

U N I V E R S I D A D N A C I O N A L D E L A P L A T A

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

COEFICIENTES EN EL SECADO POR DIFUSIÓN, DE ARCILLAS

Tesis presentada para optar al  
grado de Doctor en Química por  
Juan José Valle

L A P L A T A

1 9 4 9

A MIS PADRES

A MI NOVIA

PADRINO DE TESIS

Prof. Dr. Jorge J. Ronco

I N D I C E

<u>Secado de sólidos</u>	1
Humedad de equilibrio	1
Agua libre y agua ligada	2
Clasificación de los mecanismos de secado	3
<u>Mecanismo de la operación de secado</u>	4
Período de velocidad constante	4
Período de velocidad decreciente	6
<u>Mecanismo de la evaporación en el secado de arcillas</u>	9
Absorción por tubos capilares	10
Evaporación de acuerdo a la tensión de vapor	11
Evaporación de acuerdo a la temperatura	12
Evaporación de acuerdo al aire ambiente	12
Evaporación de acuerdo a la plasticidad	13
<u>Ecuaciones que rigen el secado</u>	13
Ecuaciones para el período de velocidad constante	13
Ecuaciones para el período de velocidad decreciente	18
Secado bajo condiciones variables	20
Dificultades del secado	22
<u>Estudio experimental</u>	24
<u>Características físicas y químicas de las tierras</u> <u>estudiadas</u>	25
<u>Determinación de las curvas de Humedad de equilibrio</u>	27
Método empleado	27
Ejemplo de los cálculos efectuados	28
Tablas de valores	30
Curvas de humedad de equilibrio	
<u>Diseño y puesta en marcha del tunel de secado</u>	33
El compartimiento	33
La corriente de aire	34
El sistema de calentamiento	34
La humidificación del aire	34
El control de la temperatura	34

El control de la humedad	34
El control de peso	35
La velocidad del aire	35
Recirculación del aire	35
<u>Realización de las corridas</u>	36
Preparación de la muestra	36
Puesta en regimen del tunel	36
Velocidad del aire	36
Temperatura del aire	36
Humedad del aire	37
Coloocación de la muestra	37
<u>Ejemplo de los cálculos efectuados</u>	37
Velocidad de secado	38
Humedad total	38
Tablas de valores	39
Curvas de velocidad de secado	
<u>Cálculo del coeficiente de película <math>K_G</math></u>	51
Cálculo de la cantidad de agua evaporada por hora	51
Cálculo de la diferencia de humedad ( $H_S - H_g$ )	51
Cálculo de $K_G$	52
Tablas de valores	53
El coeficiente de película $K_G$ , en la evaporación de agua	54
Comparación con los resultados de otros investiga- dores	56
Conclusiones	58
Bibliografía	60

-----

## INTRODUCCIÓN

El cálculo en problemas de secado no tiene un método general, uniforme y sencillo para los diferentes casos prácticos.

Se ha pensado que basado en similitud con los procesos de difusión y en base a sus conceptos generales, se podría llegar a encontrar dicho método.

Este trabajo es una parte de los diversos estudios que pueden conducir al método buscado.

Como parte de esa investigación, se ha estudiado el comportamiento del secado de arcillas, con el cálculo de coeficientes comparativamente con dicho proceso en superficies de agua libre. Pero considerando como una parte fundamental el proyecto, instalación y puesta a punto del tunel, con la obtención del orden de magnitudes en el trabajo como base fundamental del cálculo de las fuerzas de empuje en el proceso, se determinaron las curvas de equilibrio de las arcillas estudiadas.

Este trabajo ha sido dirigido por el Dr. Jorge Ronco, profesor de Termodinámica y Tecnología del Calor de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de La Plata y llevado a cabo en el Laboratorio Tecnológico de la citada casa de estudio.

-----

## SECADO DE SÓLIDOS

Se designa con el nombre de secado a la operación consistente en la remoción del agua de un sólido con el cual está mezclada, distinguiéndose de la evaporación, entre otras razones por la relativamente pequeña cantidad de agua que se quita en esta operación. El agua abandona el sólido por evaporación, requiriéndose que el material reciba suficiente calor para efectuar la transformación del líquido en vapor, dependiendo de la naturaleza y condiciones del material que la evaporación ocurra ya sea dentro o sobre la superficie de la muestra. El calor puede ser transferido al material ya sea por conducción, radiación o convección o generado eléctricamente en el propio material(1).

## HUMEDAD DE EQUILIBRIO

Para quitar el vapor producido por el suministro de calor es necesario una corriente de aire de velocidad, temperatura y humedad controladas, de tal modo que no perjudiquen el producto y que se prolongue el tiempo necesario hasta llegar a obtener peso constante. Muchos sólidos retienen una cierta cantidad de humedad estando en contacto con aire no saturado; esta cantidad de humedad retenida es una función definida de la temperatura y humedad del sólido y se llama humedad de equilibrio.

Un material dado, colocado en un ambiente de determinada humedad y temperatura, adquiere un cierto porcentaje de humedad que representa un verdadero equilibrio con el aire y que será constante mientras la humedad y temperatura del aire circundante se mantengan en las mismas condiciones. Si hacemos variar como sea la humedad del aire, el material cambiará su contenido de humedad de equilibrio, secándose o humedeciéndose, según haya disminuido o aumentado la humedad del aire, hasta alcanzar un nuevo valor que luego se mantendrá constante.

Para aire de humedad cero, el contenido de humedad de equilibrio de todos los materiales es cero (2).

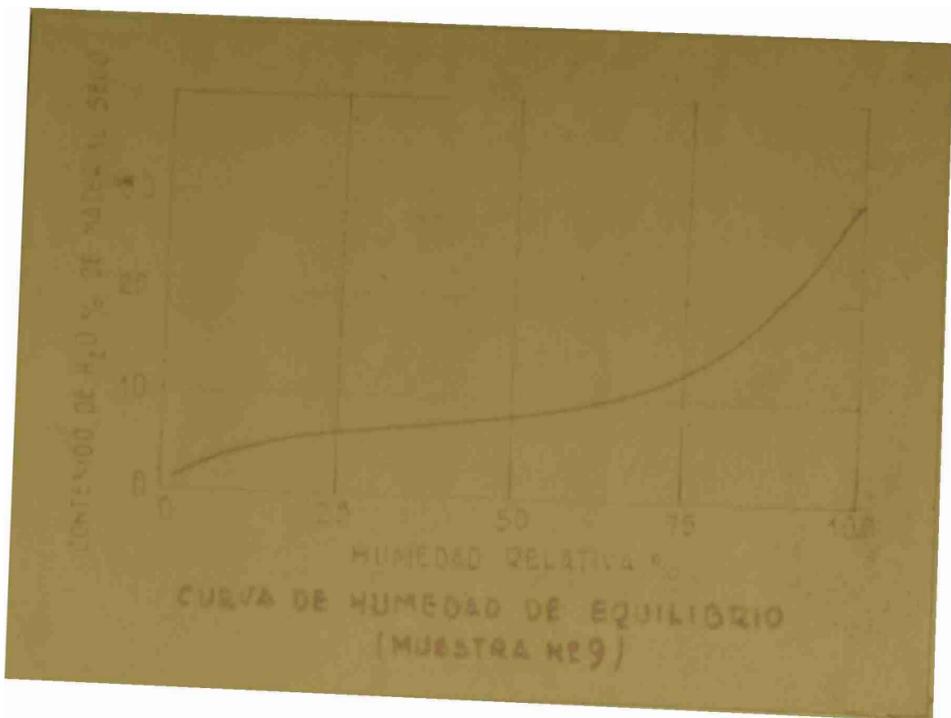
El contenido total de humedad, menos la humedad de equilibrio, representa la humedad que podrá evaporarse por el secado con un aire determinado. Esta diferencia se llama humedad libre. La humedad de equilibrio varía grandemente con la humedad del aire, mientras que la temperatura la modifica muy poco; por eso conviene representar el contenido de humedad de equilibrio en función de la humedad relativa (3), (4).

Se puede obtener dos tipos distintos de humedad de equilibrio dependiendo de si éste es alcanzado por absorción o desorción. El valor de desorción es más alto que el otro y es el único interesante en el secado. El tiempo requerido para el acondicionamiento de la muestra depende del tamaño de la misma y temperatura y circulación del aire.

O. A. Hougen (5) recomienda un método experimental, que aunque un poco largo, es de resultados muy exactos. Determina la humedad de equilibrio por desorción, suspendiendo sustancias húmedas en un ambiente de temperatura y humedad conocidos hasta que sea alcanzado peso constante. Obtiene ambientes de humedad constante y controlada colocando las muestras en un recipiente conteniendo reactivos químicos de variadas concentraciones y usando volúmenes lo suficientemente grandes como para que la humedad desprendida de la muestra no hagan variar sensiblemente el título de las soluciones. Existe un método, de Vincent y Bristol (6) que por lo rápido y cómodo ha sido usado en el presente trabajo y controlado con el anterior, dando resultados satisfactorios.

#### AGUA LIBRE Y AGUA LIGADA

La intersección de las curvas de humedad de equilibrio con el eje para 100% de humedad relativa es la menor humedad que el material puede contener, ejerciendo una tensión de vapor en este punto, igual a la que obraría ordinariamente el agua a la misma temperatura. Aunque el material tuviera una mayor cantidad de agua no podría ejercer una tensión mayor. Por lo tanto



podemos distinguir dos nuevos tipos de agua contenida por el material: el agua límite o ligada, que es la humedad de equilibrio que **poseería** el material colocado en una atmósfera de aire saturado (en la figura adjunta sería de 3.5 % el agua límite) y el agua no ligada o agua libre, que es el contenido de agua total menos el contenido de agua ligada (7).

El agua ligada y el agua libre dependen de las propiedades del material ~~entre~~ sí, mientras que la distinción entre agua libre y de equilibrio dependen de las condiciones particulares elegidas para la operación de secado

#### CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE SECADO (8)

I.- Evaporación en la superficie del sólido; la resistencia a la difusión interna del líquido es más pequeña comparada con la resistencia a la remoción del vapor en la superficie.

II.- Evaporación en la superficie del sólido; la resistencia a la difusión interna del líquido es mayor comparada con la resistencia a la remoción del vapor de la superficie,

III.- La evaporación se produce en el interior del sólido; la resistencia interna a la difusión del líquido, es mayor comparada con la resistencia total a la remoción del vapor.

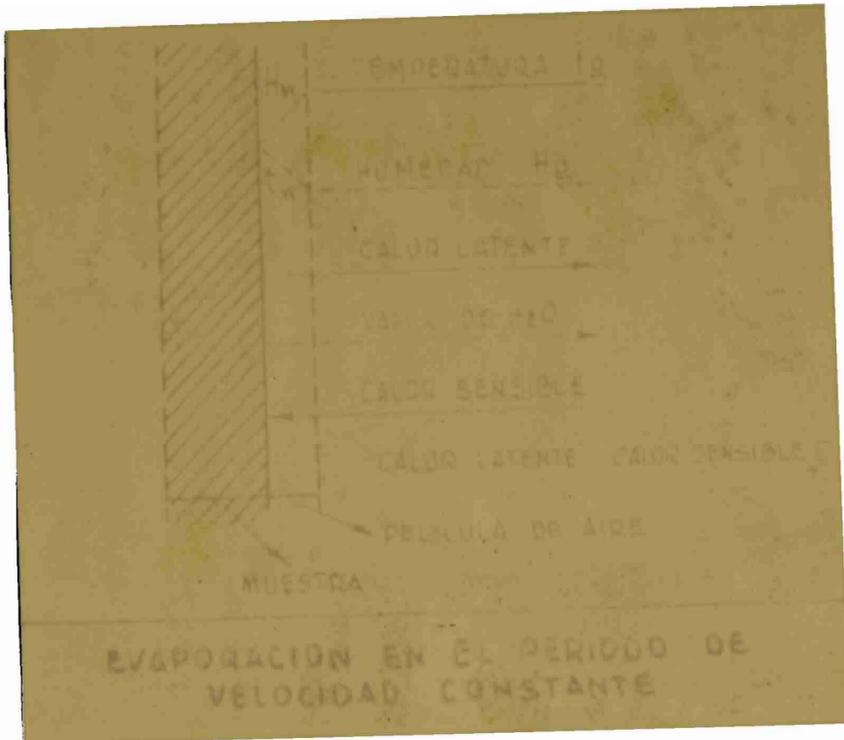
IV.- La evaporación se produce en el interior del sólido; la resistencia a la difusión interna del líquido es más pequeña comparada con la resistencia total a la remoción de vapor.

Esta clasificación, como de su simple lectura se des-

prende, se basa en el mecanismo por el cual el agua atraviesa el material desde su interior a la superficie del mismo.

MECANISMO DE LA OPERACIÓN DE SECADO. PERÍODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Al ser colocada una muestra de material húmedo en contacto con el aire, el agua se evapora de su superficie y se difunde como vapor a través de la película de aire que la cubre.



La concentración de humedad en la superficie ha disminuido, estableciéndose una diferencia de concentración entre ésta y el interior de la misma, haciendo que la humedad se mueva hacia la primera, ya sea por difusión (9) o capilaridad (10).

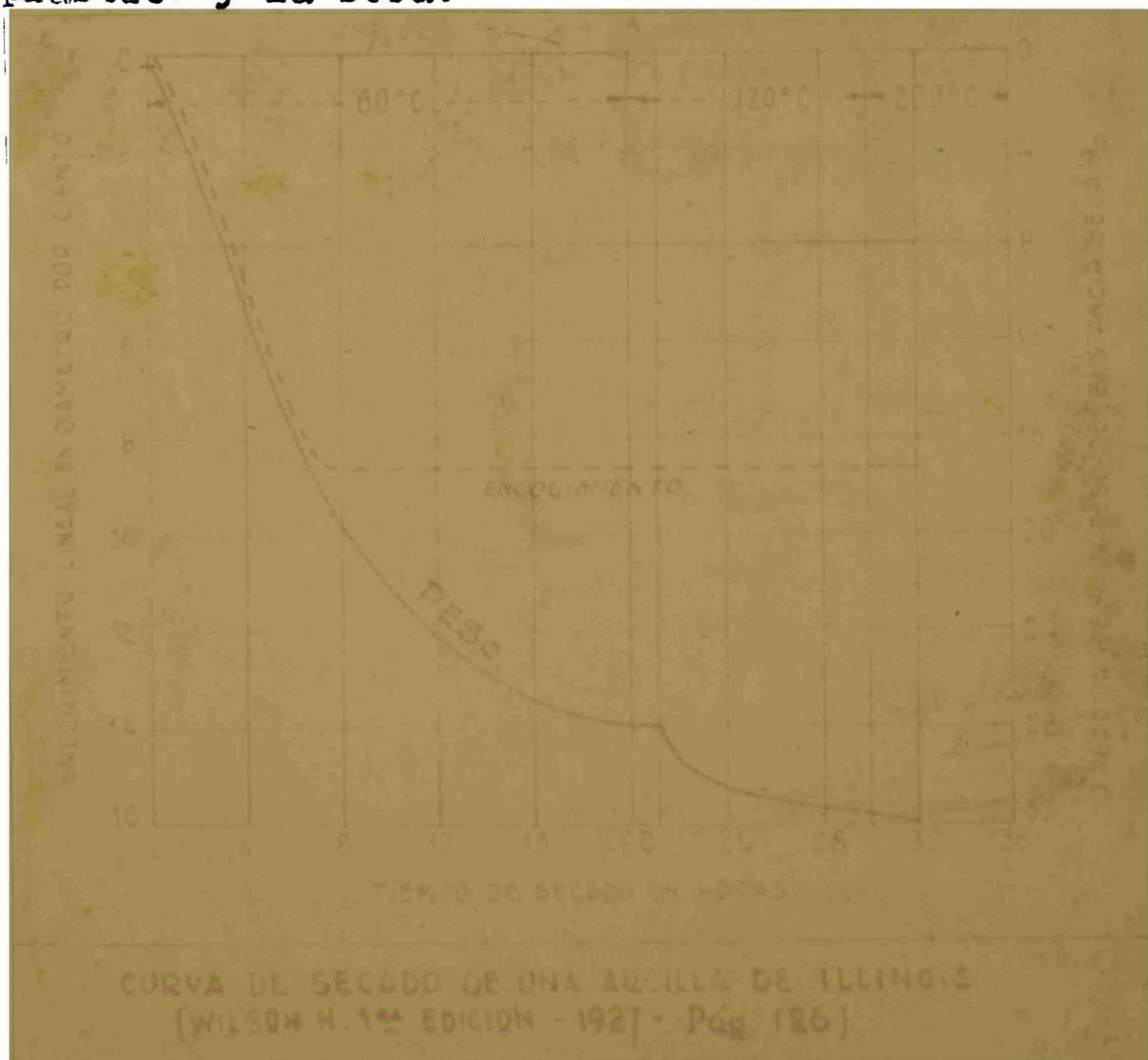
La humedad se dirige hacia la superficie, tan rápido como se pueda evaporar ella. La velocidad de secado es independiente de la humedad contenida en la capa de material y es constante, siempre que la velocidad, temperatura y humedad del aire no varíen. Durante este período en que el calor sensible es igual al calor latente, se puede controlar la velocidad de secado por el valor de la evaporación por entre la película de aire, siendo dependiente por lo tanto, de la diferencia de humedad a través de la película de aire y el espesor de la misma (11). Esta etapa se llama período de velocidad constante y es la fase inicial del secado de sólidos muy húmedos, siendo similar en su comportamiento a la evaporación de agua de una superficie libre de la misma ( $H_v$ ) (8), (12). Durante ella, la temperatura del sólido tiende a igualar la temperatura a bulbo húmedo ( $t_w$ ) del aire utilizado.

Cuando el sólido que se pone en contacto con el aire está a una temperatura superior o inferior a la temperatura a

bulbo húmedo del aire, el primer proceso que tiene lugar es un enfriamiento o calentamiento del material para tratar de igualar dicha temperatura; con todo, el material se mantiene ligeramente por sobre la temperatura a bulbo húmedo del aire, por recepción de calor irradiado por los sólidos circundantes más calientes y por transferencia de calor sensible por parte de los que están en contacto con él (13).

Durante este período la temperatura del material, una vez alcanzado el equilibrio se mantiene constante.

Este período, si es referido al secado de arcillas, se llama también de encogimiento (14) y el agua quitada durante él (agua de encogimiento) es igual al volumen perdido durante el período de secado o a la diferencia entre los volúmenes de arcilla plástica y la seca.



A medida que el secado progresa, las películas capilares disminuyen su espesor, los granes se desmembran por la tensión superficial y la masa, como un todo, se reduce de volumen. Esto continúa hasta que las partículas de arcilla están en contacto produciendo el volumen final, que permanecerá constante.

El cambio de la velocidad entre el secado a superfi -

oie libre de líquido (velocidad constante) y el secado a velocidad decreciente no es necesariamente coincidente con el punto de remoción final de agua de encogimiento. Las dos serán cortiguas en las arcillas de poros abiertos, menos en las arcillas plásticas con poca agua de encogimiento y mayormente separadas en las altamente coloidales, con elevado contenido de agua de encogimiento y poro pequeño.

Haciendo un análisis de la deformación que se produce en el secado de un cuerpo plano se comprueba que las condiciones óptimas de secado deben ser tales que las fuerzas interiores en todo momento deben llegar al límite de la plasticidad (no en exceso); entonces, al comienzo la velocidad de secado puede ser baja, por causa de los valores muy pequeños del límite de plasticidad y así, cuando el contenido de humedad del material disminuye, el módulo de elasticidad aumentará hasta que todas las condiciones lleguen al equilibrio; las fuerzas interiores aumentarán hasta llegar al límite de plasticidad, pero el aumento de estas últimas ocurre más fuertemente que el aumento del módulo de elasticidad. Así que el contenido de humedad baje, entonces la velocidad de secado puede ser aumentada continuamente (15).

Todo ello significa que para evitar los efectos perniciosos del encogimiento en los productos cerámicos, es necesario que al comienzo del secado, es decir cuando hay mucha agua libre, la velocidad sea pequeña, para que, no excediendo las fuerzas interiores el límite de elasticidad se eviten las torceduras y quebraduras.

#### PERÍODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

Cuando la humedad contenida comienza a bajar por debajo de un cierto valor, conocido como contenido crítico de humedad, la humedad no puede subir tan rápidamente a la superficie como se vaporizará de la misma; la velocidad de evaporación decrece, comenzando entonces el período de velocidad decreciente

Puesto que la velocidad de evaporación es ahora más lenta que antes, el consumo de calor también decrece, pero la velocidad de calentamiento es momentáneamente invariable. El calor sobrante, por lo tanto, debe ser absorbido por el material, elevando la temperatura de la superficie o también del interior si el material es lo suficientemente poroso.

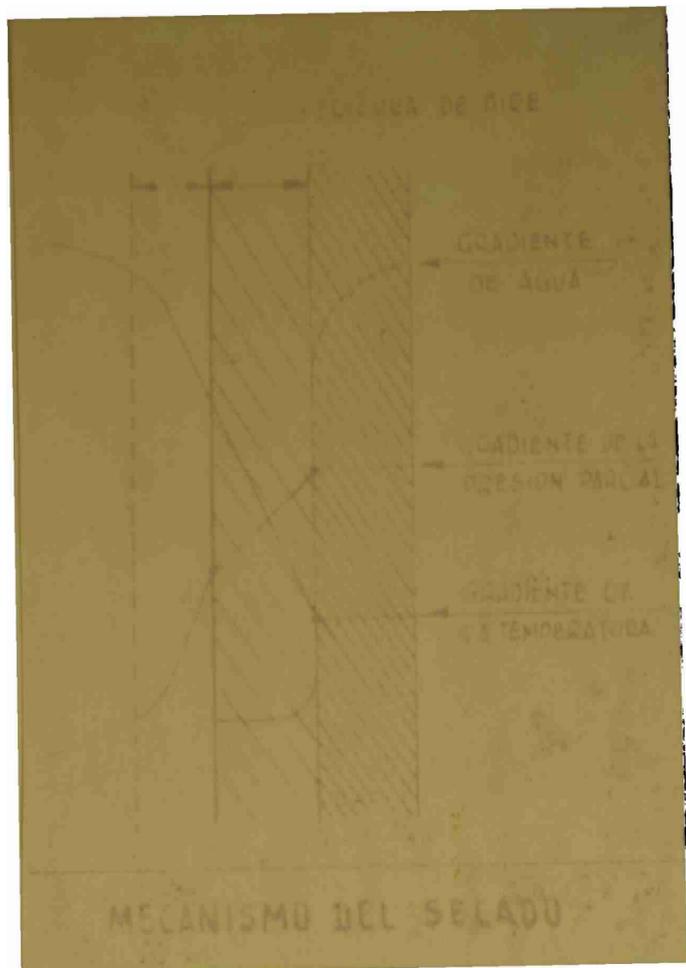
Depende del espesor de la muestra y de otros factores tales como la velocidad de evaporación, durante el período de velocidad constante y la facilidad con que el agua en estado líquido fluye del interior de la muestra, que la curva en el período de velocidad decreciente tome distintas formas.



Representado gráficamente la velocidad de evaporación por unidad de superficie con respecto al contenido total de humedad para el material seco, la curva puede ser cóncava, convexa o recta. En todos los casos, se aproxima al cero de la ordenada correspondiente al punto que representa la humedad de equilibrio del material con el aire utilizado en la operación (16).

En la figura adjunta se muestran los gradientes de temperatura, presión parcial y concentración de agua. El plano de vaporización se ha corrido de la superficie al interior del material a una distancia  $L$ . El gradiente de la concentración de agua es máximo en el centro de la línea y decrece algo a través de la capa de material húmedo; este decrecimiento es muy rápido en el plano de vaporización y es prácticamente cero en la superficie seca.

El calor suministrado al plano de vaporización se dirige a él por medio del gradiente de temperatura  $t_a - t_i - t_z$ . La parte  $t_a - t_i$  es la fuerza de empuje para que el calor pase a través de la película de aire y  $t_i - t_z$  para que atraviese el lecho seco. Es necesario también un gradiente de presión parcial que actúe como fuerza de empuje, para que el vapor formado en el plano de vaporización pueda difundir hasta la co-

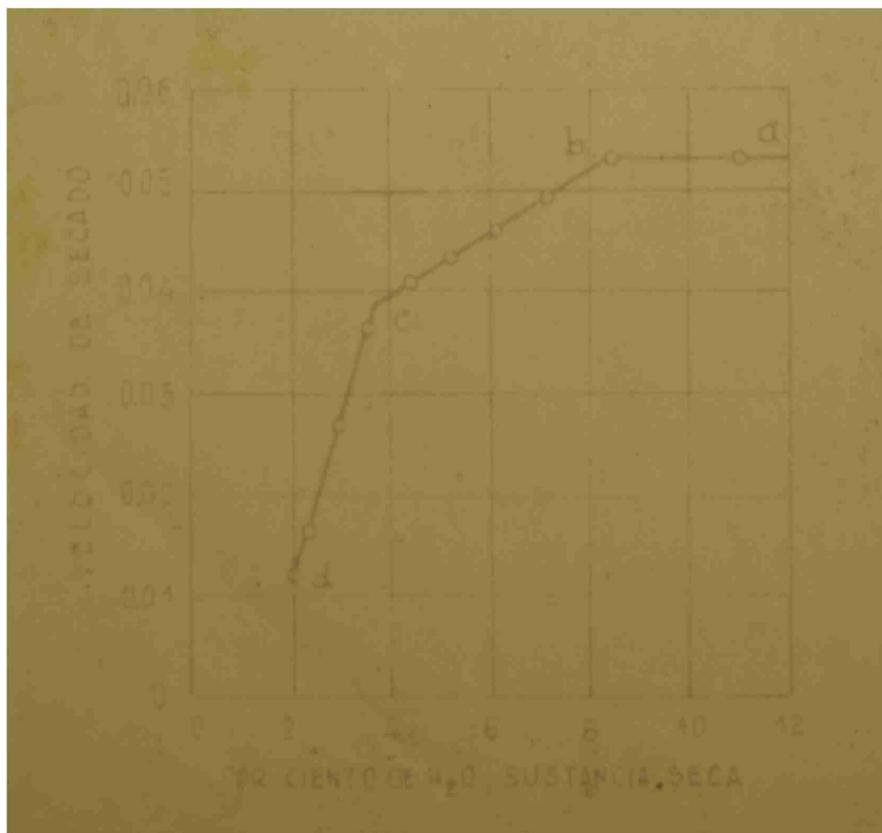


rricente de aire.

En la figura  $p_a - p_i$  representa la fuerza de empuje para que el vapor de agua difunda a través del lecho de material seco y  $p_i - p_a$  el correspondiente para vencer la resistencia de la película de aire (17).

Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes (18), (19). Una primera, en la cual hay una disminución de la superficie húmeda, haciéndose la velocidad de secado proporcional a la fracción de superficie húmeda. Esta velocidad puede ser considerada groseramente proporcional ~~al~~

~~promedio~~ al promedio de la concentración líquida del sólido.



Representando la velocidad de secado en función del promedio de concentración de humedad, este período puede representarse por la recta descendente b-e. La segunda parte del período de

velocidad decreciente es aquella durante la cual el líquido se evapora de la superficie tan rápidamente como pueda llegar a ella desde el interior del sólido.

Es decir que en esta etapa la difusión controla la velocidad de secado. Durante esta parte del período de velocidad decreciente la concentración de humedad en la superficie permanece constante en el valor de equilibrio.

Algunas comprobaciones efectuadas por Sherwood (20) para la segunda etapa del período de velocidad decreciente son: que la concentración de líquido es uniforme en todas las partes del sólido en el comienzo de la etapa; que la evaporación se efectúa en la superficie y que la resistencia superficial a la difusión del vapor puede considerarse despreciable.

#### MECANISMO DE LA EVAPORACIÓN EN EL SECADO DE ARCILLAS

El agua a evaporarse se presenta bajo tres aspectos(21)

- I.- Los huecos entre las partículas están llenos de agua.
- II.- Las partículas están recubiertas de una película de agua.
- III.- La superficie total de las partículas esponjosas adsorben agua dentro de los canales capilares.

La evaporación del agua se hace en tres fases:

- I.- Aquella en la cual la pasta disminuye de volumen en proporción al agua eliminada.
- II.- Aquella en la que comienzan formarse canales al mismo tiempo que la pasta continúa contrayéndose.
- III.- Aquella en la que el volumen deja de disminuir y los canales que se producen son proporcionales al agua eliminada.

Así, una pieza conteniendo 75 % de arcilla y 25 % de agua en peso, correspondiente a 55,1 % de arcilla y 44,9 % de agua en volumen, ha sufrido por medio del secado un encogimiento lineal de 8 %; su volumen se ha reducido a 77,9 %, componiéndose

dose de 55,2 % de arcilla y de 22,8 % de espacios vacíos (21).

Siendo el agua de los poros la que se evacúa primero de esta evaporación resulta un acercamiento de las partículas y por consiguiente, un retraimiento proporcional al agua eliminada; las partículas se han acercado, pero el aire no ha entrado todavía en el interior del producto. Durante la segunda fase, este encogimiento continúa y el aire entra en el producto reemplazando una parte del agua evacuada en los lugares donde el encogimiento no ha cerrado los espacios vacíos. El agua evacuada es aquella que llenaba los poros.. Es durante la tercera etapa que se evacúa el agua de las partículas esponjosas, el retraimiento es insensible, pues los poros se agrandan después que los canales capilares se han vaciado.

#### ADSORCIÓN POR LOS TUBOS CAPILARES

Puesto que la tensión máxima de vapor  $p_w$  es inferior dentro de un tubo capilar a la normal, como se prueba experimentalmente por la mayor ascensión de la columna líquida de un tubo capilar sobre el nivel del líquido en el cual se ha introducido; si nosotros colocamos un tubo capilar dentro de un medio saturado a la presión  $p_s$ , habrá adsorción dentro del tubo bajo la presión  $p_s - p_w$ . Por consiguiente, habrá adsorción en una atmósfera con una tensión de vapor superior a  $p_w$  e inversamente, habrá evaporación si la tensión es inferior a  $p_w$ . Y si el tubo está colocado en un ambiente donde la tensión  $p_w = p_s$  habrá equilibrio, es decir ni adsorción ni evaporación.

Estas constataciones hechas en tubos capilares, también se hacen en los productos cerámicos, que contienen una yuxtaposición de una infinidad de tubos capilares de diámetros muy pequeños, pero de longitudes variables y de direcciones distintas, sin comunicación directa necesaria entre ellos, ya que sus posiciones iniciales son luego transformadas por presión

### EVAPORACIÓN DE ACUERDO A LA TENSIÓN DE VAPOR

Las moléculas de un líquido están en estado de vibración, cuya intensidad varía con la temperatura. Las moléculas en vibración de la superficie de un líquido se escapan en forma de vapor. La tensión de vapor de un líquido varía directamente con la temperatura y el porcentaje de evaporación varía directamente con la diferencia entre la presión del medio ambiente y del líquido (21):

$$\frac{dw}{d\phi} = k (p_w - p_g) A$$

donde:

$dw/d\phi$ : velocidad de evaporación

$p_w$ : tensión de vapor del líquido

$p_g$ : tensión de vapor en el aire

$k$ : constante para la sustancia

$A$ : superficie libre del líquido

Una sustancia higroscópica, colocada en una atmósfera de humedad constante, tomará o perderá humedad, de acuerdo a la relación que existe entre la presión inicial de su vapor y la de la atmósfera. Si la evaporación es demasiado viva, el secado es rápido en la superficie y lento en el interior; se produce el secado de la superficie mientras que el centro está todavía húmedo; de ello provienen las rajaduras.

El aire se carga de vapor de agua, debiendo por lo tanto ser renovado. El pasaje de agua al estado de vapor absorbe calor, así que se produce un enfriamiento, lo que ocasiona una disminución de la tensión de vapor de agua. A medida que la saturación disminuye, la tensión de vapor de agua decrece.

El gran peligro del secado reside en la velocidad. Cuando la velocidad crece en la superficie, la difusión debe aumentar. La superficie seca se contrae y fuertes depresiones se provocan en el interior. Es en este momento que se producen las quebraduras y las roturas de los productos y es hacia el final del secado que la tendencia al quebramiento es más pronunciada.

La presencia de aire dentro de los productos es nociva porque el aire corta las corrientes capilares y aísla el agua que no puede subir. El aire aprisionado, también se dilata y hace explotar el producto (2). Este es un argumento en favor de las máquinas para desaerear las tierras antes de su utilización en cerámico.

#### LA EVAPORACIÓN DE ACUERDO A LA TEMPERATURA

El desplazamiento de las moléculas de vapor de la superficie de un líquido ocasiona un gasto de energía bajo la forma de vapor, haciendo disminuir la temperatura. La tensión de vapor del líquido caerá por debajo de la presión del medio ambiente y la evaporación cesará a menos que se suministre calor. Suministrar calor al material y evacuar el vapor producido es por consiguiente esencial para una evaporación continua.

Si durante el transcurso del secado se posa una mano sobre el producto, se notará que está frío. Este enfriamiento es debido a la evaporación. Las cantidades de calor necesaria para el secado de un determinado producto varía con los tipos de secadores. El secado a temperaturas elevadas es en ciertos casos económicamente ventajoso, pues no requiere más que la cantidad extra de calor necesario para elevar la temperatura de los productos y en cambio, el calor de vaporización del agua es más bajo.

#### LA EVAPORACIÓN DE ACUERDO AL AIRE AMBIENTE

Después que la humedad ha sido llevada a la superficie y evaporada, la velocidad de secado es mantenida por la corriente de aire. Para un aporte constante de calor a la superficie libre de un líquido, la velocidad de evaporación varía en razón directa con la velocidad del aire, cuando ella es superior a 90 m por minuto. Si la velocidad del aire es inferior a este valor, la difusión del vapor en la superficie es imperfecta; no es regular.

La evaporación aumenta en un porcentaje constante por cada aumento de 70 m por minuto en la velocidad del aire. El porcentaje de evaporación en la superficie, cuando el aire es perpendicular a la superficie es aproximadamente el doble que si la corriente de aire fuera paralela (23), (24).

El secado es independiente de la presión del aire exterior y no depende más que del poder absorbente del mismo, es decir, de su humedad relativa. Al fin del secado, la presión en el interior de los capilares aumenta; cuando iguala la presión del aire ambiente, el secado termina.

El aire debe estar caliente y seco para que el secado sea activo. La cantidad de agua evaporada se hace el doble, cuando la temperatura pasa de 40°C a 60°C ó de 30°C a 40°C. La disminución de la humedad relativa tiene la misma importancia. La cantidad de agua evaporada es el doble cuando la humedad relativa baja de 80 a 60 % (25).

#### LA EVAPORACIÓN DE ACUERDO A LA PLASTICIDAD

Todavía no hay ninguna ley que determine el encogimiento en función de la velocidad de secado. El retraimiento en volumen es igual al triple del lineal y el superficial, el doble del lineal.

El encogimiento lineal (a), calculado a partir del encogimiento en volumen (b), determinado experimentalmente, está dado por la fórmula de Westman (25):

$$a = 100 \left( \sqrt[3]{\frac{b}{100}} + 1 - 1 \right)$$

El dilatómetro de Spurrier permite medir directamente el encogimiento lineal y leer al mismo tiempo, la pérdida de agua.

#### ECUACIONES PARA EL PERÍODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

La velocidad de evaporación en este período está dado por las condiciones de secado elegidas; es decir: la magnitud de la velocidad del aire y el ángulo de incidencia de esta corriente con la superficie de secado; la transferencia de calor

por conducción y convección desde el aire a la superficie de la muestra y finalmente, la humedad relativa del aire utilizado en la operación.

La humedad vaporizada de la superficie debe difundir a través de la película de aire al seno de la corriente de aire y ello se expresa por la ecuación:

$$\frac{dw}{dt} = k_G \cdot A (p_w - p_g) \quad (1)$$

donde:

$dw/dt$ : cantidad de agua difundida con respecto al tiempo (gramos de agua/hora).

$k_G$  : coeficiente de película de difusión ( $g/h \cdot cm^2$  . diferencia de presión en atmósferas).

$A$  : área de la superficie de secado ( $cm^2$ )

$p_g$  : presión parcial del vapor de agua en el aire (atm.).

$p_w$  : presión parcial del aire saturado en la interfase agua-aire (atm.).

Esta ecuación indica la fuerza de empuje necesaria para que el agua difunda a través de la película de aire, e indica la diferencia de presión parcial del vapor del agua sobre la película. Como es prácticamente imposible medir estas presiones, es conveniente expresar la fuerza de empuje como una diferencia de humedad, lo cual es posible si consideramos que la presión parcial del vapor de agua en una muestra de aire es  $p$  (atm.). La relación moles de vapor de agua por moles de aire seco es igual a  $p/(1 - p)$ .

Siendo el peso molecular del agua igual a 18 y el del aire igual a 29, la relación del vapor de agua por aire seco en peso es  $18 p/29 (1 - p)$  y como la humedad se define como gramos de vapor de agua por gramos de aire seco, podemos decir que:

$$H = \frac{18 p}{29(1 - p)} \quad (2)$$

donde:

H : humedad.

A temperatura ordinaria,  $p$  es muy pequeño, en comparac con la unidad; por lo tanto es aproximadamente:

$$H = \frac{18}{29 p} \quad (3)$$

Llamando  $k_G$ , a  $29/18 k_G$  y por todo lo anterior, la ecuación (1) podrá escribirse entonces:

$$\frac{d w}{d \phi} = k_G \cdot A (H_w - H_g) \quad (4)$$

donde:

$k_G$ : coeficiente de película de difusión ( $g/h \cdot cm^2$ , unidad de diferencia de humedad).

$H_g$ : humedad del aire ( $g$  de agua/ $g$  de aire seco).

$H_w$ : humedad del aire en la interfase agua-aire ( $g$  de agua/ $g$  de aire seco).

Los valores de  $H_w$  y  $H_g$  se pueden encontrar en un diagrama de mezcla aire-agua (humedad) o bien midiendo la temperatura a bulbo húmedo (mucho más exactamente si se puede tomar la temperatura de la superficie de la muestra, que es algo más elevada); el valor  $(H_w - H_g)$  se calcula de la siguiente manera (26): consideremos una gota de agua en contacto con aire en tales condiciones que la misma tenga la temperatura a bulbo húmedo. Rodeando la gota de líquido, habrá una película de aire. A través de dicha película difundirá desde el agua al aire  $w$   $g$  de vapor de agua por hora. Si el calor latente del agua a la temperatura de bulbo húmedo es  $\lambda_w$  ( $gcal/g$ ), el calor latente de la corriente de vapor difusible será  $\lambda_w \cdot w$  ( $gcal/hora$ ).

Por otra parte, puesto que la temperatura a bulbo húmedo es inferior a la temperatura del aire ambiente, llegará a la gota de líquido una cantidad de calor sensible igual a  $q$  ( $gcal/hora$ ); y siendo la temperatura a bulbo húmedo una temperatura de equilibrio, estas dos corrientes de calor deberán ser iguales por lo tanto:

$$\lambda_w \cdot W = q \quad (5)$$

Como la transferencia de calor sensible es igual a:

$$q = h \cdot A (t_g - t_w) \quad (6)$$

donde:

$h$  : coeficiente de transferencia de calor de la película de aire.

$A$  : área de la gota.

$t_g - t_w$  = diferencia entre las lecturas de las temperaturas a bulbo seco y húmedo.

Sustituyendo los valores  $q$  y  $W$  de las ecuaciones (6) y (4) respectivamente, en la ecuación (5), obtenemos que:

$$H_w - H_g = \frac{h}{k_G \cdot \lambda_w} (t_g - t_w) \quad (7)$$

Puesto que  $h$  y  $k_G$  representan los coeficientes correspondientes a una misma película, se ha encontrado experimentalmente, como era de esperar, que toda influencia que tienda a cambiar el espesor de esta película causará el mismo cambio en cada coeficiente. Por lo tanto,  $h/k_G$  será independiente de la viscosidad y velocidad del aire.

Este valor para el vapor de agua es 0,26 (27); por lo tanto la ecuación (7) puede escribirse:

$$H_w - H_g = \frac{0,26}{\lambda_w} (t_g - t_w) \quad (8)$$

La velocidad de secado se puede expresar también, en términos de coeficientes de calor transmitido en lugar de masa transferida, puesto que el calor que llega al material es igual al calor latente de vaporización del agua contenida por dicho material (28).

El balance de calor del sistema es:

$$\begin{aligned} \lambda_w \cdot \frac{dW}{d\theta} &= \lambda_w \cdot k_G \cdot A (p_w - p_g) = \lambda_w \cdot k_G \cdot A (H_w - H_g) = \\ &= h_s \cdot A_s (t_g - t_s) \end{aligned}$$

donde:

$A_s$  : área de la superficie a través de la cual pasa el calor ( $\text{cm}^2$ ).

$h_s$  : coeficiente de película de transferencia de calor basado en  $A_s$  ( $\text{gcal/h} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

$t_g$  : temperatura del aire,  $^\circ\text{C}$ .

$t_s$  : temperatura de la superficie a través de la cual transmite el calor,  $^\circ\text{C}$ .

Para el secado adiabático, donde el calor pasa solamente a través de la misma superficie en la cual se está produciendo el secado:

$$A_s = A \quad (10)$$

$$t_s = t_w \quad (11)$$

$$h_s = h_c \quad (12)$$

donde:

$h_c$  : coeficiente de transmisión de calor por convección y conducción a través de la película que cubre la superficie de secado ( $\text{gcal/h} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

Por lo tanto, la ecuación (9) se puede escribir:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{h_c}{\lambda_w} \cdot A (t_g - t_w) \quad (13)$$

Los factores que influyen los coeficientes de película  $k_g$ ,  $k_g'$  y  $h_c$  son en primer lugar la constante de difusión y luego el espesor de la película de aire y por último, aunque indirectamente, la velocidad del aire, la temperatura y el ángulo de incidencia del mismo, ya que estas últimas hacen variar el espesor de la película.

En general estos coeficientes pueden estar expresados como una función empírica potencial de la velocidad de la masa.

Shepherd, Hadlock y Brewer(29) han relacionado los resultados del secado de diversas investigaciones y han encontrado que el resultado puede expresarse razonablemente bien con las ecuaciones:

$$k_g = 0,0512 G^{0,75} \quad (14)$$

$$h_c = 0,0170 G^{0,76} \quad (15)$$

donde:

$G$  : velocidad de la masa de aire, paralela a la superficie (lb/h . pie<sup>2</sup>)

Cualquiera de estas ecuaciones, junto con la (1) ó (1) pueden usarse para el cálculo de la velocidad de secado, durante el período de velocidad constante.

### ECUACIONES PARA EL PERÍODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

Como la humedad puede moverse dentro de un sólido por difusión de líquidos, difusión de vapor, capilaridad y gravedad, es muy difícil calcular el tiempo de secado, durante el período de velocidad variable, si no se cuenta con datos experimentales efectivos. En todos los casos, la velocidad de secado durante este período es una función del contenido de agua libre. Esta relación es generalmente una curva de cuya integración podemos inferir la velocidad de secado. Podemos escribir la ecuación de esta curva como (30):

$$- \frac{dW}{A d\phi} = f(F) \quad (16)$$

donde:

$W$  : el peso del agua libre presente en el sólido (g).

$A$  : área de la superficie (cm<sup>2</sup>).

$\phi$  : tiempo (horas).

$f(F)$ : ordenada de la curva de velocidad de secado cuando el contenido de agua libre es  $F$  (g/g de sólido seco).

Puesto que el peso del agua quitada en un intervalo de tiempo corto, es igual al producto del peso de sólido seco y la variación en agua libre por unidad de sólido seco:

$$- dW = A f(F) d\phi = - D dF \quad (17)$$

Integrando entre los límites de tiempo inicial igual a cero y final igual a  $\phi_f$ , tenemos:

$$\int_0^{\phi_f} d\phi = - \frac{D}{A} \int_{F_2}^{F_1} \frac{dF}{f(F)} = \phi_f \quad (18)$$

donde:

$D$  : peso de sustancia seca en la muestra (g).

$\theta_f$  : tiempo de secado del período de velocidad decreciente (horas).

$F_1$  : contenido de agua libre al comenzar el período de velocidad decreciente (g de agua/g de material seco)

$F_2$  : contenido de agua libre al finalizar el mismo período (g de agua/g de sustancia seca).

Si ahora representamos gráficamente, tomando como ordenada  $1/f(F)$  y como abscisa a  $F$ , el área de la integral entre los límites  $F_1$  y  $F_2$  multiplicada por  $D/A$  nos dará el tiempo requerido para el secado durante el período de velocidad decreciente.

Cuando no disponemos de la curva de velocidad de secado para el período de velocidad decreciente, podemos usar un método de cálculo aproximado. Para ello debemos suponer que la curva en este período es una línea recta desde el punto crítico al origen.

Entonces la ecuación (16) se convierte en:

$$-\frac{dW}{d\theta} = m F \quad (19)$$

donde  $m$  es una constante dada por la siguiente ecuación:

$$m = \frac{R_c}{F_c} \quad (20)$$

donde:

$R_c$  : velocidad de secado durante el período de velocidad constante (g/hora . cm<sup>2</sup>).

$F_c$  : contenido de agua libre en el punto crítico (g de agua/g de sólido seco).

Teniendo en cuenta las ecuaciones (19) y (20), la ecuación (18) se convierte en:

$$\theta_f = \int_0^{\theta_f} d\theta = \frac{D F_c}{A R_c} \int_{F_2}^{F_1} \frac{dF}{F}$$

$$\theta_f = \frac{D F_c}{A R_c} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (21)$$

Para efectuar este cálculo solamente se necesita conocer las coordenadas del punto crítico en la curva de velocidad de secado.

Si la curva de secado no es una línea recta desde el origen, pero sí lo es desde el punto crítico hasta el contenido de humedad deseado como final, el tiempo de secado se calcula por la siguiente ecuación (31):

$$\theta = \frac{D}{A} \frac{F_c - F_2}{R_m} \quad (22)$$

donde:

$\theta$  : tiempo en horas, requerido para el secado desde el contenido crítico de humedad  $F_c$  hasta el contenido deseado  $F_2$ .

$R_m$ : valor medio de la velocidad de secado (g de agua / h . cm<sup>2</sup>).

El valor de  $R_m$  se obtiene por la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{R_c - R_2}{\ln \frac{R_c}{R_2}} \quad (23)$$

#### SECADO BAJO CONDICIONES VARIABLES

Cuando las condiciones de secado no son constantes, esto es, si el aire varía la temperatura o humedad, mientras pasa sobre los productos, las ecuaciones anteriores no se pueden usar. Es el el secado comercial, que debido a la naturaleza de los productos, ya sea contemplando la faz económica o práctica, o ambas a la vez, donde no se trabaja en condiciones constantes. Los tipos comunes de secado comercial son los siguientes: aquel en el cual la humedad permanece baja y constante durante todo el período, pero la temperatura es lentamente aumentada, a medida que progresa el secado; y aquel en el cual la temperatura es lentamente elevada, pero la humedad es tomada comparativamente alta en la primera parte del tratamiento y bajada luego en la segunda parte.

Si el secado se realiza enteramente por sobre el contenido crítico de humedad, el valor promedio de secado  $\left(\frac{dW}{d\theta}\right)_m$

se puede calcular como sigue (32):

$$\left(\frac{dW}{d\theta}\right)_m = K_G A (p_w - p_g)_m = K_G A (\Delta p)_m \quad (24)$$

$$\left(\frac{dW}{d\theta}\right)_m = K_G' A (H_w - H_g)_m = K_G' A (\Delta H)_m \quad (25)$$

donde  $(p_w - p_g)_m$  y  $(H_w - H_g)_m$  son los valores parciales promedios de la diferencia de presión y los valores promedios de la diferencia de humedad, respectivamente, entre la interfase aire-agua y la corriente de aire.

Si es posible tomar durante el secado valores de  $(\Delta p)_m$  ó  $(\Delta H)_m$  se puede graficar vs. la duración del secado y el valor promedio se calcula gráficamente. Si en cambio conocemos las temperaturas y humedades en las condiciones finales, se pueden usar los valores logarítmicos promedios de  $\Delta p$  ó  $\Delta H$ .

Se omite mayores detalles sobre este particular, pues en el presente trabajo no se estudia el secado en estas condiciones.

-----

DIFICULTADES EN EL SECADO DE PRODUCTOS ARCILLOSOS (33).

Casi todos los defectos producidos por el secado en los productos arcillosos son debidos al encogimiento. Merecen especial mención algunos de ellos.

La torción, producida por las variaciones en el encogimiento total debido a la composición irregular de la pasta o contenido de agua, que hacen que el secado no se produzca a la misma velocidad y al mismo tiempo, provocando pequeñas rajaduras, que frecuentemente se cierran en el período final de secado, escapando a la observación. Todo ello provoca deformaciones en las piezas al ser colocadas en el horno para su cocimiento.

Las rajaduras y quebraduras son las más comunes y molestas dificultades que se presentan en el secado de este tipo de material. Las arcillas en condiciones plásticas ofrecen menor resistencia a la deformación y aún a la posibilidad de rajarse o quebrarse; a medida que el agua se evapora van perdiendo paulatinamente esta propiedad.

Las rajaduras son pequeñas quebraduras de la superficie; las cuales indican una serie de diferentes condiciones entre la superficie y el interior de la masa. Son causadas generalmente por un más elevado o más fácil encogimiento de la superficie con respecto al resto de la pieza, debido a la mayor velocidad de secado de aquélla. El grano fino, arcillas altamente coloidales, conteniendo un mínimo de material plástico y un máximo de agua, hace a las piezas más difíciles de secar sin rajaduras.

Las quebraduras se producen cuando se usa un gran porcentaje de granos grandes, en proporción a otro de granos no plásticos más pequeños; aparecen entre los primeros.

Se producen rajaduras verticales en las piezas grandes y pesadas, cuando la fricción contra la superficie de apoyo es muy grande con respecto a la resistencia a la tracción de la masa semiplástica, al contraerse por el secado.

Éstas son las principales dificultades encontradas en el secado de arcillas y productos cerámicos; algunas de ellas ya habían sido mencionadas y explicadas con anterioridad, así como otras que ahora omito.

La prevención de ellas exige un cuidadoso y constante control de las condiciones de secado elegidas.

-----

ESTUDIO EXPERIMENTAL

En el estudio experimental nos guió el propósito de obtener coeficientes de película de difusión y curvas de humedad de equilibrio. Para ello se ha construido los aparatos y equipos que se describen más adelante.

Se ha hecho las representaciones gráficas correspondientes a cada corrida y finalmente, se ha comparado los resultados obtenidos con los de otros autores.

-----

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS TIERRAS ESTUDIADAS (\*)

Tierras de la Estación Gorina, F. C. de Gral. Roca:

Nº 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Tierras de La Granja, Provincia de Buenos Aires:

Nº 7.

Tierras del Km. 23, del F. C. de Comodoro Rivadavia:

Superior Nº 9 e Inferior Nº 10.

Tierras de El Bosque, La Plata:

Nº 0

ANÁLISIS QUÍMICO

IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4
Profundidad (cm)	0,20-0,70	0,70-1,30	1,20-2,60	2,60-3,10
Arcilla %	31,86	29,43	29,32	33,36
Guarzo %	28,10	31,56	34,15	32,76
Feldespato %	35,80	39,90	30,60	27,88
CO <sub>2</sub> Ca %	---	---	5,06	4,00
Sales solubles %	0,28	0,16	0,07	0,11
Materias orgánicas %	4,25	2,95	0,87	1,89

IDENTIFICACIÓN	5	6
Profundidad (cm)	0,50-4,00	> 4,00
Arcilla %	28,15	26,33
Guarzo %	33,41	38,06
Feldespato %	27,11	31,71
CO <sub>2</sub> Ca %	8,80	1,35
Sales solubles %	0,16	0,13
Materias orgánicas %	1,37	1,52

[\*] Las muestras Nº 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 y sus análisis fueron cedidos por el Dr. Luis A. Tenucci y la Nº 0 por el Dr. Jorge Ronco, del Laboratorio de Ensayos de Materiales e Investigaciones Tecnológicas.

CONSTANTES FÍSICAS

IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4	5	6
Índice plástico	20,90	23,50	25,40	35,80	24,90	13,10
Límite líquido	52,70	56,00	43,50	72,60	67,70	47,80
Peso esp. aparente	2,70	2,76	2,71	2,58	2,70	2,57
Límite contracción	17,00	16,80	20,90	16,80	19,50	28,10
Relac. de contrac.	1,85	1,90	1,73	1,80	1,77	1,48
Cambio de volumen	41,30	45,00	21,80	54,00	5,20	17,80
Contrac. lineal	10,10	11,60	6,40	13,40	13,40	5,30

IDENTIFICACIÓN	7	9	10	0
Índice plástico	14,30	19,20	25,20	14,70
Límite líquido	43,90	55,70	71,00	44,00
Peso esp. aparente	---	---	---	2,64
Límite de contrac.	29,00	---	---	17,60
Relac. de contrac.	1,44	---	---	1,79
Cambio de volumen	10,40	---	---	29,00
Contrac. lineal	3,20	4,20	1,60	8,10

ANÁLISIS MECÁNICO ( ASTM D 422 - 39)

IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4	5
Mat. grueso > 2 mm (%)	0	0	0	0	0
Arena gruesa 2-0,25 mm (%)	0	0	0	0	1,0
Arena fina 0,25-0,05 mm (%)	13,0	15,0	16,0	10,0	9,0
Limo 0,05 - 0,005 mm (%)	39,5	40,0	49,0	46,5	44,5
Arcilla 0,005-menor (%)	47,5	39,0	35,0	41,5	45,5
Coloides < 0,001 mm (%)	20,5	20,5	17,0	20,5	20,0

IDENTIFICACIÓN	6	0
Mat. grueso > 2 mm (%)	0	0
Arena gruesa 2-0,25 mm (%)	0,5	0,5
Arena fina 0,25-0,05 mm (%)	16,0	16,5
Limo 0,05-0,005 mm (%)	56,5	21,0
Arcilla 0,005-menor (%)	27,0	32,0
Coloides < 0,001 mm (%)	1,5	12,0

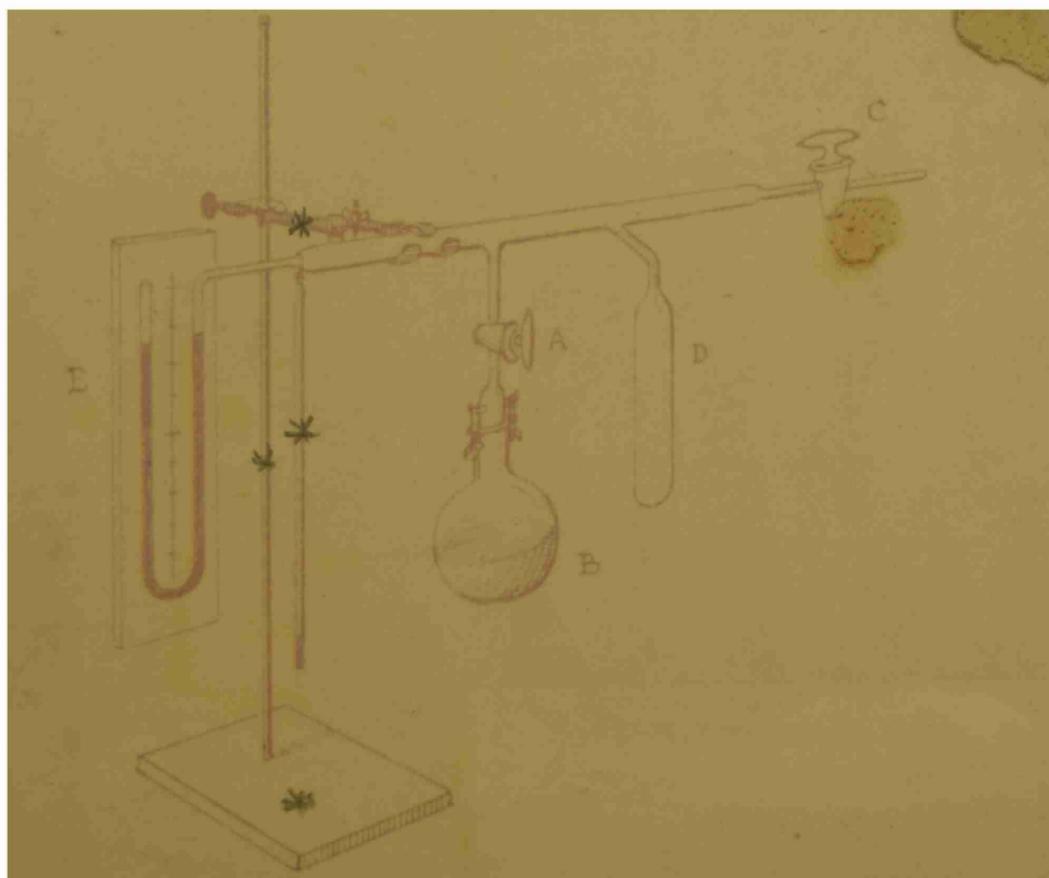
### DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO

Siendo el secado una operación en muchos casos intermedia del proceso industrial de un producto, antes de someter una sustancia a este tratamiento es conveniente hacer un estudio de la humedad de equilibrio. De este modo sabremos de antemano cuál será la humedad relativa del aire que deberemos usar en el secado para conseguir que el producto tenga la adecuada proporción de agua requerida para su ulterior tratamiento.

Además las curvas de humedad en equilibrio nos muestran el comportamiento de cada arcilla frente al aire de distintas humedades relativas, lo que facilitará el conocimiento del punto final del secado y la posición del punto crítico, datos que se espera concuerden con los determinados en la operación de secado.

Se han realizado estas determinaciones empleando el método de Vincent y Bristol (6).

Para ello se dispuso del equipo que muestra la figura



APARATO USADO EN LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO.

Una muestra de material a investigar es colocada en el balón B de 100 ml de capacidad. Estando las llaves A y C abiertas, se evacúa el aire a través de C, por medio de una bomba de vacío. Hecho esto, se cierra C y se espera hasta que el sistema esté en equilibrio, es decir, cuando el manómetro E no acusé variaciones. Cerrando A se introduce D en un baño de

seco  
 ciclo-acetona. La diferencia entre la presión de equilibrio y la presión obtenida después de condensar el vapor de agua, es la tensión de vapor de la humedad del material; dividiendo este valor por la tensión del vapor de agua pura a la temperatura de la experiencia obtenemos la humedad relativa por ciento.

Se puede omitir el enfriamiento, obteniendo la tensión de vapor de la humedad del material como una diferencia entre la presión de equilibrio ( $p_E$ ) y la presión de la bomba ( $p_B$ ) cuando A está cerrada. Esto no es válido si el material tiene aire oculto.

Se puede obtener así una curva, cuyos parámetros sean la humedad de equilibrio y la humedad relativa.

La precisión del aparato está dada por los cierres herméticos y la exactitud de las lecturas en el manómetro.

En los cuadros siguientes hallan los valores de la humedad relativa obtenidos por el método que antecede. Los valores de la humedad en equilibrio han sido hallados por diferencias de peso, antes y después de ser llevadas las muestras a estufa a 100 - 105°C hasta peso constante. La pérdida de peso se expresa en gramos por ciento de material seco.

#### EJEMPLO DE LOS CÁLCULOS EFECTUADOS

##### Muestra N° 0

$p_E = 20,5$ mm Hg	$D = 4,0090$ g
$p_B = 2,00$ mm Hg	$t = 22,6^\circ\text{C}$
$P = 4,8794$ g	$\zeta = 20,565$ (34)

##### 1) Cálculo de $H_r$

$$HR = \frac{p_E - p_B}{\zeta} \cdot 100$$

donde:

$p_B$  = presión de la bomba estando A cerrada (mm Hg).

$p_E$  = presión de la humedad de la muestra (mm Hg).

$H_R$  = humedad relativa %.

$\Sigma$  = tensión del vapor de agua a t°C.

$$H_R = \frac{20,5 - 2}{20,565} \cdot 100$$

$$H_R = 89,9 \%$$

2) Cálculo de  $H_E$

a)  $P = D + W$

donde:

P = peso de la muestra húmeda (g).

D = peso de la muestra seca (g).

W = pérdida de agua (g).

$$W = 4,8704 - 4,0090 = 0,8704$$

b)  $H_E = \frac{W \cdot 100}{D}$

donde:

$H_E$  = humedad de equilibrio (g de agua/g de material seco por ciento).

$$H_E = \frac{0,8704 \cdot 100}{4,0090}$$

$$H_E = 21,7 \%$$

-----

# HUMEDAD DE EQUILIBRIO

## MUESTRA N° 0



## MUESTRA N° 1



# HUMEDAD DE EQUILIBRIO

## MUESTRA Nº 2



## MUESTRA Nº 3



MUESTRA Nº C

L	B	P	D	V	H <sub>R</sub> <sup>10</sup>	H <sub>E</sub> <sup>5</sup>	t <sub>20</sub>	Z(34)
20.50	2.00	4.8794	4.0090	0.8704	89.9	21.7	22.6	20.565
15.50	2.00	2.8442	2.5780	0.2662	64.8	10.8	22.8	20.815
13.50	2.00	3.8588	3.5438	0.3100	54.5	8.7	23.0	21.063
11.00	2.00	2.2332	2.0924	0.1408	42.4	6.7	23.1	21.196
9.50	2.00	8.8418	8.4262	0.4156	55.0	4.9	23.0	21.068
7.25	2.00	7.8662	7.5702	0.2960	25.0	3.9	23.0	21.068
4.00	2.00	8.0412	7.8568	0.1944	10.0	2.4	23.0	21.068

MUESTRA Nº 1

20.50	2.00	3.9058	3.2888	0.6170	84.6	18.7	23.6	21.845
19.00	2.00	2.9744	2.5444	0.4300	76.8	16.9	23.8	22.110
16.00	2.00	1.7650	1.5860	0.1790	63.3	11.2	23.8	22.110
14.00	2.00	2.4754	2.2518	0.2236	54.3	9.9	23.8	22.110
11.50	2.00	2.1148	1.9624	0.1524	42.9	7.7	23.8	22.110
10.00	2.00	1.7566	1.6474	0.1092	36.2	6.6	23.8	22.110
6.50	2.00	1.7234	1.6832	0.0452	20.3	2.7	23.8	22.110

MUESTRA Nº 2

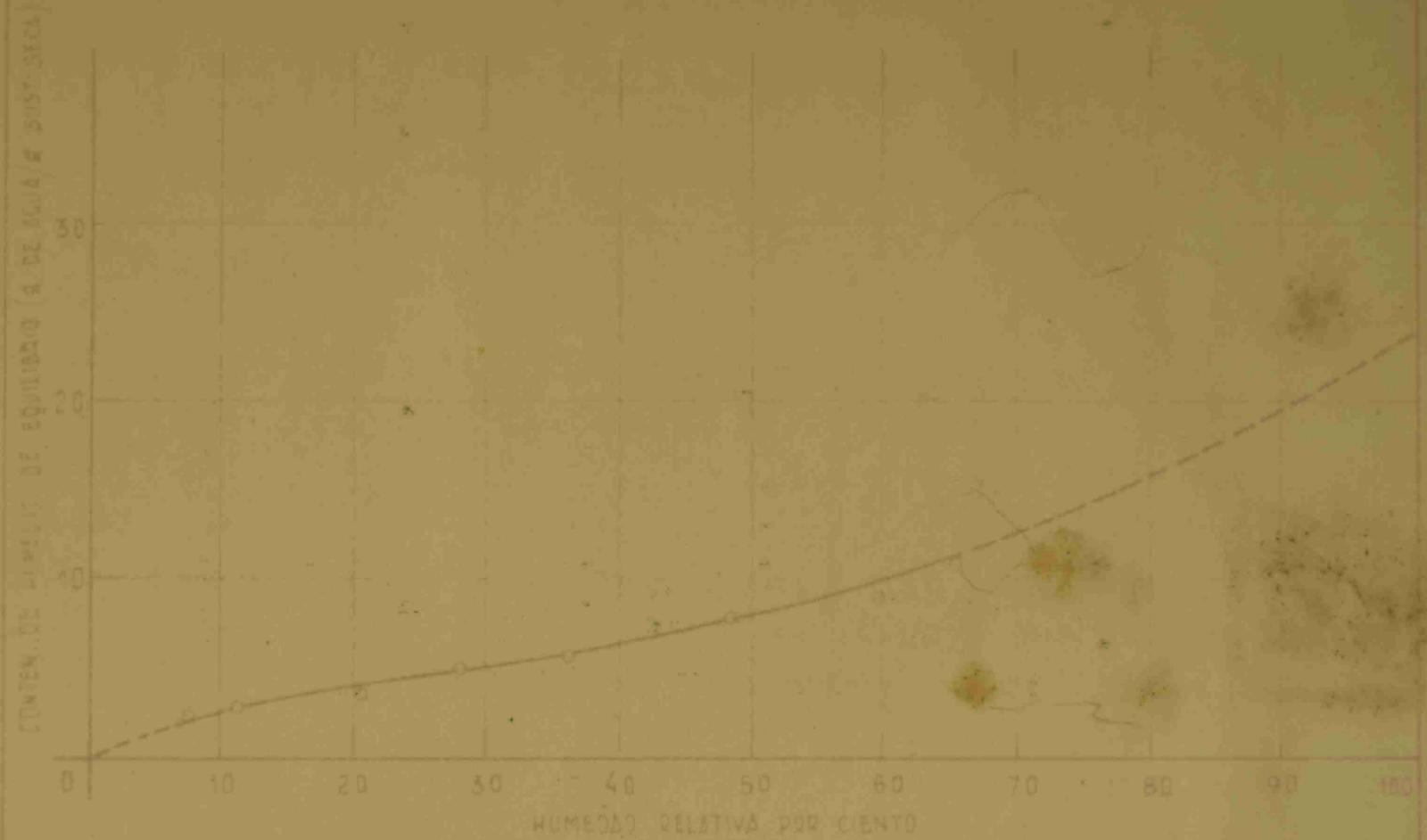
21.00	2.25	2.3130	2.0074	0.3056	87.8	15.2	23.2	21.324
17.50	2.25	1.8462	1.6854	0.1608	74.1	9.5	22.6	20.565
15.00	2.25	2.4534	2.3292	0.1242	41.0	5.3	23.2	21.324
6.50	2.25	4.0190	3.9022	0.1168	20.9	2.9	22.4	20.316

MUESTRA Nº 3

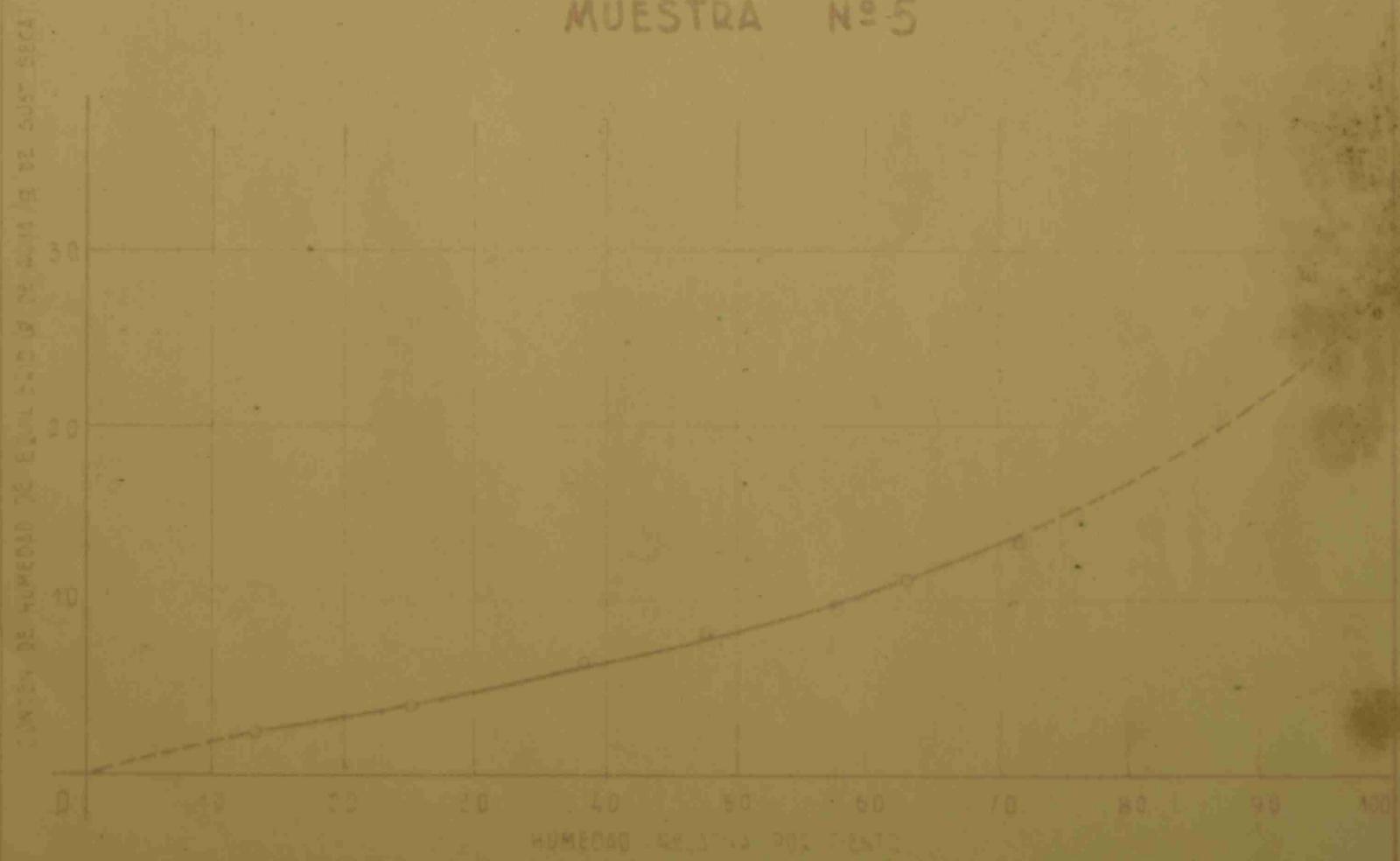
16.25	2.25	2.0546	1.8760	0.1786	71.4	9.5	21.8	19.507
14.50	2.25	1.5862	1.4782	0.1080	61.7	7.3	22.0	19.827
11.50	2.25	2.2156	2.0994	0.1162	44.4	5.5	21.8	20.815
9.25	2.25	4.4188	4.2122	0.2066	34.1	4.9	22.8	20.815
7.25	2.25	1.1396	1.0970	0.0426	24.6	3.8	22.4	20.316
6.00	2.25	1.5002	1.4570	0.0432	18.1	2.9	22.7	20.690
4.75	2.25	2.2366	2.1738	0.0628	12.0	2.8	22.8	20.815

# HUMEDAD DE EQUILIBRIO

## MUESTRA Nº 4

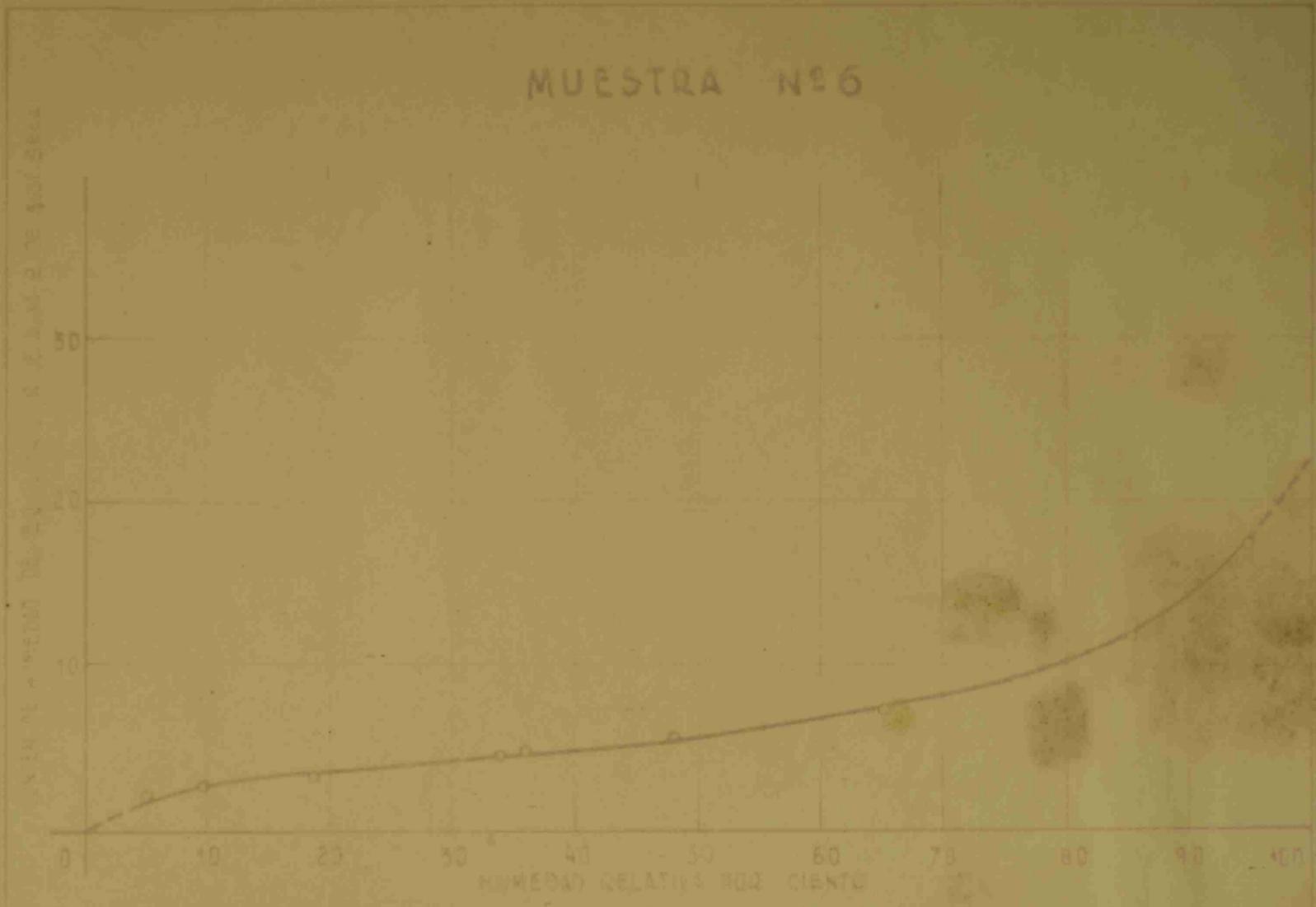


## MUESTRA Nº 5



# HUMEDAD DE EQUILIBRIO

## MUESTRA Nº6



## MUESTRA Nº7



MUESTRA Nº 4

PE	PB	P	D	W	H <sub>R</sub> %	H <sub>E</sub> %	t <sub>EO</sub>	Z
15.75	2.25	1.6876	1.5218	0.1658	64.9	10.8	22.8	20.815
14.50	2.25	2.1060	1.9274	0.1786	58.8	9.2	22.8	20.815
12.25	2.25	1.2486	1.1590	0.0896	48.0	7.7	22.8	20.815
9.75	2.25	1.6006	1.5136	0.0870	36.0	5.7	22.8	20.815
8.00	2.25	1.9625	1.8672	0.0953	27.6	5.1	22.8	20.815
6.50	2.25	1.5426	1.4886	0.0540	20.3	3.6	22.9	20.941
5.50	2.25	1.2630	1.2269	0.0361	10.8	2.9	22.8	20.815
3.75	2.25	2.5210	2.4562	0.0648	7.2	2.6	22.7	20.690

MUESTRA Nº 5

17.00	2.25	2.2262	1.9652	0.2610	71.3	13.2	22.7	20.690
15.50	2.25	1.8514	1.6680	0.1834	62.5	10.9	23.1	21.196
14.50	2.25	1.6984	1.5466	0.1518	57.3	9.6	23.1	21.196
12.50	2.25	2.5901	2.3992	0.1909	46.9	7.9	23.6	21.845
10.50	2.25	2.8774	2.7068	0.1706	37.7	6.3	23.6	21.845
8.50	2.25	1.7972	1.7133	0.0839	29.4	4.9	23.1	21.196
7.50	2.25	2.6164	2.5208	0.0956	24.6	3.7	23.2	21.324
4.75	2.25	3.3958	3.3258	0.0700	11.4	2.2	23.6	21.845

MUESTRA Nº 6

22.50	2.25	1.4760	1.2544	0.2216	94.9	17.6	23.2	21.824
21.00	2.25	1.4454	1.2942	0.1512	85.8	11.7	23.0	21.845
16.75	2.25	1.3994	1.3030	0.0964	65.5	7.4	23.8	22.110
13.00	2.25	1.4112	1.3508	0.0774	43.0	5.0	24.0	22.377
10.25	2.25	1.4194	1.3508	0.0686	36.2	5.0	23.0	22.110
10.00	2.25	1.5050	1.4360	0.0690	34.6	4.8	24.0	22.377
6.50	2.25	1.5092	1.4568	0.0524	18.9	3.5	24.0	22.377
5.00	2.25	2.4706	2.3996	0.0710	9.9	2.9	24.1	22.377
3.50	2.25	2.1252	2.0752	0.0500	5.5	2.4	24.2	22.648

MUESTRA No 7

P <sub>E</sub>	P <sub>B</sub>	P	D	W	H <sub>R</sub> %	H <sub>W</sub> %	t&c	C
17.75	2.25	1.5356	1.4446	0.0910	67.6	6.3	24.4	22.922
15.75	2.25	1.5622	1.4794	0.0828	58.5	5.6	24.5	23.060
14.25	2.25	1.8460	1.7630	0.0830	55.9	4.7	24.8	25.476
12.75	2.25	1.6216	1.5570	0.0646	44.2	4.1	25.0	23.756
11.25	2.25	1.4039	1.3524	0.0515	37.9	3.8	25.0	23.756
9.50	2.25	2.1002	2.0332	0.0670	30.5	3.3	25.0	23.756
9.00	2.25	1.7858	1.7322	0.0536	22.2	2.1	25.1	23.897
8.25	2.25	1.6744	1.6272	0.0472	24.9	2.9	25.2	24.039
6.50	2.25	1.3944	1.3610	0.0334	17.5	2.4	25.3	24.182
4.50	2.25	1.7728	1.7358	0.0370	9.3	2.1	25.3	24.182
3.25	2.25	3.7035	3.6380	0.0655	4.1	1.8	25.4	24.326

MUESTRA No 9

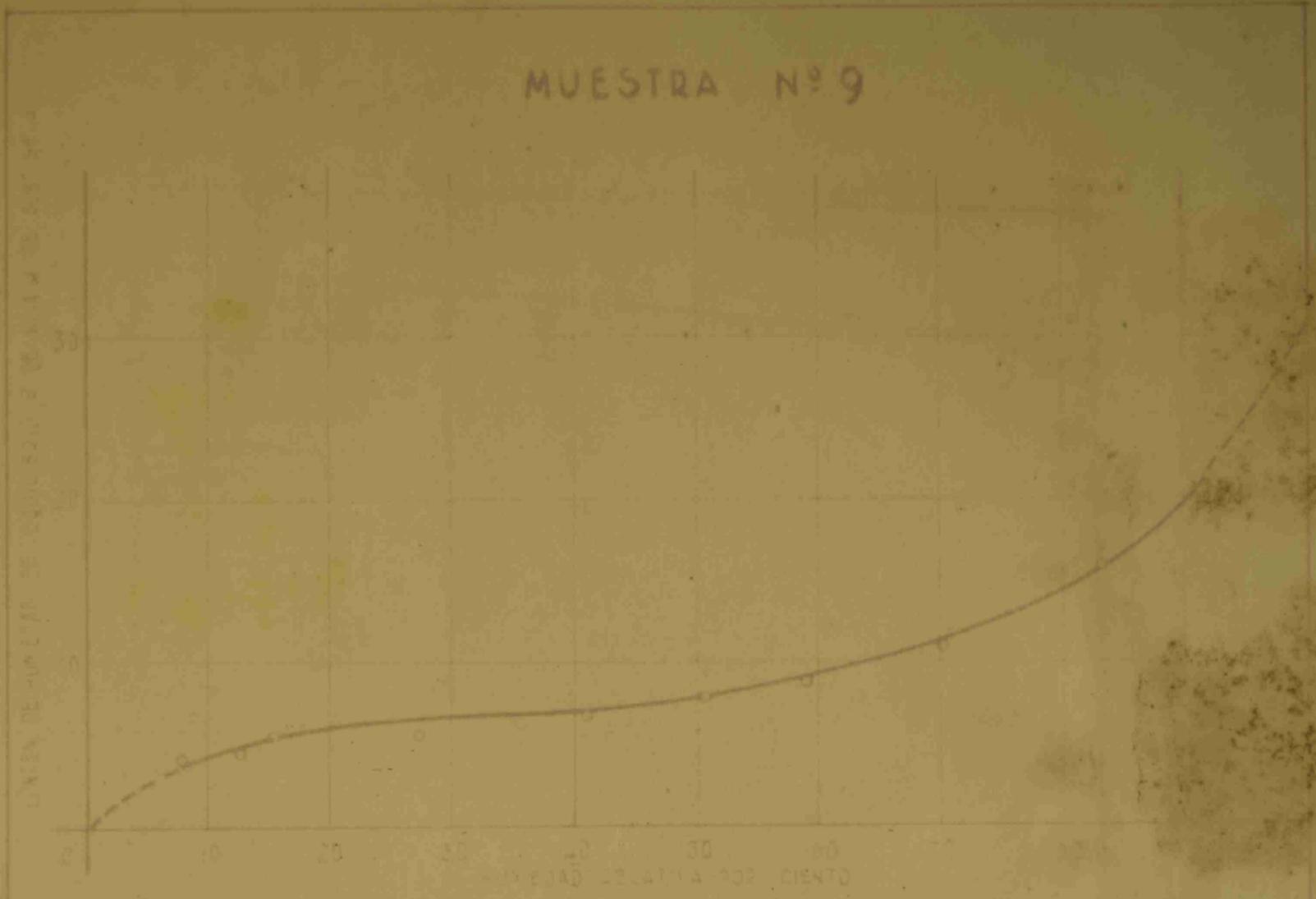
21.00	2.25	2.0658	1.7076	0.3582	91.7	20.9	22.5	20.440
19.25	2.25	2.7372	2.3642	0.3730	83.2	15.9	22.5	20.440
16.75	2.25	2.0438	1.8362	0.2076	70.0	11.3	22.7	20.690
14.75	2.25	1.8463	1.6919	0.1544	59.3	9.1	23.0	21.068
13.00	2.25	1.9462	1.7995	0.1467	50.4	8.1	23.2	21.324
10.75	2.25	1.4466	1.3530	0.0930	40.8	6.8	22.8	20.815
7.75	2.25	1.4733	1.3954	0.0834	27.2	5.9	22.3	20.193
5.50	2.25	2.1462	2.0342	0.1120	14.9	5.5	23.5	21.714
4.75	2.25	1.9496	1.8602	0.0894	12.3	4.8	22.4	20.316
3.75	2.25	2.6537	2.5452	0.1051	7.4	4.2	22.2	20.070

MUESTRA No 10

19.00	2.25	1.9910	1.7820	0.2090	79.5	11.70	23.0	21.058
17.50	2.25	2.8754	2.6545	0.2209	71.9	8.70	23.1	21.196
14.25	2.25	2.5544	2.4136	0.1408	56.6	5.80	23.1	21.196
9.50	2.25	2.4866	2.3874	0.0992	37.2	4.16	21.7	19.468
7.50	2.25	2.4068	2.3174	0.0894	27.4	3.84	21.4	19.113
6.25	2.25	2.8572	2.7618	0.0954	22.2	3.44	21.4	19.113
4.75	2.25	2.6162	2.5434	0.0728	12.9	2.84	21.6	19.349
3.75	2.25	2.9066	2.8361	0.0705	7.9	2.50	21.6	19.349

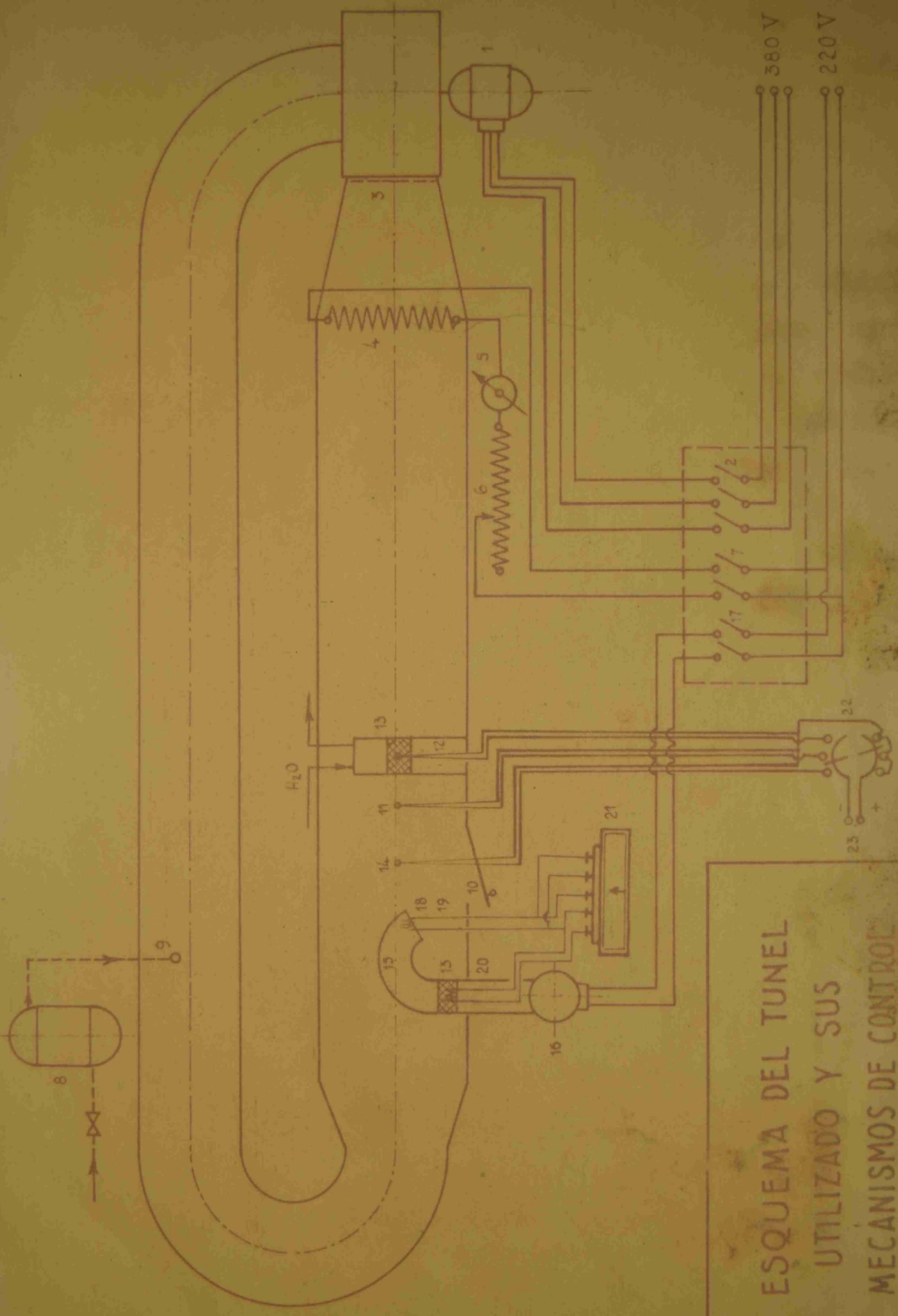
# HUMEDAD DE EQUILIBRIO

## MUESTRA Nº 9



## MUESTRA Nº 10





ESQUEMA DEL TUNEL  
 UTILIZADO Y SUS  
 MECANISMOS DE CONTROL

## REFERENCIAS

- 1) Ventilador centrífugo.
- 2) Llave del ventilador en el tablero general.
- 3) Regulador de sección en la salida del ventilador.
- 4) Resistencia para el calentamiento del aire.
- 5) Amperímetro.
- 6) Reóstato en serie que regula la resistencia (4).
- 7) Llave de la resistencia (4) en tablero general.
- 8) Caldera generadora de vapor.
- 9) Vapor.
- 10) Ventilación operada manualmente.
- 11) Termocupla a bulbo seco.
- 12) Termocupla a bulbo húmedo.
- 13) Caja de agua.
- 14) Termocupla en la superficie de la muestra.
- 15) Cámara de alta velocidad con ventilador centrífugo (16).
- (17) Llave de (16) en tablero general.
- (18), (19) Termómetros de resistencia, de bulbo seco, en cámara de alta velocidad.
- (20) Termómetro de resistencia de bulbo húmedo, en cámara de alta velocidad.
- (21) Indicador de humedad Allochio Bachini.
- (22) Llave de tres puntos para las termocuplas.
- (23) Potenciómetro.

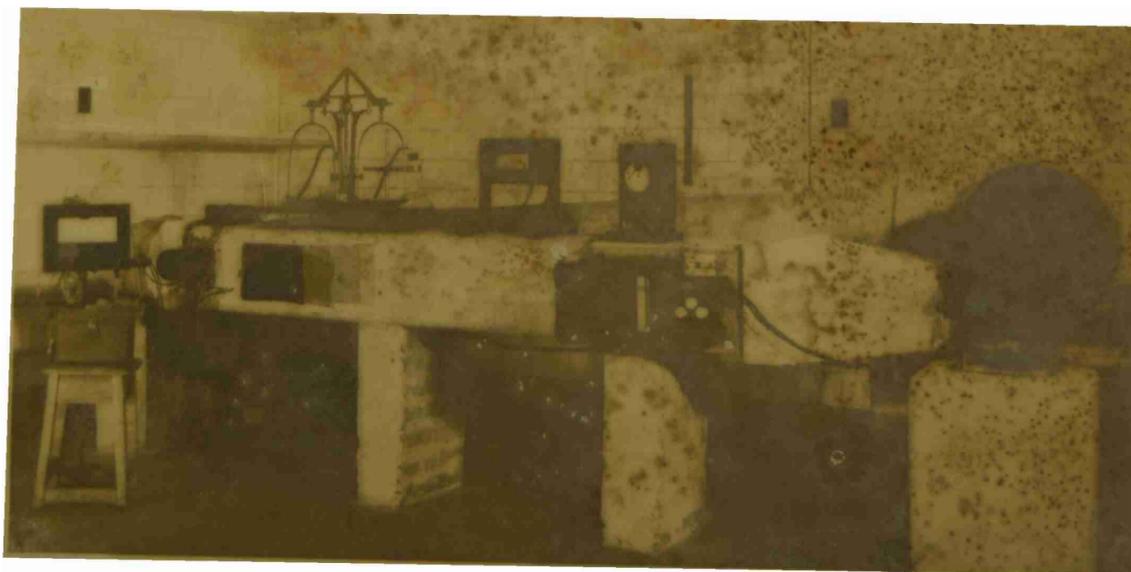
-----

DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL TUNEL DE SECADO (35), (36), (37).

El estudio que se propone realizar, hace necesario la construcción de un tunel de secado, que nos permita ir controlando las pérdidas de agua de la muestra colocada en su interior a intervalos determinados y la temperatura de la superficie de la misma, manteniendo la constancia de la velocidad, temperatura y humedad del aire en cada corrida. Es necesario también dotar al equipo de los mecanismos adecuados que permitan hacer variar las condiciones de trabajo a voluntad del operador, para las distintas corridas, de modo de conseguir situar los parámetros termodinámicos considerados dentro de los valores deseados.

Un tunel de secado que se adapta a estas exigencias ha sido enteramente construido y montado en el Laboratorio Tecnológico de la Facultad de Química y Farmacia de La Plata, y dotado de todos los aparatos de control necesarios para esta clase de experiencias.

El compartimiento ha sido construido con un conducto "Eternit" de fibro-cemento de 30 x 40 x 250 cm y dotado de una portezuela de 30 x 20 cm en un costado, que permite manipular la muestra, colocada en un platillo ad-hoc, que pende, a través de un orificio, del brazo de una balanza ubicada a su vez, sobre el conducto.



La corriente de aire es producida por un extractor centrífugo "Marelli L B 25", colocado en un extremo del compartimiento y su velocidad controlada por medio de una rejilla regulable que ofrece resistencia al pasaje del aire.

El sistema de calentamiento del aire utilizado, consiste en una resistencia de alambre de nicrom de 1 mm. de diámetro, con una capacidad de 16,5 amperes, colocada en serie con un reóstato, que permite su regulación, de modo de obtener la temperatura deseada. Esta resistencia está colocada en la boca del túnel, cerca del ventilador, en forma de zig-zag, de modo que el aire al pasar se ponga en contacto con ella y se caliente.

La humidificación del aire se efectúa por medio de una corriente de vapor obtenida por ebullición de agua en dos balones pyrex de tres litros de capacidad cada uno, calentados directamente a mechero de gas. El tubo de desprendimiento desemboca en un orificio efectuado **en el conducto** de recirculación del aire, de modo que antes de pasar el aire sobre la muestra ha tenido tiempo de homogeneizarse.

Si el aire adquiere una humedad demasiado elevada, se consigue hacerla bajar inmediatamente permitiendo entrar una porción de aire atmosférico.

Control de temperatura. Una vez obtenida la temperatura deseada, se mantiene constante modificando la posición del reóstato de modo que la corriente que pasa por la resistencia interna sea exactamente la necesaria para compensar las pérdidas por radiación del equipo.

Las temperaturas que se controlan son: la temperatura a bulbo seco y a bulbo húmedo del aire y la temperatura de la superficie de la muestra. Para ello se dispone de tres termocuplas de cobre-constantán conectadas a un potenciómetro por medio de una llave de tres puntos.

El control de la humedad se hace a bajas temperaturas

(hasta 30°C más o menos) por medio de un higrómetro a cabello, colocado en la parte superior del tunel y a la izquierda de la balanza. Para temperaturas más elevadas se usa un higrómetro eléctrico basado en el siguiente principio: un pequeño ventilador absorbe aire del interior del tunel de secado y lo hace pasar por los bulbos de tres termómetros a resistencia, dos a bulbo seco y el otro a bulbo húmedo, conectados con un puente de Wheatstone, cuya escala está graduada directamente en porcentaje de humedad relativa.

El control de peso, como ya se ha especificado, se hace por medio de una balanza de sensibilidad 20 mg, colocada directamente sobre el compart. unto. Un platillo de zinc de 30 x 20 cm pende del brazo izquierdo de la balanza y está colocado en el interior del tunel; sobre él se coloca la muestra.

Esto permite el pesaje del material, durante la operación de secado, sin necesidad de sacarlo del tunel.

La velocidad del aire es medida por un anemómetro Joules-Richard, el que se coloca en el medio de la corriente de aire, de modo que ésta incida perpendicularmente a las paletas del molinillo del aparato, dándonos directamente la velocidad del aire en metros por minuto.

Recirculación del aire. Un tubo de fibrocemento de 25 cm de diámetro, con codos del mismo material que por un lado lo comunican con el ventilador y por el otro con la parte final del tunel, cierran el circuito por donde el aire se recicla. Completan las conexiones un par de embudos de hojalata, revestidos exteriormente con **amiante** y magnesia plástica como aisladores. Uno de ellos comunica el ventilador con la parte anterior del **tunel donde se halla la resistencia de nicrom** y el otro la parte posterior del compartimiento de secado con el tunel de reciclado.

Todas las piezas, tanto el motor como los conductos,

son enteramente desmontables, de modo que el acceso a cualquier parte del aparato sea factible para poder subsanar una posible avería.

### REALIZACIÓN DE LAS CORRIDAS

#### 1) Preparación de la muestra

La muestra, convenientemente mezclada y molida en un molino a bola hasta alcanzar un polvo prácticamente impalpable, se adiciona de agua de empaste, de modo que forme una masa homogénea y plástica y se coloca en un cristalizador de 15 cm de diámetro, habiendo previamente tenido cuidado en recubrir el mismo interiormente con una lámina de papel estaño o plomo, para evitar que la arcilla al contraerse por el secado se pegue a las paredes del cristalizador y se raje; al mismo tiempo, al reducirse el volumen inicial por la pérdida de agua el papel al adherirse a la muestra, hace que los costados de la misma se encuentren cubiertos y de ese modo no se aumenta la superficie expuesta. La superficie que se ofrece al contacto del aire para ser secada, debe ser cuidadosamente alisada.

#### 2) Puesta en regimen del tunel

a) Velocidad del aire. Se hace funcionar el ventilador y se controla la velocidad, regulándola por medio de la rejilla colocada delante del ventilador, hasta alcanzar la velocidad deseada.

b) Temperatura del aire. Cerrando el circuito por medio de la llave correspondiente, queda conectada la resistencia interior del tunel, encargada de calentar el aire utilizado en la operación. Alcanzada la temperatura deseada, se regula la **intensidad** de la corriente que alimenta la resistencia interna por medio del reóstato colocado en serie, hasta que las pérdidas de calor del aparato sean igualadas por el calor suministrado.

c) Humedad del aire. Una vez que el aire ha llegado a la temperatura de trabajo, se mide la humedad del mismo. Si su porcentaje es inferior al deseado, se le suministra vapor de agua producido en los balones colocados al efecto. Si en cambio, el porcentaje de humedad es mayor, se abre la portezuela y se hace entrar aire atmosférico hasta obtener el valor de humedad deseado.

3) Colocación de la muestra. La muestra preparada de la manera indicada en 1) se introduce en el tunel y se coloca en el platillo ad-hoc que hay en el interior del mismo y deteniendo el ventilador es rápidamente pesada.

Se coloca asimismo, una segunda muestra, a cuya superficie se adosa la termocupla que ha de medir su temperatura, pues no es posible hacerlo por razones obvias, con la que está sobre el platillo.

4) Manteniendo durante la corrida, la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire en las condiciones preestablecidas, a intervalos regulares se constata la pérdida de peso de la muestra y son leídas las temperaturas a bulbo seco, a bulbo húmedo del aire y sobre la superficie de la muestra.

El secado es continuado hasta obtener los puntos necesarios para el trazado de la curva de velocidad de secado correspondiente.

Los parámetros considerados para la representación gráfica de la operación son la velocidad de secado y la humedad total por ciento, referida al material seco.

#### EJEMPLO DE LOS CÁLCULOS EFECTUADOS

Corrida Nº 1; muestra Nº 0

Datos:

$P = 390,12 \text{ g}$	$t_g = 43,2^{\circ}\text{C}$	$A = 128,81 \text{ cm}^2$
$D = 279,67 \text{ g}$	$t_w = 33,0^{\circ}\text{C}$	$H_R = 48\%$
$W = 6,55 \text{ g}$	$t_s = 35,4^{\circ}\text{C}$	$v = 500 \text{ m/min}$

1) Velocidad de secado R.

$$R = \frac{dW}{d\theta \cdot A}$$

$$R = \frac{6,55}{0,5 \cdot 128,81}$$

$$R = 0,102 \text{ g de agua evaporada/hora} \cdot \text{cm}^2$$

2) Humedad total por ciento  $H_T$

$$H_T = \frac{W - D}{D} \cdot 100$$

$$H_T = \frac{390,12 - 279,67}{279,67} \cdot 100$$

$$H_T = 39,5 \text{ g de agua/g de sustancia seca}$$

(por ciento)

-----

Haciendo las curvas de la velocidad de secado, tomando como ordenada la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo y de superficie y por abscisa el contenido total de agua de la sustancia, es como se puede estudiar el comportamiento del material frente a las variaciones de los parámetros termodinámicos, es decir, ver cómo influye en el proceso de secado un aumento o disminución de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. De este modo, comparando las curvas de velocidad de secado, será posible elegir las condiciones óptimas que más convengan a las características de la sustancia y de nuestro trabajo.

A continuación se insertan las tablas de valores obtenidas, con sus correspondientes representaciones gráficas.

-----

MUESTRA Nº 0

$t_g = 43.20C$   $H_R = 48\%$   $u = 500$  m/min  $A = 128.81$  cm<sup>2</sup>  $P = 390.1$   
 $D = 279.67$  g

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
11.45	390.12						39.5
12.15	383.57	6.55	43.2	33.2	35.4	0.102	37.1
12.45	377.67	5.90	43.2	33.0	35.4	0.092	35.0
13.15	371.50	6.17	43.5	33.0	35.0	0.096	32.8
13.45	366.03	5.47	43.0	32.8	35.4	0.085	30.8
14.15	359.74	6.29	43.2	33.0	35.5	0.097	28.6
14.45	353.84	5.90	43.5	33.6	36.8	0.092	26.5
15.15	348.22	5.62	43.2	33.2	37.8	0.087	24.5
15.45	342.97	5.25	43.5	33.5	38.2	0.081	22.6
16.15	338.04	4.93	43.5	33.0	39.2	0.076	20.8
16.45	333.77	4.27	43.5	33.0	40.0	0.066	19.5
17.15	330.19	3.58	43.5	33.5	40.8	0.055	18.0
17.45	326.92	3.27	43.5	35.5	41.8	0.050	16.9

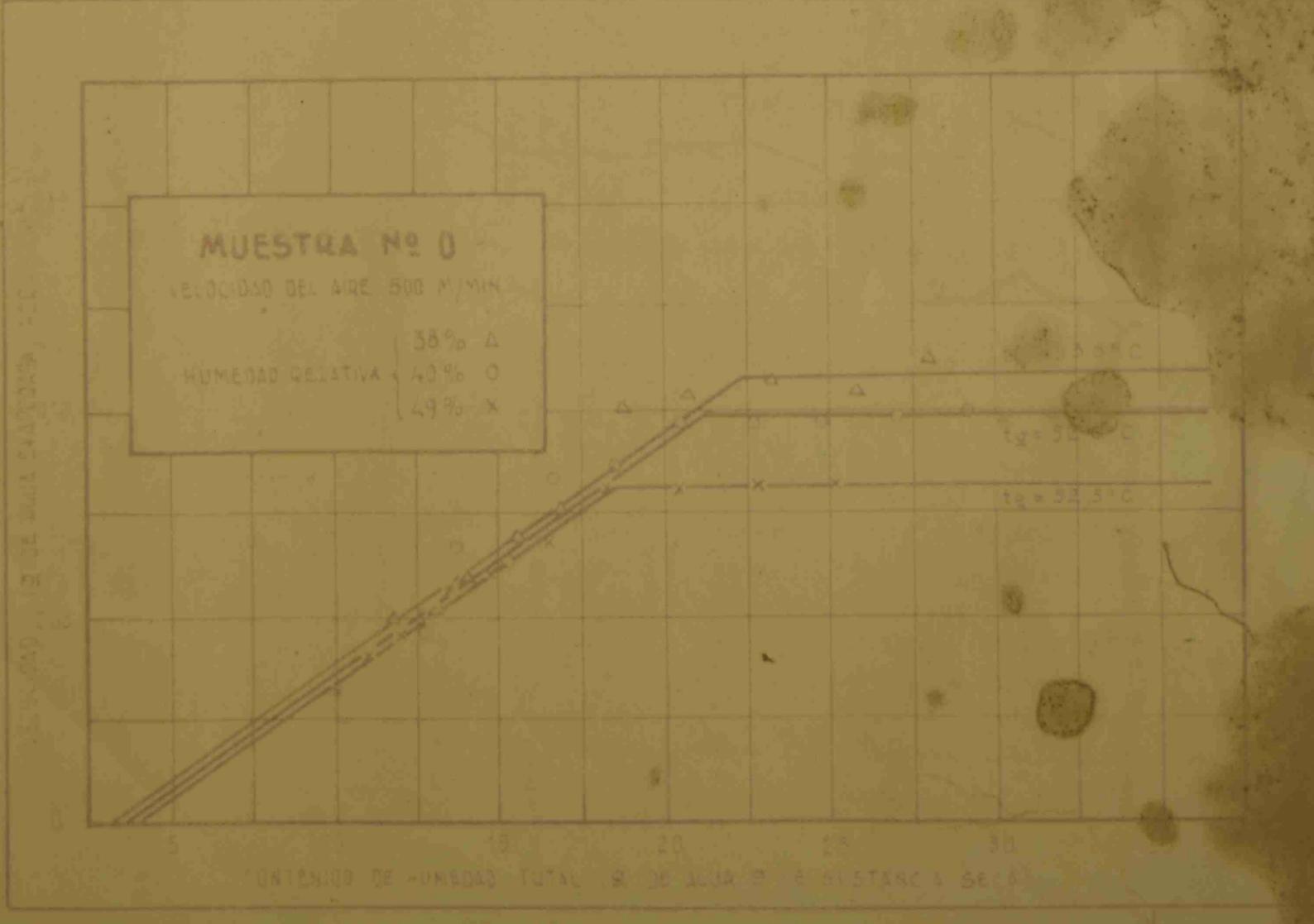
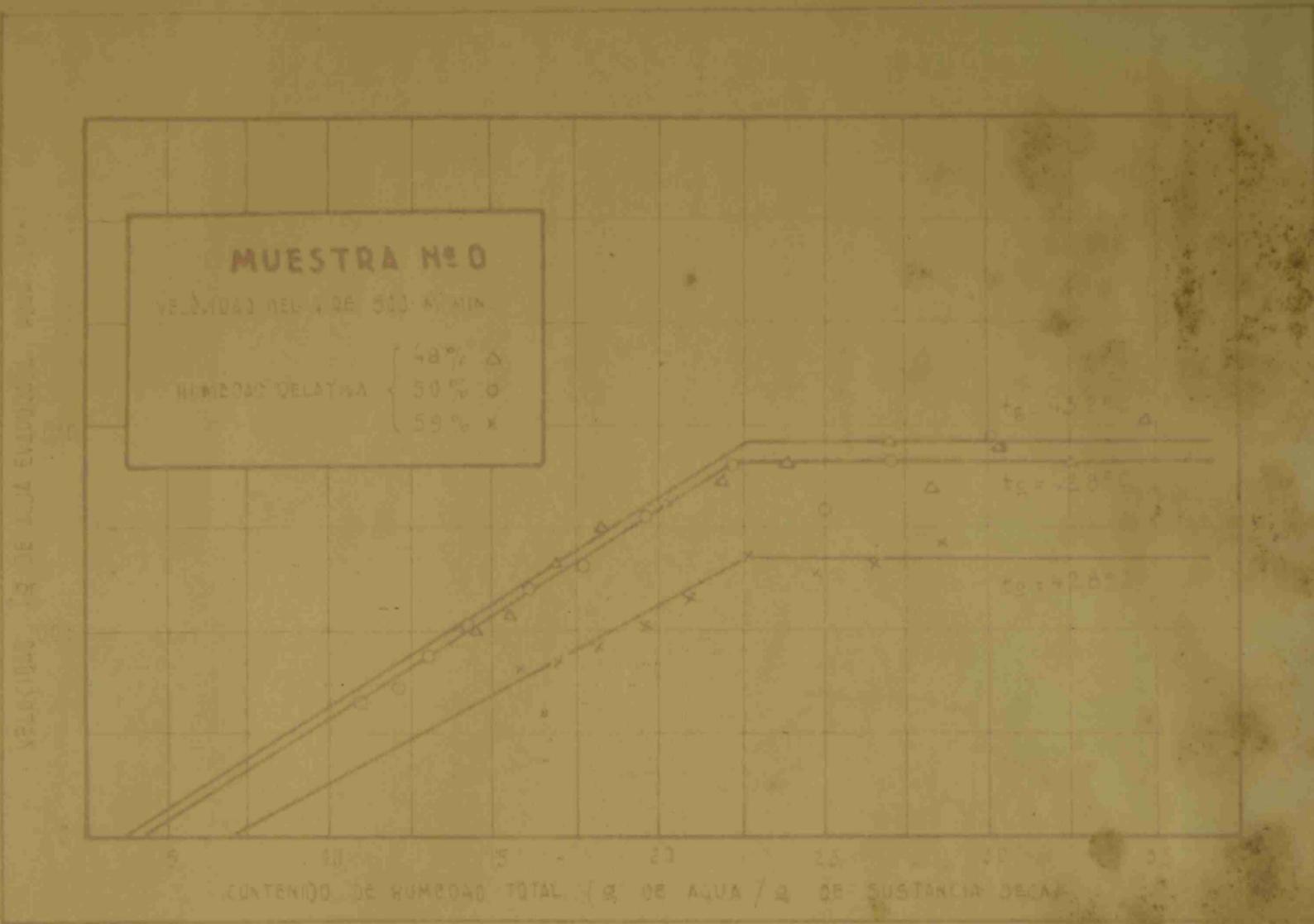
$t_g = 42.80C$   $H_R = 50\%$   $u = 500$  m/min  $A = 132.61$  cm<sup>2</sup>  $P = 297.1$   
 $D = 218.85$  g

8.35	297.15						35.0
9.05	290.68	6.47	42.8	32.8	36.0	0.098	32.6
9.35	284.55	6.13	42.8	32.8	35.8	0.092	29.4
10.05	279.25	5.30	42.5	32.6	35.8	0.080	27.4
10.35	273.20	6.05	42.8	32.8	35.8	0.091	24.7
11.05	268.02	5.18	44.0	33.0	36.0	0.079	22.3
11.35	263.60	4.42	43.5	32.5	36.4	0.066	20.2
12.05	259.56	4.04	42.8	32.8	37.2	0.061	18.4
12.35	256.09	3.47	42.8	32.8	38.0	0.052	16.8
13.05	253.14	2.95	43.0	33.0	38.5	0.044	15.5
13.35	250.69	2.45	42.4	32.5	40.5	0.037	13.4

$t_g = 42.80C$   $H_R = 59\%$   $u = 500$  m/min  $A = 125.60$  cm<sup>2</sup>  $D = 300$   
 $D = 227.27$  g

10.40	300.09						33.1
11.10	295.52	4.57	42.8	35.5	38.0	0.072	31.0
11.40	291.27	4.25	43.2	35.8	39.0	0.067	29.1
12.10	287.22	4.05	42.8	35.8	38.0	0.064	27.2
12.40	282.85	4.37	42.5	35.8	38.0	0.069	25.2
13.10	279.12	3.73	42.8	35.8	38.5	0.059	23.5
13.40	275.85	3.27	42.8	35.8	39.2	0.051	22.0
14.10	272.92	2.93	42.8	36.0	40.5	0.046	20.7
14.40	270.23	2.69	42.8	35.8	40.5	0.042	19.5
15.10	267.64	2.59	42.5	35.8	41.8	0.041	18.3

# VELOCIDAD DE SECADO



ILUSTRASI 0

$t_g = 53.6^{\circ}\text{C}$   $H_R = 38\%$   $u = 500$  m/min  $A = 128.81$  cm<sup>2</sup>  $P = 378.54$   
 $D = 284.38$  g

$\theta$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
11.35	378.54						32.3
12.05	371.36	7.18	53.6	38.4	39.2	0.112	30.6
12.35	366.66	6.70	53.2	38.4	40.0	0.104	28.3
13.05	357.81	6.85	54.0	38.4	39.4	0.107	25.8
13.35	351.18	6.63	53.6	38.4	39.6	0.103	23.2
14.05	344.78	6.40	53.6	38.0	39.8	0.100	21.2
14.35	339.38	4.90	54.2	38.0	44.5	0.076	19.5
15.05	335.44	4.44	54.8	38.0	45.6	0.069	17.9
15.35	331.64	3.80	55.0	38.2	46.0	0.059	16.6
16.05	328.38	3.26	55.0	38.2	46.4	0.051	15.5
16.35	325.14	3.24	55.0	38.2	46.6	0.050	14.3

$t_g = 52.6^{\circ}\text{C}$   $H_R = 40\%$   $u = 500$  m/min  $A = 128.10$  cm<sup>2</sup>  $P = 387.24$  g  
 $D = 288.91$  g

10.00	387.24						33.9
10.30	380.73	6.51	52.6	38.0	40.8	0.100	31.7
11.00	374.41	6.29	52.6	38.0	40.8	0.098	29.5
11.30	368.22	6.22	52.6	38.2	40.8	0.097	27.3
12.00	361.98	6.24	52.6	38.2	40.8	0.097	25.2
12.30	355.73	6.25	52.5	38.2	45.4	0.097	23.0
13.00	350.10	5.63	52.5	38.2	47.0	0.087	21.1
13.30	344.78	5.32	52.5	38.4	49.6	0.083	19.3
14.00	340.70	4.08	52.8	38.4	50.2	0.063	17.8
14.30	336.90	4.31	52.8	38.2	50.2	0.067	16.3
15.00	333.41	2.98	52.6	38.0	50.2	0.046	15.3

$t_g = 52.5^{\circ}\text{C}$   $H_R = 49\%$   $u = 500$  m/min  $A = 124.62$  cm<sup>2</sup>  $P = 295.03$  g  
 $D = 228.46$  g

10.05	295.03						29.8
10.35	289.98	.10	52.5	40.5	45.4	0.082	27.5
11.05	284.91	.07	52.5	40.5	45.4	0.081	25.3
11.35	279.91	5.00	52.5	40.5	45.6	0.080	23.1
12.05	274.85	5.06	53.2	40.2	46.5	0.081	20.8
12.35	270.56	4.29	53.2	40.2	46.8	0.068	19.0
13.05	266.80	3.76	54.2	40.5	48.2	0.060	17.3
13.35	263.38	3.42	54.8	40.5	49.0	0.057	16.0
14.05	260.58	2.80	55.0	40.8	49.8	0.045	14.5
14.35	258.06	2.52	55.0	40.8	50.4	0.046	13.4
15.05	256.08	1.98	55.0	40.8	50.8	0.031	12.5

ILUSTRA N<sup>o</sup> 0

$t_g = 64.2^{\circ}\text{C}$   $H_R = 30\%$   $u = 500$  m/min  $A = 140.45$  cm<sup>2</sup>  $P = 355.28$  g

$D = 257.29$  g

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	H <sub>T</sub> %
10.25	355.28						35.1
10.55	347.09	9.19	64.2	40.4	46.4	0.122	34.6
11.25	336.49	10.60	64.2	42.0	46.4	0.141	30.4
11.55	325.46	11.03	64.0	41.6	46.4	0.147	26.1
12.25	315.54	9.92	64.2	42.2	47.0	0.132	22.2
12.55	307.06	8.48	65.2	41.6	49.4	0.113	19.0
13.25	300.94	6.12	65.2	42.0	53.0	0.082	16.6
13.55	295.69	5.25	65.0	42.0	53.4	0.070	14.5
14.25	292.09	3.60	65.0	42.2	53.6	0.048	13.1
14.55	288.64	3.45	65.0	42.2	54.2	0.046	11.8

$t_g = 65.0^{\circ}\text{C}$   $H_R = 30\%$   $u = 500$  m/min  $A = 130.63$  cm<sup>2</sup>  $P = 367.51$  g

$D = 273.60$  g

9.45	367.55						34.2
10.15	358.22	9.33	65.0	43.4	46.8	0.142	30.9
10.45	349.40	8.82	65.0	43.4	46.8	0.135	27.6
11.15	340.32	9.08	65.0	43.4	46.8	0.134	24.3
11.45	332.48	7.84	65.0	43.4	48.4	0.120	21.4
12.15	325.50	6.98	65.0	43.4	50.8	0.107	18.9
12.45	320.10	5.40	65.0	43.4	52.4	0.082	16.9
13.15	315.62	4.48	65.3	43.2	54.0	0.068	15.3
13.45	312.10	3.52	65.6	43.0	54.6	0.055	14.0

$t_g = 65.0^{\circ}\text{C}$   $H_R = 33\%$   $u = 500$  m/min  $A = 130.19$  cm<sup>2</sup>  $P = 334.09$  g

$D = 249.04$  g

10.20	334.09						34.0
10.50	326.09	8.00	65.0	44.6	50.6	0.117	30.8
11.20	318.16	7.93	65.0	45.4	50.6	0.117	27.6
11.50	310.38	7.78	65.0	45.0	50.6	0.114	24.5
12.20	302.96	7.42	65.0	45.2	51.5	0.109	21.5
12.50	296.66	6.30	65.4	45.0	53.0	0.092	19.0
13.20	291.34	5.32	65.0	44.8	53.4	0.077	16.9
13.50	287.09	3.65	65.0	45.0	54.5	0.053	15.3
14.20	284.24	3.45	65.4	45.0	56.0	0.050	14.0
14.50	281.26	2.98	65.0	42.2	56.2	0.044	12.8

MUESTRA Nº 3

$t_g = 44.8^\circ\text{C}$   $H_R = 43\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 124.62 \text{ cm}^2$   $P = 359.$   
 $D = 277.96 \text{ g}$

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T$
9.45	359.00						29.1
10.15	353.14	5.86	43.5	32.4	35.0	0.094	27.0
10.45	347.23	5.91	44.0	32.4	35.0	0.095	24.8
11.15	341.23	6.00	43.8	32.4	35.0	0.096	22.7
11.45	335.78	5.45	43.8	32.4	35.0	0.087	20.7
12.15	330.80	4.98	43.8	32.4	36.0	0.080	19.0
12.45	326.48	4.32	44.5	31.4	38.0	0.069	17.4
13.15	322.86	3.62	43.8	32.4	38.5	0.058	16.1
13.45	319.54	3.32	43.6	32.4	39.2	0.053	14.9
14.15	316.61	2.93	43.8	32.4	40.2	0.047	13.9
14.45	313.93	2.68	44.0	32.4	41.4	0.042	12.5
15.15	311.72	2.21	43.8	32.4	41.6	0.035	12.0

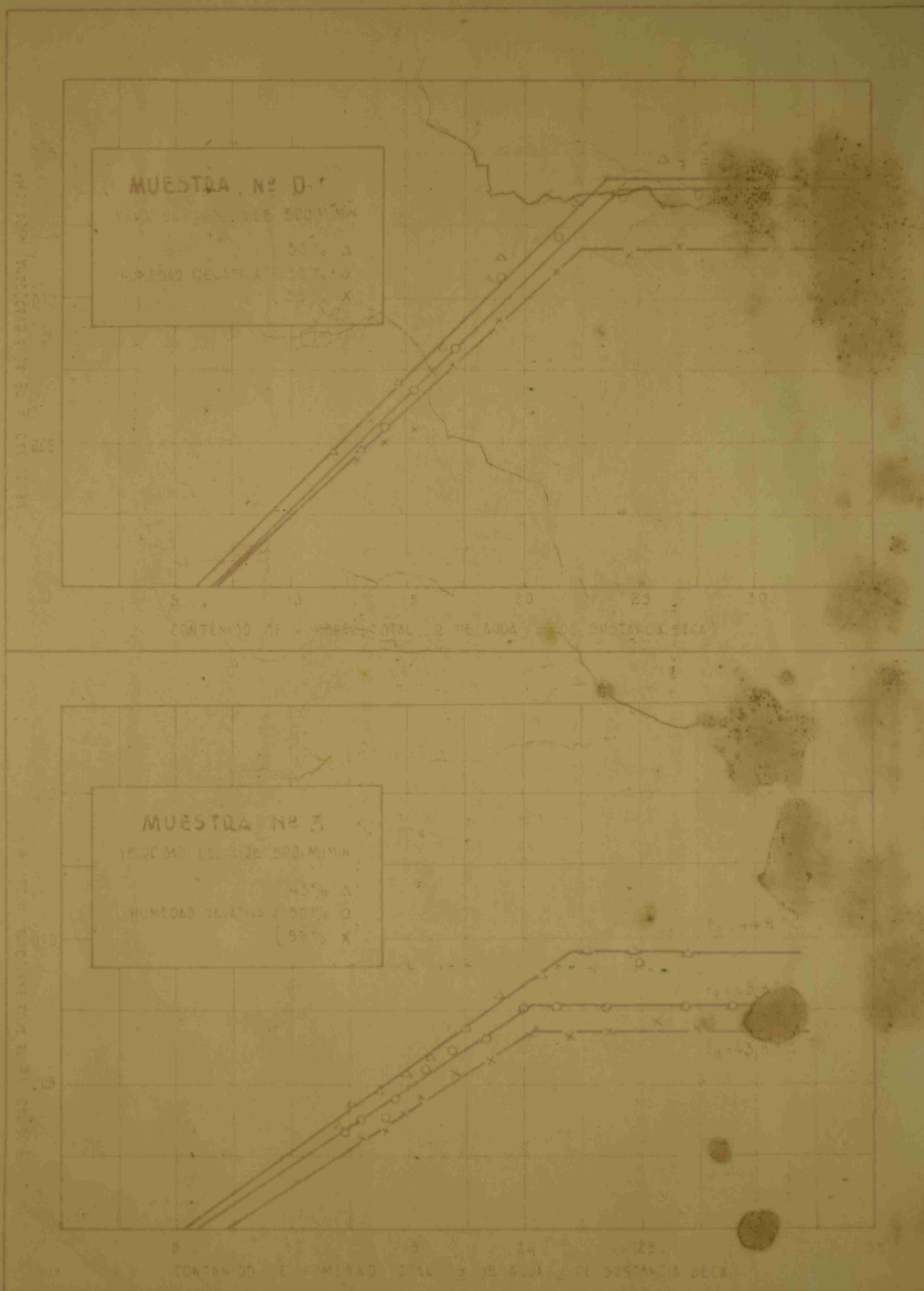
$t_g = 43.8^\circ\text{C}$   $H_R = 50\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 130.63 \text{ cm}^2$   $P = 382.35$   
 $D = 293.54 \text{ g}$

10.05	382.35						30.6
10.35	377.35	5.00	42.2	33.2	35.0	0.077	28.9
11.05	372.33	5.02	43.8	33.2	36.8	0.077	27.1
11.35	366.41	5.92	44.5	33.2	36.8	0.091	25.1
12.05	361.43	4.98	43.8	33.2	36.8	0.076	23.4
12.35	356.60	5.07	43.8	33.2	37.0	0.077	21.6
13.05	351.38	4.98	43.2	33.2	37.8	0.076	19.9
13.35	347.11	4.27	43.0	33.2	38.2	0.065	18.4
14.05	343.13	3.98	44.2	33.2	39.2	0.061	17.1
14.35	339.50	3.63	44.0	33.2	40.0	0.055	15.8
15.05	336.63	2.87	43.8	33.2	40.2	0.044	14.8
15.35	334.18	2.45	43.8	33.2	40.8	0.038	14.0
16.05	331.75	2.43	43.8	33.2	40.2	0.038	13.0
16.35	329.64	2.11	43.8	33.2	41.8	0.032	12.3

$t_g = 43.8^\circ\text{C}$   $H_R = 58\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 128.82 \text{ cm}^2$   $P = 355.95 \text{ g}$   
 $D = 277.02 \text{ g}$

10.40	355.95						29.2
11.10	351.42	4.53	43.6	35.5	37.2	0.069	27.5
11.40	346.69	4.73	43.8	35.8	38.0	0.072	25.8
12.10	341.59	5.10	43.8	35.8	38.0	0.068	23.8
12.40	336.67	4.92	43.8	35.8	38.2	0.065	22.0
13.10	331.64	5.03	43.8	35.8	38.0	0.066	20.2
13.40	327.17	4.47	44.0	36.0	38.5	0.058	18.5
14.10	323.07	4.10	43.8	35.8	39.2	0.053	17.0
14.40	319.38	3.69	43.8	35.8	41.0	0.046	15.6
15.10	316.77	2.61	43.5	35.8	41.6	0.040	14.7
15.40	314.51	2.26	43.8	36.2	42.0	0.034	13.9
16.10	312.46	2.05	43.8	35.8	42.5	0.031	13.1

# VELOCIDAD DE SECADO



MUESTRA No 3

$t_g = 53.2^{\circ}\text{C}$   $H_R = 39\%$   $u = 500$  m/min  $A = 128.81$  cm<sup>2</sup>  $P = 380.82$  g  
 $D = 286.79$  g

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_v$	$t_B$	R	$H_T\%$
11.35	380.82						33.1
12.05	373.64	7.18	53.2	38.4	38.8	0.111	30.5
12.35	366.74	6.90	53.2	38.4	38.8	0.107	28.2
13.05	360.27	6.47	53.2	38.4	38.8	0.100	25.8
13.35	352.87	7.40	53.4	38.2	39.2	0.115	23.2
14.05	346.62	6.20	54.2	38.0	40.4	0.096	21.0
14.35	340.75	5.92	54.8	38.0	44.2	0.092	19.0
15.05	336.16	5.59	54.0	38.2	46.0	0.071	17.3
15.35	331.74	4.42	53.2	38.2	46.4	0.068	15.8
16.05	327.87	3.87	53.2	38.2	46.8	0.060	14.3
16.35	324.38	3.49	53.4	38.2	48.2	0.054	13.1

$t_g = 52.5^{\circ}\text{C}$   $H_R = 41\%$   $u = 500$  m/min  $A = 129.62$  cm<sup>2</sup>  $P = 392.74$  g  
 $D = 298.04$  g

10.00	392.14						32.4
10.30	385.96	6.18	52.5	38.2	40.8	0.095	30.3
11.00	379.99	5.97	52.5	38.0	40.8	0.092	28.4
11.30	373.79	6.20	52.5	38.2	40.8	0.095	26.1
12.00	367.57	6.22	52.5	38.6	40.8	0.096	24.0
12.30	361.59	5.98	52.5	38.0	45.4	0.092	21.9
13.00	355.83	5.76	53.2	38.2	47.0	0.088	19.9
13.30	351.22	4.61	53.6	38.2	49.0	0.071	18.3
14.00	347.02	4.20	53.0	38.4	50.2	0.064	16.8
14.30	342.98	4.04	52.6	38.6	50.2	0.062	15.4
15.00	339.70	3.28	52.6	32.0	50.2	0.050	14.3

$t_g = 52.5^{\circ}\text{C}$   $H_R = 48\%$   $u = 500$  m/min  $A = 125.60$  cm<sup>2</sup>  $P = 348.84$  g  
 $D = 267.09$  g

10.05	348.84						30.6
10.35	343.46	5.38	52.5	40.5	44.5	0.085	28.6
11.05	337.97	5.49	52.5	40.5	44.5	0.087	26.5
11.35	332.52	5.45	52.5	40.0	44.5	0.087	24.5
12.05	327.22	5.30	52.4	40.0	45.4	0.085	22.5
12.35	322.52	4.70	53.0	40.4	46.8	0.074	20.7
13.05	317.97	4.55	53.2	40.5	48.2	0.072	19.0
13.35	314.27	3.70	53.0	40.8	48.2	0.059	17.7
14.05	310.94	3.33	52.5	40.8	49.8	0.053	16.4
14.35	308.05	2.39	52.5	40.5	50.4	0.046	15.3
15.05	305.44	2.61	52.5	40.5	50.4	0.042	14.5

EXPERIMENT 3

$t_g = 64.5^\circ\text{C}$   $H_R = 29\%$   $u = 500$  m/min  $A = 128.81$  cm<sup>2</sup>  $P = 381.83$   
 $D = 274.70$  g

$\phi$	P	V	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
10.10	381.83						39.9
10.40	373.22	8.61	64.5	42.0	47.0	0.132	36.4
11.10	364.70	8.52	64.5	41.2	47.0	0.130	33.3
11.40	356.50	8.20	64.8	41.7	47.0	0.126	30.3
12.10	347.73	8.77	64.0	41.7	47.0	0.134	27.0
12.40	338.95	8.78	64.5	41.7	48.2	0.134	23.8
13.10	331.20	7.75	65.0	41.7	49.4	0.119	20.9
13.40	323.68	7.52	65.4	41.7	50.0	0.115	18.1
14.10	317.60	6.08	65.0	41.5	50.6	0.093	15.8
14.40	312.30	5.30	65.4	41.5	50.8	0.081	13.8
15.10	307.92	4.38	65.4	41.7	50.8	0.066	12.7
15.40	304.22	3.70	65.4	41.7	52.0	0.057	10.9

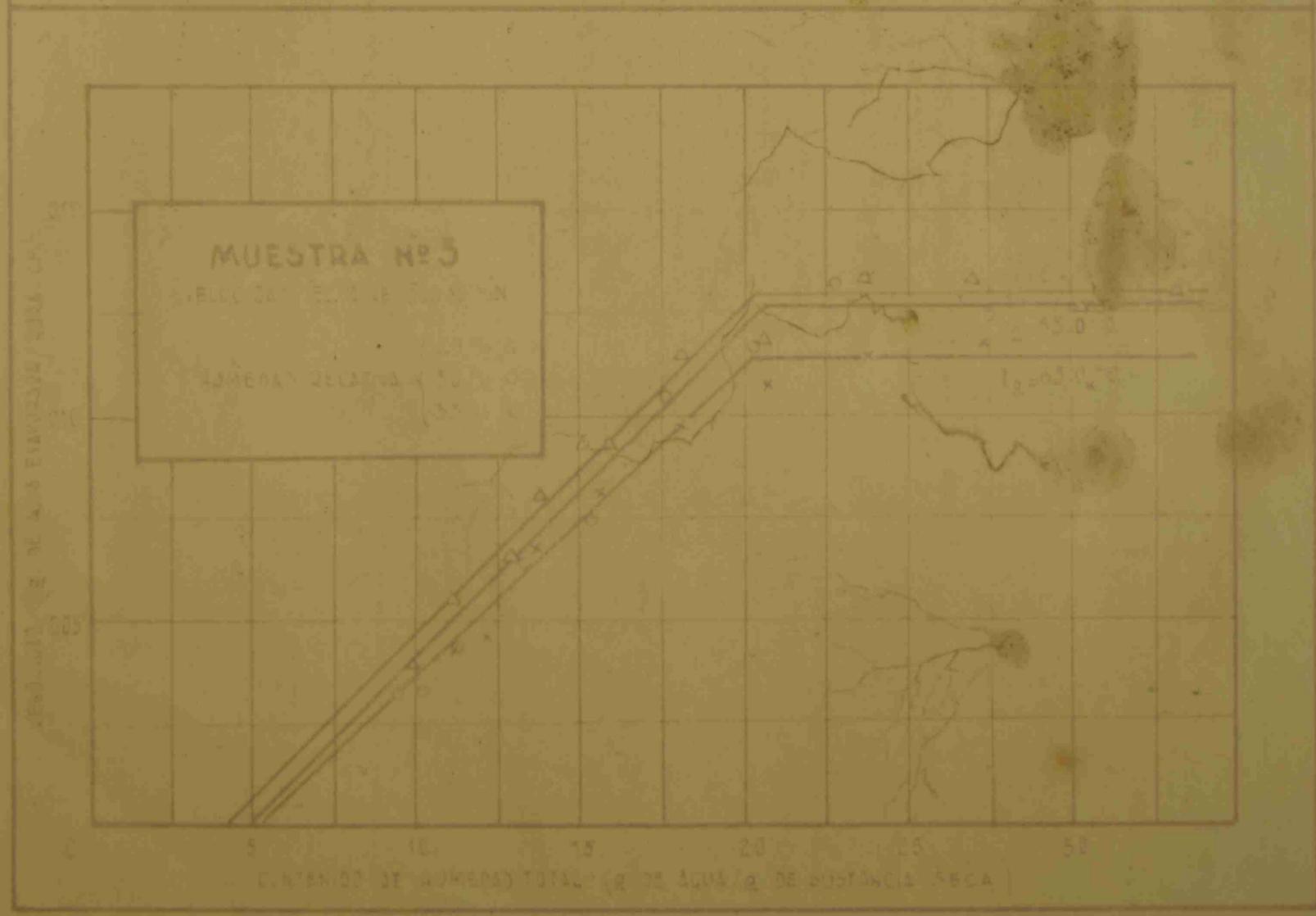
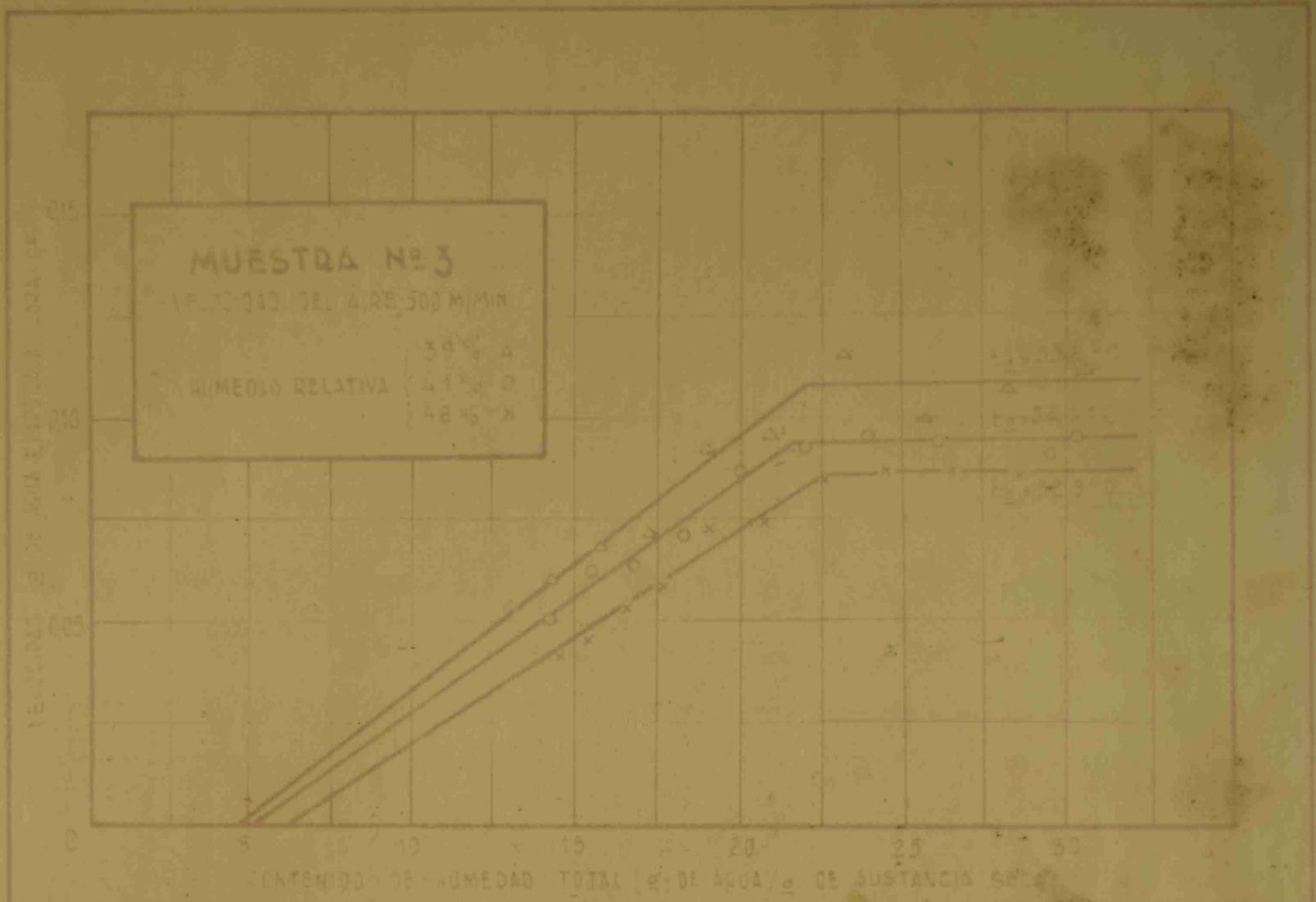
$t_g = 65.0^\circ\text{C}$   $H_R = 30\%$   $u = 500$  m/min  $A = 132.66$  cm<sup>2</sup>  $P = 317.21$  g  
 $D = 235.81$  g

10.50	317.21						34.5
11.20	308.76	8.45	65.4	43.4	47.8	0.127	30.9
11.50	300.94	8.22	64.5	43.4	47.8	0.124	27.4
12.20	292.16	8.78	65.0	43.4	47.8	0.132	23.7
12.50	284.29	7.87	65.0	43.8	50.0	0.118	20.3
13.20	277.31	6.98	65.8	43.4	53.2	0.105	17.4
13.50	272.31	5.00	65.8	44.0	53.4	0.075	15.3
14.20	267.91	4.40	65.5	44.0	53.8	0.066	13.0
14.50	265.41	2.50	65.0	43.4	53.2	0.037	12.3
15.20	262.49	2.92	65.4	43.8	54.5	0.043	11.1
15.50	260.26	2.23	65.4	43.4	56.0	0.033	10.1
16.20	258.01	2.25	67.4	43.4	58.0	0.034	9.2

$t_g = 65.0^\circ\text{C}$   $H_R = 33\%$   $u = 500$  m/min  $A = 132.66$  cm<sup>2</sup>  $P = 310.50$  g  
 $D = 232.06$  g

10.20	310.50						34.1
10.50	303.43	7.07	65.0	44.6	50.6	0.107	30.6
11.20	295.58	7.85	65.0	44.6	50.6	0.118	27.2
11.50	287.91	7.67	65.0	45.4	50.6	0.116	23.8
12.20	280.76	7.15	65.0	44.6	51.8	0.108	20.7
12.50	274.21	6.55	65.2	44.6	52.5	0.099	18.0
13.20	268.73	5.48	65.0	45.0	53.0	0.082	15.5
13.50	264.11	4.62	65.0	44.8	53.4	0.069	13.5
14.20	260.96	3.15	65.2	44.8	53.6	0.047	12.1
14.50	258.12	2.84	65.2	44.6	54.4	0.043	10.9
15.20	255.36	2.76	65.0	44.6	56.2	0.041	9.7

# VELOCIDAD DE SECADO



MUESTRA Nº 6

$t_g = 43.8^{\circ}\text{C}$   $H_R = 48\%$   $u = 500$  m/min  $A = 142.00$  cm<sup>2</sup>  $P = 355.4$  g  
 $D = 260.63$  g

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_B$	R	$H_T\%$
11.45	355.46						36.5
12.15	350.18	5.28	43.8	33.2	35.0	0.074	34.4
12.45	345.03	5.15	43.8	33.2	35.0	0.072	32.4
13.15	339.33	5.70	43.8	33.2	35.0	0.080	30.2
13.45	333.98	5.35	43.8	33.2	35.0	0.075	27.8
14.15	328.68	5.30	43.5	33.2	36.0	0.074	25.7
14.45	323.12	5.56	44.0	32.4	36.8	0.078	23.6
15.15	317.90	5.22	43.2	33.2	38.0	0.073	21.6
15.45	303.35	4.55	43.5	33.2	38.5	0.064	19.8
16.15	299.80	3.55	43.8	33.2	39.2	0.050	18.5
16.45	297.82	2.98	43.8	33.2	40.2	0.042	17.3
17.15	294.90	2.92	43.8	33.2	41.6	0.041	16.2

$t_g = 43.8^{\circ}\text{C}$   $H_R = 55\%$   $u = 500$  m/min  $A = 134.04$  cm<sup>2</sup>  $P = 367.28$  g  
 $D = 276.43$  g

10.05	367.28						32.9
10.35	362.63	4.65	43.8	35.0	37.0	0.070	31.2
11.05	357.43	5.20	43.8	35.0	37.2	0.078	29.3
11.35	352.93	4.50	43.8	35.0	37.0	0.067	27.7
12.05	348.35	4.58	43.8	35.0	37.8	0.069	26.0
12.35	344.03	4.32	43.5	35.0	38.5	0.065	24.5
13.05	339.13	4.90	44.6	34.8	39.2	0.073	22.7
13.35	334.93	4.20	44.0	34.5	39.5	0.064	21.1
14.05	331.03	3.90	43.8	35.0	40.5	0.058	19.8
14.35	327.95	3.08	43.8	35.0	40.8	0.046	18.6
15.05	325.08	2.87	42.8	35.0	41.2	0.044	17.5
15.35	322.56	2.52	42.8	35.0	41.2	0.039	16.7
16.05	320.15	2.41	44.2	35.0	41.4	0.037	15.8

$t_g = 44.0^{\circ}\text{C}$   $H_R = 57\%$   $u = 500$  m/min  $A = 132.06$  cm<sup>2</sup>  $P = 355.35$  g  
 $D = 256.43$  g

10.10	355.35						38.6
10.40	350.93	4.42	43.5	35.2	37.2	0.068	36.9
11.10	346.80	4.13	43.5	36.0	37.8	0.063	35.3
11.40	342.48	4.32	44.0	36.0	37.8	0.066	33.6
12.10	337.78	4.70	44.0	36.0	37.8	0.072	31.7
12.40	333.95	3.83	44.0	36.0	37.8	0.059	30.2
13.10	329.83	4.12	44.0	36.0	40.0	0.063	28.7
13.40	325.90	3.93	44.0	36.0	37.8	0.060	27.1
14.10	322.11	3.79	44.0	35.8	38.2	0.058	25.6
14.40	318.16	3.95	44.0	35.6	40.4	0.060	24.1
15.10	314.26	3.90	44.2	36.0	40.6	0.060	22.7
15.40	310.48	3.78	44.5	36.0	40.8	0.058	21.1
16.10	307.23	3.25	44.5	36.0	41.2	0.050	19.8
16.40	304.11	3.12	44.5	36.0	41.5	0.048	18.6
17.10	301.34	2.77	44.2	36.0	42.0	0.042	17.5
17.40	299.06	2.28	44.5	35.8	42.0	0.035	16.6

MUESTRA Nº 6

$t_g = 52.0^{\circ}\text{C}$   $H_R = 34\%$   $u = 500$  m/min  $A = 151.67$  cm<sup>2</sup>  $P = 331.82$  g

$D = 247.73$  g

$\theta$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
9.55	331.82						34.0
10.25	323.46	8.36	52.0	36.2	40.5	0.110	30.5
10.55	315.04	8.42	52.0	36.2	40.5	0.111	27.2
11.05	306.46	8.58	52.0	36.2	40.5	0.113	23.7
11.55	298.23	8.23	51.6	36.8	41.6	0.109	20.5
12.05	291.56	6.67	51.8	36.2	42.8	0.088	17.7
12.55	286.74	4.82	52.0	36.2	44.2	0.063	15.7
13.05	282.67	4.07	51.8	36.2	44.4	0.053	14.1
13.55	279.16	3.51	52.0	36.2	46.5	0.046	12.7
14.05	276.19	2.97	52.0	36.2	46.8	0.039	11.5
14.55	273.72	2.47	52.0	36.2	48.0	0.032	10.5

$t_g = 52.8^{\circ}\text{C}$   $H_R = 39\%$   $u = 500$  m/min  $A = 151.67$  cm<sup>2</sup>  $P = 346.96$  g

$D = 245.30$  g

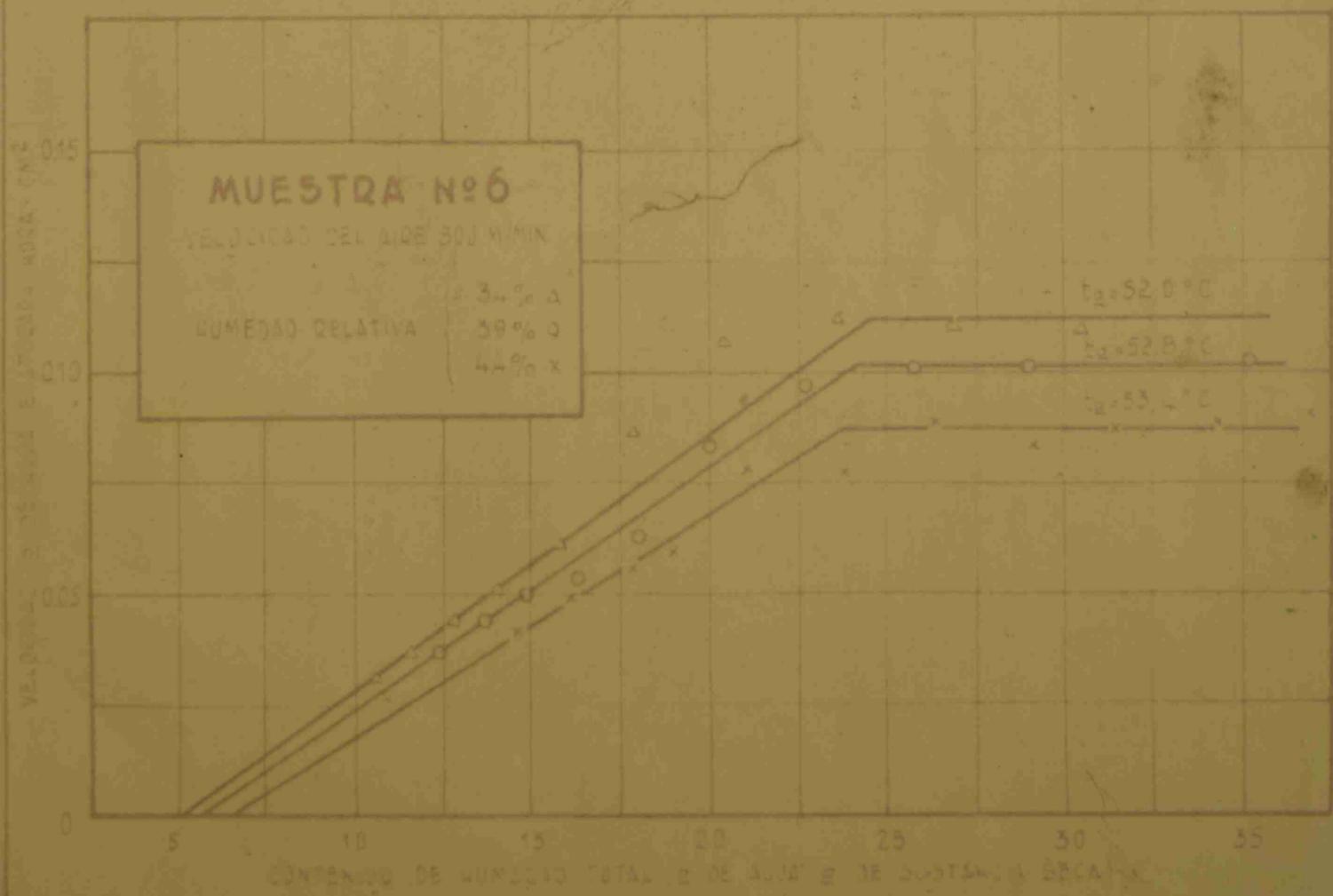
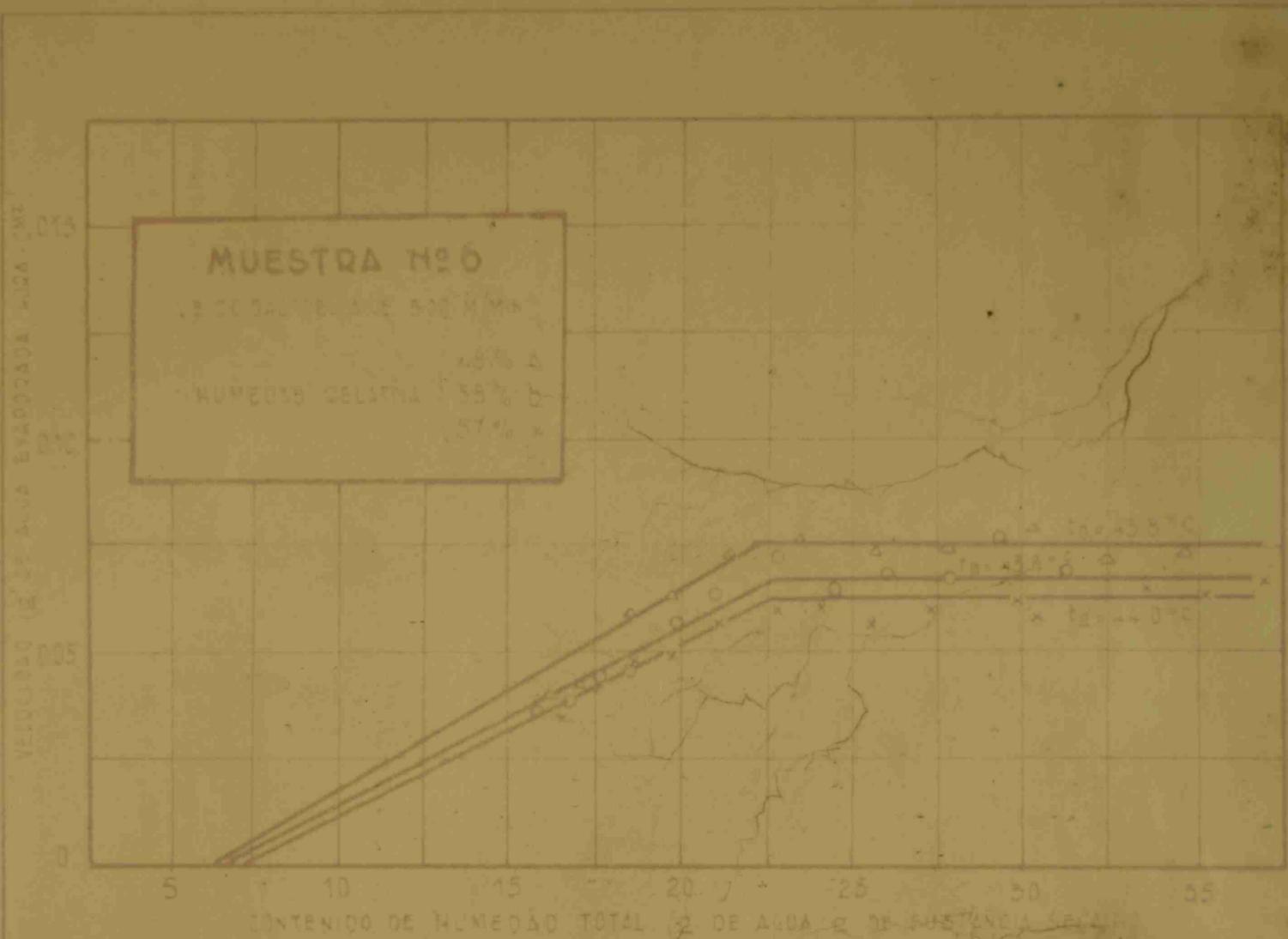
10.20	346.96						41.4
10.50	339.48	7.48	53.2	38.0	43.4	0.098	38.4
11.20	331.75	7.73	52.5	38.0	43.4	0.102	35.2
11.50	324.02	7.73	52.8	38.0	43.4	0.102	32.1
12.20	316.35	7.67	52.8	38.0	44.4	0.101	29.0
12.50	308.58	7.77	52.8	38.2	45.4	0.102	25.8
13.20	301.05	7.53	52.5	38.2	47.6	0.099	22.7
13.50	294.52	6.53	52.5	37.8	49.2	0.086	20.0
14.20	289.67	4.85	53.2	37.8	49.6	0.064	18.1
14.50	285.45	4.22	53.5	38.2	50.2	0.055	16.3
15.20	281.53	3.92	52.8	38.4	50.5	0.051	14.7
15.50	278.03	3.50	52.8	38.0	50.8	0.046	13.4
16.20	275.07	2.96	52.8	38.6	51.5	0.039	12.2

$t_g = 53.4^{\circ}\text{C}$   $H_R = 44\%$   $u = 500$  m/min  $A = 131.74$  cm<sup>2</sup>  $P = 299.23$  g

$D = 213.96$  g

10.20	299.23						39.8
10.50	293.18	6.05	53.4	40.2	45.8	0.091	37.0
11.20	387.31	5.87	54.8	40.0	45.8	0.089	34.3
11.50	281.51	5.80	52.8	40.0	45.8	0.088	31.5
12.20	275.99	5.52	53.4	40.0	45.8	0.084	28.9
12.50	270.08	5.91	53.4	40.0	45.8	0.089	26.2
13.20	264.83	5.25	53.4	40.8	45.8	0.079	23.7
13.50	259.61	5.22	53.4	40.5	46.5	0.079	21.0
14.20	255.61	4.00	53.2	40.2	46.8	0.060	18.9
14.50	251.88	3.73	54.0	40.2	48.2	0.057	17.7
15.20	249.03	3.35	53.4	40.2	49.0	0.051	16.0
15.50	246.56	2.87	53.4	40.2	50.4	0.043	14.6

# VELOCIDAD DE SECADO



MULSTRA Nº 6

$t_g = 66.0^\circ\text{C}$   $H_R = 26\%$   $u = 500$  m/min  $A = 149.27$  cm<sup>2</sup>  $P = 317.91$   
 $D = 226.06$  g

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
10.25	317.91						40.6
10.55	308.51	9.40	66.0	41.6	46.2	0.126	36.4
11.25	298.91	9.60	66.0	41.8	46.2	0.129	32.2
11.55	289.43	9.48	66.2	41.8	46.2	0.127	28.0
12.25	280.01	9.42	66.0	41.8	46.8	0.126	23.8
12.55	271.91	8.10	65.8	41.8	48.2	0.108	20.2
13.25	265.85	6.06	65.8	42.0	49.4	0.081	17.6
13.55	260.23	5.62	65.8	41.8	52.6	0.075	15.1
14.25	255.10	4.42	65.8	41.8	53.2	0.059	13.6
14.55	250.68	3.59	65.2	41.8	53.8	0.048	12.0
15.25	247.09	3.23	65.8	41.8	54.2	0.043	11.0

$t_g = 65.0^\circ\text{C}$   $H_R = 30\%$   $u = 500$  m/min  $A = 153.86$  cm<sup>2</sup>  $P = 371.73$  g  
 $D = 260.25$  g

10.15	371.73						42.8
10.45	362.64	9.09	65.0	43.4	47.8	0.118	39.3
11.15	353.37	9.27	65.0	43.4	47.8	0.120	35.8
11.45	343.48	9.89	65.0	43.4	47.8	0.128	32.0
12.15	334.35	9.13	65.0	43.4	47.8	0.118	28.5
12.45	325.00	9.35	65.0	43.4	47.8	0.120	24.9
13.15	316.32	8.68	65.0	43.4	48.4	0.112	21.5
13.45	309.40	6.92	65.0	43.6	49.6	0.089	18.9
14.15	303.65	5.75	65.2	43.8	52.2	0.074	16.7
14.45	299.02	4.63	65.2	43.4	53.4	0.061	14.9
15.15	294.80	4.22	65.0	43.4	53.8	0.056	13.2

$t_g = 66.5^\circ\text{C}$   $H_R = 33\%$   $u = 500$  m/min  $A = 142.00$  cm<sup>2</sup>  $P = 344.38$   
 $D = 279.80$  g

9.50	344.38						40.0
10.20	336.41	7.97	66.0	46.0	50.6	0.112	36.7
10.50	328.28	8.13	66.5	46.0	50.6	0.114	33.3
11.20	320.00	8.28	66.5	46.0	52.6	0.116	29.9
11.50	311.95	8.05	66.5	46.0	53.0	0.113	26.7
12.20	303.72	8.23	66.5	46.0	53.4	0.115	23.3
12.50	297.85	5.87	66.5	46.0	53.8	0.082	20.8
13.20	291.90	5.95	65.2	47.0	54.5	0.083	18.5
13.50	287.00	4.90	66.0	45.8	56.0	0.068	16.5
14.20	282.80	4.20	65.6	46.0	56.2	0.059	15.1
14.50	279.04	3.76	66.0	46.0	56.8	0.057	13.6

MUESTRA Nº 9

$t_g = 43.8^{\circ}\text{C}$   $H_R = 48\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 151.67 \text{ cm}^2$   $P = 321.17$

$D = 217.54 \text{ g}$

$\phi$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
12.45	321.37						47.7
13.15	315.37	6.00	43.8	33.2	35.8	0.079	44.9
13.45	309.82	5.55	43.8	33.2	35.8	0.073	42.4
14.15	303.59	6.23	43.8	33.2	35.8	0.082	39.5
14.45	297.57	6.02	43.8	33.2	35.8	0.079	36.8
15.15	292.39	5.18	42.8	33.4	35.8	0.068	34.4
15.45	286.40	5.99	45.2	33.2	37.0	0.079	31.3
16.15	280.56	5.93	44.0	33.2	37.8	0.079	28.6
16.45	275.03	5.53	43.8	33.2	38.0	0.073	26.1
17.15	270.45	4.58	43.8	33.2	38.5	0.060	24.0
17.45	266.07	4.38	43.8	33.2	39.2	0.057	21.9
18.15	262.30	3.77	43.8	33.2	39.5	0.049	20.2
18.45	259.15	3.15	43.8	33.2	40.8	0.041	18.7

$t_g = 43.2^{\circ}\text{C}$   $H_R = 50\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 128.10 \text{ cm}^2$   $P = 354.78 \text{ g}$

$D = 240.28 \text{ g}$

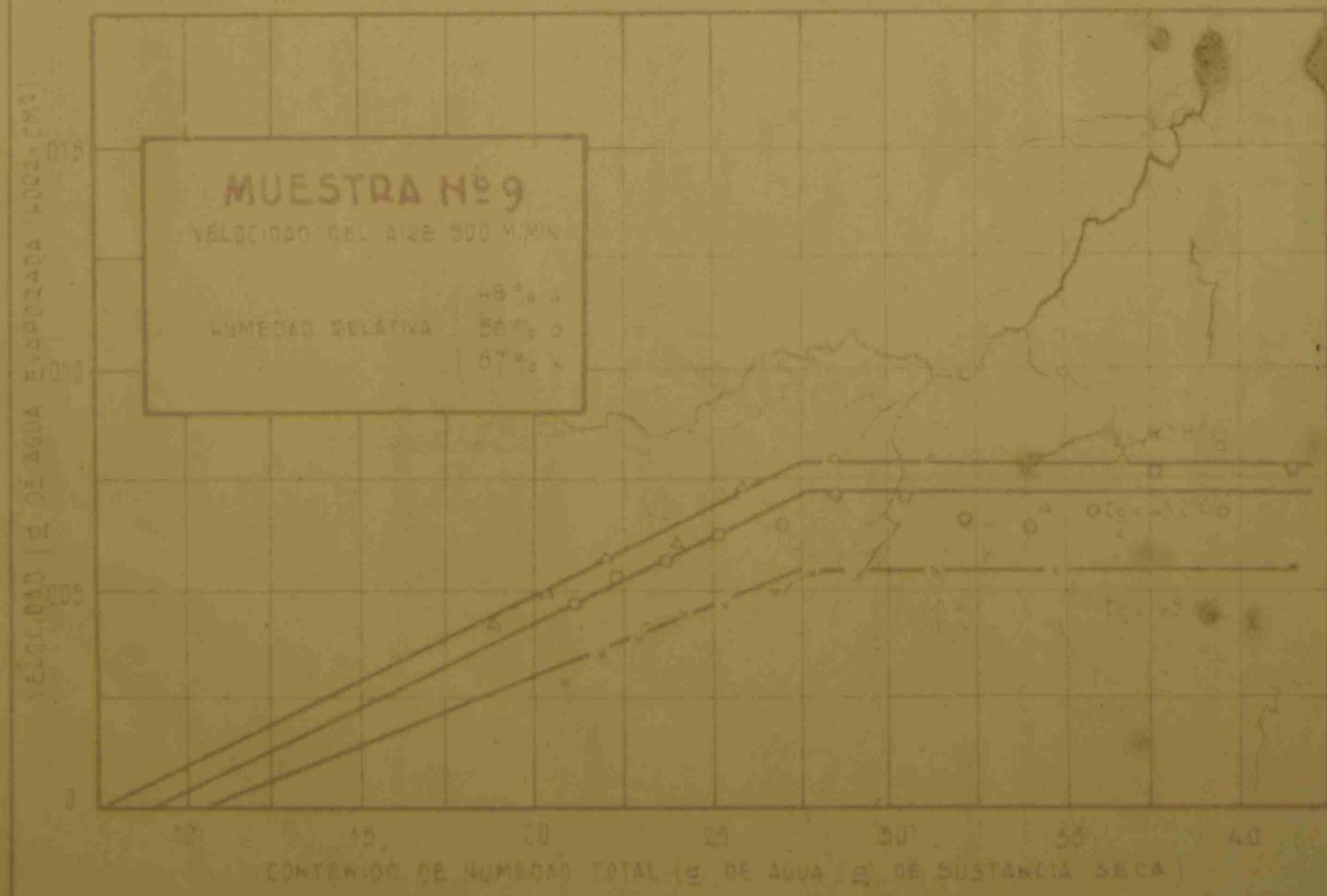
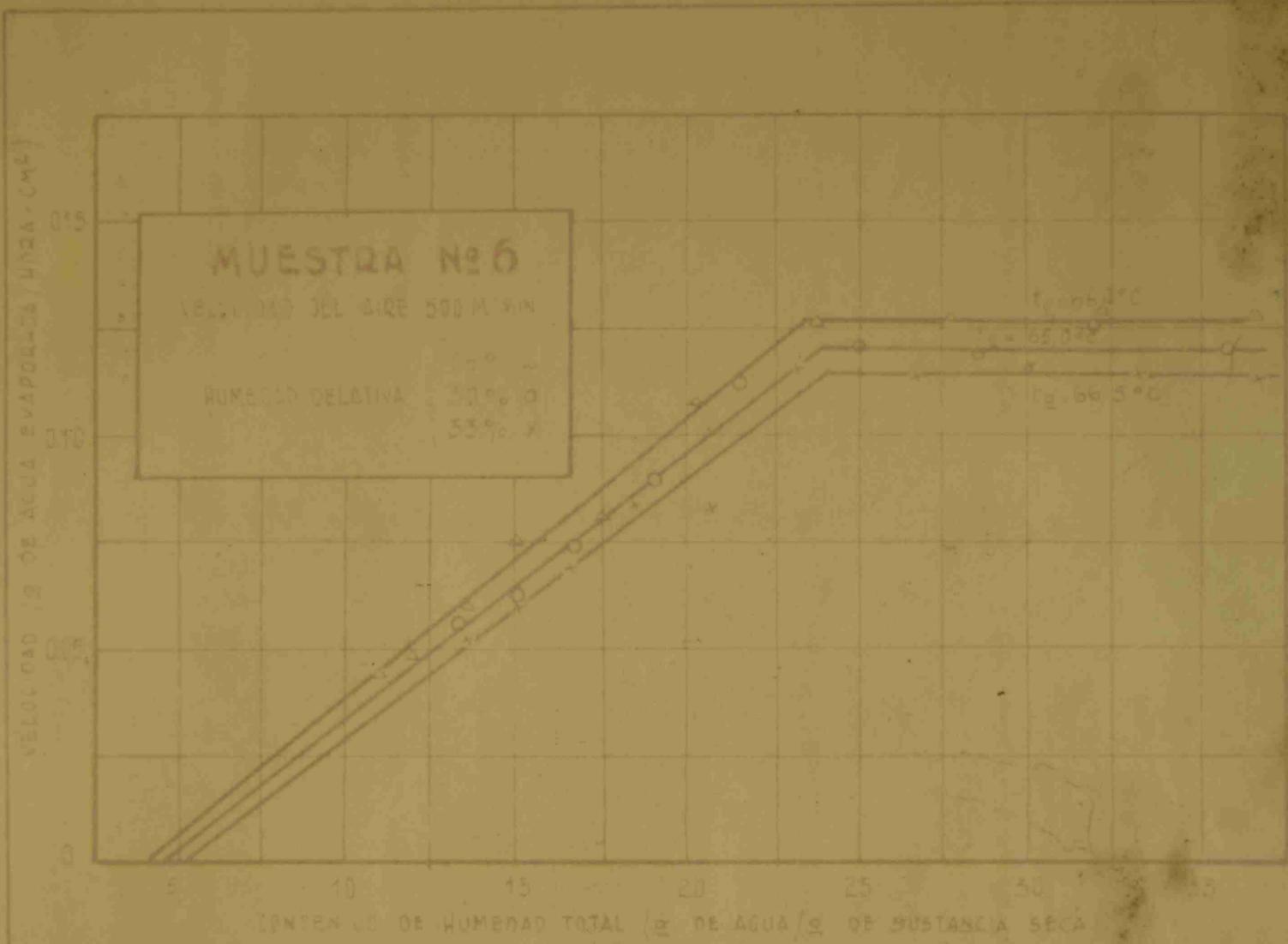
10.05	354.78						47.6
10.35	349.83	4.95	43.2	33.2	35.8	0.077	45.5
11.05	344.88	4.95	43.2	33.2	36.0	0.077	43.5
11.35	339.93	4.95	43.0	33.4	36.0	0.077	41.4
12.05	335.63	4.30	43.2	33.2	36.0	0.067	39.6
12.35	330.71	4.92	43.2	33.2	36.0	0.077	37.5
13.05	326.33	4.38	43.0	33.4	37.0	0.068	35.7
13.35	322.20	4.13	43.2	33.2	38.5	0.064	34.0
14.05	318.03	4.17	43.5	33.0	39.2	0.065	32.3
14.35	313.56	4.47	43.5	33.0	39.5	0.070	30.5
15.05	309.09	4.47	43.2	33.2	40.5	0.070	28.6
15.35	304.96	4.13	43.2	33.2	40.8	0.064	26.9
16.05	301.06	3.90	43.2	33.2	40.8	0.061	25.3
16.35	296.34	3.72	43.8	33.0	41.2	0.058	23.7
17.05	292.89	3.45	43.8	33.0	42.6	0.053	22.3
17.35	289.94	2.95	43.5	33.0	43.2	0.046	21.1

$t_g = 43.4^{\circ}\text{C}$   $H_R = 57\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 137.33 \text{ cm}^2$   $P = 302.78$

$D = 212.38 \text{ g}$

11.10	302.78						38.3
11.40	298.50	4.23	43.4	35.6	38.2	0.062	36.4
12.10	294.78	3.72	43.4	35.6	38.2	0.054	34.7
12.40	290.70	4.08	43.4	35.6	38.2	0.058	32.8
13.10	287.00	3.70	43.4	35.6	38.2	0.054	31.2
13.40	283.36	3.64	42.8	35.6	38.4	0.053	29.0
14.10	279.71	3.65	42.8	35.8	40.4	0.053	27.8
14.40	276.28	3.43	43.8	36.0	40.6	0.049	26.7
15.10	272.90	3.22	44.0	36.0	40.8	0.046	25.3
15.40	269.37	3.03	43.4	35.5	41.2	0.044	23.9
16.10	267.20	2.67	43.5	35.5	42.0	0.038	22.7
16.40	264.77	2.43	43.5	35.8	42.0	0.035	21.7
17.10	262.75	2.02	43.5	35.8	42.2	0.029	20.7

# VELOCIDAD DE SECADO



МУСЫНА № 9

$t_g = 51.8^{\circ}\text{C}$   $H_R = 36\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 132.25 \text{ cm}^2$   $P = 287.73$

$D = 202.01 \text{ g}$

$\phi$	P	$\nabla$	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
9.55	287.73						42.3
10.25	279.98	7.75	51.8	36.2	40.5	0.117	38.5
10.55	271.96	8.02	51.8	36.2	40.5	0.121	34.5
11.25	264.11	7.85	51.6	36.2	40.5	0.118	30.7
11.55	256.71	7.40	52.2	36.2	41.6	0.112	27.0
12.05	250.34	6.37	52.0	36.2	42.8	0.096	24.1
12.55	245.06	5.28	51.5	36.5	44.2	0.080	21.5
13.05	240.51	4.55	51.8	36.2	44.4	0.069	19.3
13.55	236.74	3.77	51.8	36.2	46.5	0.057	17.4
14.05	233.29	3.45	51.8	36.2	46.8	0.052	15.6
14.55	230.44	2.85	52.0	36.2	48.0	0.043	14.2

$t_g = 52.6^{\circ}\text{C}$   $H_R = 40\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 141.37 \text{ cm}^2$   $P = 304.26 \text{ g}$

$D = 211.98 \text{ g}$

10.20	304.26						43.5
10.50	296.86	7.40	53.0	38.0	43.4	0.104	40.0
11.20	289.48	7.58	52.6	38.0	43.4	0.104	36.5
11.50	282.54	6.94	52.6	38.0	43.4	0.098	33.3
12.20	276.06	6.48	52.6	38.0	44.4	0.092	30.2
12.50	268.96	7.10	52.6	38.2	45.4	0.100	26.8
13.20	263.00	5.96	52.6	37.5	47.6	0.084	24.0
13.50	258.15	4.85	52.8	38.0	49.2	0.069	21.9
14.20	253.70	4.45	52.6	38.0	49.6	0.063	19.8
14.50	249.76	3.94	52.6	38.0	50.2	0.055	17.9
15.20	246.31	3.45	52.6	38.0	50.5	0.048	16.3
15.50	243.56	2.75	52.6	38.0	50.8	0.039	15.0

$t_g = 52.7^{\circ}\text{C}$   $H_R = 43\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 132.66 \text{ cm}^2$   $P = 345.87$

$D = 237.02 \text{ g}$

10.20	345.87						45.9
10.50	339.94	5.91	52.8	39.8	45.8	0.089	43.4
11.20	335.50	6.44	52.6	39.8	45.8	0.097	40.7
11.50	327.72	5.78	52.6	39.8	45.8	0.087	38.2
12.20	321.56	6.16	52.8	40.2	45.8	0.092	35.6
12.50	315.97	5.59	52.8	39.8	45.8	0.084	33.3
13.20	309.94	6.03	52.8	39.5	45.8	0.090	30.7
13.50	304.67	5.27	53.0	39.8	45.8	0.079	28.5
14.20	299.32	5.35	53.0	40.0	47.0	0.080	26.2
14.50	294.67	4.65	52.8	39.8	49.0	0.070	24.3
15.20	290.45	4.22	52.8	39.8	50.2	0.063	22.5
15.50	286.62	3.83	52.0	39.8	49.5	0.058	21.6

MUESTRA Nº 9

$t_g = 64.5^\circ\text{C}$   $H_R = 26\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 136.95 \text{ cm}^2$   $P = 348.63 \text{ g}$   
 $D = 227.45 \text{ g}$

$\emptyset$	P	W	$t_g$	$t_w$	$t_s$	R	$H_T\%$
10.10	348.63						53.2
10.40	338.65	9.98	64.5	41.2	46.2	0.145	48.9
11.10	328.53	10.12	64.0	41.2	46.2	0.147	44.8
11.40	318.95	9.58	64.0	41.2	46.2	0.140	40.2
12.10	308.80	10.15	64.0	41.2	46.2	0.147	35.7
12.40	298.90	9.90	65.2	41.2	47.0	0.145	31.4
13.10	289.98	8.92	64.5	41.0	47.5	0.130	27.5
13.40	282.00	7.98	64.8	41.0	48.2	0.116	23.9
14.10	275.50	6.50	65.0	41.5	49.0	0.095	21.6
14.40	270.04	5.46	65.0	41.5	50.5	0.080	19.2
15.10	265.10	4.94	65.0	41.5	52.2	0.072	17.0
15.40	261.67	3.43	65.0	41.8	52.6	0.050	15.5

$t_g = 65.0^\circ\text{C}$   $H_R = 30\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 138.50 \text{ cm}^2$   $P = 331.44 \text{ g}$   
 $D = 218.04 \text{ g}$

10.50	331.44						52.0
11.20	321.57	9.87	65.2	43.2	47.8	0.141	47.5
11.50	311.64	9.93	64.6	43.4	47.8	0.141	42.9
12.20	301.84	9.80	65.0	43.4	47.8	0.140	38.4
12.50	292.44	9.40	65.0	43.4	47.8	0.134	34.1
13.20	283.24	9.20	65.0	43.4	47.8	0.131	29.9
13.50	275.06	8.18	65.0	43.6	48.5	0.117	25.8
14.20	268.56	6.50	65.0	43.4	49.2	0.093	22.9
14.50	262.86	5.70	65.2	43.2	50.0	0.081	20.3
15.20	258.11	4.68	65.2	43.4	50.4	0.066	18.2
15.50	254.08	4.10	65.4	43.4	51.3	0.059	16.3
16.20	250.39	3.69	65.6	43.4	52.2	0.052	14.6

$t_g = 66.0^\circ\text{C}$   $H_R = 31\%$   $u = 500 \text{ m/min}$   $A = 218.32 \text{ cm}^2$   $P = 326.83 \text{ g}$   
 $D = 218.32 \text{ g}$

9.50	326.83						49.3
10.20	318.08	8.75	66.0	45.4	50.8	0.128	45.3
10.50	309.25	8.83	66.2	45.4	50.8	0.129	41.3
11.20	300.53	8.72	66.0	45.4	50.8	0.128	37.3
11.50	292.07	8.46	66.0	45.4	51.8	0.124	33.5
12.20	283.40	8.67	66.0	45.4	52.0	0.127	28.6
12.50	275.80	7.60	66.5	45.4	52.5	0.111	26.1
13.20	269.04	6.76	65.4	45.4	53.0	0.099	23.0
13.50	263.28	5.76	66.0	45.4	53.2	0.084	20.4
14.20	257.64	4.64	65.8	45.6	54.0	0.068	18.3
14.50	254.64	4.00	66.0	45.6	54.8	0.058	16.5
15.20	251.67	2.97	66.0	45.4	55.2	0.043	15.1

# VELOCIDAD DE SECADO



CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE PELÍCULA  $K_G$  PARA EL PERÍODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Ejemplo práctico de los cálculos a efectuar, basado en los datos de la corrida N° 1.

Muestra N° 0

$$\begin{array}{lll} t_g = 43,2^\circ\text{C} & t_w = 33,0^\circ\text{C} & t_s = 35,4^\circ\text{C} \\ u = 500 \text{ m/min} & H_R = 48 \% & A = 128,81 \text{ cm}^2 \end{array}$$

La fórmula a emplear es la siguiente:

$$\frac{dw}{d\theta} = K_G (H_w - H_g) A \quad (4)$$

donde:

$dw/d\theta$  : cantidad de agua evaporada en la unidad de tiempo (g/hora).

A : área de la superficie de secado ( $\text{cm}^2$ ).

$(H_w - H_g)$  : diferencia de humedad entre la interfase agua-aire y la humedad del aire (g de agua/g de aire seco).

$K_G$  : coeficiente de película (g de agua evaporada por hora por  $\text{cm}^2$  y por unidad de diferencia de humedad).

1º: Cálculo de  $dw/d\theta$

Según la tabla N° 1 en 2,5 horas, la muestra perdió 29,72 g de agua; por lo tanto:

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{29,72}{2,5} = 11,89$$

2º: Cálculo de  $(H_s - H_g)$ .

Se efectúa el cálculo tomando la temperatura de la superficie de la muestra, en lugar de la temperatura de bulbo húmedo, por ser la primera, como ya se dijo en la página 5, la temperatura real del material donde se produce el secado.

Los valores de  $H_s$  y  $H_g$  son buscados en la tabla psicométrica (38).

Para una temperatura a bulbo seco del aire  $t_g = 43,2^\circ\text{C}$  y

una temperatura sobre la superficie de la muestra.  $t_g = 35,4^{\circ}\text{C}$  es

$H_s = 0,0380$  g de vapor de agua/g de aire seco

$H_g = 0,0335$  g de vapor de agua/g de aire seco

$(H_s - H_g) = 0,0045$  unidades de diferencia de humedad.

3<sup>a</sup>: Cálculo de  $K_G$ .

$$K_G' = \frac{\frac{dw}{d\theta}}{(H_s - H_g) \cdot A}$$

$$K_G' = \frac{11,89}{0,0045 \times 128,81}$$

$$K_G' = 20,5 \text{ g/h.cm}^2 \cdot \text{unid. de dif. de humedad}$$

-----

COEFICIENTES DE PELÍCULA (K<sub>G'</sub>)

MUESTRA Nº 0		
t <sub>g</sub>	H <sub>R</sub> %	K <sub>G'</sub>
43,2	48	20,5
42,8	50	21,8
42,8	59	20,2
53,6	38	19,4
52,6	40	19,7
52,5	49	20,3
64,2	30	17,5
65,0	30	17,4
65,0	33	17,5
K <sub>G'm</sub> = 18,9		

MUESTRA Nº 3		
t <sub>g</sub>	H <sub>R</sub> %	K <sub>G'</sub>
44,8	43	20,7
43,8	50	21,0
43,8	58	21,2
53,2	39	19,9
52,5	41	19,2
52,5	48	21,2
64,5	29	19,0
65,0	30	20,2
65,0	33	19,3
K <sub>G'm</sub> = 20,2		

MUESTRA Nº 6		
t <sub>g</sub>	H <sub>R</sub> %	K <sub>G'</sub>
43,8	48	19,2
43,8	55	19,2
44,0	57	21,9
52,0	34	20,0
52,8	39	22,5
53,4	44	22,0
66,0	26	15,0
65,0	30	18,7
66,5	33	18,2
K <sub>G'm</sub> = 19,6		

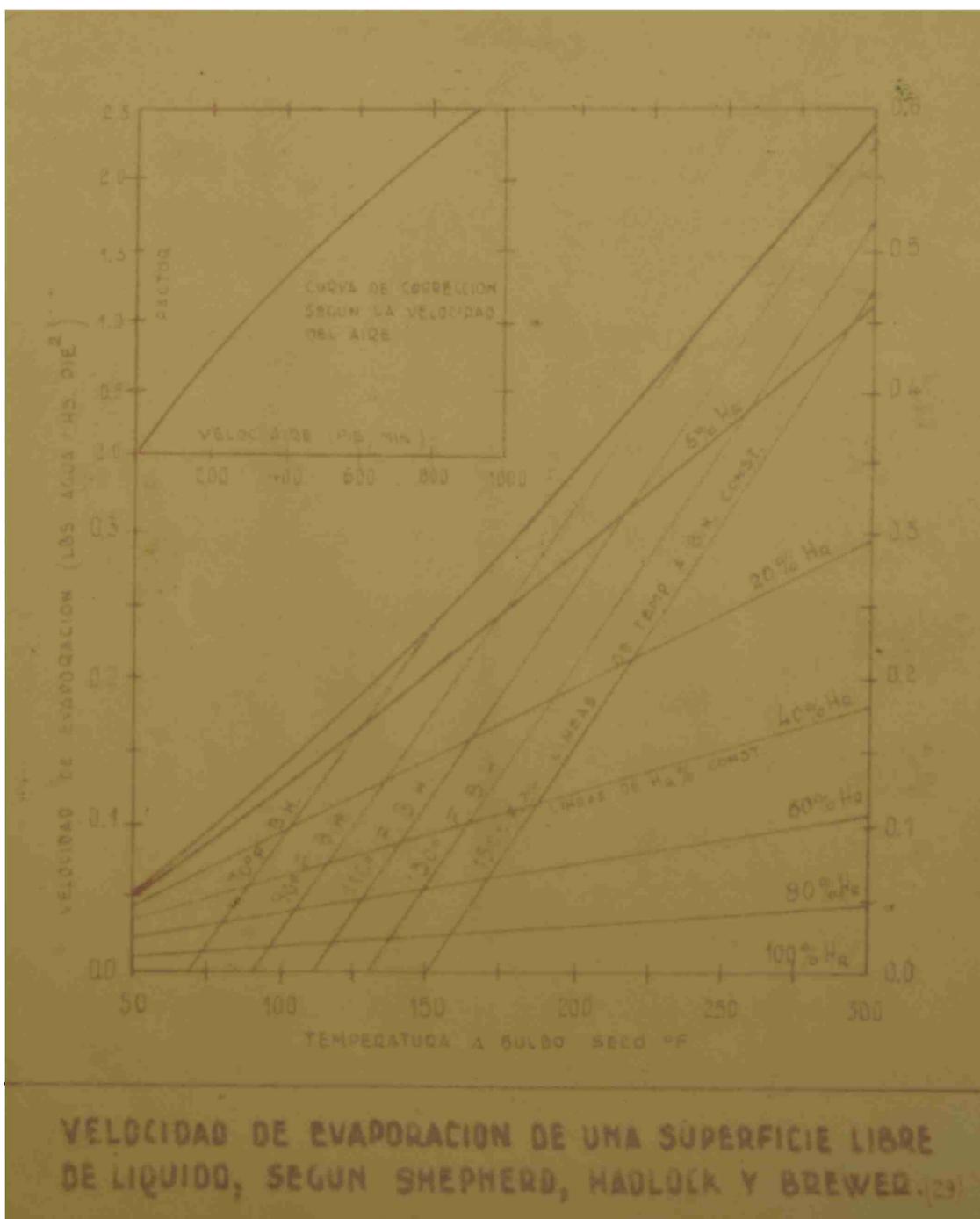
MUESTRA Nº 9		
t <sub>g</sub>	H <sub>R</sub> %	K <sub>G'</sub>
43,8	48	22,2
43,2	50	20,8
43,4	57	18,6
51,8	36	21,8
52,6	40	22,0
52,7	45	21,9
64,5	26	18,2
65,0	30	17,5
66,0	31	19,3
K <sub>G'm</sub> = 20,3		

EVAPORACION EN UNA SUPERFICIE LIBRE DE AGUA LIQUIDA Y SECA.

Siendo el comportamiento de las sustancias a secar, durante el período de velocidad constante, similar al observado por una superficie libre de líquido, se ha hallado el coeficiente de película correspondiente a la evaporación de agua, con aire de distintas humedades relativas y temperaturas y a la misma velocidad (500 m/min) que la empleada para el secado de las tierras, a los efectos de comparar los resultados.

Para ello se ha utilizado el gráfico de Shepherd, Hadlock Brewer (29) sobre velocidad de evaporación y además se efectuó una corrida con agua.

En la tabla adjunta se consignan los datos hallados utilizando el gráfico de Shepherd, Hadlock y Brewer mencionado



$t_g$ °C	$t_w$ °C	$H_R$ %	$(H_w - H_g)$ (33)	R (29)	$H_g'$
33.0	20.5	40	0.0070	0.163	23.3
38.0	20.5	60	0.0050	0.110	22.0
52.0	22.0	20	0.0135	0.284	21.0
52.0	34.0	40	0.0085	0.173	20.3
52.0	41.5	60	0.0045	0.095	21.1
65.5	33.0	20	0.0140	0.294	21.0
65.5	43.5	40	0.0085	0.160	19.8
65.5	54.5	60	0.0055	0.116	21.9
$H_m = 21.3$					

A la corrida efectuada con agua destilada le correspondieron los siguientes datos:

$$t_g = 38,0^{\circ}\text{C}$$

$$t_w = 25,0^{\circ}\text{C}$$

$$H_R = 34$$

$$u = 500 \text{ m/min}$$

$$(H_w - H_g) = 0,00525$$

$$R = 0,12$$

$H_g' = 22,8$

-----

COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE OTROS INVESTIGA-

DORES

Para hacer la comparación que se propone, disponemos de un gráfico hecho por Holstad, Farevaag y Farrell (39).

En él se ha representado en función del coeficiente  $K_G$ , y la velocidad de masa  $G$ , los resultados obtenidos por varios investigadores, mostrándose distintos tipos de curvas para la evaporación de agua.

En el presente trabajo se ha tomado, de las tres variables (temperatura, humedad y velocidad del aire) solamente las dos primeras, resultando el coeficiente  $K_G$ , constante en función de ellas. Las curvas representadas se han hecho en base a trabajos en los cuales se ha estudiado la variación de  $K_G$ , en función de la velocidad de aire. Por esta razón de los datos obtenidos en este trabajo solamente resulta el punto correspondiente a la velocidad del aire de 500 m/min.

La curva A representa los valores obtenidos por Holstad, Farevaag y Farrell con la siguiente ecuación:

$$K_G = 1,42 G^{0,37}$$

Esta ecuación ha sido obtenida, utilizando los valores de los coeficientes resultantes de considerar la temperatura de la superficie de la muestra.

La curva B representa la ecuación dada por Carrier aplicando en la obtención de los coeficiente la temperatura a bulbo húmedo.

Las curvas C y D representan los resultados obtenidos por Lurie y Michailoff y Thiesenhusen en la evaporación de agua por una corriente de aire paralela a la superficie.

La curva E fué obtenida por Sherwood para una corriente de aire paralela. La curva F está dada por los resultados de los trabajos realizados por Shepherd, Hadlock y Brewer sobre secado de tierras y evaporación de agua por una corriente de aire paralela a la superficie de secado.

La ecuación utilizada para la confección de esta curva ha sido citada en la página 17.

$$K_G = 0,0512 G^{0,75} \quad (14)$$

La curva H fué hallada por Ronco (40) en la evaporación del agua por una corriente de aire paralela a la superficie de evaporación y trabajando en un tunel de secado similar al utilizado en el presente trabajo.

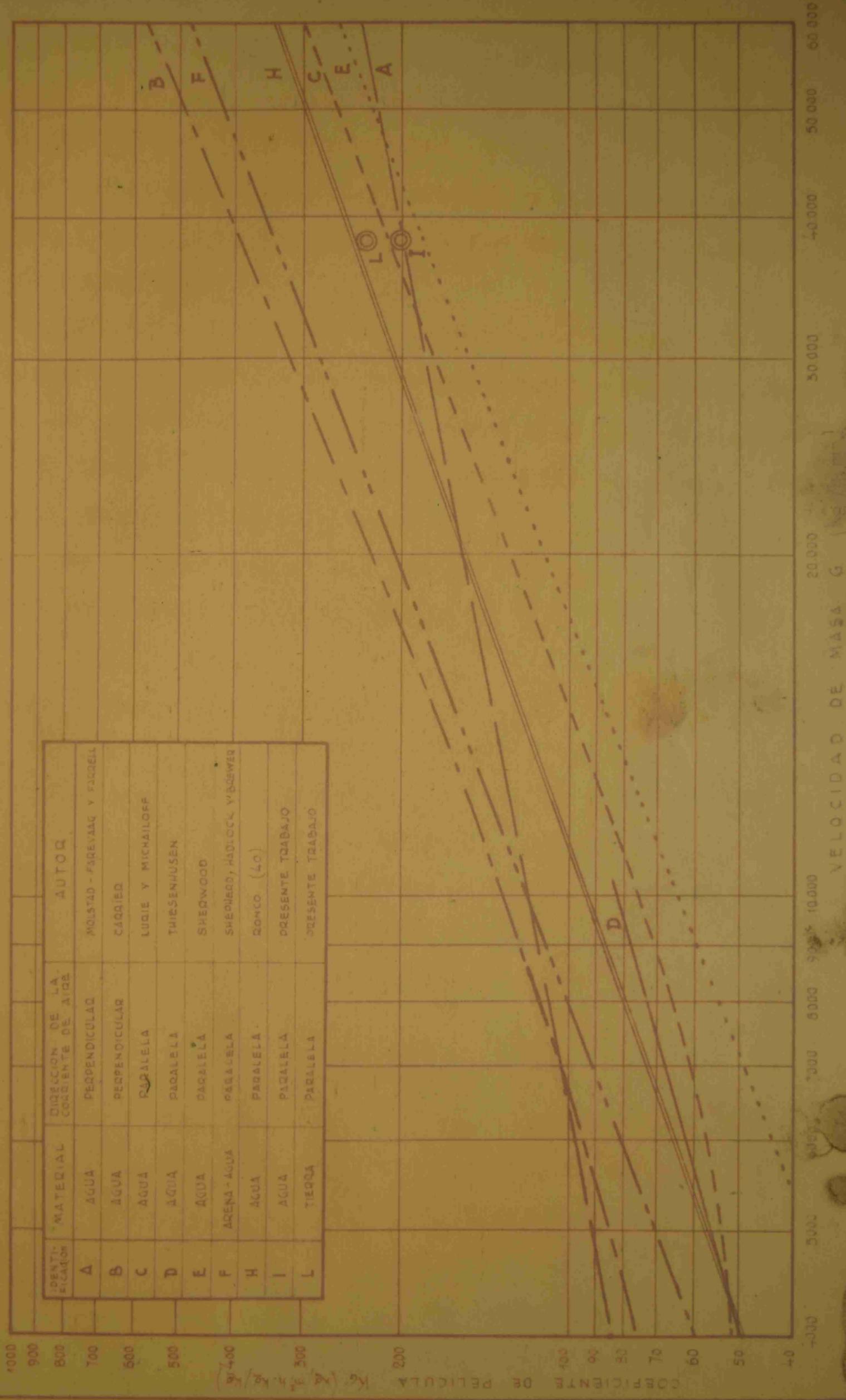
Para la representación de los puntos obtenidos ha sido necesario hacer una extrapolación, pues los autores antes mencionados trabajaron a velocidades del aire menores. La extrapolación comprende el tramo de curva comprendido entre los valores 20.000-60.000 de velocidad de masa.

El punto I representa el coeficiente  $K_G$  para la tierra Nº 3 y Nº 9 a la velocidad de 500 m/min.

El punto L representa el coeficiente  $K_G$  hallado en este trabajo para la evaporación de agua también a la velocidad de 500 m/min.

-----

# COMPARACION CON LOS RESULTADOS DE OTROS INVESTIGADORES



CONCLUSIONES.

1ª: La humedad en equilibrio, para las tierras estudiadas con aire de 100 % de humedad relativa, varía entre 21 % y 31 %. Con aire de 50 % de humedad relativa la humedad de equilibrio varía entre 5 % y 9 %.

2ª: El contenido de humedad de equilibrio con aire de 50 % de humedad relativa es más elevado, cuanto mayor es el porcentaje de arcilla contenido en la muestra.

MUESTRA Nº	1	5	4	2	3	0	6
Arcilla %	47,5	45,5	43,5	39,0	35,0	32,0	27,0
H <sub>E</sub> % (H <sub>R</sub> 50%)	8,6	8,2	7,6	6,0	5,8	6,8	5,9

3ª: El punto crítico, es decir, la intersección de la curva de humedad de equilibrio con el eje de 100 % de humedad relativa, concuerda, dentro de los errores experimentales con los obtenidos en las curvas de velocidad de secado.

4ª: La misma consideración puede hacerse con el punto del eje de humedad total por ciento, hacia el cual tiende la curva de velocidad de secado y el valor del contenido de humedad por ciento hallado en la respectiva curva de la humedad de equilibrio para aire del mismo contenido de humedad relativa que el empleado en la operación de secado.

5ª: Los coeficientes de película K<sub>G</sub>, pueden considerarse constantes, cualquiera sea la temperatura y humedad del aire utilizado. Para las cuatro muestras de tierra estudiadas, dichos coeficientes tienen prácticamente el mismo valor.

MUESTRA Nº	0	3	6	9
K <sub>G</sub> ' <sub>m</sub>	18,9	20,2	19,6	20,3

6ª: Los coeficientes hallados, tanto en la corrida efectua-

da con agua ( $K_G = 22,8$ ), como por medio del gráfico de Shepherd, Hadlock y Brewer ( $K_G = 21,3$ ) son algo mayores que los calculado para la tierras estudiadas, lo cual quiere significar que si bien el comportamiento de dichas tierras, durante el período de velocidad constante se acerca grandemente a la evaporación de una superficie libre de líquido; con todo, existen ciertos factores que retrasan ligeramente la evaporación.

*J P Y L*

-----

NOMENCLATURA

- A : área  
D : peso del material seco  
F : contenido de agua libre  
H : humedad  
h : coeficiente de película de transmisión de calor.  
 $K_G$  y  $K_{G'}$  : coeficientes de película de difusión.  
m : una constante.  
P : peso de la muestra húmeda  
p : presión parcial  
q : cantidad de calor  
R : velocidad de secado  
t : temperatura  
u : velocidad del aire  
w : peso de la humedad  
Ø : tiempo  
 $\lambda$  : calor latente del agua  
 $\mathcal{E}$  : tensión de vapor de agua

Subíndices

- c : período de velocidad constante; punto crítico  
E : equilibrio  
f : en el período de velocidad decreciente  
g : en el aire; a bulbo seco  
m : valor medio  
R : relativa  
s : superficie de la muestra  
T : total  
w : en la interfase agua-aire; a bulbo húmedo.

Esta nomenclatura se adapta, en lo posible, a la convención aprobada por el "American Institute of Chemical Engineers (41).

-----

BIBLIOGRAFÍA

- (1) V. P. Victor; Chem. and Met. Eng., 52 Nº 7, 105-9 (1945).
- (2) W. L. Badger and Mc Cabe; Elements of Chem. Eng., 1936, 2a. ed., pág. 298.
- (3) W. L. Lewis; Ind. Eng. Chem., 13, 427 (1921).
- (4) Mc Cormack; Apl. of Cme. Eng., 3a. ed., pág. 237.
- (5) Mc Cormack; Apl. of Chem. Eng., 3a. ed., pág. 251.
- (6) Vincent y Bristol; Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 17, 465 (1945)
- (7) Badger and Mc Cabe. Elem. of Chem. Eng, 1936 2a. ed., pág. 299.
- (8) T. K. Sherwood; Ind. Eng. Chem., 21, 12 (1929).
- (9) E. R. Gilliland y T. K. Sherwood; Ind. Eng. Chem., 25, 1134-36 (1933).
- (10) N. H. Ceaglske y O. A. Hougen; Ind. Eng. Chem., 29, 805-13, (1937).
- (11) Zimmermann y Lavine; Chem. Engineering Laboratory Equipement, pág. 269 (1943).
- (12) H. H. Macey; Brit. Clay Worker, 46, 306-13 (1937); Trans. Ceram. Soc., 37, 131-48, (1938); Chem. Abst., 32, 1417<sup>9</sup>.
- (13) W. L. Badger and W. L. Mc Cabe; Elements of Chemical Engineering, 1936, 2a. ed., pág. 302.
- (14) Wilson Hewit; Ceramics, Clay Technology, 1a. ed., pág. 125, (1927).
- (15) A. Tsepín; Keram. Sbornik, Nº 17, pág. 32-37 (1937), del Ceramic Abstracts del Journal of Am. Ceram. Soc., Nº 7, pág. 165 (1948).
- (16) Walker, Lewis, Mc Adams and Gilliland; Principles of Chemical Engineering, 3a. ed., (1937), pág. 643.
- (17) Badger y Mc Cabe; Elements of Chemical Engineering, (1936), 2a. ed., pág. 303.
- (18) Perry J.; Chemical Eng. Handbook, 1a. ed., (1934) pág. 1223
- (19) Newman; Chem. and Metall. Eng., 38, 710 (1931).
- (20) Sherwood T. K.; Ind. Eng. Chem., 21, 976 (1929).

- (21) Laurin F.; L'Industria Ceramica, Nº 382, pág. 6 (1948).
- (22) Wilson Hewit; Ceramics, Clay Technology, 1a. ed., 130, (1927)
- (23) Wilson Hewit; Ceramics, Clay Technology, 1a. ed., pág. 123, (1927).
- (24) Newcomb Rexford (h); Cerámica blanca (1949), pág. 137.
- (25) Laurin F.; L'Industrie Ceramique, Nº 383, pág. 24 (1948).
- (26) Badger y Mc Cabe; Elements of Chemical Engineering, (1936), 2a. ed., pág. 251.
- (27) Sherwood y Comigs; Trans. Am. Inst. Chem. Eng, 28, 88-117 (1932), de Badger y Mc Cabe, Elem. of. Chem. Eng (1936), pág. 254.
- (28) Zimmermann y Lavine; Chemical Engineering Laboratory Equip- ment, pág. 272 (1943).
- (29) Shepherd, Hadlock and Brewer; Ind. Eng. Chem., 30, 388-97 (1938).
- (30) Badger y Mc Cabe; Elements of Chemical Engineering, (1936) 2a. ed., pág. 308.
- (31) Brier y Foust; Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 35 - 797 (1939)
- (32) Zimmermann y Lavine; Chemical Engineering Laboratory Equip- ment, pág. 276 (1943).
- (33) Mc. Namara E.; Ceramics (1945), volumen III, pág. 131.
- (34) Perry J.; Chemical Engineering Handbook, (1934) 1a. ed., pág. 339
- (35) Zimmermann y Lavine; Chemical Engineering Laboratory Equip- ment, pág. 314 (1943).
- (36) Binnington D. y Geddes W.; Canadian Journal of Research; 10, 221 - 33 (1934).
- (37) Grahame B. Ridley; Ind. Eng. Chem.; 13, 453 (1921).
- (38) Badger y Mc Cabe; Elements of Chemical Engineering (1936) 2a. ed., (tabla psicométrica, apéndice).
- (39) Molstad, Farevaag y Farrell; Ind. Eng. Chem., 30, 1131, (1938)
- (40) Ronco J.; Comunicación privada.
- (41) Perry, Chilton, Callahan, Hougen, Mc Adams, Mc Cabe y An - twerpen; Ind. Eng. Chem., 39, 438 (1947).