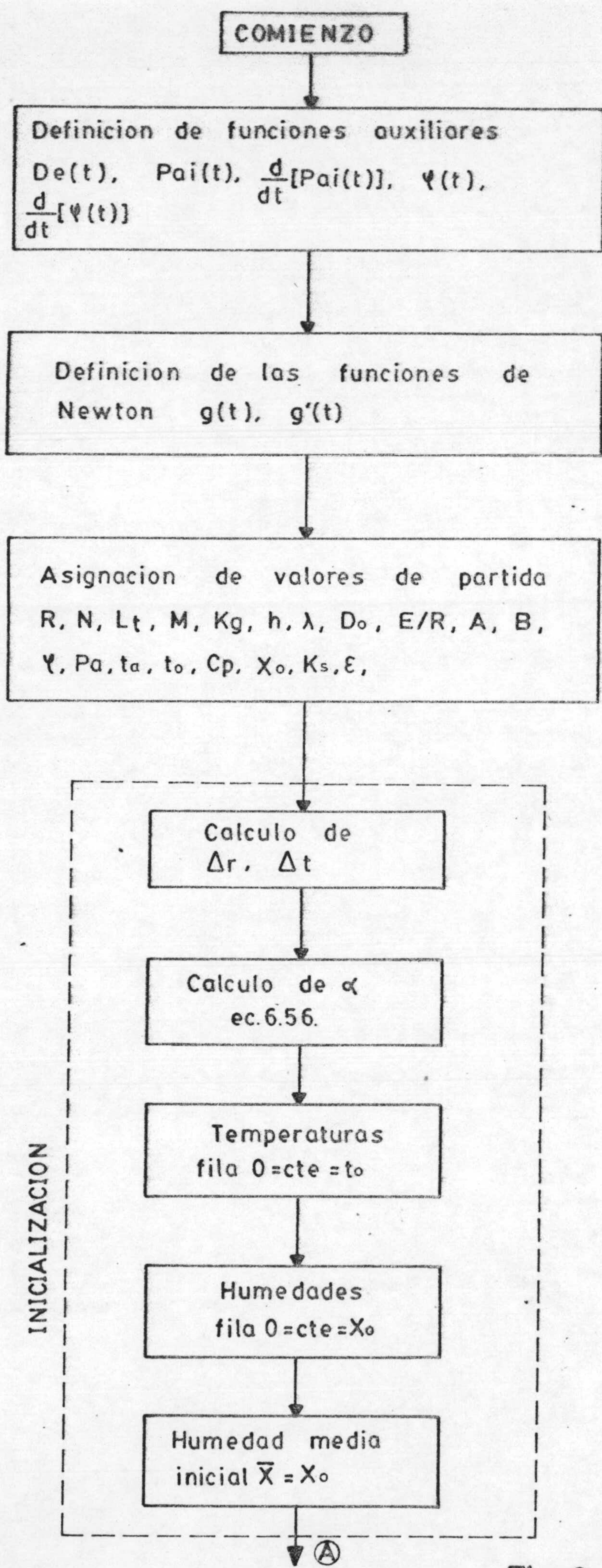


Fig. 6.36: Organigrama de cálculo

Por el hecho de usarse la primera derivada de la función $g(t)$ con respecto a la temperatura t , es necesario conocer la derivada de $P_{ai}(t)$ y de la función $\Psi(t)$ por lo que se necesita una definición previa de las funciones $g'(t)$, $\frac{d}{dt} P_{ai}(t)$ y $\frac{d}{dt} \Psi(t)$. En el apartado 7.5 aparecen las definiciones de estas tres ecuaciones auxiliares para la resolución del método de Newton.

Finalmente, para calcular los valores medios de humedad y temperatura se emplean las ecuaciones:

$$\bar{X} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \cdot X_{j,k} \cdot dr \quad [6.53]$$

$$\bar{t} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \cdot t_{j,k} \cdot dr \quad [6.54]$$

que desarrolladas por la regla de Simpson, quedan de la forma siguiente:

$$\bar{X} = \frac{1}{N^3} \left[4 \cdot 1^2 \cdot X_{1,k} + 2 \cdot 2^2 \cdot X_{2,k} + 4 \cdot 3^2 \cdot X_{3,k} + \dots + 4(n-1)^2 \cdot X_{n-1,k} \right] + \frac{1}{N} X_{n,k} \quad [6.55]$$

$$\bar{t} = \frac{1}{N^3} \left[4 \cdot 1^2 \cdot t_{1,k} + 2 \cdot 2^2 \cdot t_{2,k} + 4 \cdot 3^2 \cdot t_{3,k} + \dots + 4(n-1)^2 \cdot t_{n-1,k} \right] + \frac{1}{N} t_{n,k} \quad [6.56]$$

6.2.4.5.- COMPARACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS OBTENIDOS A TRAVES DEL MODELO.

Con el esquema de cálculo expuesto anteriormente se obtienen los resultados que se encuentran en las tablas 6.8 a 6.27; en las mismas aparece la distribución de temperaturas y humedades de los materiales utilizados en función del tiempo.

Representando los valores deducidos de humedad y temperatura frente a los experimentales (figuras 6.37 a 6.40, en las que aparecen a título de ejemplo las representaciones indicadas para los experimentos realizados con esferas de 1", 3/4" y 3/8" de diámetro y temperatura del aire de 70 y 80°C respectivamente), se observa que el modelo propuesto reproduce, aceptablemente, desde los primeros instantes del secado los valores de humedad, pues la desviación máxima encontrada entre unos y otros valores no es superior a una centésima en error absoluto. Así mismo se aprecia que con los valores de temperatura media del sólido existe una desviación mayor (como máximo de 10°C), con respecto a los resultados experimentales, siendo ésta mas acentuada, sobre todo al principio para llegar a ser muy parecidos los resultados teóricos y experimentales al final de la simulación. Esta circunstancia puede explicarse si se tienen en cuenta las dificultades experimentales que surgieron en los experimentos de determinación de la temperatura media de los materiales en el transcurso del secado, ya que fue muy difícil conseguir un ajuste perfecto entre el termopar y el sólido quedando huecos llenos de aire que darían lugar a las desviaciones encontradas.

También podría interpretarse esta desviación si se tiene en cuenta que algunas de las hipótesis iniciales, expuestas en la sección 6.3, no se cumplen al principio del secado para la ecuación de transmisión de calor y de aquí la aproximación gradual observada de los valores teóricos hacia los experimentales a partir del instante en que se inicia la velocidad de secado decreciente (periodo para el que se hicieron las hipótesis de secado).

Sin embargo, si se tienen en cuenta las dificultades indicadas anteriormente cabe pensar, sin demasiado error, que los valores de la temperatura que resultan de la aplicación del modelo deben ajustarse mas a la realidad que los experimentales, sobre todo, cuando se observa la buena concordancia encontrada con los valores de humedad, que fueron obtenidos por un procedimiento mas fiable como es el de pesada.

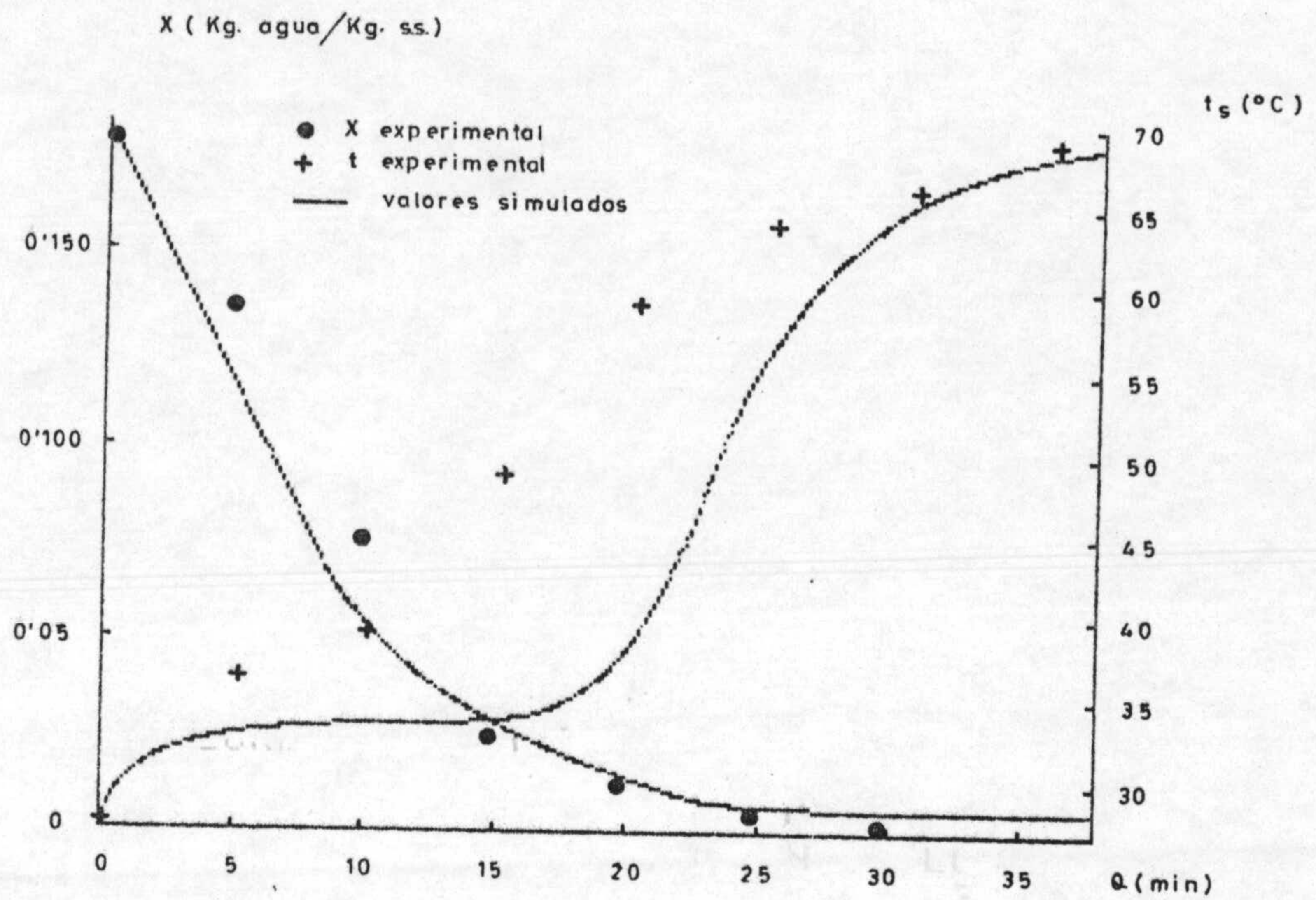


FIGURA 6.37.-COMPARACION DE LOS VALORES SIMULADOS CON LOS EXPERIMENTALES PARA LAS ESFERAS DE 1" DE DIAMETRO ($t_a = 70^\circ\text{C}$)

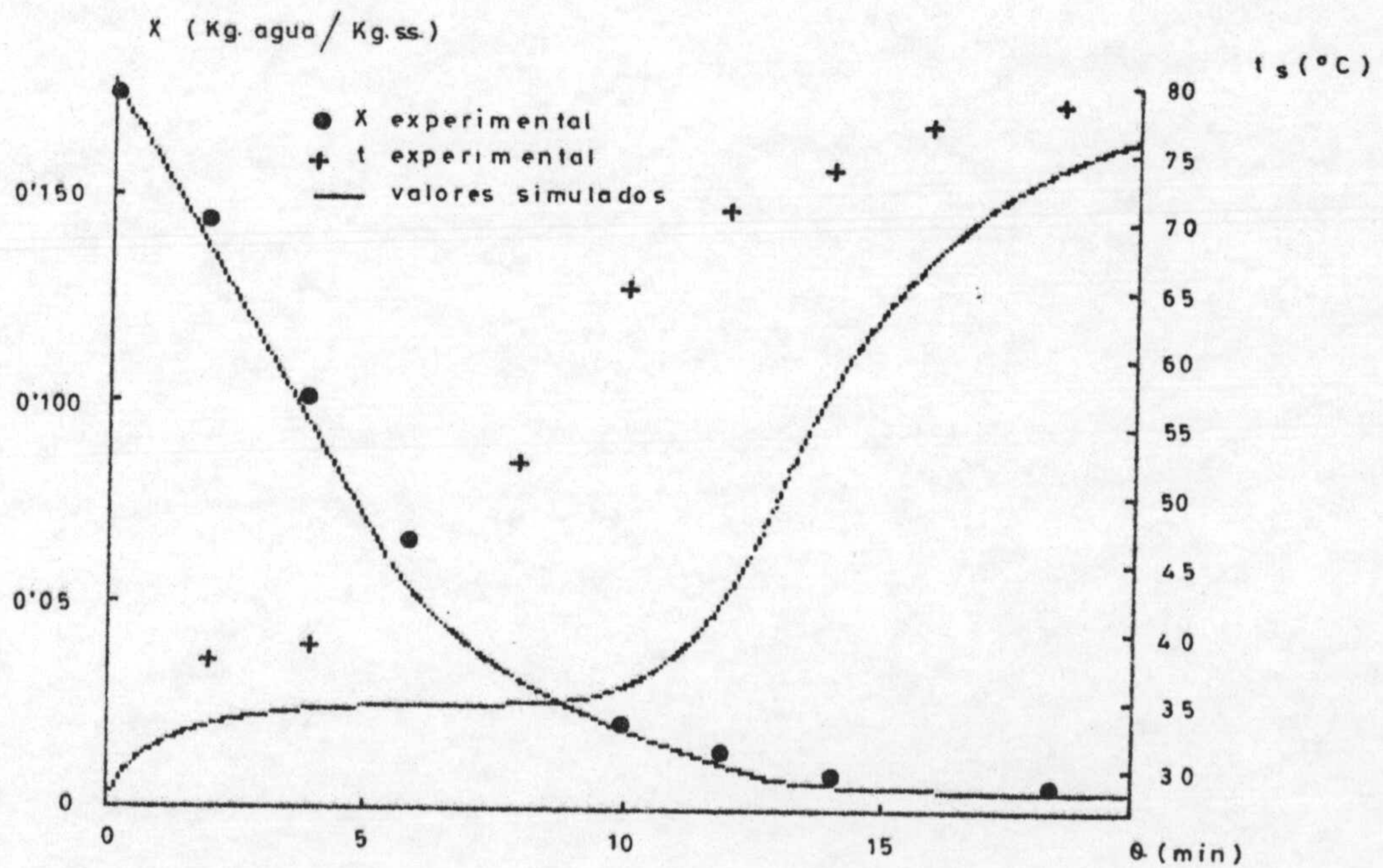


FIGURA 6.38.-COMPARACION DE LOS VALORES SIMULADOS CON LOS EXPERIMENTALES PARA LAS ESFERAS DE 3/4" DE DIAMETRO ($t_a = 80^\circ\text{C}$)

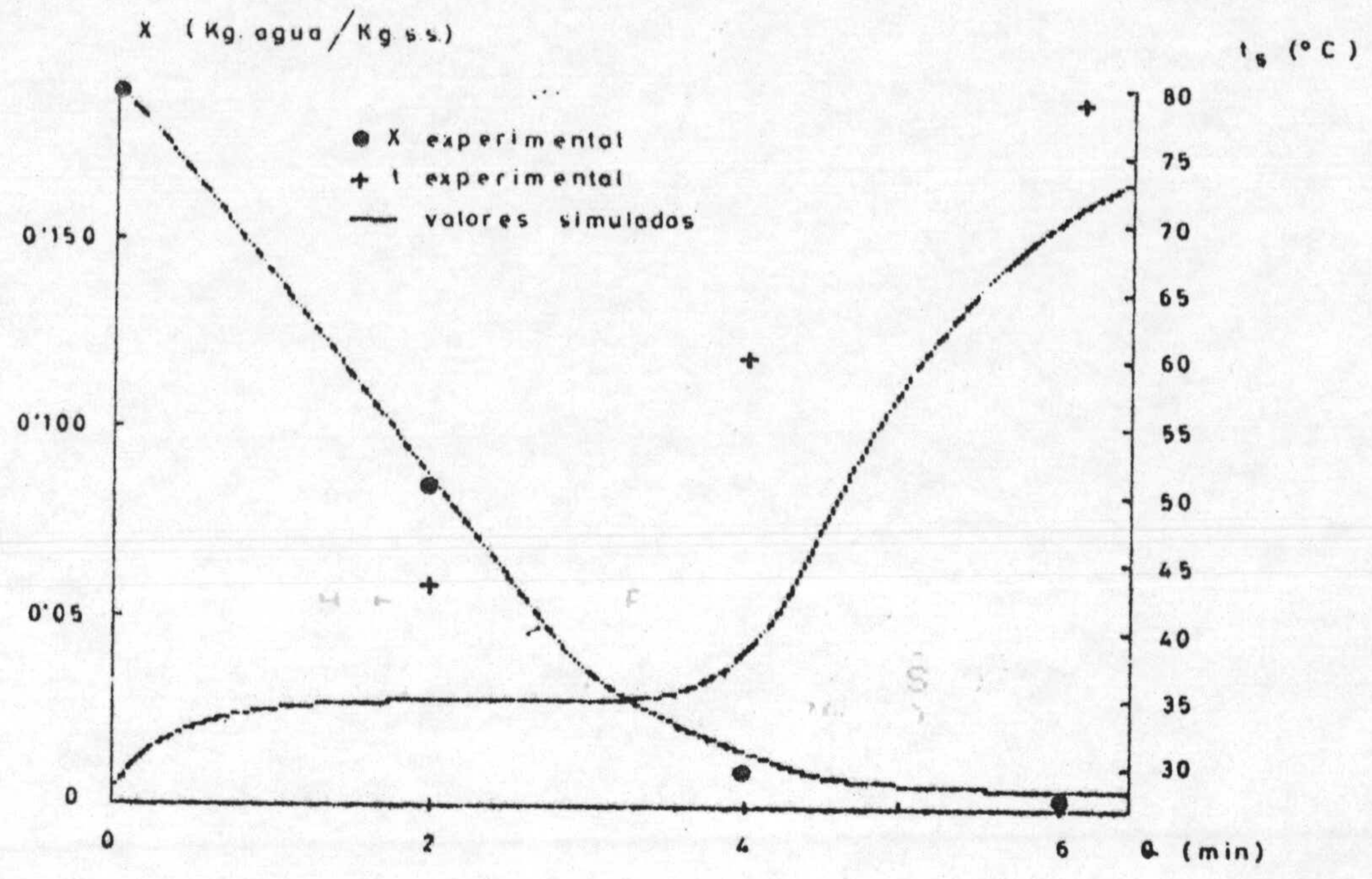


FIGURA 6.39.-COMPARACION DE LOS VALORES SIMULADOS CON LOS EXPERIMENTALES PARA LAS ESFERAS DE 3/8" DE DIAMETRO ($t_a = 80^\circ C$)

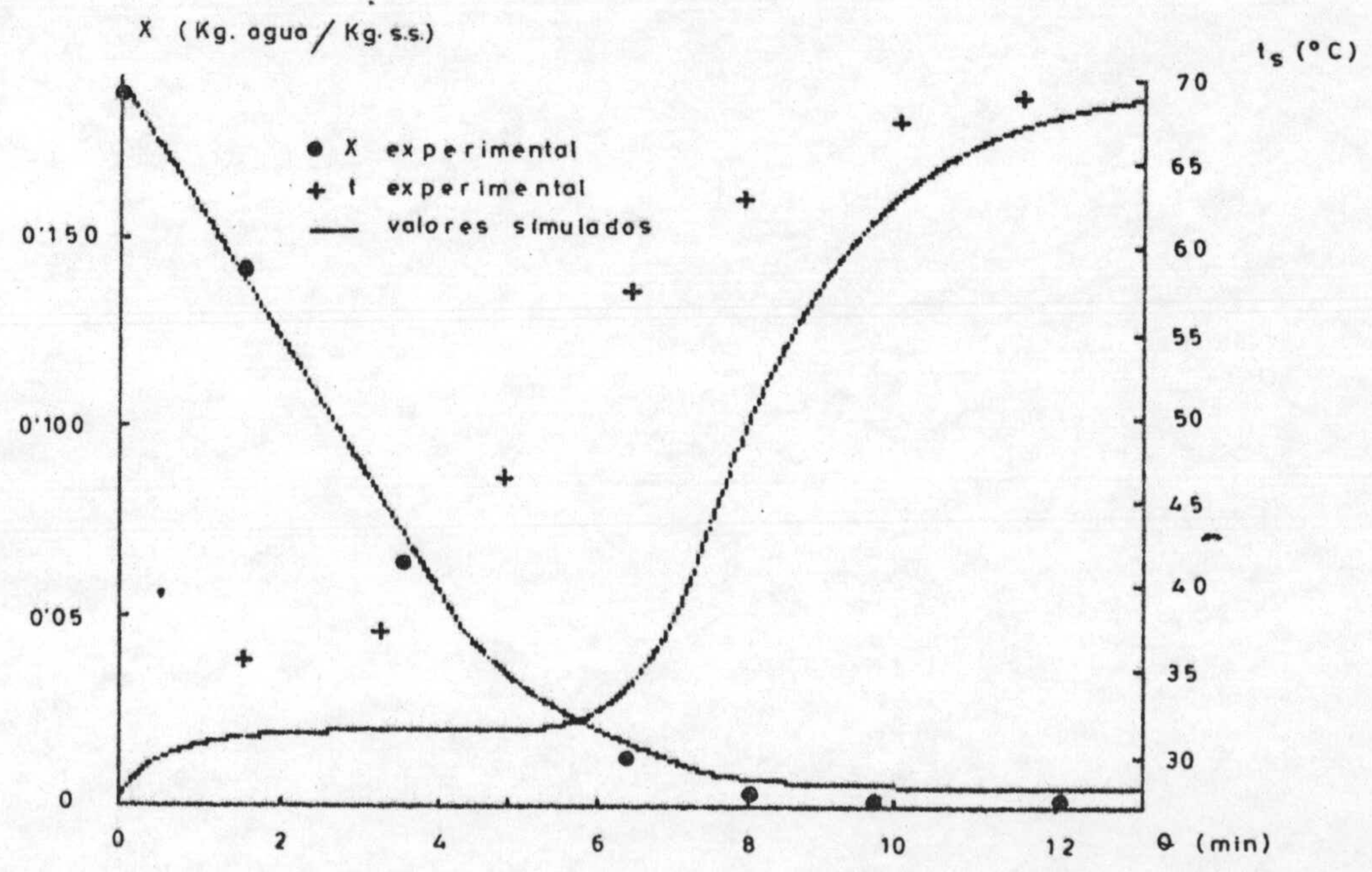


FIGURA 6.40.-COMPARACION DE LOS VALORES SIMULADOS CON LOS EXPERIMENTALES PARA LAS ESFERAS DE 1/2" DE DIAMETRO ($t_a = 70^\circ C$)

T A B L A 6.8

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1" de diámetro.

$$t_a = 40^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,196
1	28,61	0,191
2	29,14	0,186
3	29,47	0,182
4	29,70	0,177
6	29,98	0,168
8	30,11	0,159
10	30,18	0,149
15	30,24	0,126
20	30,26	0,103
25	30,26	0,079
30	30,26	0,056
35	30,28	0,033
40	32,62	0,018
45	36,86	0,014
50	38,77	0,013
55	39,54	0,013
60	39,83	0,013
64	39,92	0,013

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,012 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g};$ $A=1.289.900;$
 $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3.$; $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ -
 $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ $P_a=0,0382 \text{ atm.};$ -
 $X_o=0,196 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=1,08;$ $N=8;$ $M=854;$ $k_g=536,14 \text{ Kcal/m.h.}^{\circ}\text{C.};$
 $h=128,67 \text{ Kcal/h.m}^2^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.9

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1" de diámetro.

$$t_a = 50^{\circ}\text{C}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,202
1	28,23	0,193
2	28,66	0,185
3	28,93	0,178
4	29,12	0,171
5	29,25	0,163
6	29,35	0,155
8	29,47	0,141
10	29,53	0,126
15	29,58	0,089
20	29,59	0,052
25	29,68	0,029
30	32,16	0,017
35	40,99	0,010
40	46,35	0,009
45	48,56	0,009
49	49,32	0,009

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,012 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g};$ -
 $A=1.289,900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0321 \text{ atm.};$ $X_o=0,202 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,83;$ $N=8;$ $M=657;$ -
 $k_g=404,94 \text{ Kcal/h.m}^{\circ}\text{C.};$ $h=97,19 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.10

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1" de diámetro.

$$t_a = 60^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}.$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,202
1	29,73	0,192
2	30,73	0,183
3	31,35	0,173
4	31,76	0,163
5	32,06	0,154
6	32,27	0,144
7	32,42	0,134
8	32,53	0,124
9	32,60	0,115
10	32,66	0,105
15	32,77	0,056
20	32,89	0,029
25	36,57	0,015
30	48,98	0,009
35	55,63	0,008
39	57,91	0,007

Parámetros utilizados en la simulación; $R=0,012 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,85 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m}^{\circ}\text{C};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0373 \text{ atm.};$ $X_o=0,202 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,66;$ $N=8;$ $M=522;$ -
 $k_g=402,07 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C};$ $h=96,26 \text{ Kcal/h.m}^2^{\circ}\text{C}.$

T A B L A 6.11

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1" de diámetro.

$$t_a = 70^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,183
1	30,24	0,168
2	31,34	0,155
3	32,02	0,142
4	32,49	0,129
5	32,81	0,115
6	33,06	0,101
7	33,23	0,088
8	33,35	0,074
9	33,43	0,062
10	33,49	0,054
15	33,74	0,028
20	37,99	0,014
25	54,56	0,007
30	64,26	0,006
35	67,90	0,006
37	68,58	0,006

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,012\text{m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg.}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0358 \text{ atm.};$ $X_o=0,183 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,63;$ $N=8;$ $M=498;$ -
 $K_g=417,9 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=100,3 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.12

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1" de diámetro.

$$t_a = 80^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	x ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,198
1	30,10	0,180
2	31,22	0,165
3	31,91	0,149
4	32,38	0,133
5	32,71	0,117
6	32,94	0,101
7	33,11	0,085
8	33,23	0,072
9	33,32	0,062
10	33,38	0,054
15	33,61	0,029
20	37,54	0,015
25	55,93	0,006
30	70,79	0,005
31	72,41	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,012 \text{ m.}$; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.}$; $E=10,9 \text{ kcal/mol-g.}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C.}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,0312 \text{ atm.}$; $X_o=0,198 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,53$; $N=8$; $M=791$; -
 $k_g=383,33 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $h=92,0 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.13

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/4" de diámetro.

$$t_a = 40^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,184
2	28,77	0,173
4	29,12	0,162
6	29,23	0,151
8	29,27	0,140
10	29,28	0,129
12	29,28	0,118
14	29,28	0,107
16	29,28	0,096
18	29,28	0,085
20	29,28	0,073
25	29,28	0,046
30	30,28	0,021
35	36,28	0,014
40	38,44	0,013
45	39,71	0,013
50	39,92	0,012
55	39,98	0,012
60	39,99	0,012

Parámetros utilizados en la simulación: R=0,009 m.; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C.}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,0355 \text{ atm.}$; $X_o=0,184 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=1$; $N=8$; $M=1.390$; -
 $K_g=104,08 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$; $K_g=433,72 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.14

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/4" de diámetro.

$$t_a = 50^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,187
2	28,20	0,158
4	28,51	0,132
6	28,60	0,106
8	28,62	0,080
10	28,62	0,054
12	28,63	0,036
14	28,93	0,025
16	30,81	0,018
18	36,02	0,012
20	42,29	0,010
22	45,83	0,009
24	47,78	0,008
26	48,85	0,008
28	49,40	0,008
30	49,68	0,008
39	49,98	0,008

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,009 \text{ m.}$; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C.}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,0295 \text{ atm.}$; $X_o=0,187 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,66$; $N=8$; $M=917$; -
 $k_g=514,16 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $h=123,40 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.15

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/4" de diámetro.

$$t_a = 60^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,186
2	30,13	0,159
4	30,75	0,133
6	30,95	0,106
8	31,02	0,080
10	31,04	0,054
12	31,06	0,033
14	31,73	0,022
16	35,17	0,015
18	43,13	0,009
20	49,91	0,008
22	54,18	0,007
24	56,64	0,007
26	58,07	0,007
27	58,54	0,007

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,009 \text{ m.}$; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C.}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,032 \text{ atm.}$; $X_o=0,186 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,45$; $N=8$; $M=625$; -
 $k_g=384,25 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $h=92,22 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.16

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/4" de diámetro.

$$t_a = 70^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,180
2	31,80	0,141
4	32,70	0,104
6	32,99	0,066
8	33,08	0,039
10	33,41	0,025
12	36,34	0,016
14	46,12	0,009
16	56,86	0,007
20	66,09	0,006
24	68,85	0,005
28	69,66	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,009 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,85 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0341 \text{ atm.};$ $X_o=0,180 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,47;$ $N=8;$ $M=1.626;$
 $K_g=435,90 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=104,62 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.17

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/4" de diámetro.

$$t_a = 80^{\circ}\text{C.}$$

$$G \doteq 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,178
2	33,02	0,135
4	34,15	0,092
6	34,51	0,051
8	34,66	0,031
10	35,93	0,020
12	42,44	0,011
14	56,75	0,006
16	66,97	0,005
18	72,98	0,005
19	74,71	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,009 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,035 \text{ atm.};$ $X_o=0,178 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,33;$ $N=8;$ $M=459;$ -
 $k_g=407,93 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=97,90 \text{ Kcal/h.m}^2^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.18

Simulación del secado no isotérmico para las esferas de 1/2" de diámetro.

$$t_a = 40^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,193
2	29,09	0,168
4	29,20	0,143
6	29,21	0,118
8	29,21	0,093
10	29,21	0,068
12	29,21	0,043
14	30,40	0,020
16	36,01	0,014
18	38,70	0,013
20	39,60	0,013
22	39,88	0,012
24	39,96	0,012
30	39,99	0,012

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,006 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_{i,0}=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$;
 $P_a=0,0353 \text{ atm.};$ $X_o=0,193 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,5;$ $N=8;$ $M=1.585;$
 $k_g=644,36 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=155,85 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.19

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1/2" de diámetro.

$$t_a = 50^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,198
2	29,28	0,158
4	29,52	0,117
6	29,55	0,077
8	29,56	0,037
10	33,84	0,014
12	44,19	0,010
14	48,10	0,009
16	49,41	0,009
18	49,82	0,009
20	49,94	0,009
22	49,98	0,008
24	49,99	0,008

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,006 \text{ m.}$; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o = 1.233,7 \text{ m}^2/\text{h}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s = 2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_n = 27^{\circ}\text{C.}$; -
 $C_p = 0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.}$; $K_s = 0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; ;
 $P_a = 0,032 \text{ atm.}$; $X_o = 0,198 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T = 0,47$; $N=8$; $M=1.490$;
 $k_g = 552,16 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $h=132,52 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.20

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1/2" de diámetro.

$$t_a = 60^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,184
2	30,17	0,124
4	30,34	0,064
6	30,73	0,024
8	42,46	0,009
10	54,65	0,007
12	58,44	0,006
14	59,56	0,006
16	59,87	0,006
18	59,96	0,006
19	59,98	0,006

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,006 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol.g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,030 \text{ atm.};$ $X_o=0,184 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,33;$ $N=8;$ $M=1.046;$ -
 $K_g=557,75 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=133,80 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.21

Simulación del secado no isotérmico para las esfe-
ras de 1/2" de diámetro.

$$t_a = 70^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,192
2	31,24	0,126
4	31,68	0,062
6	32,41	0,022
8	48,15	0,008
10	62,70	0,006
12	67,65	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,006 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3.$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0297 \text{ atm.};$ $X_o=0,192 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,20;$ $N=8;$ $M=634;$ -
 $k_g=473,94 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=113,75 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.22

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 1/2" de diámetro.

$$t_a = 80^{\circ}\text{C.}$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C.}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,184
2	34,55	0,118
4	35,28	0,048
6	39,78	0,014
8	63,63	0,006
10	74,58	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,006 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C.};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/kg.}^{\circ}\text{C.};$ $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a = 0,0374 \text{ atm.};$ $X_o=0,184 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T = 0,20;$ $N=8;$ $M=634;$
 $K_g=445,02 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=106,80 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.23

Simulación del secado no isotérmico para las esfe_ ras de 3/8" de diámetro.

$$t_a = 40^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,188
2	28,51	0,160
4	28,53	0,131
6	28,54	0,103
8	28,54	0,075
10	28,54	0,047
12	29,61	0,021
14	36,23	0,014
16	39,02	0,012

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,005 \text{ m}$; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,0335 \text{ atm.}$; $X_o=0,188 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,27$; $N=8$; $M=1.317$;
 $K_g=553,53 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$; $h=132,85 \text{ Kcal/h.m}^2^{\circ}\text{C}.$

T A B L A 6.24

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/8" de diámetro.

$$t_a = 50^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,194
2	27,84	0,143
4	27,86	0,094
6	27,86	0,046
8	34,08	0,013
10	45,66	0,009
12	48,98	0,008
14	49,77	0,008
16	49,95	0,008
18	49,98	0,008
20	49,99	0,008

Parámetros utilizados en la simulación: R=0,005 m.; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C}$; -
 $C_p=0,53 \text{ kcal/Kg.}^{\circ}\text{C}$; $K_s=0,333 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,0275 \text{ atm.}$; $X_o=0,194 \frac{\text{kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,35$; $N=8$; $M=1.707$;
 $k'_g=495,05 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$; $h=118,81 \text{ Kcal/h.m}^2^{\circ}\text{C}$.

T A B L A 6.25

Simulación del secado no isotérmico para las esfe
ras de 3/8" de diámetro.

$$t_a = 60^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,185
2	31,97	0,125
4	32,05	0,064
6	36,32	0,014
8	53,72	0,008
10	58,60	0,007
12	59,69	0,007
13	59,96	0,007

Parámetros utilizados en la simulación: R=0,005 m; -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$; $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h}$; $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g}$; -
 $A=1.289.900$; $B=5.225,8$; $\rho_s=2.100 \text{ Kg/m}^3$; $t_o=27^{\circ}\text{C}$; -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C}$; $K_s=0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$; $E = 10^{-8}$; -
 $P_a=0,035 \text{ atm.}$; $X_o=0,185 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$; $L_T=0,23$; $N=8$; $M=1.122$; -
 $k_g=497,59 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$; $h=119,42 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C.}$

T A B L A 6.26

Simulación del secado no isotérmico para las esfe_ras de 3/8" de diámetro.

$$t_a = 70^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,180
2	31,47	0,090
4	32,51	0,021
6	57,22	0,006
8	67,46	0,005
9	68,97	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,005 \text{ m.};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h.};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g.};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s=2.100 \text{ kg/m}^3;$ $t_o=27^{\circ}\text{C};$ -
 $C_p=0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C};$ $K_s=0,33 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a=0,0295 \text{ atm.};$ $X_o=0,180 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T=0,20;$ $N=8;$ $M=976;$ -
 $k_g=532,61 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.};$ $h=127,83 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C}.$

T A B L A 6.27

Simulación del secado no isotérmico para las esferas de 3/8" de diámetro.

$$t_a = 80^{\circ}\text{C}.$$

$$G = 9.300 \text{ Kg/h.m}^2.$$

θ (min.)	t ($^{\circ}\text{C}$)	X ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)
0	27,00	0,191
2	34,56	0,090
4	37,65	0,016
6	68,98	0,005
7	75,13	0,005

Parámetros utilizados en la simulación: $R=0,005 \text{ m};$ -
 $\lambda=565,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}};$ $D_o=1.233,7 \text{ m}^2/\text{h};$ $E=10,9 \text{ Kcal/mol-g};$ -
 $A=1.289.900;$ $B=5.225,8;$ $\rho_s = 2.100 \text{ Kg/m}^3;$ $t_o = 27^{\circ}\text{C};$ -
 $C_p = 0,53 \text{ Kcal/Kg.}^{\circ}\text{C};$ $K_s = 0,333 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C};$ $E = 10^{-8};$ -
 $P_a = 0,0355 \text{ atm.};$ $X_o = 0,19 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}};$ $L_T = 0,13;$ $N=8;$ $M=634;$ -
 $K_g = 527,73 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C};$ $h=126,66 \text{ Kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C}.$

7.- APENDICE

7.1.- CALCULO DEL VALOR MEDIO DEL CALOR INTEGRAL DE ADSORCION (λ_{ads}) PARA LA FORMACION DE UNA MONOCAPA

Teniendo en cuenta que el valor medio de una función, como puede ser $y = f(x)$ en el intervalo de valores de x comprendido entre x_1 y x_2 , viene dado por:

$$\bar{y} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx}{\int_{x_1}^{x_2} dx} \quad [7.1]$$

Como se vio en el párrafo 6.1.3, $\lambda_{ads} = f(X_e)$, es decir, el calor de adsorción para cada temperatura es función de la humedad de equilibrio. Si se aplica la definición del valor medio de una función (ecuación 7.1) al cálculo del valor medio del calor integral de adsorción, entre los límites de humedad cero y X_1 que es el valor de la humedad cuando se ha adsorbido una capa monomolecular de agua ($X_1 = 0,0061$ Kg agua/100 Kgs.s. ver apartado 6.11), resulta:

$$\lambda_{ads} = \frac{\int_0^{X_1} \left[\lambda_0 + \frac{\exp(-28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})}{1 - \exp(28,7 \cdot T \cdot X_e^{2,16})} \cdot 28,7 \cdot X_e^{2,16} \cdot R \cdot T^2 \right] dx}{\int_0^{X_1} dx} \quad [7.2]$$

Para resolver la integral del numerador se ha utilizado la regla de los trapecios (88). En la figura 6.6, entre los límites adecuados, se han tomado diez puntos lo que equivale a decir, que se dividió la curva en nueve incrementos iguales, tal como se indica en la tabla 7.1.

T A B L A 7.1

Valores de λ_{ads} deducidos de la gráfica 6.6

$X_e \cdot 10^{-3}$ (kg agua/100 Kgs.s.)	0	0,77	1,43	2,10	2,77	3,43
λ_{ads} (Kcal/mol)	10,51	10,65	10,78	10,90	10,98	11,11
$X_e \cdot 10^{-3}$ (kg agua/100 Kgs.s.)	4,10	4,77	5,43	6,10		
λ_{ads} (Kcal/mol)	11,20	11,27	11,25	11,20		

Una vez aplicado el método de los trapecios, el valor medio del calor integral de adsorción que se obtiene es: - 11 Kcal/mol agua adsorbida

7.2.- DISCRETIZACION DE LA ECUACION GENERAL DE TRANSFERENCIA DE MATERIA

El coeficiente de difusión efectivo, D_e , es función de la posición por lo que al operar en la ecuación 6.22 queda:

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial D_e}{\partial r} \cdot r^2 \cdot \frac{\partial X}{\partial r} + D_e \cdot 2r \cdot \frac{\partial X}{\partial r} + D_e \cdot r^2 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right]$$

agrupando términos, resulta:

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = \frac{\partial D_e}{\partial r} \cdot \frac{\partial X}{\partial r} + D_e \left[\frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad [7.3]$$

Sustituyendo las ecuaciones 6.27, 6.29 y 6.31 en la ecuación anterior se llega a:

$$\frac{X_{j,k+1} - X_{j,k}}{\Delta \theta} = \frac{D_{ej+1,k} - D_{ej,k}}{\Delta r} \cdot \frac{X_{j+1,k} - X_{j,k}}{\Delta r} +$$

$$+ D_{ej,k} \left[\frac{2}{r} \frac{X_{j+1,k} - X_{j,k}}{\Delta r} + \frac{X_{j+1,k} - 2X_{j,k} + X_{j-1,k}}{\Delta r^2} \right]$$

Teniendo en cuenta que $r = j \Delta r$ y operando, queda:

$$X_{j,k+1} = X_{j,k} + \frac{\Delta \theta}{\Delta r^2} (D_{ej+1,k} - D_{ej,k}) (X_{j+1,k} - X_{j,k}) +$$

$$+ \frac{D_{ej,k} \cdot \Delta \theta}{\Delta r^2} \left[\frac{2}{j} (X_{j+1,k} - X_{j,k}) + X_{j+1,k} - 2X_{j,k} + X_{j-1,k} \right]$$

efectuando operaciones, resulta:

$$X_{j,k+1} = X_{j,k} + \left[\frac{\Delta \theta}{\Delta r^2} D_{ej+1,k} - \frac{\Delta \theta}{\Delta r^2} D_{ej,k} + \frac{D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} \cdot \frac{2}{j} + \right.$$

$$\left. + \frac{D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} \right] X_{j+1,k} + \left[\frac{\Delta \theta}{\Delta r^2} D_{ej,k} - \frac{\Delta \theta}{\Delta r^2} D_{ej+1,k} - \right.$$

$$\left. - \frac{D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} \cdot \frac{2}{j} - \frac{2D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} \right] X_{j,k} + \frac{D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} X_{j-1,k}$$

sacando factor común $\frac{\Delta \theta \cdot D_{ej,k}}{\Delta r^2}$, se obtiene finalmente:

$$X_{j,k+1} = X_{j,k} + \frac{\Delta \theta D_{ej,k}}{\Delta r^2} \left[\left(\frac{2}{j} + 1 + \frac{D_{ej+1,k} - D_{ej,k}}{D_{ej,k}} \right) X_{j+1,k} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{2}{j} + 2 + \frac{D_{ej+1,k} - D_{ej,k}}{D_{ej,k}} \right) X_{j,k} + X_{j-1,k} \right] \quad [7.4]$$

Ecuación que permite calcular el valor de la humedad del sólido X en el tiempo $k+1$ y en la posición j , apoyándose en los tres puntos inmediatamente inferiores. La ecuación anterior sólo permite el cálculo de la humedad desde la posición 1 hasta la $n-1$, es decir, no permite el cálculo de la humedad en el

centro de la esfera ($j=0$) ni en la interfase ($j=n$). Para calcular la humedad en los puntos señalados, se recurre a las condiciones límites definidas en el apartado 6.2.4:

$$\text{Para el centro de la esfera: } \left(\frac{\delta X}{\delta r}\right)_{r=0} = 0$$

Si en la ecuación 7.3 se calcula el límite cuando r tiende a cero, resulta:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\delta X}{\delta \theta}\right) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\delta D_e}{\delta r} \cdot \frac{\delta X}{\delta r}\right) + \lim_{r \rightarrow 0} D_e \left(\frac{2}{r} \cdot \frac{\delta X}{\delta r} + \frac{\delta^2 X}{\delta r^2}\right) \quad [7.5]$$

El primer sumando del segundo miembro es igual a cero ya que $(\delta D_e / \delta r)$ es finita y distinta de cero y $(\delta X / \delta r)$ por la condición límite es cero. En el segundo sumando aparecen dos términos, uno de los cuales $2/r \cdot (\delta X / \delta r)$ conduce a una indeterminación del tipo 0/0. Para eliminarla se aplica la regla de L'hôpital:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\frac{\delta X}{\delta r}}{r} = \frac{\delta^2 X}{\delta r^2}$$

sustituyendo en la ecuación 7.3, resulta:

$$\frac{\delta X}{\delta \theta} = 3 D_e \frac{\delta^2 X}{\delta r^2} \quad [7.6]$$

Pasando a incrementos finitos, se tiene:

$$\frac{X_{j,k+1} - X_{j,k}}{\Delta \theta} = 3 D_e \left(\frac{X_{j+1,k} - 2X_{j,k} + X_{j-1,k}}{\Delta r^2}\right)$$

Al existir simetría $X_{j+1,k} = X_{j-1,k}$. Ordenando los términos de la ecuación anterior, se llega a la ecuación:

$$X_{j,k+1} = X_{j,k} + \frac{6D_{ej,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} (X_{j+1,k} - X_{j,k})$$

Denominando por $j=0$ al centro de la esfera, la ecuación anterior toma la forma:

$$X_{0,k+1} = X_{0,k} + \frac{6D_{e0,k} \Delta \theta}{\Delta r^2} (X_{1,k} - X_{0,k}) \quad [7.7]$$

que se utiliza exclusivamente para el cálculo de la humedad en el punto señalado.

Para calcular la humedad en la superficie de la esfera; hay que recurrir a la tercera condición límite definida en el apartado 6.2.4:

$$-\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{r=R} = \frac{k_g (P_{ain,k+1} - P_a)}{D_{en,k+1} \cdot \rho_s} \quad [7.8]$$

por analogía con la ecuación 6.41, se puede escribir:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial r}\right)_{r=R} = \frac{3X_{n,k} - 4X_{n-1,k} + X_{n-2,k}}{2 \Delta r} \quad [7.9]$$

igualando las ecuaciones 7.8 y 7.9, se tiene:

$$\frac{k_g (P_{ain,k+1} - P_a)}{D_{en,k+1} \cdot \rho_s} = \frac{-3X_{n,k+1} - 4X_{n-1,k+1} + X_{n-2,k+1}}{2 \Delta r}$$

de donde:

$$X_{n,k+1} = \frac{4X_{n-1,k+1} - X_{n-2,k+1} - \frac{2 \Delta r k_g}{D_{en,k+1} \cdot \rho_s} (P_{ain,k+1} - P_a)}{3} \quad [7.10]$$

ecuación que permite conocer la humedad de la esfera, en la superficie, al tiempo k+1, a partir de la humedad en el interior de la misma.

7.3.- CALCULO DE LOS DISTINTOS PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN LA ECUACION DEL MODELO DE SECADO NO ISOTERMICO.

7.3.1.- CALCULO DE LA VELOCIDAD MASICA DE SECADO.

Para realizar dicho cálculo, se utiliza la expresión (99) siguiente:

$$Q = C \cdot A_o \sqrt{\frac{2g(-\Delta P/\rho_a)}{1-(D_o/D_1)^4}} \quad [7.11]$$

en la que:

Q = Caudal volumétrico de aire (m³/s)

C = Coeficiente de descarga que se determina en función del Reynolds y de la relación de diámetros - D_o/D₁

Como: G = Q · ρ / S, la expresión anterior queda:

$$G = \frac{C \cdot A_o}{S} \rho_a \cdot 3600 \sqrt{\frac{2g(-\Delta P/\rho_a)}{1-(D_o/D_1)^4}} \quad [7.12]$$

donde S es la sección transversal del lecho en m².

Como ejemplo de cálculo, seguidamente, se determina el valor de G cuando la diferencia de alturas en el manómetro-diferencial utilizado es de 16,6 cm.

En primer lugar se calcula (-ΔP) a partir de la expresión: (-ΔP) = ΔH(γ_m - γ_a), siendo γ_m y γ_a los pesos específicos de los dos líquidos manométricos usados, alcohol isoamílico (0,830) y agua (0,984) g/ml respectivamente.

El valor medio de la densidad del aire para el margen de temperaturas ensayadas (28), es: $\rho_a = 1,066 \text{ Kg/m}^3$.

Para el cálculo de G, se utilizaron los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} D_p &= 0,024 \text{ m.} & C &= 0,65 \\ A_o &= 0,0013 \text{ m}^2 & g &= 9,81 \text{ Kg.Kg}_f^{-1} \cdot \text{m.s}^{-2} \\ S &= 0,00785 \text{ m}^2 & (D_o/D_1) &= 0,525 \\ \rho_a &= 1,066 \text{ Kg/m}^3 & (-\Delta P) &= 25,511 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

Ya que C es función del número de Reynolds y en este momento no se conoce, se supondrá un valor de 0,65, posteriormente con el caudal determinado se calculará y se comparará con el valor supuesto; se detiene el cálculo cuando ambos sean coincidentes.

El valor que se obtiene para la velocidad másica, es: $G = 9300 \text{ Kg/h.m}^2$. Para verificar el valor supuesto de C, se calcula el número de Reynolds en el estrechamiento:

$$Re = \frac{D_o \cdot G}{\mu} = \frac{4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 9300 \text{ Kg/h.m}^2}{1,995 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m.s}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 5184$$

Con este valor de Reynolds y una relación $(D_o/D_1) = 0,525$ y con ayuda de la relación gráfica existente entre ellos (99), se calcula el nuevo valor de C, éste resulta ser 0,65. Luego el valor de C supuesto es el adecuado y el valor de G calculado es válido.

7.3.2.- CALCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSION EFECTIVO

Si se admiten las hipótesis formuladas en el apartado 6.2.4, la ecuación representativa de la difusión en régimen isotérmico, es:

$$\frac{\delta C}{\delta \theta} = D_e \left[\frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 C}{\delta z^2} \right] = D_e \cdot \nabla^2 C \quad [7.13]$$

Si en esta ecuación se sustituye la concentración puntual C por el contenido de humedad puntual X_p , ya que $(X_p/M_{H_2O}) \cdot \rho_s = C$, resulta:

$$\frac{\delta X_p}{\delta \theta} = D_e \left[\frac{\delta^2 X_p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 X_p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 X_p}{\delta z^2} \right] \quad [7.14]$$

La integración de esta ecuación se efectúa mediante el paso, en primer lugar de coordenadas cartesianas a esféricas:

$$\frac{\delta X_p}{\delta \theta} = D_e \left[\frac{\delta^2 X_p}{\delta x^2} + \frac{2}{r} \frac{\delta X_p}{\delta r} \right] \quad [7.15]$$

donde r es la distancia del punto considerado al centro de la esfera.

La integración de la ecuación 7.15, da como resultado:

$$\frac{X_p - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \psi_n - \psi_n \cos \psi_n}{\psi_n - \text{sen } \psi_n \cos \psi_n} \left[\frac{\text{sen}(\psi_n \frac{r}{r_m})}{\psi_n \frac{r}{r_m}} \right] e^{-\frac{\psi_n^2 \cdot D_e \cdot \theta}{r_m^2}} \quad [7.16]$$

La función ψ_n varía con el cociente $K_g \cdot r_m / D$ tal como se indica en la tabla 7.2.

T A B L A 7.2

Variación de la función Ψ_n con el cociente $k_g \cdot r_m / D$

$k_g \cdot r_m / D$	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4
∞	$n = 3,14$	$2n = 6,28$	$3n = 9,43$	$4n = 12,57$
50	3,08	6,12	9,24	12,31
20	2,98	5,98	8,98	12,00
10	2,84	5,72	8,66	11,65
4	2,45	5,23	8,20	11,25
1	1,57	4,71	7,85	10,99

Se observa que el límite a que tiende Ψ_n cuando la razón $k_g \cdot r_m / D$ tiende a infinito, es $(n \cdot \pi)$. Puede admitirse que para valores de $k_g \cdot r_m / D$ superiores a 10^4 , se cumple ya la igualdad:

$$\Psi_n = n \cdot \pi \tag{7.17}$$

De las ecuaciones 7.16 y 7.17, se obtiene:

$$\frac{X_p - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{\text{sen}(n \cdot \pi) - (n \cdot \pi) \cos(n \cdot \pi)}{(n \cdot \pi) - \text{sen}(n \cdot \pi) \cos(n \cdot \pi)} \left[\frac{\text{sen}(n \cdot \pi \frac{r}{r_m})}{n \cdot \pi \frac{r}{r_m}} \right] e^{-\frac{n^2 \pi^2 D_e \theta}{r_m^2}} \tag{7.18}$$

como n es siempre un número entero, se puede escribir que:

$$\text{sen}(n \cdot \pi) = 0$$

$$\cos(n \cdot \pi) = 1$$

llevando ésto a la ecuación 7.18, queda:

$$\frac{X_p - X_e}{X_o - X_e} = 2 \frac{\text{sen}(n \cdot \pi \cdot r/r_m)}{n \cdot \pi \cdot r/r_m} e^{-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_e \cdot \theta}{r_m^2}} \tag{7.19}$$

La ecuación 7.19 está referida a condiciones puntuales, como los datos experimentales son valores medios, se expresa dicha ecuación en función de estos valores medios.

Como la relación que existe en un cuerpo esférico - entre el contenido másico medio de humedad \bar{X} y la distribución radial de la humedad puntual X_p , es:

$$X = \frac{3}{4\pi \cdot r_m^3} \int_0^{r_m} X_p \cdot 4\pi r^2 dr \quad [7.20]$$

Despejando el valor de X_p de la ecuación 7.19 y llevándolo a la ecuación 7.20 e integrando ésta, resulta:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \left[e^{-\frac{\pi^2}{r_m^2} D_e \cdot \theta} + \frac{1}{r} e^{-\frac{4\pi^2}{r_m^2} D_e \cdot \theta} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9\pi^2}{r_m^2} D_e \cdot \theta} + \dots \right] \quad [7.21]$$

Con la ecuación 7.21 se determinaron los valores del coeficiente de difusión efectivo a un valor del tiempo igual al tiempo-crítico, tabla 7.3, ya que en ese momento la temperatura del sólido aun permanece constante y no existen gradientes térmicos en su interior; por otra parte se inicia el control de la difusión interna con lo que se dan las condiciones necesarias para aplicar la citada ecuación.

T A B L A 7.3

Valores del coeficiente de difusión efectivo D_e .

Tamaño (m)	t (°C)	$x_c \left(\frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ s.s.}} \right)$	$D_e \text{ (m}^2\text{/h)}$
0,024	40	0,073	$1,70 \times 10^{-5}$
0,024	50	0,073	$2,05 \times 10^{-5}$
0,024	60	0,073	$2,47 \times 10^{-5}$
0,024	70	0,073	$3,45 \times 10^{-5}$
0,024	80	0,073	$3,71 \times 10^{-5}$
0,018	40	0,073	$2,01 \times 10^{-5}$
0,018	50	0,073	$2,25 \times 10^{-5}$
0,018	60	0,073	$2,56 \times 10^{-5}$
0,018	70	0,073	$3,47 \times 10^{-5}$
0,018	80	0,073	$3,45 \times 10^{-5}$
0,012	40	0,061	$1,48 \times 10^{-5}$
0,012	50	0,061	$2,06 \times 10^{-5}$
0,012	60	0,061	$2,60 \times 10^{-5}$
0,012	70	0,061	$3,13 \times 10^{-5}$
0,012	80	0,061	$3,64 \times 10^{-5}$
0,010	40	0,068	$1,46 \times 10^{-5}$
0,010	50	0,068	$1,93 \times 10^{-5}$
0,010	60	0,068	$2,37 \times 10^{-5}$
0,010	70	0,068	$3,15 \times 10^{-5}$
0,010	80	0,068	$3,58 \times 10^{-5}$

7.3.3.- CALCULO DE D_0 Y E PARA LOS MATERIALES ENSAYADOS

El coeficiente de difusión se relaciona con la temperatura del sólido de manera exponencial, según una ecuación del tipo:

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_s}\right) \quad [7.22]$$

al tomar logaritmos en la ecuación anterior, queda:

$$\log D_e = \log D_0 - \frac{E}{2,3 \cdot R} \cdot 1/T_s \quad [7.23]$$

Representando en coordenadas semilogarítmicas, los valores de D_e frente a los valores de la inversa de la temperatura del sólido (tabla 7.4) se deducen los valores de E y D_0 . Correlacionando dichos puntos, por el método de los mínimos cuadrados (figura 7.1), se obtiene una línea recta de cuya pendiente y ordenada en el origen se deducen los valores de los parámetros D_0 y E siguientes: $D_0 = 1233,7 \text{ m}^2/\text{h}$ y $E = 10,8 \text{ Kcal/mol-g}$. El coeficiente de correlación de la misma, es de 0,955. Llevando estos valores a la ecuación 7.23, resulta:

$$D_e = 1233,7 \exp\left(-\frac{5400}{T_s}\right)$$

7.3.4.- CALCULO DE LAS CONSTANTES QUE INTERVIENEN EN LA ECUACION DE LA PRESION DE VAPOR DEL AGUA PURA (A Y B)

Para determinar los valores de las constantes A y B de la ecuación 6.48, se han utilizado los valores de la pre-

T A B L A 7.4

Correlación de los valores del coeficiente de difusión efectivo D_e , con la temperatura del sólido T_s .

Tamaño (m)	t (°C)	x_c ($\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg s.s.}}$)	t_s (°C)	$1/T_s$ (°K ⁻¹)	D_e (m ² /h)
0,024	40	0,073	30,60	$3,3 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-5}$
0,024	50	0,073	32,95	$3,27 \times 10^{-3}$	$2,05 \times 10^{-5}$
0,024	60	0,073	36,94	$3,23 \times 10^{-3}$	$2,47 \times 10^{-5}$
0,024	70	0,073	40,01	$3,19 \times 10^{-3}$	$3,45 \times 10^{-5}$
0,024	80	0,073	40,35	$3,17 \times 10^{-3}$	$3,71 \times 10^{-5}$
0,018	40	0,073	33,28	$3,26 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^{-5}$
0,018	50	0,073	35,38	$3,24 \times 10^{-3}$	$2,25 \times 10^{-5}$
0,018	60	0,073	38,50	$3,21 \times 10^{-3}$	$2,56 \times 10^{-5}$
0,018	70	0,073	41,18	$3,18 \times 10^{-3}$	$3,47 \times 10^{-5}$
0,018	80	0,073	41,58	$3,16 \times 10^{-3}$	$3,45 \times 10^{-5}$
0,012	40	0,061	30,60	$3,29 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^{-5}$
0,012	50	0,061	32,77	$3,27 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-5}$
0,012	60	0,061	37,94	$3,22 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-5}$
0,012	70	0,061	41,34	$3,18 \times 10^{-3}$	$3,13 \times 10^{-5}$
0,012	80	0,061	44,52	$3,15 \times 10^{-3}$	$3,64 \times 10^{-5}$
0,010	40	0,068	31,08	$3,29 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-5}$
0,010	50	0,068	33,77	$3,26 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-5}$
0,010	60	0,068	38,50	$3,21 \times 10^{-3}$	$2,37 \times 10^{-5}$
0,010	70	0,068	40,48	$3,19 \times 10^{-3}$	$3,15 \times 10^{-5}$
0,010	80	0,068	45,41	$3,14 \times 10^{-3}$	$3,58 \times 10^{-5}$

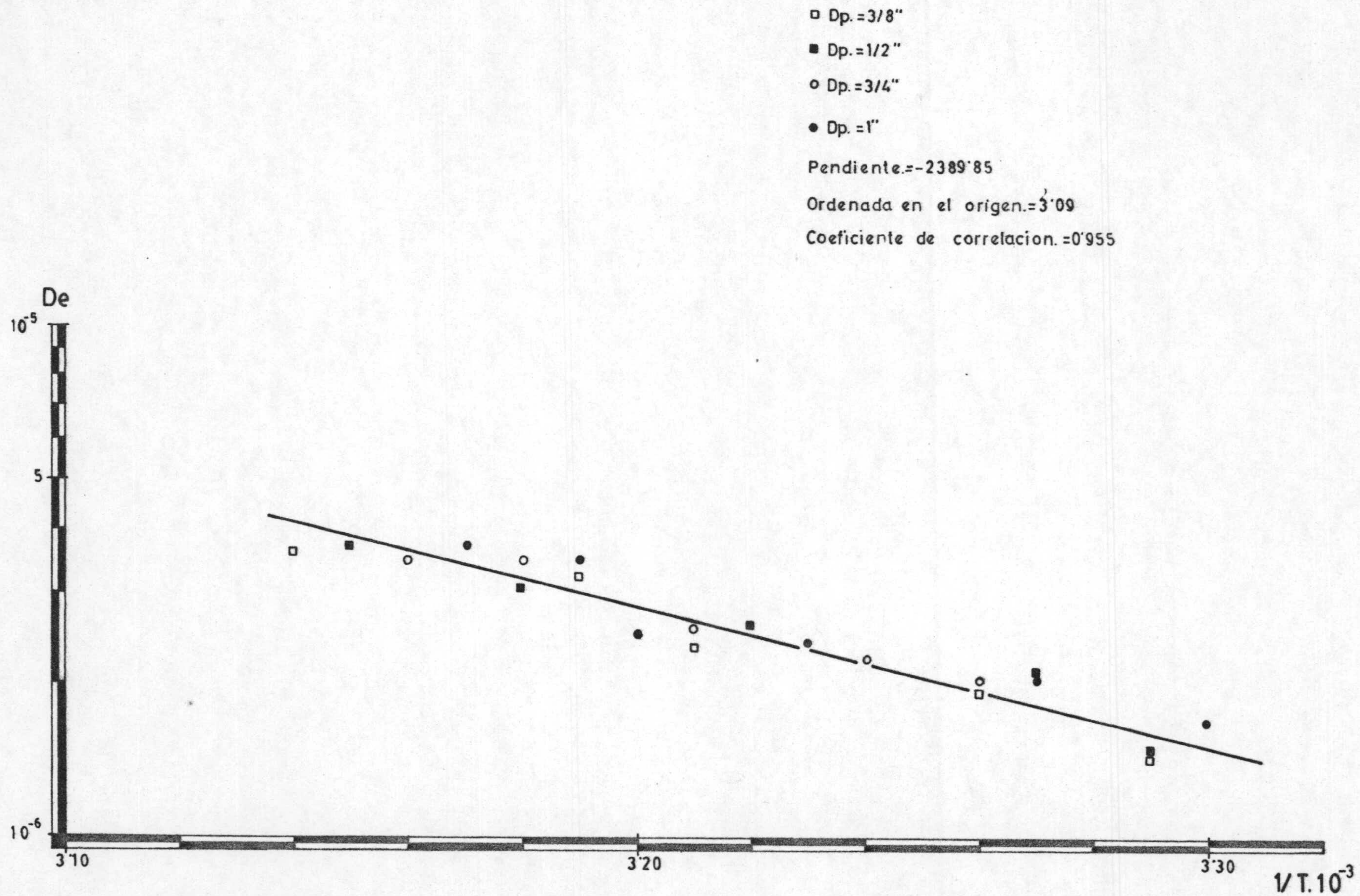


Fig. 7.1: Correlación de los valores del coeficiente de difusión efectivo, con la temperatura del solido.

sión de vapor del agua pura en función de la temperatura tomadas de (100).

La ecuación que liga a la presión de vapor con la temperatura, es del tipo:

$$P_{ai} = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad [7.24]$$

Si en esta ecuación se toman logaritmos neperianos, resulta:

$$\ln P_{ai} = \ln A - \frac{B}{T} \quad [7.25]$$

Si se representa $\ln P_{ai}$ frente a $1/T$, se debe obtener una línea recta de pendiente B y ordenada en el origen $\ln A$. Efectuando la correlación, en el intervalo de temperaturas comprendido entre 20 y 70°C, por el método de los mínimos cuadrados (tabla 7.5), se obtiene una línea recta (figura 7.2) de la que se obtiene:

$$\text{Pendiente} = - 5225,8 = - B$$

$$\text{Ordenada en el origen} = 14,07 = \ln A$$

$$\text{Coeficiente de correlación} = 0,999$$

De estos valores se deducen: $B = 5225,8$ y $A = 1289800$. Que llevados a la ecuación 7.24, se obtiene:

$$P_{ai} = 1289800 \exp\left(-\frac{5225,8}{T}\right) \quad [7,26]$$

7.3.5.- CALCULO DE LA DIFUSIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD TERMICA (α Y K_s)

Para un sólido de ecuación representativa de la transmisión de calor por conducción en estado no estacionario, está dada por la ecuación 6.18. Existen soluciones generales -

T A B L A 7.5

Variación de la presión de vapor del agua pura con la temperatura.

(°C)	1/T (° K ⁻¹)	P _{ai} (atm)	ln P _{ai}
20	0,003	0,023	-3,772
25	0,003	0,031	-3,467
30	0,003	0,042	-3,175
35	0,003	0,056	-2,891
40	0,003	0,073	-2,620
45	0,003	0,095	-2,369
50	0,003	0,122	-2,107
55	0,003	0,155	-1,862
60	0,003	0,197	-1,627
65	0,003	0,248	-1,400
70	0,003	0,308	-1,179

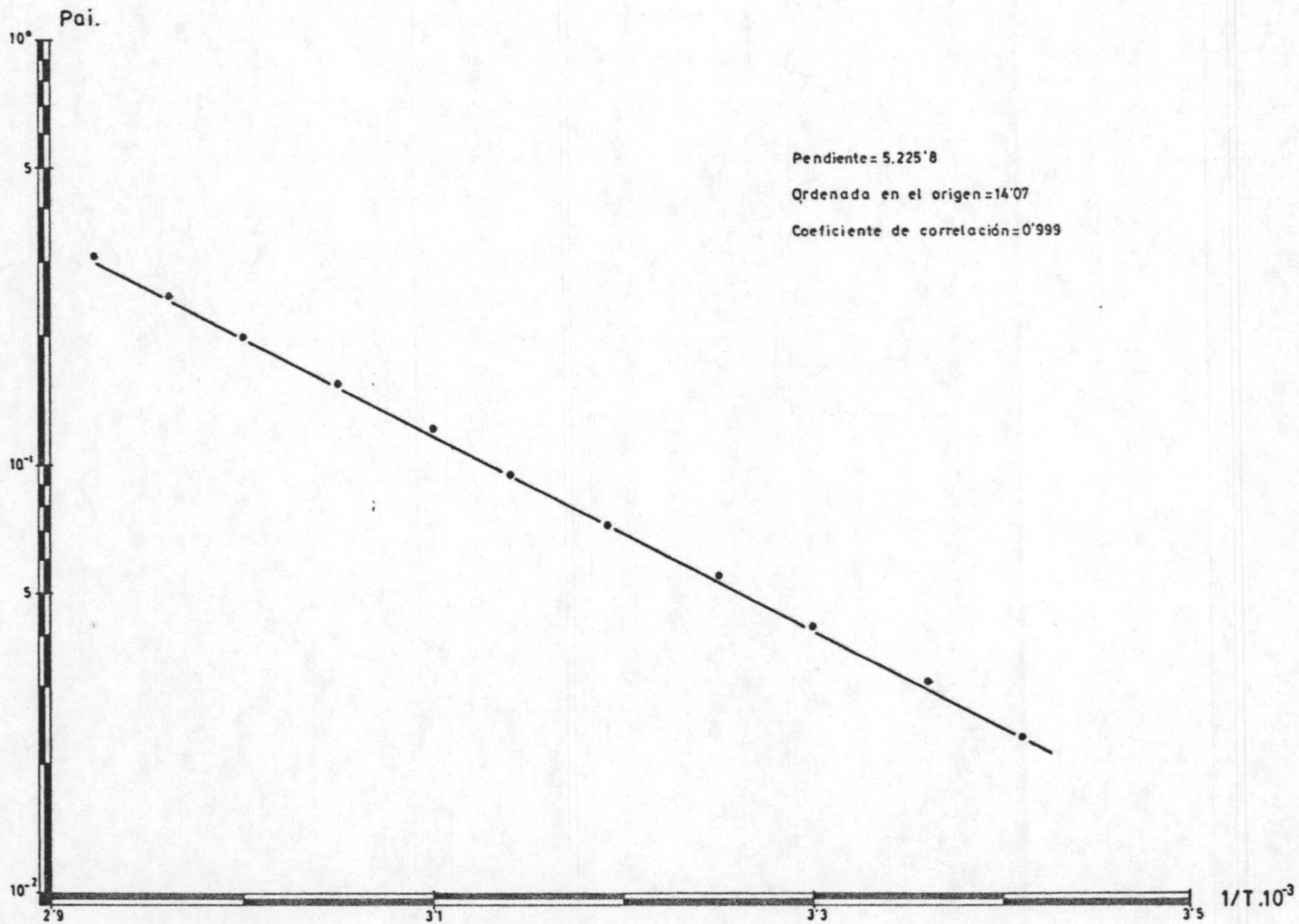


Fig. 7.2.- Variación de la presión de vapor de agua con la temperatura.

de dicha ecuación para materiales que posean una geometría sencilla; así para el calentamiento o enfriamiento de una esfera, la ecuación integrada, con las siguientes condiciones límites: temperatura uniforme en la esfera; temperatura superficial de la esfera igual a la de la masa de aire; distribución simétrica de temperatura en el sólido (35), queda de la forma:

$$\frac{t_a - t_s}{t_a - t_o} = 0,0608 \exp(-9,87 N_{Fo}) + 0,152 \exp(-39,5 N_{Fo}) + 0,067 \exp(-88,8 N_{Fo}) + \dots \quad [7.27]$$

en la que:

$$N_{Fo} = \text{número de Fourier} = \frac{\alpha \cdot \theta}{R^2}$$

La ecuación 7.27 se ha representado (35) en la forma $\frac{t_a - t_s}{t_a - t_o}$ frente a N_{Fo} tal como se indica en la figura 7.3.

Para calcular α se procedió de la manera que describe seguidamente: Se calculó el primer término de la ecuación (ordenada) con ayuda de las tablas 5.20 a 5.23, relativas a la temperatura media del sólido. Con este valor y con ayuda de la figura 7.3 se dedujo el correspondiente de N_{Fo} y a partir de éste el valor de la difusividad α . Una vez obtenido este valor, es inmediato el cálculo de K_s a partir de la relación:

$$\alpha = \frac{K_s}{\rho \cdot c_p}$$

Como ejemplo de cálculo, en la tabla 7.6 se dan los valores de N_{Fo} , α y K_s obtenidos para las esferas de 1" de diámetro cuando la temperatura de trabajo fue de 80°C. Se ha tomado como valor: $K_s = 0,333 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$

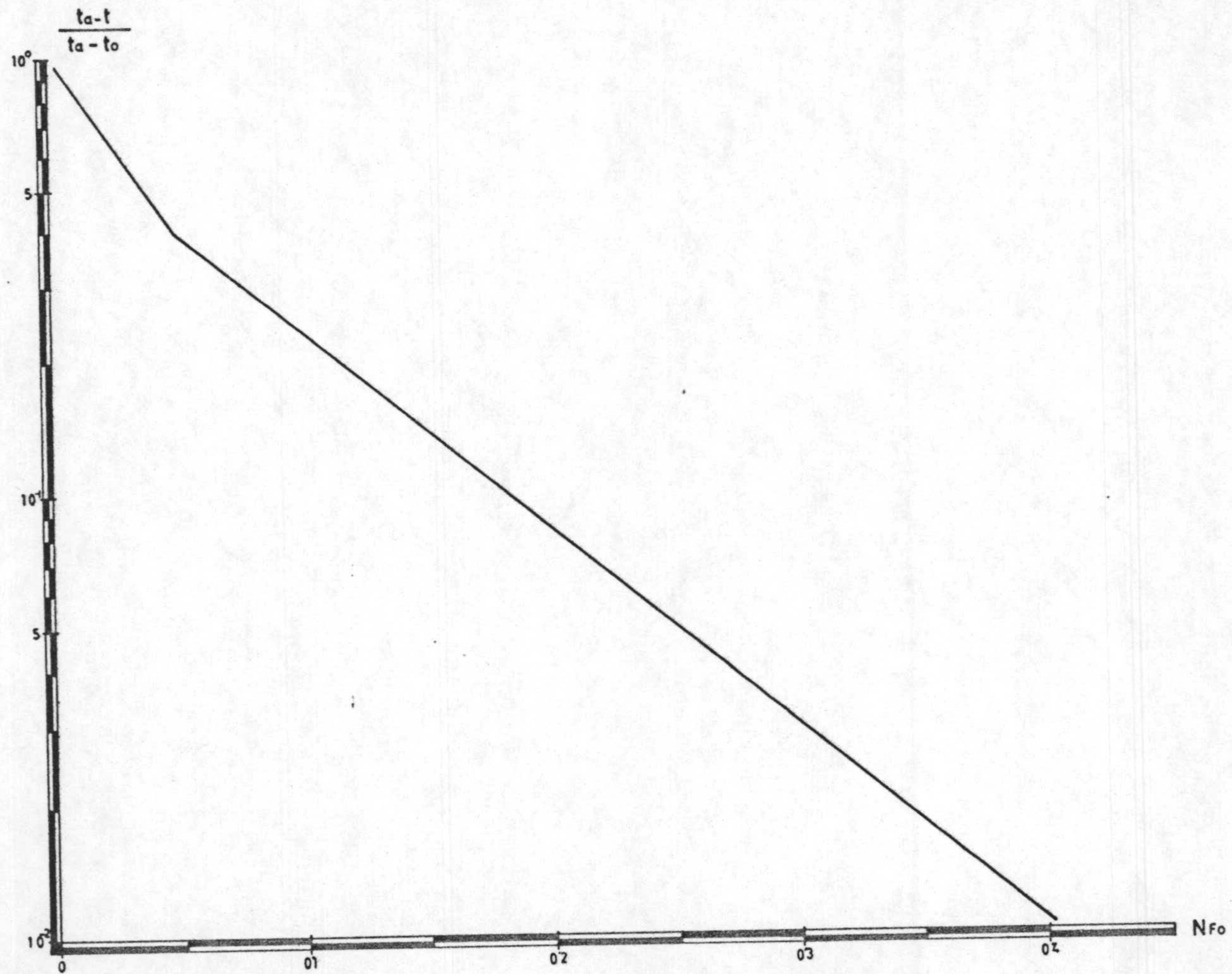


Fig.7.3-Temperaturas medias durante el calentamiento de una esfera.

T A B L A 7.6

Valores de α y de K_s para las esferas de 1" de diámetro. Temperatura del aire de secado 80°C.

θ (min)	N_{Fo}	α	K_s
1	0,036	0,0003	0,333
2	0,068	0,0003	0,333
3	0,110	0,0003	0,333
4	0,143	0,0003	0,333
5	0,174	0,0003	0,333
6	0,204	0,0003	0,333
7	0,233	0,0002	0,222
8	0,242	0,0003	0,333
9	0,272	0,0003	0,333

7.3.6.- CALCULO DE LOS COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, h , Y MATERIA k_g .

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h , se ha utilizado la ecuación 6.12, correspondiente al período de velocidad de secado constante, de la que despejando h , queda:

$$h = \frac{\left(-\frac{dX}{d\theta}\right) \cdot \rho_s \cdot \lambda_w \cdot D_p}{6 (t-t_w)} \quad [7.28]$$

Para determinar la velocidad de secado $(-dX/d\theta)$, se representa

ron los valores de X frente a θ , seguidamente y a partir de $\theta = 0$ y $X = X_0$, se procedió a efectuar una correlación lineal entre aquellas parejas de valores de (X, θ) que en la representación se adaptaban a una recta; la pendiente de la misma se tomó como velocidad de secado.

Como ejemplo de cálculo, se ha determinado el valor de h para esferas de 1" de diámetro, cuando la temperatura del aire de secado es de 40°C. Los datos necesarios para el cálculo, son:

$$\begin{array}{ll}
 D_p = 0,024 \text{ m.} & t = 40^\circ\text{C} \\
 t_w = 26,2 \text{ }^\circ\text{C} & \lambda_w = 582,09 \text{ Kcal/Kg agua} \\
 G = 9300 \text{ Kg/h.m}^2 & R = (-dX/d\theta) = 0,345 \text{ Kg agua/} \\
 & \text{/Kg s.s.h}
 \end{array}$$

llevando estos valores a la ecuación 7.28, se obtiene:

$$h = 128,67 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{ }^\circ\text{C}$$

El coeficiente de transferencia de materia k_g , se ha obtenido de la ecuación de Lewis (29). El valor que se obtiene es:

$$k_g = 536,14 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$$

Los demás valores obtenidos, se detallan en la tabla 7.7.

7.3.7.- CALCULO DEL CALOR ESPECIFICO

Se ha realizado por el método de las mezclas, que se basa en el intercambio de calor que se produce entre dos cuerpos que están a temperaturas distintas, cuando se ponen en

T A B L A 7.7

Valores de los coeficientes de transferencia de calor y materia.

Tamaño (m)	R	t	t-t _w	λ _w	G	h	k _g
0,024	0,345	40	13,8	582,09	9.300	128,67	536,14
0,024	0,405	50	21,4	580,77	9.300	97,19	404,4
0,024	0,532	60	27,8	578,79	9.300	97,94	408,07
0,024	0,720	70	35,9	577,75	9.300	102,46	426,90
0,024	0,818	80	45,4	577,47	9.300	92,00	383,33
0,018	0,333	40	12,4	581,32	9.300	104,09	433,72
0,018	0,566	50	17,7	578,74	9.300	123,40	516,16
0,018	0,648	60	27,1	578,41	9.300	92,22	384,25
0,018	0,925	70	34,0	576,70	9.300	104,62	435,90
0,018	1,130	80	44,4	576,92	9.300	97,90	407,93
0,012	0,735	40	12,1	581,16	9.300	155,85	649,36
0,012	1,030	50	19,9	579,95	9.300	132,52	552,16
0,012	1,560	60	29,9	579,95	9.300	133,58	556,58
0,012	1,601	70	35,9	577,75	9.300	113,75	473,94
0,012	1,854	80	44,2	576,81	9.300	106,81	445,05
0,010	1,319	40	20,7	585,88	9.300	132,85	553,53
0,010	1,583	50	27,7	584,24	9.300	118,81	495,05
0,010	2,010	60	34,9	587,70	9.300	119,42	497,59
0,010	2,620	70	42,4	581,32	9.300	127,83	532,61
0,010	3,080	80	50,2	580,11	9.300	126,66	527,73

contacto. El intercambio de calor se realiza en un calorímetro que utiliza agua como fluido intercambiador de calor, lo cual quiere decir, por las características del aparato, que al calor absorbido por el agua hay que sumarle los correspondientes al vaso calorimétrico, termómetro y agitador. La ecuación que permite el cálculo del valor del calor específico, es:

$$C_p = \frac{(m_a C_{pa} + M)(t_{eq} - t_{ag}) \cdot C_{pa}}{m(t - t_{eq})} \quad [7.29]$$

Para poder calcular C_p mediante la ecuación 7.29, es preciso calcular en primer lugar el valor de M que es el equivalente en agua del calorímetro (función de la masa y calores específicos del vaso, termómetro y agitador, respectivamente). La ecuación que resulta para calcular M , es:

$$M = \frac{m'_a (t'_a - t_{eq}) - m_a (t_{eq} - t_a)}{(t_{eq} - t_a)} \quad [7.30]$$

Usando el mismo calorímetro por tres veces consecutivas se obtuvieron tres valores de M , cuyo valor medio, es: $M = 55,85$ gramos. Se llevó este valor a la ecuación 7.29 y teniendo en cuenta que se realizaron cuatro pruebas (lo que quiere decir que se obtuvieron cuatro valores de la temperatura de equilibrio), se obtuvo como valor medio del calor específico:

$$C_p = 0,53 \text{ cal/g.}^\circ\text{C.}$$

7.3.8.- RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PRESION PAR -
CIAL DE VAPOR DE AGUA EN EL AIRE (P_a)

D_p (m)	t_a ($^{\circ}\text{C}$)	Ψ_{aire}	P_a (atm)
0,024	40	0,524	0,038
0,024	50	0,264	0,032
0,024	60	0,150	0,030
0,024	70	0,121	0,036
0,024	80	0,066	0,031
0,018	40	0,487	0,036
0,018	50	0,242	0,030
0,018	60	0,163	0,032
0,018	70	0,116	0,034
0,018	80	0,074	0,035
0,012	40	0,484	0,036
0,012	50	0,263	0,032
0,012	60	0,152	0,030
0,012	70	0,099	0,029
0,012	80	0,073	0,037
0,010	40	0,461	0,036
0,010	50	0,227	0,028
0,010	60	0,179	0,035
0,010	70	0,100	0,030
0,010	80	0,076	0,036

7.4.- REGLA DE ESTABILIDAD (DETERMINACION DE LOS -
PARAMETROS M Y N)

Para conseguir una solución estable en la integra -
ción de las ecuaciones de transferencia de calor y materia, el
método mas sencillo y eficaz es conseguir que todos los coefi -
cientes que intervienen en las distintas ecuaciones, sean posi -
tivos y así se tiene que cumplir que:

en la ecuación 6.33 $1 - \frac{\alpha \Delta \theta}{\Delta_r^2} \left(2 + \frac{2}{j}\right) \geq 0$ [7.31]

desde $j= 1$ hasta $j= n-1$

en la ecuación 6.36 $1 - \frac{6 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta}{\Delta_r^2} \geq 0$ [7.32]

en la ecuación 6.43 $1 - \frac{D_e \cdot \Delta \theta}{\Delta_r^2} \left(2 + \frac{2}{j}\right) \geq 0$ [7.33]

desde $j= 1$ hasta $j= n-1$

en la ecuación 6.44 $1 - \frac{6 D_e \cdot \Delta \theta}{\Delta_r^2} \geq 0$ [7.34]

En las ecuaciones 7.31 y 7.33, $\left(2 + \frac{2}{j}\right)$, siempre es
menor que seis para valores de j comprendidos entre 1 y $n-1$, -
lo cual da pie a tener en cuenta solo las ecuaciones 7.32 y -
7.34 para conseguir que el proceso de cálculo sea estable. Se
puede escribir:

$$\frac{\alpha \cdot \Delta \theta}{\Delta_r^2} \leq \frac{1}{6} \quad [7.35]$$

$$\frac{D_e \cdot \Delta \theta}{\Delta_r^2} \leq \frac{1}{6} \quad [7.36]$$

La elección de la ecuación que va a ser la base uti

lizada para efectuar los cálculos de la estabilidad, está basada en la comparación de los valores de α y D_e . En el presente trabajo, siempre D_e es menor que α con lo cual basta con que se cumpla la ecuación 7.35, para que el proceso sea estable.

Despejando $\Delta\theta$ en dicha ecuación, queda:

$$\Delta\theta \leq \frac{\Delta r^2}{6 \cdot \alpha} \quad [7.37]$$

Las definiciones de $\Delta\theta$ y de Δr , son respectivamente:

$$\Delta\theta = \frac{L_t}{M} \quad \text{y} \quad \Delta r = \frac{R}{N} \quad [7.38]$$

llevando estas definiciones a la ecuación 7.37, queda:

$$\frac{L_t}{M} \leq \frac{R^2}{6 \cdot \alpha \cdot N^2}$$

de la que despejando M, se obtiene finalmente:

$$M \geq L_t \cdot \alpha \cdot 6 \cdot N^2 / R^2 \quad [7.39]$$

Ecuación que permite el cálculo del número mínimo de divisiones del tiempo (M), conocidos L_t , α y R y fijando el valor de N.

Como ejemplo de cálculo, se obtiene el número de divisiones del tiempo, para ocho divisiones del radio (N=8) para las esferas de 1/2" de diámetro cuando la temperatura de trabajo es de 50°C. Los datos necesarios para efectuar dicho cálculo, son los siguientes:

$$\begin{aligned} R &= 0,006 \text{ m.} & \rho &= 2100 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 0,53 \text{ Kcal/Kg.}^\circ\text{C} & K_s &= 0,333 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C} \\ \alpha &= K_s / \rho \cdot C_p = 0,0003 \text{ m}^2/\text{h} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que para estas esferas (1/2") y esta tempe-

ratura de trabajo (50°C), $L_T = 0,47$, resulta:

$$M \geq 0,47 \cdot 6 \cdot 0,0003 \cdot 8^2 / 0,006^2 = 1490$$

Luego para estas esferas: $N = 8$ y $M = 1490$. Los resultados obtenidos para los demás tamaños de esferas y temperaturas, se detallan en la tabla 7.8.

7.5.- METODO DE ITERACION UTILIZADO.

Se utiliza el método de Newton-Raphson que mejora una raíz aproximada de una ecuación, mediante el desarrollo de la función en series de Taylor, en un entorno de la raíz aproximada. El método resuelve $g(t) = 0$ mediante la iteración:

$$t_1 = t - \frac{g(t)}{g'(t)} \quad [7.40]$$

donde:

$$g(t) = 2 \Delta r \left\{ h t_a - \lambda k_g [P_{ai}(t) - P_a] \right\} + K_s (4t_{n-1,k+1} - t_{n-2,k+1}) - (2r \cdot h + K_s) t \quad [7.41]$$

ecuación que se obtiene de la 6.42 sin más que pasar el primer miembro al segundo e igualar a $g(t)$.

$$\text{Siendo: } P_{ai}(t) = A \exp \left[-B/(t+273) \right] \cdot \Psi(t) \quad [7.42]$$

Como se va a utilizar la primera derivada de $g(t)$, para simplificar su cálculo, se hace:

$$K_1 = 2 \Delta r \cdot h$$

$$K_2 = 2 \Delta r \cdot k_g \cdot \lambda$$

$$K_3 = 4t_{n-1,k+1} - t_{n-2,k+1}$$

$$K_9 = 2 \Delta r \cdot h + 3K_s$$



T A B L A 7.8

Valores del número de divisiones del radio (N) y -
del tiempo (M).

Tamaño (m)	L_T (h)	τ	N	M
0,024	0,83	40	8	657
0,024	0,75	50	8	593
0,024	0,66	60	8	552
0,024	0,63	70	8	498
0,024	0,53	80	8	419
0,018	1,08	40	8	1.501
0,018	0,66	50	8	917
0,018	0,45	60	8	625
0,018	0,37	70	8	514
0,018	0,33	80	8	459
0,012	0,60	40	8	1.902
0,012	0,47	50	8	1.490
0,012	0,33	60	8	1.046
0,012	0,27	70	8	856
0,012	0,20	80	8	634
0,010	0,17	40	8	1.317
0,010	0,35	50	8	1.707
0,010	0,23	60	8	1.121
0,010	0,20	70	8	976
0,010	0,13	80	8	634

La ecuación 7.43, queda:

$$g(t) = K_1 t_a - K_2 [P_{ai}(t) - P_a] + K_s \cdot K_3 - K_9 \cdot t \quad 7.43$$

si se efectúa la primera derivada de $g(t)$ con respecto a t , -
queda:

$$g'(t) = - K_2 \cdot P'_{ai}(t) - K_9 \quad [7.44]$$

para conocer el valor de $g'(t)$, se necesita conocer el valor -
de $P'_{ai}(t)$ lo cual lleva implícito, dada la ecuación 7.42, co-
nocer el valor de $\varphi(t)$ y de $\varphi'(t)$. La forma de estas expre -
siones, es:

$$\varphi(t) = 1 - \exp[-28,7(t+273) \bar{x}^{2,16}] \quad [7.45]$$

Las derivadas de $P_{ai}(t)$ y de $\varphi(t)$, son:

$$P'_{ai}(t) = A \exp[-B/(t+273)] \cdot \varphi(t) \cdot B/(t+273)^2 + \\ + A \exp[-B/(5+273)] \varphi'(t) \quad [7.46]$$

$$\varphi'(t) = \exp[-28,7(t+273)] \cdot \bar{x}^{2,16} \cdot 28,7 \cdot \bar{x}^{2,16} / N \quad [7.47]$$

llevando la ecuación 7.47 a la 7.46 y a su vez a la 7.44, se -
obtiene el valor de $g'(t)$.

7.6.- Listados de los programas de cálculo utilizados.

7.6.1.- Programa para el modelo de secado no isotérmico.

```
1 ! *****
2 ! **  MODELO DE SECADO  **
3 ! **  NO  ISOTERMICO  **
4 ! *****
5 OPTION BASE 0
6 REAL T1(20),T2(20)
7 REAL X1(20),X2(20)
8 CLEAR
9 DEF FND1(T) = D0*EXP(-E0/(T+
  273))
10 DEF FNP1(T) = A*EXP(-B/(T+27
  3))*FNV1(T)
11 DEF FNP2(T) = FNP1(T)*B/(T+2
  73)^2+A*EXP(-B/(T+273))*FNV2
  (T)
12 DEF FNV1(T) = 1-EXP(-28.7*(0
  0/N^3+T/N+273)*X9^2.16)
13 DEF FNV2(T) = 28.7*X9^2.16*(
  1-FNV1(T))/N
14 DEF FNG0(T) = K1*T9-K2*(FNP1
  (T)-P0)+Z9*K3-K9*T
15 DEF FNG1(T) = -K2*FNP2(T)-K9
16 INPUT R0
17 INPUT N
18 INPUT L9
19 INPUT M
20 INPUT K0
21 INPUT H
22 INPUT L0
23 INPUT D0
24 INPUT E0
25 INPUT A
26 INPUT B
27 INPUT R9
28 INPUT P0
29 INPUT T9
30 INPUT T0
31 INPUT C0
32 INPUT X0
33 INPUT Z9@ ! =Ks
34 INPUT E
35 DISP "SALIDA EN PANTALLA O I
  MPRESORA";@ INPUT A$
36 PRINT USING 37
37 IMAGE 33("*"), "MODELO DE SEC
  ADO NO ISOTERMICO",33("*")
```



```

38 ! *****
39 ! *INICIALIZACION*
40 ! *****
41 K8=TIME
42 R1=R0/N
43 T1=L9/M
44 FOR J=0 TO N
45 T2(J)=T0
46 X2(J)=X0
47 NEXT J
48 X9=X0
49 K1=2*R1*H
50 K2=2*R1*K0*L0
51 K9=2*R1*H+3*Z9
52 GCLEAR
53 SCALE 0,M,0,X0
54 XAXIS 0,M/L9/12
55 YAXIS 0,.05 @ YAXIS M,-5*X0/
  (T9-T0),0,X0
56 PRINT @ PRINT "--TIEMPO----T
  EMP.M.----HUM.MED.--"
57 PRINT USING 99 ; 0,T0,X0

```

```

58 ! *****
59 ! *PROCESO POR FILAS*
60 ! *****
61 FOR K=1 TO M @ IF K=1 THEN K
  7=TIME
62 IF K=11 THEN DISP "TIEMPO ES
  TIMADO";IP((TIME-K7)*M/600);
  "MIN."
63 FOR J=0 TO N @ T1(J)=T2(J) @
  X1(J)=X2(J) @ NEXT J
64 A1=Z9/R9/C0
65 T2(0)=T1(0)+6*A1*T1/R1^2*(T1
  (1)-T1(0))
66 X2(0)=X1(0)+6*FND1(T1(0))*T1
  /R1^2*(X1(1)-X1(0))
67 FOR J=1 TO N-1
68 T2(J)=T1(J)+A1*T1/R1^2*((2/J
  +1)*T1(J+1)-(2+2/J)*T1(J)+T1
  (J-1))
69 X2(J)=(2/J+FND1(T1(J+1))/FND
  1(T1(J)))*X1(J+1)
70 X2(J)=X2(J)-(2/J+1+FND1(T1(J
  +1))/FND1(T1(J)))*X1(J)
71 X2(J)=(X2(J)+X1(J-1))*FND1(T
  1(J))*T1/R1^2+X1(J)
72 NEXT J @ GRAPH

```



```

73 ! *****
74 ! *METODO DE NEWTON-R*
75 ! *****
76 K3=4*T2(N-1)-T2(N-2)
77 O=0 @ FOR J=1 TO N-1 @ O=O+(
    2+2*(FP(J/2)#0))*J^2*X2(J) @
    NEXT J
78 O0=0 @ FOR J=1 TO N-1 @ O0=O
    0+(2+2*(FP(J/2)#0))*J^2*T2(J
    ) @ NEXT J
79 K5=O/N^3
80 K6=4*X2(N-1)-X2(N-2)
81 T6=T1(N)
82 T5=T6
83 T6=T5-FNG0(T5)/FNG1(T5)
84 IF ABS(T6-T5)>E THEN 82
85 T2(N)=T6
86 X2(N)=(K6-2*R1*K0/FND1(T2(N))
    )/R9*(FNP1(T2(N))-P0)/3
87 IF X2(N)<0 THEN X2(N)=0
88 X9=K5+X2(N)/N
89 M9=O0/N^3+T2(N)/N

90 ! *****
91 ! * SALIDA RESULTADOS *
92 ! *****
93 PENUP
94 PLOT K,X9
95 PENUP
96 PLOT K,(M9-T0)/(T9-T0)*X0
97 IF IP((K-1)*T1*60)=IP(K*T1*6
    0) THEN 101
98 PRINT USING 99 ; IP(K*T1*60)
    +FP(K*T1*60)*.6,M9,X9
99 IMAGE 2X,DZ.20,5X,20.30,5X,Z
    .50
100 GOTO 103
101 IF (K-6) MOD 10=0 THEN DISP
    "--TIEMPO----TEMP.M.----HUM.
    MED."
102 DISP USING 99 ; IP(K*T1*60)+
    FP(K*T1*60)*.6,M9,X9
103 NEXT K
104 GRAPH @ COPY
105 PRINT USING 106
106 IMAGE 32("*")
107 PRINT "TIEMPO";IP((TIME-K8)/
    60);"MINUTOS"
108 PRINT USING 106
109 END

```



```
10 | *****
11 | ** NOMENCLATURA **
12 | *****
13 | R0=Radio esfera =R
14 | N =Num. div. del radio =N
15 | L9=Limite del tiempo =Lt
16 | M =Num. div. tiempo =M
17 | K0=Coef.ind.transf.mat.=Kg
18 | H =Coef.ind.transf.cal.=h
19 | L0=Calor lat. vaporiz. =λ
20 | D0=Factor preexp De =Do
21 | E0=Factor expon. De =E/R
22 | A =Factor preexp Pai =A
23 | B =Factor expon. Pai =B
24 | R9=Densidad del solido =ρ
25 | P0=Pres.vapor del aire =Pa
26 | T9=Temperat. de trabajo=ta
27 | C0=Calor especif.solido=Cp
28 | X0=Humedad inicial =Xo
29 | Z9=Conductiv. termica =Ks
30 | E =Error de Newton-R. =e
31 | R1=Incremento radio =Δr
32 | T1=Incremento tiempo =Δt
33 | X9=Humedad media =X
34 | M9=Temperatura media =t
```


7.6.2.- Programa para el cálculo del coeficiente de difusión efectivo.

```

1 ! *****
2 ! ** CALCULO DIFUSIVIDAD **
3 ! *****
4 DEF FNX(X) = EXP(-X)+EXP(-4*
  X)/4+EXP(-9*X)/9
5 ! ENTRADA DATOS
6 DISP "R";@ INPUT R9
7 DISP "X*";@ INPUT X1
8 DISP "X0";@ INPUT X0
9 PRINT "RADIO: ";R9
10 PRINT "HUM. EQUIL.";X1
11 PRINT "HUM. INIC.";X0
12 DISP @ DISP "X";@ INPUT X
13 DISP "T";@ INPUT T
14 DISP "LIM. INF.";@ INPUT L0
15 DISP "LIM. SUP.";@ INPUT L1
16 DISP "INTERVS.";@ INPUT N
17 DISP "EPSILON.";@ INPUT E
18 PRINT
19 PRINT "HUMEDAD: ";X
20 PRINT "TIEMPO: ";T
21 ! INICIALIZACION
22 B=(X-X1)/(X0-X1)*PI^2/6
23 H=(L1-L0)/N
24 ! METODO BISECCION
25 FOR X=L0 TO L1 STEP H
26 IF (FNX(X)-B)*(FNX(X+H)-B)<=
  0 THEN 28
27 NEXT X @ DISP "NO HAY MAS" @
  GOTO 12
28 P=X @ Q=X+H @ R=FNX(P)-B @ S
  =FNX(Q)
29 IF ABS(P-Q)<=E THEN 35
30 M=(P+Q)/2 @ DISP M
31 T5=FNX(M)-B
32 IF SGN(T5)#SGN(R) THEN Q=M @
  S=T5 @ GOTO 29
33 P=M @ R=T5 @ GOTO 29
34 ! IMPRESION RESULTADOS
35 PRINT "SOLUCION X=";(P+Q)/2
36 PRINT "DIFUSIVIDAD=";(P+Q)/2
  *R9^2/PI^2/T*60
37 PRINT "B =" ;B*6/PI^2
38 NEXT X @ DISP "NO HAY MAS."
  @ GOTO 12

```


8. CONCLUSIONES

Como consecuencia de la investigación desarrollada se ha llegado a las conclusiones siguientes:

1. La relación de equilibrio: humedad del sólido frente a humedad relativa ambiente, presenta forma sigmoïdal y parece ser independiente del tamaño de las esferas utilizadas.
2. Se ha comprobado que la ecuación de BET reproduce, a la temperatura de 25°C., la relación de equilibrio de los materiales ensayados en el intervalo de humedades relativas del aire comprendido entre 0 y 53%.
3. Mediante la ecuación de Henderson, se ha conseguido correlacionar analíticamente los resultados experimentales de equilibrio para el intervalo de humedades relativas del aire comprendido entre 0 y 65%.
4. A partir de la ecuación de Henderson se ha obtenido una expresión analítica que permite calcular el calor diferencial de adsorción del vapor de agua sobre los materiales ensayados. Por integración de la misma, entre los límites de humedad cero y el correspondiente a una capa monomolecular, se ha determinado el calor integral de adsorción para la formación de una monocapa; este valor se ha comparado con el obtenido a partir de la ecuación de BET encontrándose una desviación inferior al 15%. Sin embargo, el orden de magnitud obtenido, en ambos casos, indica que la fijación del agua tiene lugar mediante un proceso de adsorción física.
5. Mediante el valor de la humedad ligada en forma de monoca-

pa, determinada a partir de la correlación de BET, se ha calculado la superficie específica de los materiales ensayados encontrándose un valor de $0,21 \text{ m}^2/\text{g}$. Este valor es del mismo orden de magnitud que los encontrados en bibliografías para materiales análogos.

6. La observación de los resultados obtenidos en el estudio cinético del secado pone de manifiesto, en todos los casos, los clásicos periodos de velocidad de secado constante y velocidad de secado decreciente.
7. Se ha encontrado que la humedad crítica, X_c , no parece depender ni del tamaño del material, D_p , ni de las condiciones del aire de secado, G y t_a ; esta circunstancia queda reflejada en las figuras 6.20 a 6.25 donde se han representado los valores de la velocidad del secado ($dX/d\theta$) frente a la humedad (X) en función de D_p y t_a .
8. Admitiendo que, durante el periodo de velocidad de secado constante, la cinética del proceso está controlada por la transferencia de calor en el exterior de las partículas, se ha propuesto una ecuación que correlaciona la velocidad de secado con el tamaño de las partículas, velocidad másica y condiciones del aire utilizado.
9. Se ha comprobado que, para velocidades másicas del aire iguales o superiores a 9.300 Kg/h.m^2 , el periodo de velocidad de secado decreciente está controlado por la transferencia de materia en el interior de las partículas a secar.
10. Suponiendo que el mecanismo responsable del transporte de

materia en el interior del sólido es la difusión del agua en estado líquido, se ha determinado una expresión empírica, tipo Arrhenius, que permite determinar el coeficiente de difusión efectivo como una función de la temperatura.

11. Se propone un modelo matemático, constituido por dos ecuaciones básicas (conservación de materia y energía) y las condiciones límites adecuadas, que reproduce las variaciones de humedad en el transcurso de la operación, tanto durante el periodo de velocidad de secado constante como durante el periodo de velocidad de secado decreciente.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) PIÑAGA, F. y LAFUENTE, B.; Agroquímica y Tecnología de Alimentos. 5/1, 99 (1965).
- (2) PIÑAGA, F. y LAFUENTE, B.; Agroquímica y Tecnología de Alimentos. 6/1, 113 (1966).
- (3) TAYLOR, A. A.; Food Technology. 536-539 (1961).
- (4) ROIG MUNTANER, A; y DIAZ PEÑA, M.; Química Física. Ed. Alhambra. Madrid (1975).
- (5) BENSON, S. W. y RICHARDSON, R. L.; J. Am. Chem. Soc. - 77, 2585 (1955).
- (6) BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H. y TELLER, E.; J. Am. Chem. Soc. 60, 309 (1938).
- (7) VAN ARSDEL, W. B. y COPLEY, M. J.; Food Dehydratation, Vol. 1. The Avi Pub. Co. Inc.; Westport-Connecticut - (1963).
- (8) JIMENEZ LOPEZ, G.; MARTIN MARTIN, A. y PEREDA MARIN, J.; Química e Industria, 21, 2 (1975).
- (9) MARTIN MARTIN, A.; y LOPEZ PEREZ, B.; Anales de Química. 70, 623 (1974).
- (10) HOUGUEN, O. A.; WATSON, K. M. y RAGATZ, R. A.; Principios de los Procesos Químicos. Ed. Reverté. Barcelona - (1965).
- (11) KNEULE, F.; El secado. Ed. Urmo. Bilbao (1966).

- (12) COULSON, J. M. y RICHARDSON, J. F.; Chemical Engineering. Vol. 3. Pergamon Press. Londres (1958).
- (13) KUPRIANOFF, J.; Fundamental Aspects of Dehydration of Foodstuffs. Soc. of Chem. Ind. Londres (1971).
- (14) HENDERSON, S. M.; Agr. Eng. Junio (1952).
- (15) HENDERSON, S. M. y PERRY, R.L.; Agricultural Process Engineering. John Willey. Nueva York (1955).
- (16) CRISTOFOL DE ALCARAZ, E.; MARTIN MARTIN, A. y PEREDA MARIN, J.; Método Manométrico para medidas de Humedades de Equilibrio. Grasas y Aceites 28, fascículo 6 (1977).
- (17) ROCKLAND, L. B.; Food Research, 22, 604 (1957).
- (18) MC ADAMS, W. H.; Transmisión de calor. 3ª edn. Mc Graw Hill. Mexico (1978).
- (19) JACOB, MAX; Heat Transfer. Vol. 1. Jon Wiley. Nueva York (1949).
- (20) KERN, D. Q.; Process Heat Transfer. Mc Graw Hill. Nueva York (1950).
- (21) VIAN, A. y OCON, J.; Elementos de Ingeniería Química. Ed. Aguilar. Madrid (1961).
- (22) BIRD, R. B.; ESTEWARD, W. E. y LIGHTFOOT, E.N.; Fenómenos de Transporte. Ed. Reverté. Barcelona (1978).

- (23) BENNETT, C. O. y MYER, J. E.; Transferencia de cantidad de movimiento, calor y materia. Ed. Reverté. Barcelona- (1979).
- (24) WELTY, J. R.; WICKS, C. E. y WILSON, R. E.; Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, John Wiley. - Londres (1969).
- (25) GAMSON, B. W.; THODOS, G. y HOUGUEN, O. A.; Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 39, 1 (1943).
- (26) WILKE, C. R. y HOUGUEN, O. A.; Trans. Am. Inst. Chem. - Engrs. 41, 445 (1945).
- (27) RANZ, W. E.; Chem. Eng. Prog. 48, 247 (1952).
- (28) PERRY, R. H. y CHILTON, C. H.; Chemicals Engineers - Handbook. 5^a ed. Mc Graw Hill. Nueva York (1973).
- (29) TREYBAL, R. E.; Operaciones con transferencia de masa. Ed. H. A. S. A. (1972).
- (30) WENTZEL, L. y WHITE, R. R.; Ind. Eng. Chem. 43, 1829 - (1951).
- (31) YOSHIDA, F.; Comunicación privada. Diciembre (1959). - Según Bird, Steward y Lightfoot en la cita nº (22) de esta misma relación bibliográfica.
- (32) FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CKUMP, C. W.; MAUS, L. y - ANDERSEN, L. B.; Principios de Operaciones Unitarias. - Ed. C. E. C. S. A. México (1972).

- (33) COULSON, J. M. y RICHARDSON, J. F.; Chemical Engineering. Vol 2. Pergamon Press. Londres (1955).
- (34) BRENNAN, BUTTERS, COWELL y LILLY; Las operaciones de la Ingeniería de los alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza (1970).
- (35) MC CABE, W. L. y SMITH, S. C.; Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Ed. Reverté. Barcelona (1970).
- (36) LONCIN, M.; Técnicas de la Ingeniería alimentaria. Ed. Dossat, S. A. Madrid (1965).
- (37) NONHEBEL, G. y MOSS, A. A. H.; El secado de sólidos en la Industria Química. Ed. Reverté. Barcelona (1979).
- (38) ROHSENOW, W. H. y CHOI, H.; Heat, Mass and Momentum Transfer. Prentice. Hall. Inc. Nueva Jersey (1961).
- (39) SHERWOOD, T. K. y PIGFORD, R. L.; Absorption and Extraction. Mc Graw Hill (1952).
- (40) CREMER, H. W. y DAVIES, T.; Chemical Engineering Practice. 6 (1958).
- (41) COLBURN, A. P. y DEEW, T. B.; Trans. A. I. Ch. E. 31, - 197-212 (1937).
- (42) SZEKELY, J. y THEMELLIS, N. J.; Rate Phenomena in process Metallurgy. John Wiley. Nueva York (1971).
- (43) TAECKER, R. G. y HOUGUEN, O. A.; Chem. Eng. Prog. 45, - 188 (1949).

- (44) BRADSHAW, R. D.; Am. Inst. Chem. Eng. 9, 590 (1963).
- (45) SHERWOOD, T. K.; Ind. Eng. Chem. 21, 12, 976 (1929).
- (46) SHERWOOD, T. K. y COMINGS, E. W.; Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 28, 118 (1932).
- (47) FISHER, E. A.; J. Soc. Chem. Ind. 54, 343 (1935). Tomada de la tesis doctoral de Ruiz Bevia, F. Universidad de Valencia (1968). Citada en esta relación con el nº (69).
- (48) SAMI SELIM, M. y SEAGRAVE, R. C.; Ind. Eng. Chem. Fundam. 12, nº 1 (1973).
- (49) CEAGLSKE, N. H. y HOUGUEN, O. A.; Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 33, 283 (1937).
- (50) LYKOW, A. W.; Zhur. Priklad. Khim. 8, 1354 (1935). Tomada de la cita nº (7) de esta relación bibliográfica.
- (51) GORLING, P.; Fundamentals Aspects of the Dehydratation of Foodstuffs. Society of Chemical. Industry. Londres (1958).
- (52) MARSHALL, W. R. y FRIEDMAN, S. J.; Chem. Eng. Progr. 45, 482-573 (1949).
- (53) FITO, P. J. y SANZ, F. J.; Agroquímica y tecnología de alimentos. 151, 121 (1975).
- (54) CEAGLSKE, N. H. y KIESLING, F. C.; Trans. A. I. Ch. E. 36, 211 (1940).

- (55) COMINGS, E. W. y SHERWOOD, T. K.; Ind. Eng. Chem. 26, -
1096 (1934).
- (56) LEBEDEV, P. D.; Int. J. Heat and Mass Transfer. 1, -
294-301 (1961).
- (57) KRISHER, O. y MAHLER, K.; Chemie Ing. Techn. 2, 31 -
(1959).
- (58) BERGER, D. y PEI, D. C. T.; Int. J. Heat and Mass Trans-
fer. 16, 293 (1973).
- (59) JASON, A. C.; Fundamentals Aspects of the Dehydratation
of Foodstuffs. Society of Chemical Industry. Londres -
(1958).
- (60) SARAVACOS, G. D. y CHARM, S. E.; Food. Technol. 16-1, -
78 (1972).
- (61) DE VRIES, D. A.; Transactions American Geophysical -
Unión. 89, 5, 909 (1958).
- (62) NAKAMURA, M. y SUGIYAMA, S.; Japanese Research 1, 2 -
(Abril-Junio). (1972).
- (63) SHERWOOD, T. K.; Trans. A. I. Ch. E. 27, 190 (1931).
- (64) SHERWOOD, T. K.; Ind. Eng. Chem. 22, 132 (1930).
- (65) SHERWOOD, T. K.; Ind. Eng. Chem. 24, 307 (1932).
- (66) GUILLILAND, E. R.; Ind. Eng. Chem. 30, 506 (1938)
- (67) ESCARDINO, A.; RUIZ, F. y MIRA, F.; Agroquímica y Tecno-
logía de alimentos. 11, 4 (1971).

- (68) ESCARDINO, A.; RUIZ, F. y GALDON, J. V.; Anales de Química 64, 363 (1969).
- (69) RUIZ BEVIA, F.; Estudio del secado de arroz cáscara con aire caliente. Tesis doctoral. Valencia (1968).
- (70) CHIRIFE, J.; Agroquímica y Tecnología de Alimentos. 11, 3, 427 (1971).
- (71) BIMBENET, J. J.; DEPEYRE, D. y LE MAGUER, M.; Chemie et Industrie. Genie Chimique. 104, 15, 1859 (1971).
- (72) LEBEDEV, P. D.; Int. J. Heat and Mass Transfer. 2, 294 (1960).
- (73) KUMAR, I. J. y NARANG, H. N.; Int. J. Heat and Mass Transfer. 9, 95 (1966).
- (74) KUMAR, I. J. y NARANG, H. N.; Int. J. Heat and Mass Transfer. 10, 1095 (1967).
- (75) BILGIN, K.; RALPH, E. P. y TEMEL, C.; Canadian J. Chem. Eng. 53, Febrero (1975).
- (76) NOVAK, L. T. y COULMAN, G. A.; Canadian J. Chem. Vol 53 Febrero (1975).
- (77) RALPH, E. P.; DALE, A. M. y MOHINDER, S. A.; Chem. Eng. Science. 26, 389 (1971).
- (78) EVANS, W. D. y CRISTCHFIELD, C. L.; Research Nat. Bur. Standars. 11, 147 (1933).

- (79) ULTON, J. A. y GUIBOL, A.; Am. Technol. Agric. 16, 1, 5 (1967).
- (80) LABUZA, T. P.; Ed. Technol. 22, 263 (1968).
- (81) JIMENEZ ALCAIDE, L. y ARRAIZ CUESTA, L.; Ingeniería Química. 134, 147 (1980).
- (82) SMITH, J. H.; Ingeniería de la Cinética Química. Ed. C. E. C. S. A. México (1974).
- (83) EMMETT, P. H. y BRUNAUER, S.; J. Am. Chem. Soc. 59, 1553 (1937).
- (84) ESCARDINO, A.; MONTON, J. y FONT, R.; Agroquímica y Tecnología de Alimentos. 19, (1), 61. (19).
- (85) WALAS, S. M.; Cinética de las Reacciones Químicas. Ed. Aguilar. Madrid (1965).
- (86) HIMMELBLAU, D. M. y BISCHOFF, K. B.; Análisis de procesos y simulación. Ed. Reverté. Barcelona (1976).
- (87) JOST, W.; Diffusion in solids, liquid and gases. Academic Press Ind. Nueva York (1954).
- (88) JENSON, V. y JEFFREYS, G. V.; Métodos Matemáticos en Ingeniería Química. Ed. Alhambra, S. A. Madrid (1969).
- (89) KEEY, R. B.; Drying: Principles and Practice. Ed. Pergamon Press. Oxford (1975).
- (90) CARSLAW, H. S. and JAEGER, J. C. Conduction of Heat in Solids. Ed. Oxford University Press (1959).

- (91) LABUZA, T. P., TANNENBAUM, S. R. y KAREL, M. Food Technology 24, nº 5 (1970).
- (92) CAURIE, M. Journal Food Technology 5, 301 (1970).
- (93) CAURIE, M. Journal Food Technology 6, 85 (1970).
- (94) CAURIE, M. Journal Food Technology 6, 193 (1971).
- (95) SALWIN, H. Food Technology 13, 594 (1959).
- (96) SIMON, P. y MEUNIER, R. Microbiologie industrielle et Génie biochimique. Mason et Cie. París (1970).
- (97) GARCIA SANTESMASES, J. Física General. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid (1973).
- (98) WESTPHAL, W. H. Prácticas de Física. Ed. Labor S.A. Barcelona (1965).
- (99) OCON GARCIA, J. y TOJO BARREIRO, G. Problemas de Ingeniería Química. Vol. I. Ed. Aguilar Madrid (1968).
- (100) BLAS, L. Agenda del Químico. Ed. Aguilar Madrid (1963).

NOMENCLATURA

NOMENCLATURA

- a = superficie interfacial por unidad de volumen (m^2/m^3)
 A_p = área de una partícula (m^2)
 c = concentración de agua ($mol-Kg/m^3$)
 C_p = calor específico a presión constante del gas ($Kcal/Kg.^{\circ}C$)
 C_s = calor húmedo del aire ($Kcal/Kg.^{\circ}C$)
 D_e = coeficiente de difusión efectivo (m^2/h)
 D_G = coeficiente de difusión del soluto (m^2/h)
 D_o = factor preexponencial de la ecuación 6.46 (m^2/h)
 D_p = diámetro de las esferas (m)
 E = energía de activación aparente ($Kcal/mol-Kg$)
 G = velocidad másica del aire ($Kg/h.m^2$)
 H = humedad del aire (Kg agua/ Kg s.s.)
 h = coeficiente individual de transferencia de calor ($Kcal/h.m^2.^{\circ}C$)
 K = constante de la ecuación de B.E.T.
 k_g = coeficiente individual de transferencia de materia ($mol-Kg/h.m^2.atm$)
 K_s = conductividad térmica del sólido húmedo ($Kcal/h.m.^{\circ}C$)
 M_a = peso molecular del aire ($Kg/mol-Kg$)
 P = presión total (atm)
 P_{ai}, P_a = presión parcial de vapor de agua en la interfase y presión másica media del vapor de agua en el seno del gas (atm)
 R = constante de los gases ($atm.m^3/mol-Kg.^{\circ}K$)
 R_e = módulo de Reynolds = $D_p \cdot G / \mu$
 R_{loc} = velocidad local de evaporación (m/h)
 S_c = módulo de Schmidt = $\mu / \rho D_p$
 T = temperatura absoluta ($^{\circ}K$)
 t_a = temperatura del aire de secado ($^{\circ}C$)
 t_{ai} = temperatura del aire en la interfase ($^{\circ}C$)
 t_s = temperatura de la esfera ($^{\circ}C$)
 X = humedad del sólido (Kg agua/ Kg s.s.)
 X_e = humedad de equilibrio (Kg agua/ Kg s.s.)
 \bar{X} = humedad media del sólido (Kg agua/ Kg s.s.)
 α = difusividad térmica (m^2/h)
 φ = humedad relativa (tanto por uno)

- ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)
- ρ_s = densidad del material seco ($\text{Kg material}/\text{m}^3$ lecho material)
- μ = viscosidad del fluido ($\text{Kg}/\text{h.m}$)
- λ = calor latente de vaporización del agua (Kcal/Kg)
- θ = tiempo de secado (h)
- π = presión total a la que circula el aire por el secadero (atm)