

01-0503283

1961
T239
C.4

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
ESCUELA DE INGENIERIA
.....

MEMORIA DE GRADO para optar al titulo de
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
TEMA
"DESECACION"

01-0503283

4508
25,68



PLINIO TELLO CORTES
1961

35601155473287

I N D I C E

Prólogo

Temario sobre desecación.....	1
-------------------------------	---

Capítulo 1.- Fundamentos de la desecación

1.1 Introducción.....	2
1.1.1 Definiciones	
1.1.2 Generalidades	
1.1.3 Objetivos de la desecación	
1.1.4 Ventajas de los productos deshidratados	
1.1.5 Diferencias entre desecación y evaporación.....	3
1.1.6 Procesos fundamentales de la desecación	
1.2 Estudio del secado de un sólido	
1.2.1 Procedimientos	
1.2.2 Contenido de humedad en equilibrio.....	4
1.2.3 Agua aprisionada, agua sin aprisionar.....	5
1.2.4 Contenido de humedad libre.....	8
1.2.5 Base de peso seco, base de peso húmedo.....	9
1.2.6 Condiciones de secado	
1.2.7 Curvas de velocidad de secado.....	11
1.3 Bibliografía.....	24

Capítulo 2.- Desecación de maderas.

2.1 Consideraciones generales.....	26
2.2 Objeto del secado de las maderas	
2.3 Estructura de la madera	
2.4 Humedad de la madera	
2.5 Períodos del secado de la madera.....	28
2.6 Variación del contenido de humedad.....	29
2.7 Designación de las maderas de acuerdo a su contenido de humedad.....	32
2.8 Determinación de la humedad de la madera	
2.8.1 Mediante pesadas	
2.8.2 Mediante higrómetros.....	33
2.9 Efectos de la humedad sobre las propiedades de la madera.....	34
2.10 Secamiento de las maderas.....	35
2.10.1 Secado natural	
2.10.2 Secamiento artificial.....	36
2.11 Defectos de la madera originados por un inadecuado secado artificial.	
2.12 Control del secamiento.....	37
2.12.1 Mediante el análisis de muestras	
2.12.2 Mediante un higrómetro	
2.13 Contracciones de la madera	
2.13.1 Origen de las contracciones.....	38
2.13.2 Variaciones de las contracciones	
2.13.3 Consecuencias de las contracciones	
2.14 Normas para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas.....	40
2.15 Instalaciones para el secado artificial de la madera.....	41
2.15.1 Secadores de celda, con circulación natural de aire	
2.15.2 Secadores de celda, con circulación forzada	
2.15.3 Secadores de túnel.....	43
2.15.4 Secadores de vapor recalentado	
2.16 Bibliografía.....	44

Capítulo 3.- Secador rotatorio

3.1 Descripción.....	46
3.2 Clasificación	
3.2.1 Secadores rotatorios de calentamiento directo	
3.2.2 Secadores rotatorios de calentamiento indirecto	
3.2.3 Secadores rotatorios de calentamiento directo-indirecto	

3.3	Transferencia de calor.....	50
3.3.1	Secadores de calentamiento directo	
3.3.2	Secadores de calentamiento indirecto	
3.3.3	Secadores de calentamiento directo-indirecto	
3.4	Limitaciones para una efectiva utilización del calor	
3.4.1	Temperatura	
3.4.2	Velocidad.....	51
3.4.3	Tiempo	
3.5	Propósito de esta investigación.	
3.6	Publicaciones sobre datos de operación de secadores rotatorios de calentamiento directo	
3.7	Secador rotatorio de calentamiento directo.....	52
3.7.1	De alta temperatura	
3.7.2	De temperatura moderada o baja.....	53
3.7.3	Tipos especiales	
3.8	Funciones de un secador.....	55
3.9	Función del secador como transportador.....	57
3.10	Definiciones	
3.10.1	Tiempo de tránsito	
3.10.2	Retención	
3.10.3	Dusting	
3.11	Variables que influyen en la retención y el dusting	
3.11.1	Las variables del secador	
3.11.2	Las características del material	
3.12	Determinación teórica del tiempo de tránsito y de la retención	
3.12.1	Ecuaciones recomendadas por algunos investigadores	
3.12.2	Análisis de los estudios realizados.....	60
3.13	Valores recomendados para la retención.....	61
3.14	Valores recomendados para el dusting.....	62
3.15	Determinación experimental de la retención y del tiempo de tránsito	
3.15.1	Retención	
3.15.2	Tiempo de tránsito	
3.16	Resultados experimentales.....	64
3.16.1	Retención sin flujo de aire	
3.16.2	Retención con flujo de aire a través del secador	
3.17	Análisis de la transmisión de calor en un secador rotatorio.....	70
3.18	Ecuaciones para determinar la transmisión de calor al material.....	71
3.19	Transferencia de masa.....	74
3.20	Resultados experimentales.....	76
3.21	Características de diseño de un secador rotatorio	
3.22	Bibliografía.....	87

Capítulo 4.- Secador de bandejas

4.1	Clasificación.....	89
4.1.1	Secador de bandejas de calentamiento indirecto	
4.1.2	Secador de bandejas de calentamiento directo.....	92
4.2	Transmisión de calor	
4.3	Secado con vapor recalentado como medio secante.....	96
4.4	Secado con mezclas de vapor recalentado y aire como medio secante....	99
4.5	Bibliografía.....	102

Capítulo 5.- Deseccación en secador rotatorio

5.1	Propósito del trabajo; principios teóricos.....	103
5.2	Aparato	
5.3	Procedimiento	
5.4	Datos de las experiencias.- Tablas I a IV.....	107
5.5	Resultados.- Tablas V a XIII	
5.6	Ejemplo de cálculo	
5.7	Discusión.....	115
5.8	Nomenclatura.....	116

Capítulo 6.- Deseccación en secador de bandejas.

6.1	Propósito del trabajo.....	132
6.2	Principios teóricos	
6.3	Aparato	
	6.3.1 Descripción	
	6.3.2 Operación	
6.4	Procedimiento.....	134
	6.4.1 Secado de asbesto	
	6.4.2 Secado de madera	
6.5	Datos de las Experiencias.- Tablas I a XI.....	135
6.6	Resultados.- Tablas (Ia) a (XIa)	
6.7	Ejemplo de cálculo	
6.8	Discusión.....	136
	6.8.1 Secado de asbesto	
	6.8.2 Secado de madera	
6.9	Resumen de los calculos(asbesto)	

.....
.....

P R O L O G O

Las múltiples ventajas que presenta la Deseccación de productos, le han dado una importancia creciente en la Industria moderna, lo que ha traído como consecuencia, la aparición de diversos equipos y variados métodos de secado.

El autor desarrolló el tema por sugerencia del Profesor Sr. Abdón Zomosa R., dedicándole meses al estudio de los trabajos realizados por los más destacados investigadores de esta materia, a la adaptación de los secadores a utilizar, y a la investigación experimental.

El esfuerzo, interés y cariño desplegado en este trabajo, sería estéril, sinó sirviera como aporte eficaz a los alumnos que en el futuro se interesen por esta materia.

Se ha presentado en la forma más sintética posible los diferentes tipos de secadores rotatorios y de bandejas, objeto de esta Memoria, exponiendo sus métodos y ventajas. A fin de aclarar las descripciones se ha complementado este trabajo con Tablas, Gráficos, Fotos y Esquemas.

Mis especiales agradecimientos a mi Profesor-guía Sr. A.Zomosa, que me brindó una constante y positiva ayuda; al Sr.Enrique D'Etigny L., Director de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, que con voluntad y espíritu de servir, me solucionó problemas; al Sr.Armando Quezada, Director de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad Técnica del Estado, que autorizó la experimentación de este trabajo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de dicho plantel. Finalmente como deber de gratitud y reconocimiento, destaco la poderosa ayuda de una gran colaboradora, Srta Myriam Eche-
nique A., que en todo momento cooperó con gentileza, voluntad y capacidad.

Noviembre 1961.

TEMARIO SOBRE DESECACION1.0 PARTE TEORICA Y DESCRIPTIVA

- 1.1 Fundamentos de la operación unitaria de desecación.
- 1.2 Fórmulas y métodos de cálculo de equipo.
- 1.3 Tipo de secadores que se utilizan en la industria.
- 1.4 Aplicaciones más importantes.

2.0 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Determinar las curvas características de la desecación:

a) T vs θ

b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T

c) $\frac{dT}{d\theta}$ vs T

de materiales nacionales, tales como: ciruelas, planchas de asbesto, leche, tanino, azúcar de IANSA, cristales de NaNO_3 , utilizando, los siguientes tipos de secadores:

i) secador de bandejas..... ciruelas, asbesto

ii) secador rotatorio..... azúcar, NaNO_3

iii) Spray dryer..... leche, tanino

2.2 Indicar claramente los períodos de velocidad constante y de velocidad de caída.

2.3 Estudiar la variación del coeficiente K de desecación, α (alfa) velocidad de desecación y T_c humedad crítica, en función de la temperatura.

2.4 Efectuar balances de materiales y térmicos para cada tipo de secador utilizado.

3.0 DISCUSION Y CONCLUSIONES

Capítulo 1

FUNDAMENTOS DE LA DESECACION

1.1 Introducción.-

1.1.1 Definiciones.-

- (1) Desecación.- Es la eliminación de un líquido de un sólido por procedimientos térmicos
- (2) Deshidratación.- Es el término aplicado a los procesos de desecación de alimentos, y a la eliminación del agua de combinación o formación de las sales inorgánicas.

1.1.2 Generalidades.- Previo a la desecación se realiza una eliminación de agua del sólido por medios mecánicos (prensado, centrifugado), por ser más económicos.

La desecación se verifica cerca del final de un proceso, razón por la cual se le considera frecuentemente como una operación de acabado, y mantiene una relación casi fija con otras operaciones del proceso. A menudo sigue a una filtración o una centrifugación y precede a una molienda o un empaquetamiento.

1.1.3 Objetivos de la desecación.-

- (1) Facilitar la manipulación en algún tratamiento posterior.
- (2) Aumentar la capacidad de otros aparatos o instalaciones del proceso.
- (3) Reducir los costos de transporte.
- (4) Conservar el producto durante su almacenamiento y su transporte.
- (5) Permitir la utilización satisfactoria del producto.
- (6) Para recuperar disolventes valiosos, para usarlos en otros procesos.
- (7) Para aumentar el interés y la venta del producto en el mercado comercial (6, 10)

1.1.4 Ventajas de los productos deshidratados.- (Referente a su capacidad)

- (1) En un mt^3 de bodega de un barco, se pueden transportar aproximadamente 375 kg. de papas envasadas. En este mismo espacio, se puede transportar una cantidad de papas deshidratadas equivalentes a 1600 kg. de papas frescas.

La necesidad media de un soldado es de 150 gr. de papas frescas. Con 150 gr. de papas deshidratadas, se podrán atender las necesidades de 8 soldados.

- (2) 50 kg. de repollos frescos, equivalen aproximadamente a 20 repollos grandes. Si se deshidratan, su peso disminuye a 4,25 kg., con un espacio equivalente a poco más de un repollo y medio. Si se agregan 17 lt. de agua a 1 kg. de repollo deshidratado se obtiene la cantidad necesaria para servir 200 raciones.(1)

1.1.5 Diferencias entre desecación y evaporación.-

- (1) En la cantidad de líquido eliminado por hora. El término desecación suele aplicarse a la eliminación de líquidos desde materiales que lo contengan en cantidades relativamente pequeñas, mientras que el término evaporación se utiliza para la eliminación de grandes cantidades de un líquido desde un sólido en disolución. En la cristalización, la desecación y la evaporación se confunden. (8, 10, 11)
- (2) En la mayoría de los casos la desecación implica la eliminación de agua (la palabra agua se usa por conveniencia, pero debe entenderse que en la exposición se aplica lo mismo a otros líquidos) a temperaturas bajo su punto de ebullición, mientras que la evaporación es el medio de eliminación de agua en una solución en ebullición.
- (3) Otra distinción es que en la evaporación el agua es eliminada desde el material, prácticamente como vapor de agua pura, mezclado con otros gases solamente en caso de fugas inevitables. En desecación, por otro lado, el agua es usualmente eliminada por circulación de aire o algún otro gas sobre el material en orden a transportar el vapor de agua.
- (4) Desecación y evaporación se diferencian también en los aparatos empleados para realizarlas. (2, 10)

1.1.6 Procesos fundamentales de la desecación.- Al desecar un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- (1) Transmisión de calor: para evaporar el líquido, la cual se realiza pasando el calor primero a la superficie exterior y desde ella al interior del sólido, independientemente del mecanismo de transmisión de calor utilizado. Este mecanismo puede ser una conducción, convección, radiación o una combinación cualquiera de ellos.

Como excepción a lo dicho, debe citarse el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera calor internamente, produciendo una temperatura más elevada dentro del sólido que en su superficie, por lo cual el calor circula desde el interior hasta la superficie exterior.

- (2) Transferencia de masa: en humedad interna y líquido evaporado, la cual puede transferirse como:
 - (a) Líquido o vapor, o como ambos dentro del sólido.
 - (b) Vapor desde la superficie húmeda.

La velocidad de eliminación de agua es determinada por la velocidad a la cual la masa y el calor pueden ser transferidos. (10, 11)

1.2 Estudio del secado de un sólido.-

1.2.1 Procedimientos.-

(1) Estudiar el mecanismo interno de la circulación de un líquido en un sólido durante la desecación.

(a) La determinación del mecanismo particular se consigue estudiando los gradientes de humedad interna para lo cual es preciso cortar muestras en distintas partes del sólido, las que deben secarse a intervalos de tiempo diferentes y determinárseles el contenido de humedad. La determinación de estos gradientes es un problema experimental difícil.

Los mecanismos que pueden presentarse son los siguientes:

(i) Difusión en sólidos homogéneos continuos

(ii) Circulación capilar en sólidos granulares

(iii) Circulación producida por los gradientes de contracción y de presión

(iv) Circulación causada por la gravedad

(v) Circulación originada por una sucesión de vaporizaciones y condensaciones.

(b) La importancia del conocimiento del mecanismo interno de la circulación, de un líquido reside en permitir el análisis del funcionamiento de los secadores desde el punto de vista de mejorar los resultados y aumentar la capacidad, además de ayudar al desarrollo de nuevas técnicas de desecación.

(2) Estudiar el efecto de las condiciones externas, cuyas principales variables son (no todas estas variables se presentan necesariamente en un mismo problema):

(a) Temperatura.

(b) Humedad.

(c) Ventilación.

(d) Estado de subdivisión del sólido.

(e) Agitación del sólido.

(f) Contacto entre superficies calientes y sólido húmedo.

Este método es el empleado comunmente, debido a que los resultados obtenidos suelen ser directamente aplicables al proyecto y funcionamiento de los secadores. (10)

1.2.2 Contenido de humedad en equilibrio.-

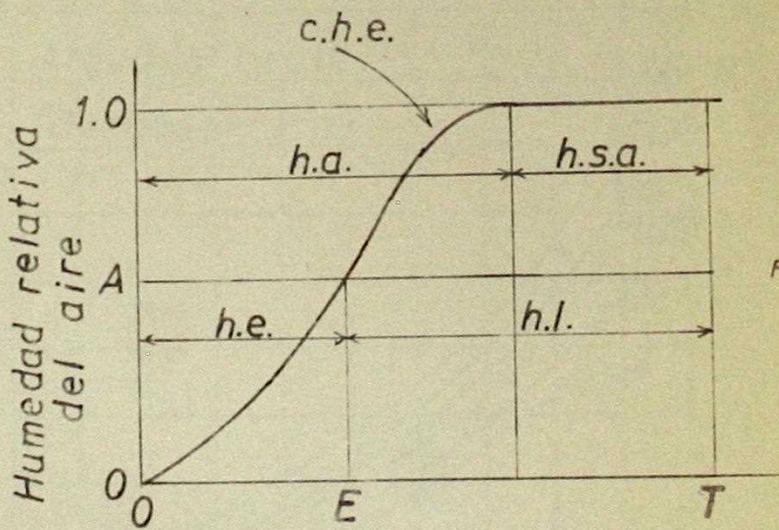
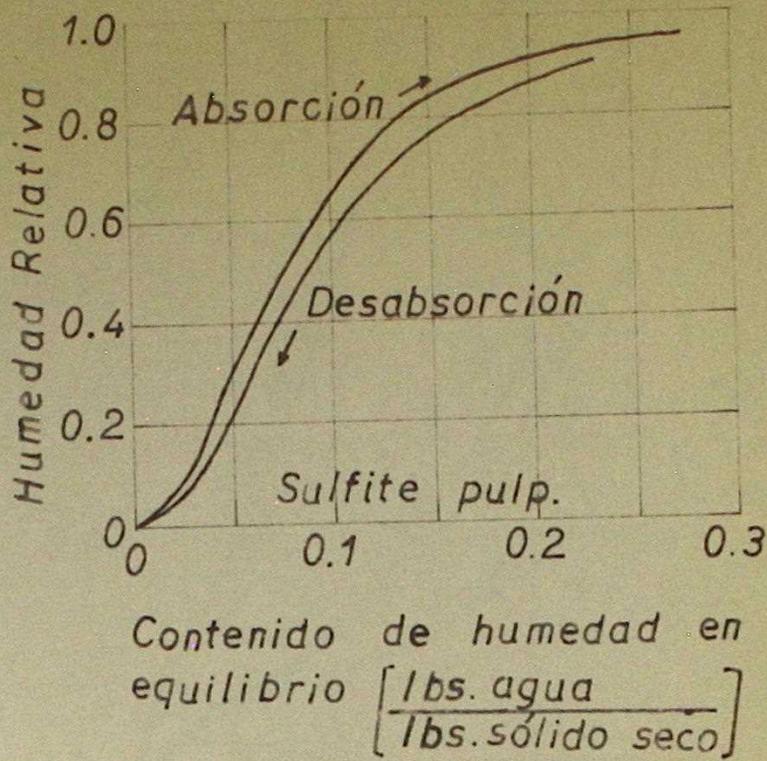
(1) Si un sólido húmedo es puesto en contacto con una corriente de aire de temperatura, presión de vapor, y humedad constantes durante todo el tiempo de la exposición, el sólido perderá humedad por evaporación o ganará humedad del aire hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido iguale a la del aire. En tal situación el sólido alcanza un contenido dedinido de humedad que permanece inalterable, ante una exposición adicional del mismo aire y que es denominado "Contenido de humedad en equilibrio" del

material bajo las condiciones especificadas.(2, 12)

- (2) Histeresis.- (Fig. 1.1) En muchos materiales el contenido de humedad en equilibrio depende de la dirección en la cual el equilibrio es aproximado, obteniéndose valores diferentes según se trate de una absorción o de una desabsorción.
- (a) Desabsorción.- Si el material contiene más humedad que el valor de equilibrio, se secará hasta que su contenido de humedad alcance el valor de equilibrio. Para cálculos de secado solamente se usa este valor
- (b) Absorción.- Si el material se seca más que el valor de equilibrio y es puesto en contacto con aire de temperatura y humedad constantes, absorberá agua hasta alcanzar este mismo valor de equilibrio. El equilibrio logrado por medio de la absorción a veces es llamado "Regain".(2, 3, 12)
- (3) Importancia del contenido de humedad en equilibrio en la desecación.-
- (a) El contenido de humedad en equilibrio representa un contenido de humedad límite para condiciones dadas de temperatura y humedad del aire, y en virtud de ello los costos de la desecación pueden ser elevados innecesariamente al secar un material hasta un contenido de humedad menor al contenido de humedad en equilibrio que posee al estar en contacto con el aire atmosférico.
- (b) Si un material secado hasta un 1% de humedad, alcanza una humedad de 5% al estar en contacto con el ambiente, indica que el material se había secado excesivamente, siendo probable que la capacidad y el rendimiento del secador sean mayores, si el contenido de humedad del material al abandonar el secador fuese de un 5%.(10)
- (4) Para aire de humedad cero, el contenido de humedad en equilibrio de todos los materiales es cero.
- (5) Para cualquier porcentaje de humedad dado, el contenido de humedad en equilibrio varía mucho con el tipo de material. La Fig. 1.3 muestra algunas curvas típicas de humedad en equilibrio.
- (6) El contenido de humedad en equilibrio de un sólido disminuye al aumentar la temperatura del aire. La Fig. 1.4 señala el efecto de la temperatura del aire en el contenido de humedad en equilibrio para el algodón (raw cotton).

1.2.3 Agua aprisionada, agua sin aprisionar.-

- (1) Si las curvas del contenido de humedad en equilibrio de la Fig. 1.3, se prolongan hasta su intersección con el eje para 100% de humedad, el contenido de humedad así definido es la menor humedad que este material puede contener y no obstante ejerce una presión de vapor tan alta como aquella ejercida por el agua a la misma temperatura. Si dicho material contiene más agua que el indicado por esta intersección, el puede a pesar de eso ejercer solamente la presión de vapor de agua de la temperatura dada. Esto hace posible una distinción entre los dos tipos de agua retenida en una sustancia dada. El agua llegada a la más baja concen-



Contenido de humedad

TIPOS DE HUMEDAD

h.a. = humedad aprisionada

h.s.a. = » sin aprisionar

h.e. = » equilibrio

h.l. = » libre

c.h.e. = curva humedad equilibrio

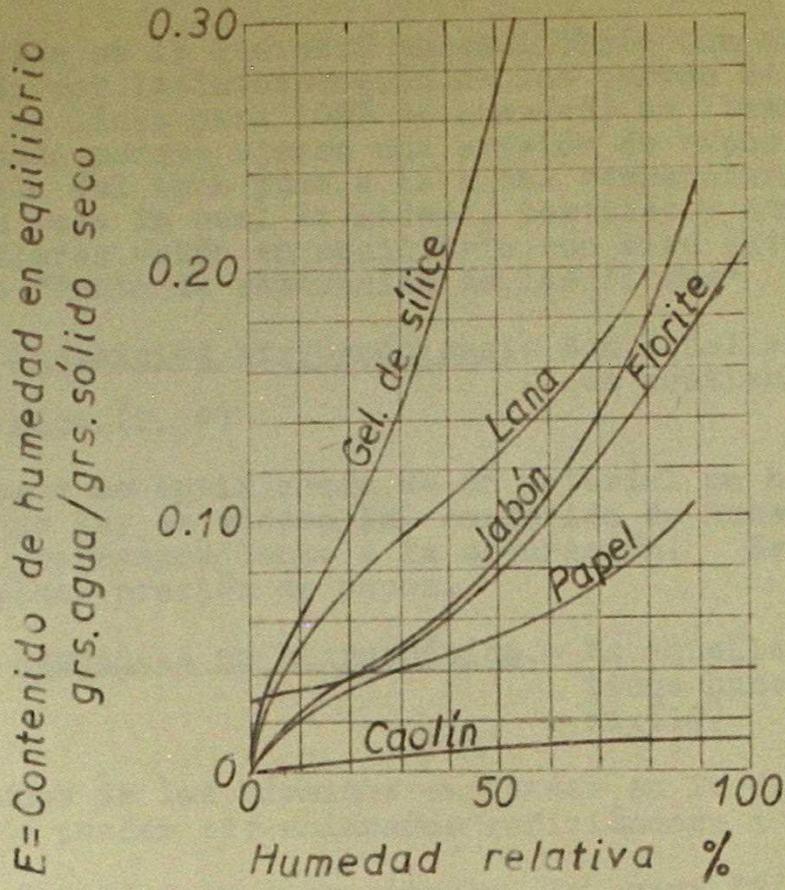


FIG. 1.3

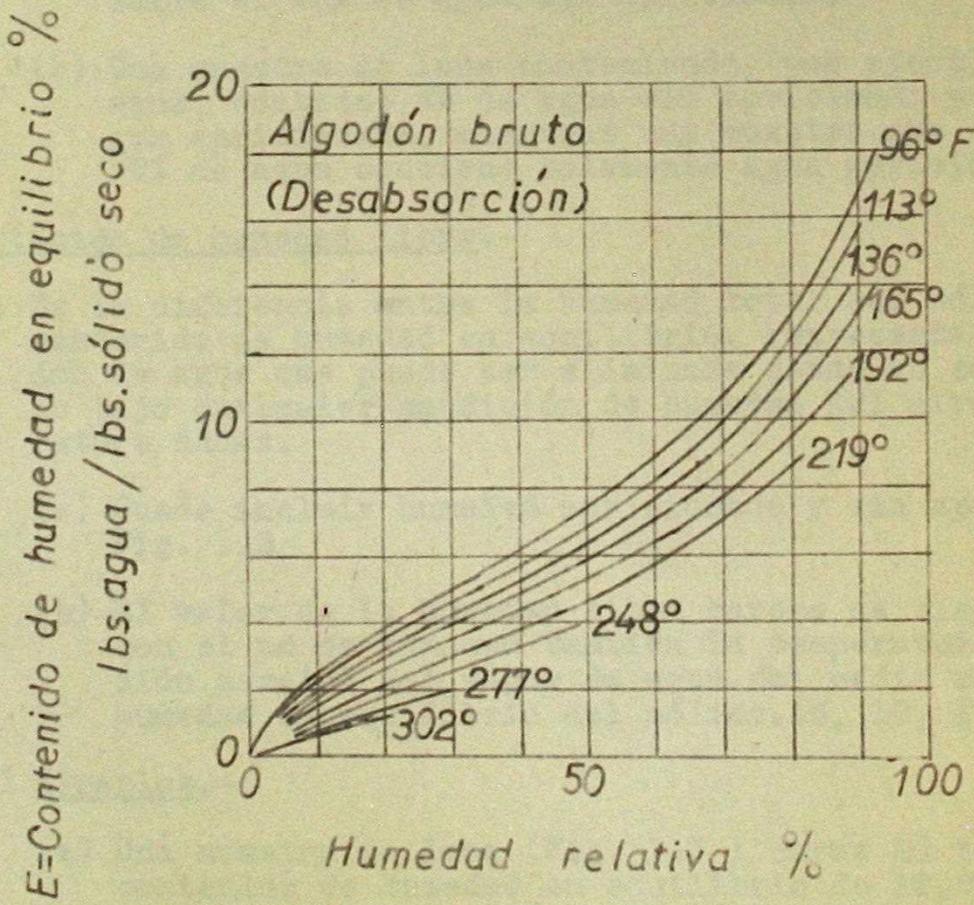


FIG. 1.4

tración es la que está en equilibrio con aire saturado (dado por la intersección de las curvas de la Fig. 1.3 con la línea para 100% de humedad) es llamada agua aprisionada porque ejerce una presión de vapor menor que aquella del agua pura a la misma temperatura. La condición bajo la cual la madera, textiles y otros materiales celulares están en equilibrio con aire saturado es llamado "Punto de saturación de las fibras"

- (a) Sustancias higroscópicas.- Son aquellas sustancias que contienen agua aprisionada.(2, 9)
- (2) El agua no aprisionada de un material no higroscópico es la que hay en exceso del contenido de humedad en equilibrio correspondiente a la saturación. Esta agua ejerce su plena presión de vapor.
- (a) Sustancia no higroscópica.- Es aquella que sólo contiene humedad no aprisionada.(10)
- (3) Algunos de los términos empleados en la discusión precedente pueden ser aclarados refiriéndose a la Fig. 1.3
- (a) Consideremos por ejemplo, la curva "2" para lana. Esta intercepta la curva para 100% de humedad en 26% de humedad, consecuentemente, cualquier muestra de lana que contenga menos que 26% de humedad contiene solamente agua aprisionada. Toda humedad que contenga sobre el 26% es agua sin aprisionar.
- (b) Una muestra de lana conteniendo, por ejemplo, 30% de agua, contiene 4% de agua sin aprisionar y 26% de agua aprisionada, mientras una muestra que contiene 20% de agua contiene solamente agua aprisionada.(9,10)

1.2.4 Contenido de humedad libre.-

- (1) Es la diferencia entre la humedad total del sólido y el contenido de humedad en equilibrio, representa la cantidad de agua que puede ser eliminada desde un sólido húmedo bajo cualquier condición de humedad del aire y temperatura dadas.
- (a) Puede incluir humedad aprisionada y sin aprisionar Fig. 1.2
- (b) El valor de la humedad libre carece de significado si con el no se conocen también la temperatura y la presión parcial del vapor de agua del medio secante y la humedad en equilibrio del sólido.(5, 10, 11)
- (2) Ejemplos.-
- (a) Una muestra de lana (Fig. 1.3 ; curva 2) tiene un contenido de humedad en equilibrio de 12,5% en contacto con aire de 50% de humedad relativa y 25°C.
- (b) Si una muestra dada de lana contiene 20% de humedad, no todo este 20% es posible eliminarlo por secado en una corriente de aire a 25°C y 50% de humedad. Solamente: $20 - 12,5 = 7,5\%$ es eliminable. Esta es la humedad libre de esta muestra para estas condiciones.(2)

- (3) Es conveniente recordar que la distinción entre agua aprisionada y agua sin aprisionar depende de las propiedades propias del material, mientras que la distinción entre contenido de humedad en equilibrio y contenido de humedad libre depende de las condiciones particulares escogidas para la operación de secado.(3)

1.2.5 Base de peso seco, base de peso húmedo.- (Fig. 1.5)

- (1) Los cálculos de secado se simplifican si los contenidos de agua se expresan en la base de 1 kg. de sólido seco. En efecto, la cantidad de agua eliminada puede determinarse fácilmente obteniendo la diferencia entre el contenido de agua en dos tiempos cualesquiera.

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (1-1)$$

W_d = kg.de agua/kg.de sólido seco

W_w = kg.de agua/kg.de sólido húmedo

- (2) Base de peso húmedo.- Es la que expresa la humedad de un material por un porcentaje del peso del sólido húmedo.

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (1-2)$$

- (3) La base de peso húmedo es menos satisfactoria que la base de peso seco, con la cual la variación del porcentaje de humedad es constante para todos los contenidos de humedad. (10, 11)

- (4) Ejemplo.- Un sólido húmedo es secado desde un 80% hasta un 5% de humedad (base húmeda). Determinar el agua evaporada por cada 1000 lb. de producto seco.(12)

Solución.

$$\text{Contenido inicial de humedad} = \frac{0,80}{1 - 0,80} = 4,0000$$

$$\text{Contenido final de humedad} = \frac{0,05}{1 - 0,05} = 0,0527$$

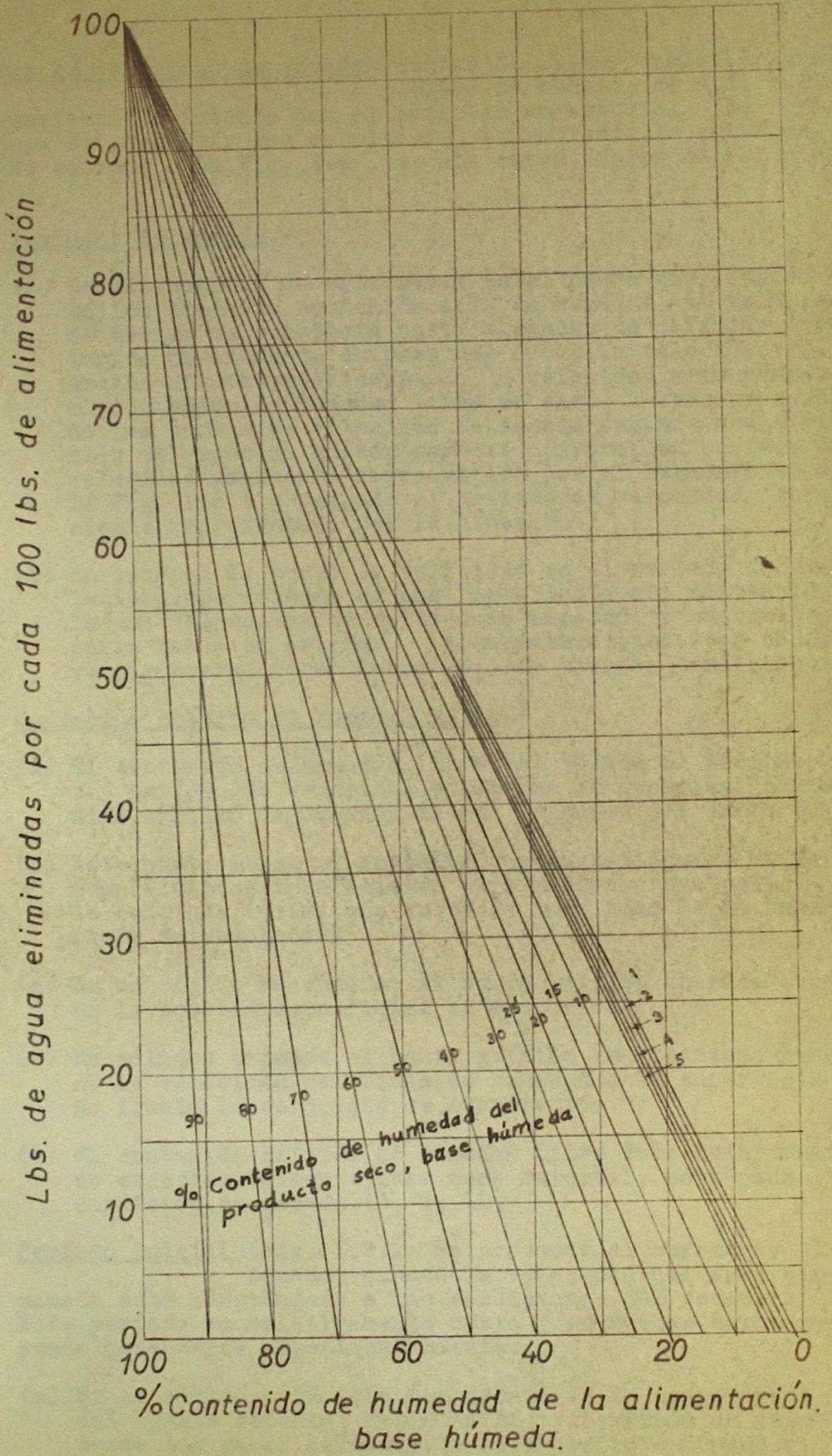
$$\text{lb.de agua evaporada/lb.de sólido seco} = 3,9473$$

$$\text{lb.de sólido seco en el producto} = \frac{1000}{0,95} = 950$$

$$\text{lb.de agua evaporadas.....} = \frac{950}{4 - 0,0527} = 3750$$

1.2.6 Condiciones de secado.- La velocidad de evaporación de agua desde un material es determinada por la temperatura, humedad y velocidad del aire con el cual está en contacto. Estas condiciones externas son llamadas "condiciones de secado", a las cuales es expuesto el material.

- (1) Cuando los factores mencionados arriba permanecen constantes, el proceso es conocido como secado bajo condiciones constantes.(3, 7)



1.2.7 Curvas de velocidad de secado.- Antes de atacar cualquier problema de secado, es útil realizar una experiencia de secado con el material en estudio. La forma más ventajosa de presentar los resultados, es mediante la curva de velocidad de secado. La Fig. 1.6, es una curva típica de velocidad de secado.

(1) Períodos de secado.-

- (a) Lo más notable de esta curva es el hecho que, cuando el sólido tiene un contenido alto de humedad, la velocidad de secado es constante hasta alcanzar un definido contenido de humedad, después del cual, la velocidad de secado disminuye, alcanzando la velocidad cero cuando el contenido de humedad libre es cero. Este proceder de las curvas de velocidad de secado sugiere una división del proceso en dos partes: primero, un período de velocidad constante representado por el segmento ab de la Fig. 1.6; y segundo el período de velocidad decreciente representado por la línea bc
- (b) En general la curva de velocidad en el período de velocidad decreciente es una recta hasta una distancia lejana del contenido crítico de humedad, y entonces curva hacia el origen. La curvatura puede ser cóncava o convexa, dependiendo ello de ciertas condiciones.

(2) Contenido crítico de humedad libre.-

- (a) El contenido de humedad libre del sólido al término del período de velocidad constante se denomina "contenido crítico de humedad libre" (abscisa del punto b)
- (b) Este punto marca el instante cuando el líquido en la superficie es insuficiente para mantener una película continua (film) que cubra la totalidad de la superficie de desecación
- (c) En un sólido no poroso, el punto crítico aparece cuando la humedad superficial es evaporada.
- (d) En sólidos porosos el punto crítico es alcanzado cuando la velocidad del flujo de humedad a la superficie no iguala la velocidad de evaporación.
- (e) El contenido crítico de humedad libre debe determinarse experimentalmente para cada material, para cada condición de secado. (3, 9, 11)

(3) Período inicial (Fig. 1.7).- Se presenta al empezarse el secado, cuando la velocidad del agua eliminada está adaptándose a las condiciones del secador. Este período es relativamente corto y en muchos casos no puede detectarse experimentalmente.

- (a) Si es sólido está frío por debajo de la temperatura del agente secante, debido a la transmisión de calor desde los gases calientes a la superficie húmeda y fría del sólido, la temperatura del agua se eleva y se evapora después tomando su calor latente del gas caliente. El agua se evapora por que la presión de vapor del agua que moja el sólido es mayor que la presión parcial del vapor de agua del medio secante.

Al aumentar la temperatura de la superficie aumenta la cantidad de agua evaporada y disminuye la transmisión calorífica hacia el sólido; después de poco tiempo el calor transmitido es igual al necesario para la evaporación del agua, y cuando se alcanza la temperatura de bulbo húmedo, la cantidad de agua evaporada es constante.

- (b) Cuando la temperatura inicial del sólido es más alta que la temperatura de bulbo húmedo del medio secante, el mecanismo de regulación es el mismo; pero con la excepción de que el calor latente necesario es mayor que el transmitido al sólido por lo que la velocidad de desecación disminuye hasta llegar a la del régimen estacionario. (5, 11)

(4) Período de velocidad constante.-

- (a) Se presenta cuando la evaporación tiene lugar en la superficie del sólido húmedo, el que se comporta como una superficie libre de agua bajo condiciones similares.
- (b) Sin embargo el aumento de la rugosidad de la superficie del sólido puede inducir a velocidades de evaporación superiores, que las de un líquido libre
- (c) La velocidad de desecación la determina la rapidez con que se difunde el vapor de agua a través de la película de aire que existe sobre la superficie del sólido, no siendo afectada por el mecanismo interno de circulación del líquido.
- (d) Si el sólido es no poroso, el agua eliminada en este período es principalmente agua superficial en la superficie del sólido.

En un sólido poroso, la mayoría del agua eliminada en el período de velocidad constante es suministrada del interior del sólido. La evaporación desde un material poroso es por el mismo mecanismo que aquel desde un termómetro de bulbo húmedo, y el proceso que ocurre en un termómetro de bulbo húmedo es esencialmente uno de velocidad de secado constante.

- (e) El período de velocidad constante varía en los procesos industriales desde una fracción insignificante hasta cantidades importantes.
- (f) Este período es el más susceptible a la aplicación de consideraciones teóricas, y la influencia de la mayoría de las variables que afectan el mecanismo de la desecación, en este período han sido bastante bien demostradas.
- (g) Las velocidades de secado se suelen representar en función de la humedad libre y no de la humedad total, porque para cualquier materia siendo constantes la temperatura y la humedad del medio secante la velocidad de desecación es cero, cuando la humedad libre es también cero. (2, 4, 5, 9, 10, 11, 13)

(5) Período de velocidad decreciente (Período de velocidad de caída)

(a) En el caso más general este período se divide en dos zonas. (Fig. 1.7):

- (i) Zona de desecación superficial no saturada.- Que sigue inmediatamente después del punto crítico. Cuando una parte de la superficie del sólido no es humedecida por el líquido por más tiempo, el área del agua utilizable para la transferencia de masa y calentamiento directo disminuye, motivando la disminución de la velocidad de secado.
- (ii) Zona en la cual predomina la circulación interna del líquido.-

En los casos ordinarios es muy difícil distinguir entre estas dos zonas. Teóricamente, este segundo período representa la parte del ciclo de secado donde el agua de vaporización ha pasado a ser enteramente subsuperficial. La circulación interna de la humedad puede ser regida por varios mecanismos, tales como: la difusión, la capilaridad, etc.

Durante la segunda zona, la intensidad con que circula interiormente el líquido es la que decide la intensidad de la desecación. Las líneas que representan estos dos estados en la curva de secado; frecuentemente son, aproximadamente rectas. (10, 11)

(b) Mecanismo del secado.-

- (i) Caso en el cual no existe agua aprisionada.-

A medida que disminuye el contenido de humedad de una plancha, se alcanza un punto en el cual el poder de la plancha para entregar humedad a la superficie llega a ser menor, que el del aire para evaporar dicha agua, por lo cual la velocidad de secado empieza a disminuir, iniciándose así el período de velocidad decreciente, que es aquel en el cual el plano de vaporización se pone en movimiento desde la superficie de la placa hacia el interior de ella, hasta que toda la humedad libre es eliminada.

Este mecanismo puede discutirse en más detalles con ayuda de la Fig. 1.8. En esta figura se muestra esquemáticamente la mitad de la placa, además de los gradientes de temperaturas, presión parcial y concentración de agua. En el instante representado por la figura, el plano de vaporización se ha movido una distancia L hacia el interior del sólido. El gradiente de agua, máximo en el centro del sólido disminuye hacia el exterior: lentamente en la plancha húmeda y rápidamente en el plano de vaporización, siendo cero en la capa seca (pues el agua aprisionada es despreciable).

El suministro del calor al plano de vaporización es posible al gradiente de temperaturas ($t_a - t_i - t_z$), cuya parte ($t_a - t_i$) impulsa el flujo de calor a través de la película de aire, mientras la parte ($t_i - t_z$) lo hace a través de la capa seca.

El gradiente de presiones parciales ($p_z - p_i - p_a$) impulsa el vapor de agua formada en el plano de vaporización hasta la corriente de aire. La mencionada difusión de vapor se realiza en dos etapas: difusión de vapor a través de la capa seca y difusión a través de la película de aire, actuando como fuerzas impulsoras de los respectivos casos, los gradientes ($p_z - p_i$) y ($p_i - p_a$) respectivamente

(ii) Caso en el cual existe agua aprisionada (Fig. 1.9)

En el secado de un sólido higroscópico, cuando la zona de evaporación alcanza la línea central, todavía hay una cantidad considerable de humedad que puede ser eliminada por el aire secante. Esta humedad es el agua aprisionada (retenida después que toda el agua sin aprisionar ha sido eliminada), la cual debe ser vaporizada y su vapor difundido a la superficie. Puesto que la presión parcial de esta agua aprisionada es menor que aquella del agua libre a la misma temperatura, la fuerza impulsora durante este período es pequeña, y dado que la resistencia a la difusión es alta (puesto que incluye la mitad de la placa), la velocidad de secado es baja.

Este hecho es mostrado en la Fig. 1.6, la cual representa el secado de una placa de pulpa de papel, material que contiene considerable agua aprisionada. Después que la zona de vaporización alcanza la línea central, la velocidad de secado cae muy rápidamente.(3)

(6) Ecuaciones para el secado.-

(a) Ecuaciones del período de velocidad constante.- Cuando una corriente de aire (componente a) y vapor de agua (componente b), pasa sobre una superficie de agua desde la cual el vapor de agua es difundido a través de la película ficticia próxima a la interfase, es posible determinar la velocidad de difusión mediante la ecuación (1-3) derivada de las presentadas por Lewis y Chang. (Trans.Am.Inst.Chem.Eng; 21, 127, 1938)

$$\frac{w}{A} = \frac{b_{gw}(p_{bi} - p_{bg})}{(p_a)_m \cdot B_g} \quad (1-3)$$

donde:

w = peso del vapor de agua difundido por unidad de tiempo.

A = área de difusión.

b_{gw} = coeficiente de difusión.

B_g = espesor de la película

p_{bg} = presión parcial del vapor de agua en el gas.

p_{bi} = presión parcial del vapor de agua en la interfase.

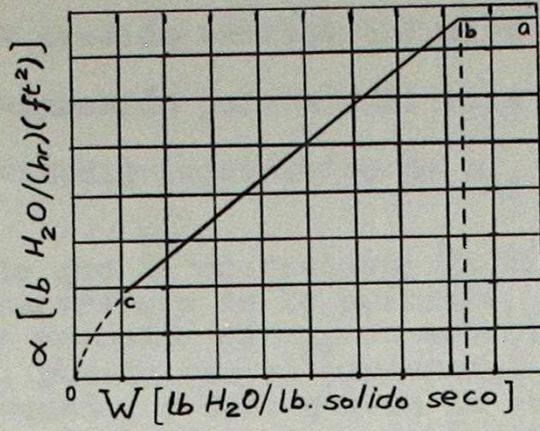


Fig. 1.6

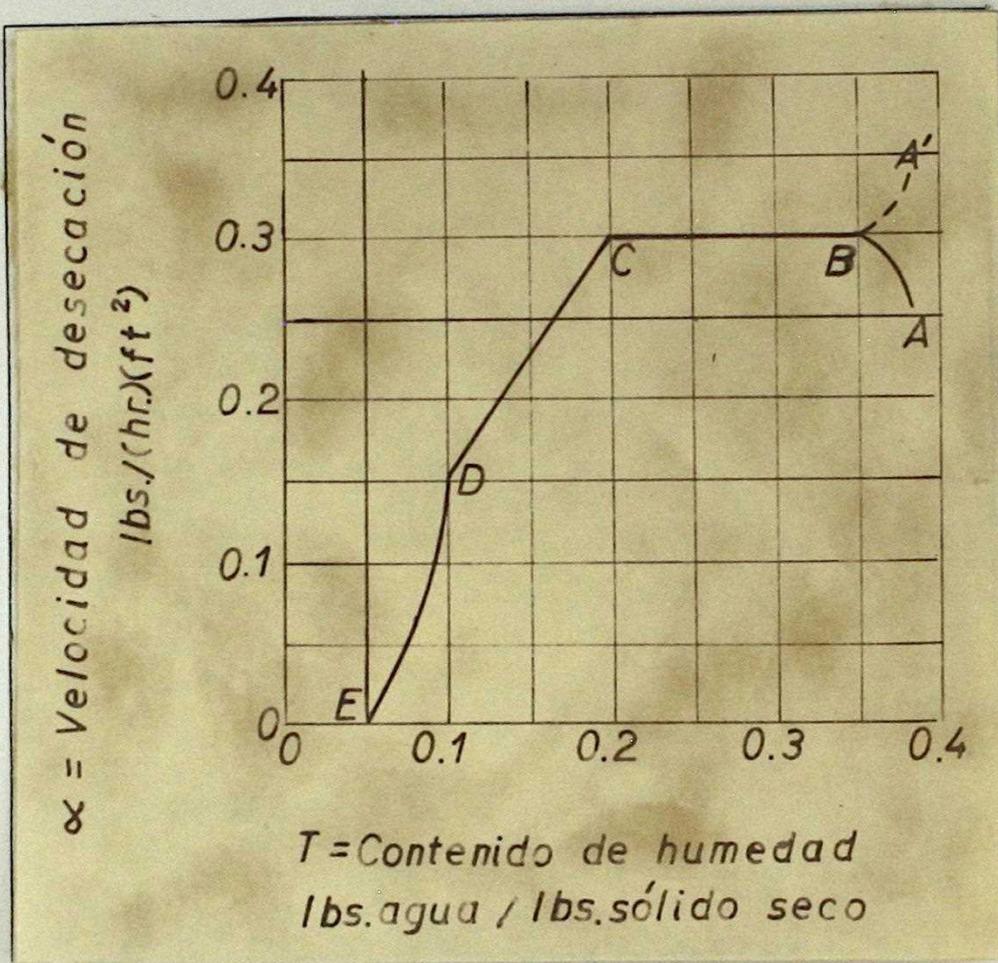


Fig. 1.7

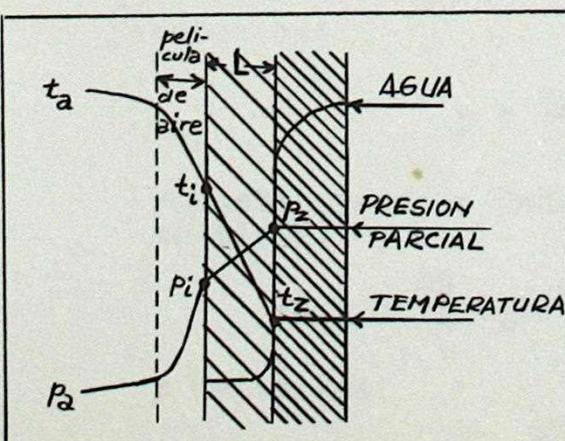


Fig. 1.8

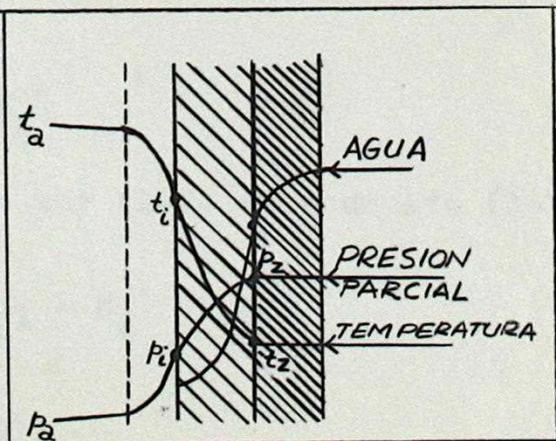


Fig. 1.9

p_{ag} = presión parcial del aire en el gas.

p_{ai} = presión parcial del aire en la interfase.

$(p_a)_m$ = medio logarítmico de p_{ag} y p_{ai}

Puesto que el coeficiente de difusión b_{gw} varía con la temperatura de la película, es necesario usar un valor promedio de b_{gw} en ecuación (1-3). Por otro lado, puesto que el porcentaje de variación en $(p_a)_m$ es pequeño, y dado que en la práctica es muy difícil medir el espesor de la película, es conveniente agrupar estos factores en un sólo coeficiente k_G :

$$k_G = \frac{b_{gw}}{(p_a)_m \cdot B_g} \quad (1-4)$$

La velocidad de transmisión de vapor de agua a través de la película, por medio de la difusión es dada por:

$$w = k_G A (p_i - p_g) \quad (1-5)$$

Esta ecuación muestra la necesidad de un gradiente de presiones parciales para lograr la difusión del vapor de agua a través de la película. Para fines de cálculo, sin embargo, es conveniente expresar la fuerza impulsora como una diferencia de humedades, más bien que una diferencia de presiones parciales, porque las humedades pueden leerse directamente desde la carta psicrométrica. Para lograr el propósito señalado utilizamos la expresión:

$$H = \frac{18 p}{29(1 - p)} \quad (1-6)$$

que relaciona la humedad del aire con la presión parcial del vapor de agua en el aire. En la fórmula (1-6), bajo condiciones ordinarias de temperatura, p es pequeño en comparación con la humedad, en virtud de lo cual la ecuación (1-6) puede escribirse en forma aproximada como:

$$H = \frac{18 p}{29} \quad (1-7)$$

entonces:

$$p = \frac{29 H}{18} \quad (1-8)$$

y sustituyendo p dado por (1-8) en ecuación (1-5) se tiene:

$$w = \frac{29}{18} k_G A (H_i - H_g) \quad (1-9)$$

y haciendo:

$$k_G' = \frac{29}{18} k_G \quad (1-10)$$

$$w = k_G' A (H_i - H_g) \quad (1-11)$$

Consideremos ahora una gota del agua que está siendo difundida, bajo condiciones tales, que la gota esté a la temperatura de bulbo húmedo. Rodeando la gota de líquido existirá una película de aire, a través de la cual se difunden w (lb. de vapor de agua/hr.)

Si λ (Btu./lb) es el calor latente del agua a la temperatura de bulbo húmedo, entonces $\lambda \cdot w$ (Btu./hr.) es el calor latente del vapor de agua en difusión.

Por otro lado, puesto que la temperatura de bulbo húmedo es inferior a la temperatura del volumen de aire; entonces q (Btu/hr) es el calor sensible que fluye dentro de la gota.

Puesto que la temperatura de bulbo húmedo, es una temperatura de equilibrio:

$$\lambda \cdot w = q \quad (1-12)$$

y recordando que el calor sensible es igual a:

$$q = h A (t_g - t_i) \quad (1-13)$$

igualando las ecuaciones (1-12) y (1-13) se tiene:

$$\lambda \cdot w = h A (t_g - t_i) \quad (1-14)$$

y reemplazando w por su valor (1-11) se llega a:

$$\lambda \cdot k_G' A (H_i - H_g) = h A (t_g - t_i)$$

$$\lambda \cdot k_G' (H_i - H_g) = h (t_g - t_i) \quad (1-15)$$

Puesto que h y k_G' representan coeficientes correspondientes a la misma película, es razonable esperar que ellos sean afectados por los mismos factores y en la misma forma. Cuando la velocidad de transferencia de masa es pequeña, la razón h/k_G' puede ser considerada constante.

A menudo, la radiación y la conducción hacen que la temperatura de evaporación exceda a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Cuando ocurre esto, es necesario calcular la temperatura real de la superficie para poder hallar la intensidad constante. Esta temperatura mayor de la superficie se calcula basándose en un balance calorífico que iguale el flujo de transmisión de calor por convección y por radiación a la intensidad de evaporación, el cual nos proporciona la siguiente ecuación:

$$k_G' A \lambda (H_i - H_g) = h_c A (t_g - t_i) + h_r \epsilon A (t_r - t_i); \quad (1-16)$$

$$h_r = \frac{0.173 [(t_r/100)^4 - (t_i/100)^4]}{t_r - t_i} \quad (1-17)$$

La ecuación (1-16) puede modificarse por medio de la relación empírica para las mezclas de aire y vapor de agua:

$$\frac{h_c}{k_{G'}} = c_s \quad (1-17)$$

$$c_s = 0,24 + 0,45 H \quad (1-18)$$

La ecuación (1-16) se convierte entonces en:

$$\frac{\lambda}{c_s} (H_i - H_g) = (t_g - t_i) + \xi \frac{h_r}{h_c} (t_r - t_i) \quad (1-19)$$

La ecuación (1-19) se resuelve por tanteo o gráficamente (Perry pag.1245), para calcular los valores reales de H_i y t_i y, por consiguiente, la intensidad real de desecación.

En la deducción de las ecuaciones precedentes la nomenclatura empleada fué la siguiente:

A = área de difusión, ft^2

c_s = calor específico del aire húmedo, $Btu/(lb.de\ aire\ seco)(^{\circ}F)$

H = humedad del aire, $lb.de\ agua/lb.de\ aire\ seco$

H_g = humedad del aire, $lb.de\ agua/lb.de\ aire\ seco$

H_i = humedad del aire en la interfase, $lb.de\ agua/lb.de\ aire\ seco$

h = coeficiente de transmisión de calor, $Btu/(hr)(ft^2)(^{\circ}F)$

h_c = coeficiente de transmisión de calor por convección, $Btu/(hr)(ft^2)(^{\circ}F)$

h_r = coeficiente de transmisión de calor por radiación, $Btu/(hr)(ft^2)(^{\circ}F)$

k_G = coeficiente de transferencia de masa, $lb/(hr)(ft^2)(atm)$

p = presión parcial del vapor de agua en el aire, atm

p_g = presión parcial del vapor de agua en el aire, atm

p_i = presión parcial del vapor de agua en la interfase, atm

q = calor sensible, Btu/hr

t_g = temperatura del aire, $^{\circ}F$

t_i = temperatura de la interfase, $^{\circ}F$

t_r = temperatura de la fuente que radia calor hacia la superficie húmeda, °F

w = velocidad de difusión, lb. de agua/hr

ξ = emisividad de la superficie que recibe la radiación

λ = calor latente del agua, Btu/lb

En la ecuación (1-15) para calcular la velocidad de desecación deben utilizarse los coeficientes de transmisión de calor en lugar de los coeficientes de transferencia de masa, porque los primeros son por lo general más seguros que estos últimos.

En relación con los coeficientes de transmisión de calor podemos señalar que:

i) Si $h = h_{\text{conv.}} + h_{\text{rad.}}$ entonces $t_g < t_{\text{sup.}} < t_i$

Un resultado semejante, se obtiene cuando el calor llega a la superficie de evaporación por convección y conducción.

ii) Si $h = h_{\text{conv.}}$ entonces $t_{\text{sup.}} = t_i$

(2, 3, 6, 10)

(b) Ecuaciones del período de velocidad decreciente.

(i) Como se muestra en Fig. 1.6, la velocidad de secado durante el período de velocidad decreciente es una función del contenido de humedad libre del material comprometido. En general, esta relación es una curva, la cual debe determinarse experimentalmente. Cuando se tiene esta curva, el tiempo de secado puede obtenerse por medio de una simple integración, suponiendo que la ecuación para la curva de velocidad de secado, en el período de velocidad decreciente, puede escribirse como:

$$-\frac{1}{A} \frac{dW}{d\theta} = f(T) \quad (1-20)$$

donde:

W = peso del agua libre presente en el sólido, lb

A = área de secado, ft²

θ = tiempo, hr

T = contenido de humedad libre, lb. de agua/lb. de sólido seco

$f(T)$ = ordenada de la curva de velocidad de secado

y puesto que el peso del agua eliminada en un corto intervalo de tiempo es igual al producto del peso del sólido seco y el cambio de humedad libre:

$$dW = D dT \quad (1-21)$$

introduciendo el valor de dW en la ecuación (1-20) se tiene:

$$-\frac{D}{A} \frac{dT}{d\theta} = f(T) \quad (1-22)$$

por lo cual:

$$d\theta = -\frac{D}{A} \frac{dT}{f(T)} \quad (1-23)$$

integrando entre los límites impuestos por el período de velocidad decreciente obtenemos:

$$\int_0^{\theta_2} d\theta = -\frac{D}{A} \int_{T_c}^{T_2} \frac{dT}{f(T)} \quad (1-24)$$

$$\theta_2 - \theta_c = \frac{D}{A} \int_{T_2}^{T_c} \frac{dT}{f(T)} \quad (1-25)$$

$$\theta_f = \theta_2 - \theta_c \quad (1-26)$$

$$\theta_f = \frac{D}{A} \int_{T_2}^{T_c} \frac{dT}{f(T)} \quad (1-27)$$

donde:

D = peso del sólido seco, lb

θ_f = tiempo de secado en el F.R.P., hr

T_c = contenido de humedad libre al comienzo del F.R.P., lb.de agua/lb.de sólido seco

T_2 = contenido de humedad libre al final del F.R.P., lb.de agua/lb.de sólido seco

Si los datos experimentales son utilizables, puede graficarse $1/f(T)$ como ordenada y T como abscisa, el área entre los límites T_2 y T_c multiplicada por el valor de D/A dará el tiempo requerido para el F.R.P.

- (ii) Si estos datos no son utilizables, una solución aproximada puede obtenerse suponiendo que la velocidad de secado disminuye linealmente con el contenido de humedad entre el punto crítico y el origen

Bajo esta suposición, la ecuación (1-20) se reduce a:

$$-\frac{1}{A} \frac{dW}{d\theta} = KT \quad (1-28)$$

donde

$$K = \frac{\alpha}{T_c} \quad (1-29)$$

siendo:

α = velocidad de secado durante el F.R.P.,
lb.de agua/(hr)(ft²)

T_c = contenido crítico de humedad libre, lb.de
agua/lb.de sólido seco

K = coeficiente de desecación

y si se sustituyen dW y K dados por (1-21) y (1-29) respectivamente en (1-28) se tiene:

$$-\frac{D}{A} \frac{dT}{d\theta} = \frac{\alpha}{T_c} T \quad (1-30)$$

de donde

$$d\theta = -\frac{D}{A} \frac{T_c}{\alpha} \frac{dT}{T} \quad (1-31)$$

que integrada entre el punto crítico y el punto final del F.R.P.

$$\int_{\theta_c}^{\theta_f} d\theta = -\frac{D}{A} \frac{T_c}{\alpha} \int_{T_c}^{T_2} \frac{dT}{T} \quad (1-32)$$

nos conduce a:

$$\theta_f = \frac{D}{A} \frac{T_c}{\alpha} \text{Log} \frac{T_c}{T_2} \quad (1-33)$$

$$\theta_f = 2,3 \frac{D}{A} \frac{T_c}{\alpha} \log_{10} \frac{T_c}{T_2} \quad (1-34)$$

En este método sólo es necesario conocer las coordenadas del punto crítico en la curva de velocidad de secado. (3, 11)

(7) Factores que afectan la velocidad de secado.-

- (a) Efecto de la humedad del aire.- Si la temperatura de bulbo húmedo del aire y su velocidad son fijas, pero si la humedad del aire es variada, el efecto es variar p_a y variar el gradiente ($p_a - p_1$) en proporción. Durante el período de velocidad constante, la velocidad de secado es proporcional a ($p_1 - p_a$) tal como en la vaporización del agua y, p_1 permanecerá fijo en el valor correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo.

Cualitativamente el efecto de variación de la humedad en el período de velocidad decreciente es el mismo. La fuerza impulsora por la reacción del secado es el gradiente ($p_z - p_1 - p_a$), y si p_a es aumentado, la velocidad de secado disminuye en proporción y viceversa. Este efecto es mostrado en Fig. 1.10, en la



cual la temperatura de bulbo húmedo es constante, pero la temperatura de bulbo seco (y por lo tanto la humedad relativa) cambia.(3)

- (b) Efecto de la velocidad del aire.- Las variaciones en la velocidad del aire afectan la velocidad de secado en el período de velocidad constante (Fig. 1.11), a través de su influencia en los coeficientes h_c y k_G , tal como lo indican las ecuaciones:

$$j_H = \left(\frac{h_c}{c_p G} \right) \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{2/3} = \phi \left(\frac{LG}{\mu} \right) \quad (1-35)$$

$$j_D = \left(\frac{k_G M P}{G} \right) \left(\frac{\mu}{\rho D_v} \right)^{2/3} = \phi(\text{Re}) \quad (1-36)$$

propuestas por A.P.Colburn, Trans.Am.Inst.Chem.Engrs, 29,174-210 (1933) y T.H.Chilton, Ind.Eng.Chem.,26,1183-1187 (1934) respectivamente para correlacionar datos experimentales para los coeficientes de transmisión de calor y de transferencia de masa, y donde:

c_p = calor específico, Btu/(lb)(°F)

D_v = coeficiente de difusión, ft²/hr

G = velocidad de masa, lb/(hr)(ft²)

h_c = coeficiente de transmisión de calor por convección, Btu/(hr)(ft²)(°F)

j_D = factor j para transferencia de masa, sin dimensión.

j_H = factor j para transmisión de calor, sin dimensión.

k = conductividad térmica, Btu/(hr)(ft²)(°F)(ft)

k_G = coeficiente de transferencia de masa, lb.mol/(hr)(ft²)(atm)

L = longitud de la superficie húmeda, ft

M = peso molecular

P = presión total, atm

Re = número de Reynolds, sin dimensión

ϕ = función

μ = viscosidad, lb/(ft)(hr)

ρ = densidad, lb/ft³

- (c) Efecto de las contracciones.- Un factor importante que controla la velocidad de secado es la contracción del sólido. Sólidos porosos rígidos no tienen contracción apreciable

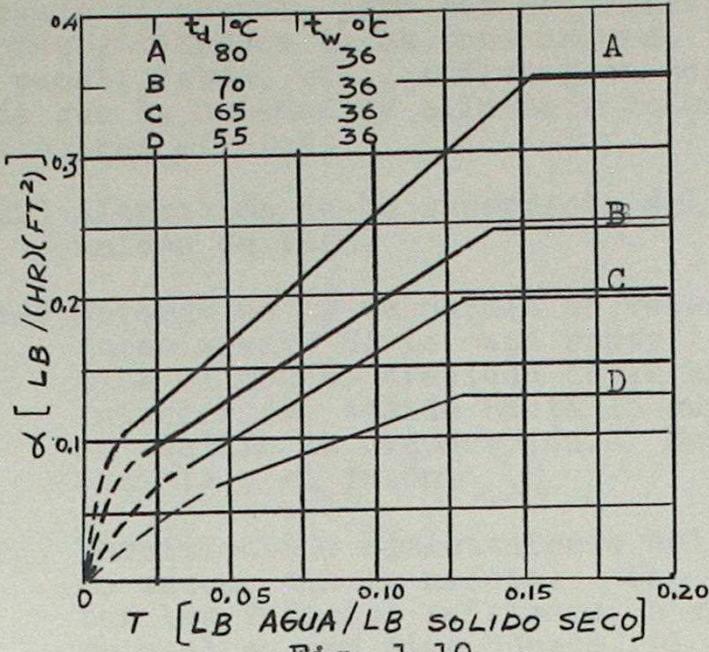


Fig. 1.10

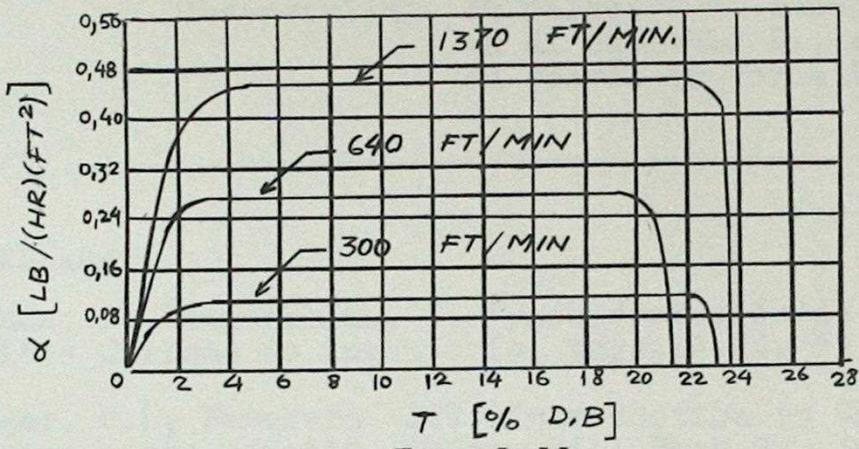


Fig. 1.11

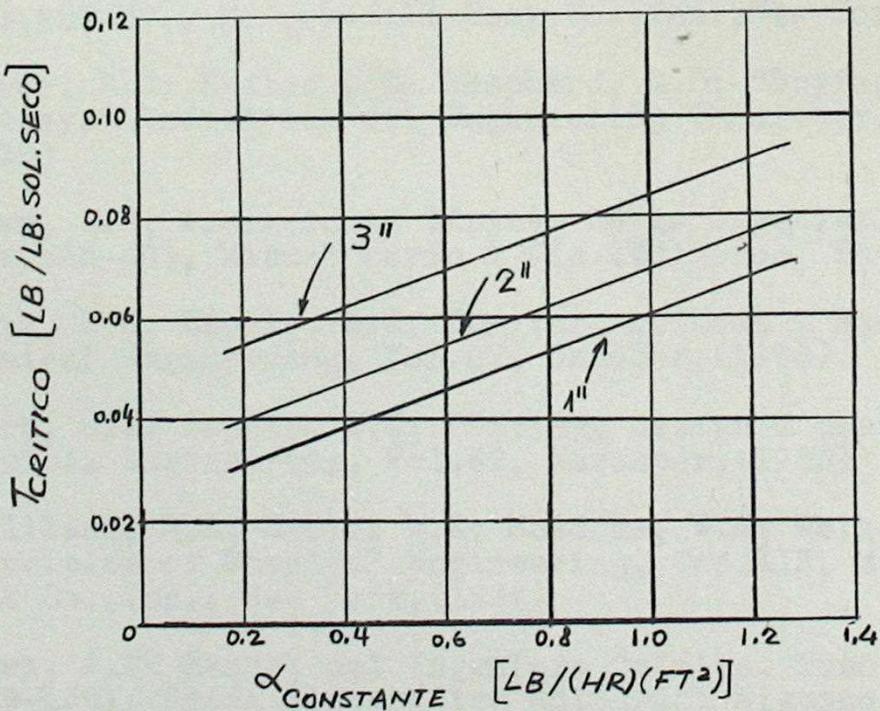


Fig. 1.12

durante el secado, pero los materiales coloidales, amorfos y fibrosos tales como madera, textiles, pulpa de papel, jabón, etc., sufren gran contracción a medida que la humedad es eliminada de ellos. Esto tiene tres efectos:

- (i) Alteración de la superficie del material por unidad de peso.
- (ii) Retardo de la velocidad de secado, debido al endurecimiento de la capa superficial, lo cual impide el pronto traslado de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie donde se realiza la evaporación. Esto ocurre con la arcilla y el jabón.
- (iii) Torcimiento o agrietamiento del material tal como sucede con la madera. Con el objeto de evitar los defectos señalados, a veces el secado se realiza con aire húmedo, el que permite así disminuir la diferencia de humedades, entre el aire y la superficie del sólido.(2)

Observación.- En relación al secado de madera, en el capítulo 2., se ha expuesto su teoría en forma breve.

1.3 Bibliografía.-

- (1) Aranda, A; Faignenbaum, I; "Deshidratación de alimentos" Revista Chilena de Ingeniería, pags.19-24, N^o 3, (1943)
- (2) Badger, W.L; Banchemo, J.T; Introduction to Chemical Engineering, pags.468-520, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1956)
- (3) Badger, W.L; McCabe, W.L; Elements of Chemical Engineering, pags.280-321, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1936)
- (4) Brewer, R.C; Hadlock, C; Shepherd, C.B; "Drying materials in trays" Industrial and Engineering Chemistry, 30, 388-397, (1938)
- (5) Brown, G.G; Operaciones básicas de la Ingeniería Química, pags.585-601, Manuel Marín & Cía., Editores, Barcelona (1955)
- (6) Clark, W.E; Lapple. W.C; "Drying, methods & equipment" Chemical Engineering, Vol.62, October, (1955)
- (6) Clark, W.E; Lapple. W.C; "Drying, design & costs" Chemical Engineering, Vol.62, November, (1955)
- (7) Gilliland, E.R; Lewis, W.K; McAdams, W.H; Walker, W.H; Principles of Chemical Engineering, Cap.XIX, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1937)
- (10) Perry, J.H; Manual del Ingeniero Químico, Tomo I, pags. 1239-1381, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, (UTEHA), Mexico, 1958

- (8) Henglein, F.A; Compendio de Tecnología Química, pags.132-145
Manuel Marín, Editor, Barcelona,(1951)
- (9) McCabe, W.L; Smith, J.C; Unit Operations of Chemical Engineering, pags. 871-905, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York,(1956)
- (10) Perry, citado anteriormente entre los números (7) y (8)
- (11) Peters, M.S; Elementary Chemical Engineering, pags. 209-216,
McGraw-Hill Book Co.,Inc., New York,(1954)
- (12) Treybal, R.E; Mass-Transfer Operations, pags.524-583, McGraw-Hill
Book Co.,Inc.,New York,(1955)
- (13) Wenzel, L; White, R.R; "Drying granular solids in superheated
steam", Industrial and Engineering Chemistry, 43, 1829-1837,(1951)

Capítulo 2.-

DESECACION DE MADERAS.

2.1 Consideraciones generales.- La desecación de la madera constituye un proceso muy delicado, por el hecho de que la madera no es un material homogéneo, y que presenta una estructura compleja y variable en una misma pieza, así como un equilibrio interior inestable; todo ello es motivo de contracciones, cada vez distintas, y que afectan a la longitud, al espesor y ancho de las piezas. Son problemas complejos que es preciso resolver y que pueden presentarse en cualquier momento.

A tal efecto, se impone un perfecto conocimiento de las maderas a tratar, una familiarización con el procedimiento, y el disponer de los medios de observación y control a lo largo de toda la operación de secado. Las dificultades y distintas modalidades de desecación, varían bastante, según la especie de la madera y su espesor.

2.2 Objeto del secado de las maderas.- Consiste en reducir la humedad contenida en ella, hasta alcanzar un estado de equilibrio con el medio o ambiente donde la madera ha de ser empleada, realizando la operación, de forma que se eviten, o por lo menos se reduzcan al mínimo, las tensiones internas, que pudieran originar desperfectos (7)

2.3 Estructura de la madera.- Observando el corte longitudinal de un tronco Fig. 2.1, que pase por su línea central, se distinguen las siguientes zonas:

2.3.1 La médula.- Faja central, que en el árbol adulto está formada por tejido muerto.

2.3.2 El duramen.(o pellín).- Zona de coloración oscura, formada por células muertas, que rodea la médula.

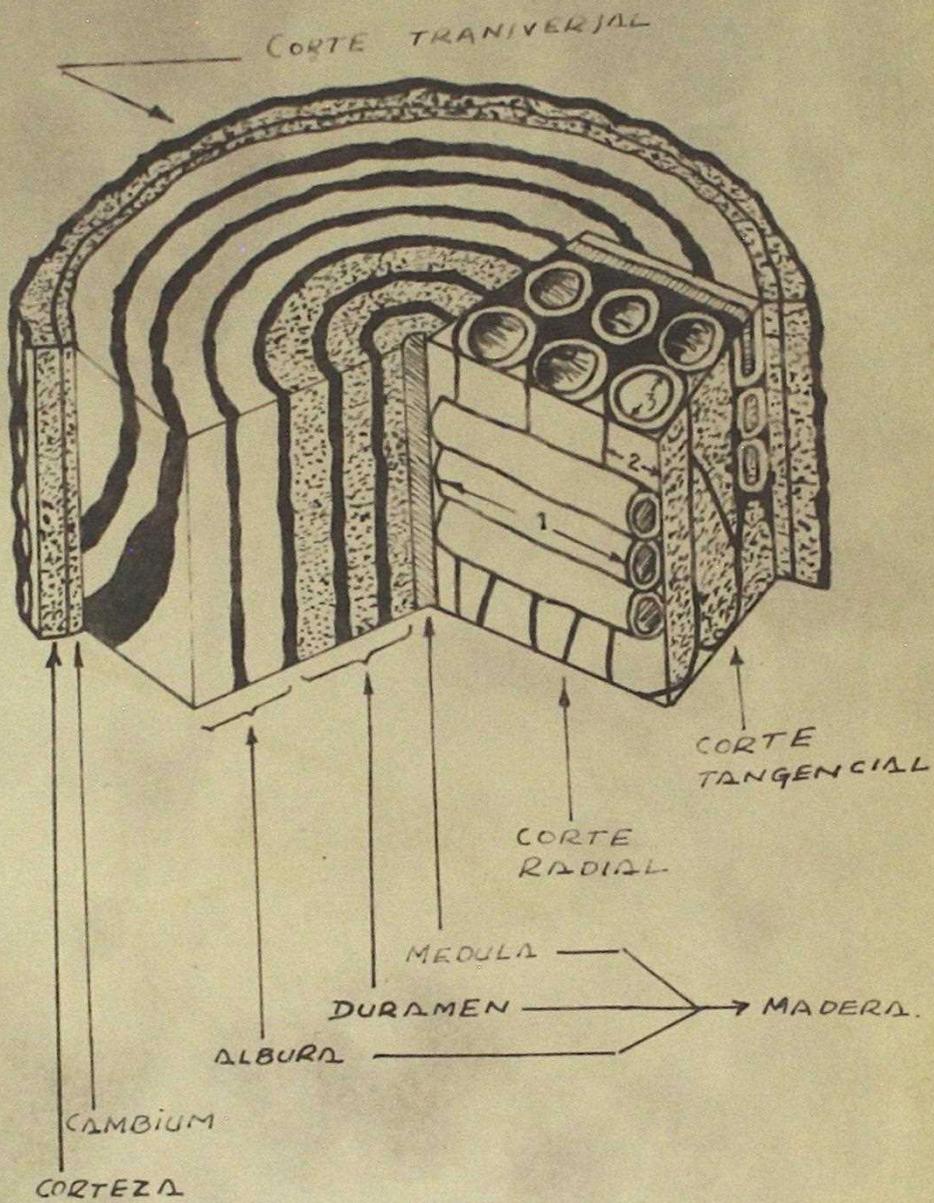
2.3.3 La albura (o hualle).- Zona de coloración más clara que rodea el duramen; constituida por células vivas, conductoras de la savia y ricas en sustancias nutritivas. A medida que el árbol crece, las células de la albura próximas al duramen mueren, incorporándose a éste.

2.3.4 El cambium.- Rodea a la albura y es una zona muy fina, de gran actividad en la primavera, pues forma células de gran diámetro, paredes delgadas y amplia cavidad interior que constituye la madera temprana (o de primavera). Al avanzar el verano el cambium pasa a generar células más pequeñas, de paredes más gruesas que forman la madera tardía (o de verano). Este proceso origina una serie de anillos concéntricos, llamados anillos de crecimiento.

2.3.5 La corteza.- Situada al exterior del cambium, protege los tejidos internos del tronco y actúa en el transporte de la savia (5)

2.4 Humedad de la madera.- La humedad en la madera, está constituida por la savia que es agua con azúcares, almidón, tanino y sustancias colorantes en disolución (8)

FIG. 2.1



CORTE DE UN TRONCO, QUE EXPLICA LAS DIFERENCIAS EN LAS CONTRACCIONES

El agua se encuentra en la madera bajo las formas siguientes:

- 2.4.1 Agua de constitución. - Que por ser un elemento componente de la materia, no interviene en la humedad de la madera.(4)
- 2.4.2 Agua de saturación (o de impregnación). - Absorbida por las paredes celulares.
- 2.4.3 Agua libre (o de embebimiento). - Es aquella que ocupa las cavidades celulares.

2.5 Períodos del secado de la madera. - Al secarse la madera, primeramente se evapora el agua libre a velocidad constante y cuando las cavidades celulares están vacías, las paredes empiezan a perder su propia humedad a velocidad decreciente hasta llegar a un equilibrio con las condiciones del aire. El límite que separa éstas dos etapas, se denomina "punto de saturación de las fibras" y para la mayoría de las especies, se encuentra comprendido entre el 20 y el 35% de humedad. La madera sólo empieza a contraerse cuando se alcanza el punto de saturación.(1, 5, 7, 9)

Tabla 2.1 Porcentaje de humedad en el "punto de saturación de las fibras" para algunas maderas.(#)

Especies	% de hum.
Especies chilenas	
Coníferas	
Alerce.....	28
Ciprés.....	27
Mañío.....	27
Pino Araucaria.....	26
Dicotiledóneas	
Avellano.....	24
Coigüe.....	33
Huahuan.....	26
Laurel.....	26
Lingue.....	28
Luma.....	32
Olivillo.....	24
Picha-picha.....	26
Raulí.....	28
Roble.....	32
Temu.....	30
Ulmo.....	31
Especies extranjeras	
Alamo.....	27
Eucalyptus Glóbulus.....	32
Pino Insignis.....	24

(#) Torricelli D, Eduardo; "Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas Chilenas", pag.12, (1941)

2.6 Variación del contenido de humedad.-

2.6.1 La humedad en la madera varía con la especie y dentro de un mismo árbol según las zonas consideradas; la albura tiene más humedad que el duramen y existe mayor humedad en las partes cercanas a la base que en la parte superior del tronco (9)

2.6.2 A cada condición del aire, caracterizada por su temperatura y su estado higrométrico, corresponde una humedad bien definida en la madera, cualquiera que sea la especie. Este grado de humedad se denomina contenido de humedad en equilibrio y es de gran importancia en el secamiento. No puede determinarse por métodos matemáticos y se ha obtenido de la experimentación. Con estos resultados se ha confeccionado el gráfico de la Fig. 2.2 en el cual se determina la humedad que debe tener la madera para estar en equilibrio con un aire de características determinadas (5)

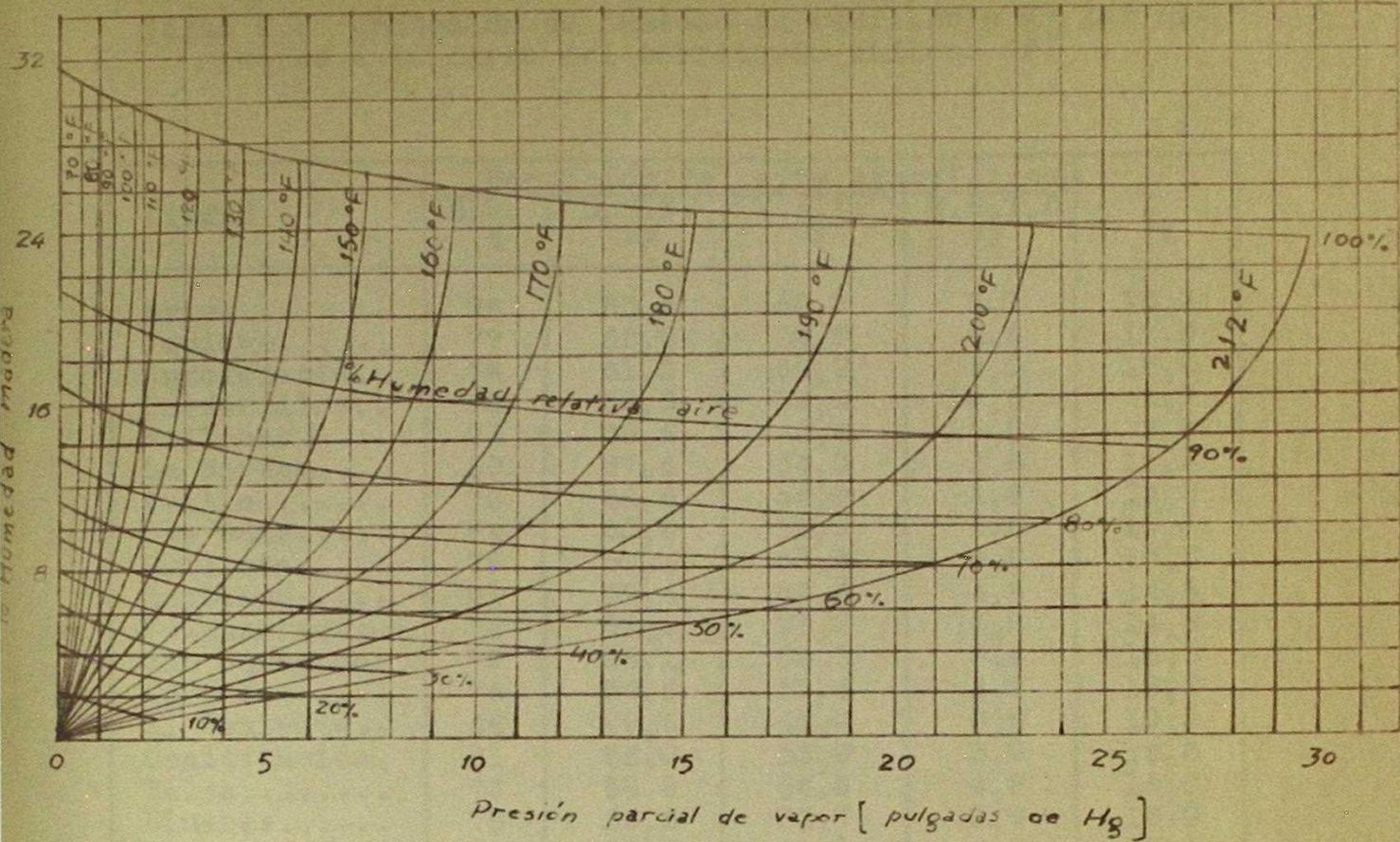
Tabla 2.2 Humedad de la madera a distintas temperaturas.(#)

Hum. rel. del aire %	Temperaturas °C										Hum. rel. del aire %
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
10	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	10
15	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	15
20	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	20
25	6	5	5	5	5	5	4	4	3	3	25
30	6	6	6	6	6	5	5	4	4	3	30
35	7	7	7	7	6	6	5	5	4	4	35
40	8	8	8	7	7	7	6	6	5	4	40
45	9	9	9	8	8	7	7	6	6	5	45
50	10	10	9	9	9	8	7	7	6	6	50
55	11	10	10	10	9	9	8	7	7	6	55
60	12	11	11	11	10	10	9	8	7	7	60
65	13	12	12	12	11	10	10	9	8	8	65
70	14	14	13	13	12	11	11	10	9	8	70
75	15	15	15	14	13	13	12	11	10	9	75
80	17	17	16	16	15	14	14	13	12	11	80
85	19	19	18	18	17	16	15	14	13	12	85
90	22	22	21	20	19	18	17	16	15	14	90
95	27	26	25	24	23	22	21	19	18	17	95
100	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	100

(#) Pistono R, J; "Desección de los Productos Vegetales", pag.212 Editorial Reverté, S.A., Buenos Aires (1955)

Observación: La humedad de la madera que aparece en la Tabla 2.2 está referida al estado seco, y sus valores son válidos prácticamente para todas las especies de madera.

A continuación he incorporado una tabla del contenido de humedad en equilibrio de las maderas a lo largo del territorio chileno. Esta tabla fué confeccionada por el Sr. Gregorio Zárate I., utilizando para ello datos registrados por el Observatorio Climatológico de Chile (Humedad relativa y D.B.T.). La temperatura de bulbo húmedo (W.B.T.) del aire se determinó utilizando la carta psicrométrica y los datos proporcionados, la cual permitió calcular la temperatura de depresión: $W.B.T.D. = D.B.T. - W.B.T.$



Contenido de humedad en equilibrio de la madera para diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa del aire. (Esta carta es aplicable a cualquier tipo de madera con un contenido de la producción Nor. American y S. American)

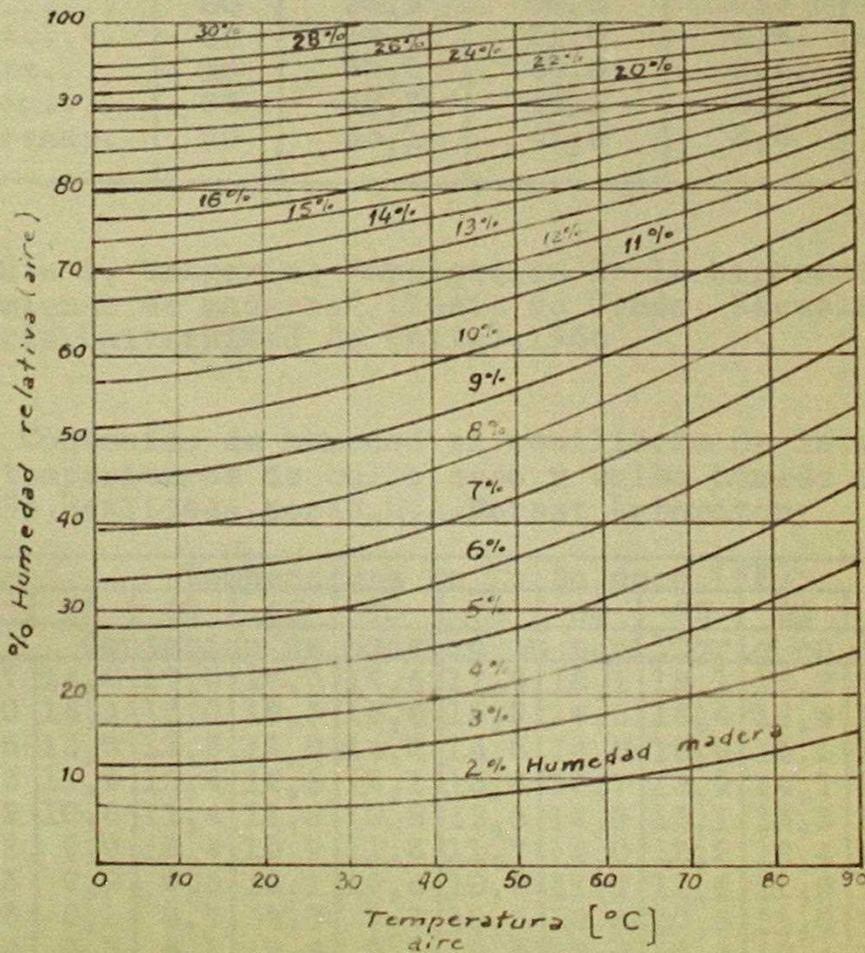


FIG. 2.2(b)

Contenido de humedad en equilibrio de la madera para diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa del aire

Tabla 2.3 Contenido de humedad en equilibrio de las maderas a lo largo del territorio chileno (#)

Ciudad	Condición del aire atmosférico				T ^h %
	H.R. %	D.B.T. °F	W.B.T. °F	W.B.T.D °F	
Arica.....	76	65,4	60,3	5,1	15,3
Iquique.....	77	63,5	58,9	4,6	17,0
Antofagasta..	74	61,2	56,2	5,0	15,0
Potrerosillos..	28	52,0	39,5	13,5	5,9
Vallenar.....	73	58,6	43,6	15,0	5,3
La Serena....	80	57,6	54,0	3,6	16,2
Ovalle.....	75	58,8	54,0	4,8	14,8
Los Andes....	64	58,6	52,0	6,6	13,3
Quillota.....	79	57,4	53,5	3,9	16,5
Santiago.....	71	57,4	52,6	4,8	14,8
Valparaiso...	74	57,9	53,0	4,9	14,8
San Fernando..	79	56,1	52,5	3,6	16,5
Curicó.....	76	56,6	52,4	4,2	16,2
El Teniente..	46	49,6	41,0	8,6	10,0
Constitución.	81	56,0	53,0	3,0	16,5
Talca.....	73	58,8	54,0	4,8	15,0
Linares.....	78	56,6	52,7	3,9	16,0
Cauquenes....	66	57,2	51,1	6,1	13,1
Talcahuano...	87	54,5	52,3	2,2	18,2
Concepción...	78	54,3	50,6	3,7	18,0
Los Angeles..	76	56,8	52,5	4,3	16,8
Angol.....	66	55,4	49,5	5,9	13,0
Traiguén.....	79	53,8	50,2	3,6	15,0
Temuco.....	80	53,8	50,5	3,3	15,2
Valdivia.....	88	52,9	51,0	1,9	15,4
Pto Montt....	85	52,0	49,6	2,4	15,1
Pto Aysén....	85	48,2	46,1	2,1	14,9
Punta Arenas.	70	44,1	41,5	2,6	14,5

(#) Zárate I, Gregorio; "Aplicación de la higrometría al secamiento de maderas" (Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile), 1956

Tabla 2.4 Contenido de humedad en equilibrio de la madera a distintas temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo de depresión. Realizada por: U.S.A. Forest Laboratory

W.B.T.D. °F	Temperatura de bulbo seco (°F)										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Contenido de humedad en equilibrio en %										
4	15,7	16,2	17,0	17,3	17,6	17,9	18,1	18,1	18,2	18,2	18,3
5	13,0	14,5	15,0	15,3	15,6	15,9	16,2	16,4	16,6	16,8	17,0
6	12,5	13,0	13,5	13,0	14,2	14,5	14,8	15,0	15,1	15,3	15,5
7	11,3	11,9	12,4	12,8	13,1	13,4	13,7	13,9	14,1	14,3	14,4
8	10,2	10,8	11,4	11,8	12,2	12,5	12,8	13,1	13,3	13,5	13,7
9	9,2	9,9	10,4	10,9	11,3	11,7	12,0	12,2	12,4	12,6	12,7
10	8,3	9,9	9,6	10,1	10,6	10,9	11,2	11,5	11,8	12,0	12,2
11	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,6	10,8	11,0	11,2	11,3
12	6,4	7,3	8,1	8,6	9,1	9,6	10,0	10,2	10,4	10,6	10,8
13	5,5	6,4	7,2	7,8	8,4	8,8	9,2	9,6	9,9	10,1	10,2
14	4,6	5,7	6,6	7,3	7,9	8,3	8,7	9,1	9,4	9,7	9,9
15	-	5,0	5,8	6,6	7,3	7,8	8,2	8,5	8,8	9,1	9,3

Tabla 2.4 Continuación

W.B.T.D. °F	Temperatura de bulbo seco (°F)										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Contenido de humedad en equilibrio en %										
16	-	-	5,2	6,0	6,7	7,2	7,7	8,0	8,3	8,6	8,8
17	-	-	-	5,4	6,1	6,7	7,2	7,5	7,8	8,1	8,3
18	-	-	-	4,8	5,6	6,2	6,7	7,1	7,4	7,7	7,9
19	-	-	-	-	5,0	5,6	6,2	6,6	7,0	7,3	7,5
20	-	-	-	-	-	5,2	5,7	6,2	6,6	6,9	7,1
21	-	-	-	-	-	-	5,3	5,8	6,2	6,5	6,7
22	-	-	-	-	-	-	-	5,3	5,8	6,1	6,3
23	-	-	-	-	-	-	-	-	5,4	5,7	6,0
24	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	5,4	5,7
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	5,5

2.7 Designación de las maderas de acuerdo a su contenido de humedad

2.7.1 Madera seca.- Se denomina a la madera que tiene un porcentaje de humedad inferior al 15%

2.7.2 Madera semi-seca.- Es aquella que tiene una humedad comprendida entre el 15 y el 30%

2.7.3 Madera húmeda.- Es la madera con una humedad superior al 30%(3)

2.8 Determinación de la humedad de la madera.- La humedad de la madera, puede ser determinada de diferentes modos, donde los más corrientes son:

2.8.1 Mediante pesadas.- Los pasos a seguir con este sistema son los siguientes:

- (1) Extraer una probeta del medio de la pieza de madera donde se quiere medir la humedad, o en todo caso a una cierta distancia de sus extremos.
- (2) Pesarse la probeta, inmediatamente después de sacada de la madera, en una balanza sensible y anotar su peso P_h . Si esta pesada no puede ser efectuada inmediatamente, tomar la precaución de encerrar la probeta en una campana hermeticamente cerrada.
- (3) Colocar la probeta en una estufa (calentada electricamente, de preferencia), donde la temperatura es mantenida en $100 \div 105^\circ\text{C}$, hasta su completo secado, el que se alcanza cuando no hay más pérdida de peso
- (4) Pesarse la probeta al sacarla de la estufa y anotar su peso P_o .
- (5) Calcular el grado de humedad con ayuda de la fórmula:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-1)$$

Observación.- Estos cálculos y pesadas pueden evitarse utilizando "estufas-balanza" que se basan en las indicaciones anteriormente expuestas y que permiten la lectura directa del

Tabla 2.4 Continuación

W.B.T.D. °F	Temperatura de bulbo seco (°F)										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Contenido de humedad en equilibrio en %										
16	-	-	5,2	6,0	6,7	7,2	7,7	8,0	8,3	8,6	8,8
17	-	-	-	5,4	6,1	6,7	7,2	7,5	7,8	8,1	8,3
18	-	-	-	4,8	5,6	6,2	6,7	7,1	7,4	7,7	7,9
19	-	-	-	-	5,0	5,6	6,2	6,6	7,0	7,3	7,5
20	-	-	-	-	-	5,2	5,7	6,2	6,6	6,9	7,1
21	-	-	-	-	-	-	5,3	5,8	6,2	6,5	6,7
22	-	-	-	-	-	-	-	5,3	5,8	6,1	6,3
23	-	-	-	-	-	-	-	-	5,4	5,7	6,0
24	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	5,4	5,7
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	5,5

2.7 Designación de las maderas de acuerdo a su contenido de humedad

2.7.1 Madera seca.- Se denomina a la madera que tiene un porcentaje de humedad inferior al 15%

2.7.2 Madera semi-seca.- Es aquella que tiene una humedad comprendida entre el 15 y el 30%

2.7.3 Madera húmeda.- Es la madera con una humedad superior al 30%(3)

2.8 Determinación de la humedad de la madera.- La humedad de la madera, puede ser determinada de diferentes modos, donde los más corrientes son:

2.8.1 Mediante pesadas.- Los pasos a seguir con este sistema son los siguientes:

- (1) Extraer una probeta del medio de la pieza de madera donde se quiere medir la humedad, o en todo caso a una cierta distancia de sus extremos.
- (2) Pesar la probeta, inmediatamente después de sacada de la madera, en una balanza sensible y anotar su peso P_h . Si esta pesada no puede ser efectuada inmediatamente, tomar la precaución de encerrar la probeta en una campana hermeticamente cerrada.
- (3) Colocar la probeta en una estufa (calentada electricamente, de preferencia), donde la temperatura es mantenida en $100 \pm 105^\circ\text{C}$, hasta su completo secado, el que se alcanza cuando no hay más pérdida de peso
- (4) Pesar la probeta al sacarla de la estufa y anotar su peso P_o .
- (5) Calcular el grado de humedad con ayuda de la fórmula:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-1)$$

Observación.- Estos cálculos y pesadas pueden evitarse utilizando "estufas-balanza" que se basan en las indicaciones anteriormente expuestas y que permiten la lectura directa del

grado de humedad de la probeta sobre un cuadrante. La precisión obtenida con este método es del orden del 1%.

2.8.2 Mediante higrómetros.- Existen dos tipos principales de aparatos eléctricos para medir el grado de humedad de la madera, los cuales funcionan basándose en los principios:

- (1) De medir la resistencia eléctrica de la madera.- En efecto la resistencia eléctrica que opone la madera al paso de la corriente eléctrica continua o alterna de baja frecuencia disminuye a medida que el contenido de agua de la madera aumenta. La variación de esta resistencia es grande según el valor de la humedad de la madera. En efecto, ensayos de laboratorio muestran que entre 100% de humedad y el punto de saturación de las fibras (30% de humedad, aproximadamente) la resistencia eléctrica de la madera varía relativamente poco (en la razón de 50). Por el contrario, esta variación es muy amplia cuando se baja del punto de saturación (cuando las humedades son 30% y 5% la razón entre las resistencias es aproximadamente un millón). Bajo 5%, la resistencia aumenta de tal modo que ella prácticamente no es mensurable.

Los higrómetros "a resistencia" de este modo, se comportan bien, dentro de los límites de 7% y 30%, fuera de los cuales las determinaciones no son exactas. Es conveniente señalar que los valores comprendidos entre estos límites corresponden a las humedades que tienen que medirse frecuentemente, es decir a aquellas necesarias para los diferentes empleos de la madera.

- (2) De medir las características dieléctricas de la madera, variables con la humedad de esta.

Ventajas y desventajas de los procedimientos indicados para medir la humedad de la madera.-

- (a) Método de pesadas.- Tiene la ventaja de ser muy preciso, en caso de ser cuidadosamente ejecutado. Pero presenta los siguientes inconvenientes:
- (i) La destrucción más o menos grande de la pieza de madera donde se quiere la humedad, impidiendo la aplicación del método a los trabajos terminados o en curso de terminación.
 - (ii) Los resultados no pueden obtenerse sino al cabo de varias horas, lo que no permite una frecuencia suficiente en la repetición de las medidas corrientemente exigidas.
 - (iii) El gran cuidado y atención, que es preciso emplear en el curso de las diferentes fases de la operación
- (b) Método de utilizar higrómetro.- El empleo de estos aparatos evita los inconvenientes que presenta el método por pesadas. Las medidas son rápidas y pueden ser repetidas un gran número de veces sobre un mismo pedazo de madera o sobre pedazos diferentes en un tiempo muy corto, sin necesidad de largas correcciones, con la condición de no pretender resultados de una precisión superior a 1% o 2%. Esta precisión es suficiente en la mayoría de los casos.

En el caso de las maderas secadas artificialmente, estas deben haberse estabilizado después de ser sacadas del secador, antes de poder utilizar el higrómetro, so pena de cometer errores importantes (4)

2.9 Efectos de la humedad sobre las propiedades de la madera.- El contenido de humedad de la madera es un factor importante en su utilización; las siguientes son algunas de las más importantes propiedades influenciadas por la humedad.

2.9.1 El peso.- El agua contenida en la madera afecta notablemente su peso, llegando en algunos casos a pesar más que la misma madera; por consiguiente, es un factor que encarece apreciablemente el transporte.

2.9.2 Resistencia mecánica.- La mayoría de las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la compresión, a los impactos, etc., aumentan considerablemente en la madera seca. Ver Tabla 2.5

2.9.3 Variaciones dimensionales.- La madera al secar se contrae y al humedecerse se hincha; por tal motivo debe tener una humedad adecuada al ambiente en que se usará.

2.9.4 Durabilidad.- Los hongos e insectos que causan pudriciones y galerías en la madera precisan, para poder vivir, que la madera tenga una humedad superior al 20%.

2.9.5 Pinturas y colas.- Para que las pinturas y las colas se adhieran y penetren bien la madera debe estar convenientemente seca.

2.9.6 Suavidad de la terminación.- La madera seca puede terminarse y pulirse mejor que la húmeda (5)

Tabla 2.5 Resistencia de algunas maderas chilenas en estado húmedo y seco al aire (#)

(a) Resistencia a la tracción normal a las fibras.

(b) Resistencia a la compresión normal a las fibras.

m.s.= madera seca al aire (12% de humedad)

m.h.= madera húmeda

Especies	(a)		(b)	
	Resistencia		Fatiga en el límite de proporcionalidad	
	kg/cm ²		kg/cm ²	
	m.h.	m.s.	m.h.	m.s.
Especies chilenas				
Coníferas				
Alerce.....	15	27	21	46
Ciprés.....	18	23	30	51
Mañío.....	34	39	40	68
Pino Araucaria.....	36	42	42	68

Tabla 2.5 Continuación

Especies	(a)		(b)	
	Resistencia		Fatiga en el	
	kg/cm ²		límite de pro- porcionalidad	
	m.h.	m.s.	m.h.	m.s.
Especies chilenas				
Dicotiledóneas				
Avellano.....	25	28	26	49
Coigüe.....	60	80	51	95
Huahuan.....	26	33	30	56
Laurel.....	23,8	30	21	51
Lingue.....	45	58	42	95
Luma.....	80	120	230	200
Olivillo.....	32	39	38	68
Picha-picha.....	72	85	69	136
Raulí.....	45	55	44	85
Roble.....	58	62	95	80
Temu.....	53	66	66	130
Ulmo.....	34	41	40	70
Especies extranjeras				
Alamo.....	16	19	12	30
Eucalyptus Glóbulus.....	50	70	71	120
Pino Insignis.....	22	35	34	65

(#) Torricelli D, Eduardo; "Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas Chilenas", pags.33 y 35, (1941)

2.10 Secamiento de las maderas.- Las indicaciones hechas en número anterior, dejan de manifiesto la conveniencia de emplear las maderas en estado seco, llamándose por tal, el estado seco al aire, que tiene un valor cercano al 15% del peso seco en la mayoría de las especies.

2.10.1 Secado natural.- La madera de los aserraderos y barracas es apilada en castillos al abrigo de las lluvias, en forma tal que el aire circule por su interior permitiendo su secamiento (8). Con este sistema, las condiciones naturales del aire ambiente, humedad relativa, temperatura y velocidad, son las que determinan las modificaciones en el estado de humedad de la madera. Por tanto, es condición esencial que toda la superficie de las piezas esté en contacto con el aire, que éste se mantenga en continuo movimiento y que su estado higrométrico permita una evaporación.

La madera puede desecarse hasta el límite permitido por el ambiente, por lo cual éste sistema nunca permite alcanzar una desecación perfecta y sin que se produzcan rajaduras y grietas en la madera. Esta, durante meses y meses permanece expuesta a la interperie sin que sea posible ningún control o regulación, ni de temperatura, ni de humedad, ni de velocidad de aire; ello sin contar los daños que suelen originar los hongos e insectos.

Para alcanzar el contenido de humedad anteriormente mencionado se requiere una inmovilización de capital durante largo tiempo, incluso para las maderas de desecación rápida, pues por este

sistema requieren de dos a tres meses para llegar al 20% de humedad, mientras que con un secador, este mismo resultado se obtiene en pocas horas (7)

2.10.2 Secado artificial.- (Fig. 2.3) El secamiento artificial, resuelve el problema de la rapidez y permite el empleo de la madera elaborada sin exigir el almacenamiento de ella por el tiempo necesario hasta su secamiento correcto y además permite obtener las piezas con el grado de sequedad que se necesite para los fines consiguientes (8)

Períodos de secado de la madera (Ver 2.5)

(1) Período de velocidad constante.- A fin de evitar que se produzcan tensiones internas, es preciso que la masa de la madera vaya tomando temperatura lentamente, en particular cuando la exterior es muy baja. Conviene que la diferencia de temperaturas inicial entre el exterior e interior de la celda no exceda los $20 \div 30^{\circ}\text{C}$ luego se va aumentando hasta que llegue a unos 10°C más de la temperatura normal de secado, manteniendo, sin embargo una humedad relativa bastante alta (del 70 al 90%) según la especie y la humedad inicial de la madera. Por tanto, se introducirá vapor saturado cuya finalidad, aparte la humidificación del aire, consiste en llevar toda la masa de la madera a temperatura uniforme, y en empapar la parte superficial de las tablas, dilatándolas. Con ello se facilita el desplazamiento de la humedad desde el interior hacia el exterior.

La duración de este primer período varía entre límites muy amplios (entre 3 y 20 horas), según sean el espesor, la humedad inicial de la madera y su especie.

(2) Período de velocidad decreciente.- A lo largo de este segundo período, procede la evaporación de la humedad contenida en la madera. La temperatura del aire se mantiene de manera uniforme al nivel apropiado a la especie, pudiendo variar, normalmente entre 100 y 65°C . La humedad del aire también se gradúa de acuerdo con las características de la madera, siendo la mínima admisible la del 45%.

Hacia el final de la operación se deja descender un poco la temperatura en el interior de la celda, con objeto de evitar que la madera salga de ella demasiado caliente y puedan agrietarse las extremidades de las tablas. En este período se equilibran las condiciones del aire y de la madera. El enfriamiento se llevará a cabo en un lugar contiguo al secadero, resguardado de las corrientes de aire.

2.11 Defectos de la madera originados por un inadecuado secado artificial.-

Después de evaporada con facilidad el agua libre, que representa el $70 \div 75\%$ del total, comienza a evaporar el agua de saturación. Esta humedad tiene que llegar desde el interior a la superficie desplazándose por difusión mediante presión osmótica; se comprende fácilmente lo indispensable de que el estrato exterior de la madera se mantenga permeable a la humedad que emerge a la superficie. Cuando la difusión está retrasada con respecto a la evaporación y al secado del estrato superficial, este se endurece,

(case hardening) acabando por desecarse rápidamente del todo.

El problema del endurecimiento es el peor de los inconvenientes que pueden presentarse durante el secado. A causa de la impermeabilidad de la superficie y la consiguiente disminución de la evaporación se produce un rápido aumento en la temperatura del aire circulante, aumentando también con ello la temperatura de la madera; la evaporación del agua interior, que no encuentra libre salida, origina tensiones que terminan en grietas. Este mismo fenómeno puede venir ocasionado también por un exceso de velocidad en la circulación del aire.

El fenómeno contrario, es decir, el del endurecimiento interior puede producirse cuando, para corregir el primero, se da demasiado vapor, saturando con ello el estrato exterior de la madera; en este caso las consecuencias son todavía peores (7)

2.12 Control del secamiento.-

2.12.1 Mediante el análisis de muestras.- La experiencia que se tiene sobre el problema del endurecimiento, ha indicado la necesidad de cortar pequeños trozos de la madera que se trata de secar, denominados controles de humedad (8). Estos controles por estar dotados de mucha superficie, con respecto a su masa, reaccionarán mucho antes, que las tablas puestas a secar; su colocación se efectuará de la forma siguiente: una en el mismo centro de la pila, y las otras a unos veinte centímetros de los dos niveles extremos de la pila.

En el caso de que las condiciones del aire se vuelvan anormales, y propicias a originar un endurecimiento, las extremidades de la Fig. 2.4 tienden a aproximarse (b). Después de introducir vapor, las dos ramas verticales vuelven a ponerse paralelas. No obstante, conviene seguir introduciendo vapor hasta que los extremos estén como se señala en (c). Conviene hacerlo así, precisamente por la mayor sensibilidad de las muestras (7)

2.12.2 Mediante un higrómetro.- El control del secamiento mediante un higrómetro es muy ventajoso, pues este aparato se puede emplear en todas las cámaras de secado que se usan corrientemente, y la medición se hace directamente en la madera que se encuentra en la cámara cerrada; mediante la utilización de electrodos de varillas de madera tratadas en un proceso especial para hacerlas conductibles. Estas varillas se introducen en agujeros taladrados previamente y se cortan simplemente, después de efectuada la medición.

Este instrumento, está diseñado para un rango de temperaturas que va desde los 10 hasta los 130°C. La temperatura se mide inmediatamente en los puntos de medida de humedad, y el contenido de humedad de la madera puede leerse directamente, sin necesidad de emplear tablas de conversión. Funciona con corriente alterna de 220 Voltios y consume unos 8 a 10 Vatios, pudiendo montarse en un lugar apropiado fuera de la cámara de secamiento. El equipo descrito permite efectuar mediciones en seis puntos simultáneamente y si se desea, hasta en doce, siempre que se use una unidad suplementaria (6)

2.13 Contracciones de la madera con el secado.-

2.13.1 Origen de las contracciones (Fig. 2.1).- En el proceso de secado de la madera y cuando el contenido de humedad de ésta, ha sobrepasado el punto de saturación de las fibras, la madera empieza a contraerse a medida que avanza el secado. Este se debe a que las paredes celulares, constituidas por fibrillas muy delgadas extendidas en dirección espiralada (Fig. 2.5); en la madera húmeda están ligeramente separadas por capas de agua, que al alcanzar el punto de saturación de las fibras, se adelgaza y desaparece, por lo cual éstas se aproximan y la célula se contrae, motivando una apreciable disminución de su grosor. Pero debido a que las fibrillas corren espiralmente en el sentido longitudinal de la pared celular las variaciones de humedad no alteran mayormente la longitud de las células (5). La contracción de la madera se expresa generalmente en porcentaje de su tamaño en estado de completa saturación (9)

2.13.2 Variaciones de las contracciones.- Debido a la existencia de rayos medulares, que son haces de fibras que salen radialmente desde el centro del tronco, las contracciones en el sentido radial son menores en magnitud que las tangenciales a los anillos anuales. En el sentido axial las contracciones son muy pequeñas (8) y no tienen importancia.

Esta diferencia en la contracción de la madera en sus diversos sentidos se debe; principalmente, a la disposición de las células.

En términos generales las maderas pesadas se contraen e hinchan proporcionalmente más que las livianas, o sea que las variaciones dimensionales guardan cierta relación con el peso específico. Debido a su menor contracción, las maderas livianas resultan más fáciles de secar (5)

Como una consecuencia directa de las contracciones que experimenta la madera cuando progresa el secamiento, se producen disminuciones en el volumen. Las contracciones volumétricas, pueden determinarse por medio de la fórmula 2.2

$$C.V. = 100 \left[\left(1 + \frac{a}{100}\right) \left(1 + \frac{b}{100}\right) \left(1 + \frac{c}{100}\right) - 1 \right] \quad [\%] \quad (2-2)$$

en la cual, a, b y c son las contracciones axial, radial y tangencial respectivamente (a, b y c en %) (8).

El progreso de las contracciones es lento cuando el secamiento avanza desde el máximo hasta el 40%, en maderas cuyo porcentaje de humedad es muy alto (sobre 100) cuando están en estado verde y es rápido cuando avanza desde un 20% hasta el estado de madera seca al horno en que la humedad es de 0% (2)

2.13.3 Consecuencia de las contracciones.- La contracción desigual de la madera en sus distintos planos y la diferencia en la rapidez del secamiento de las regiones externas con respecto a las internas de una misma pieza, originan en conjunto, una serie de fenómenos, siendo los principales: las deformaciones, las grietas y la disminución de las dimensiones (5)

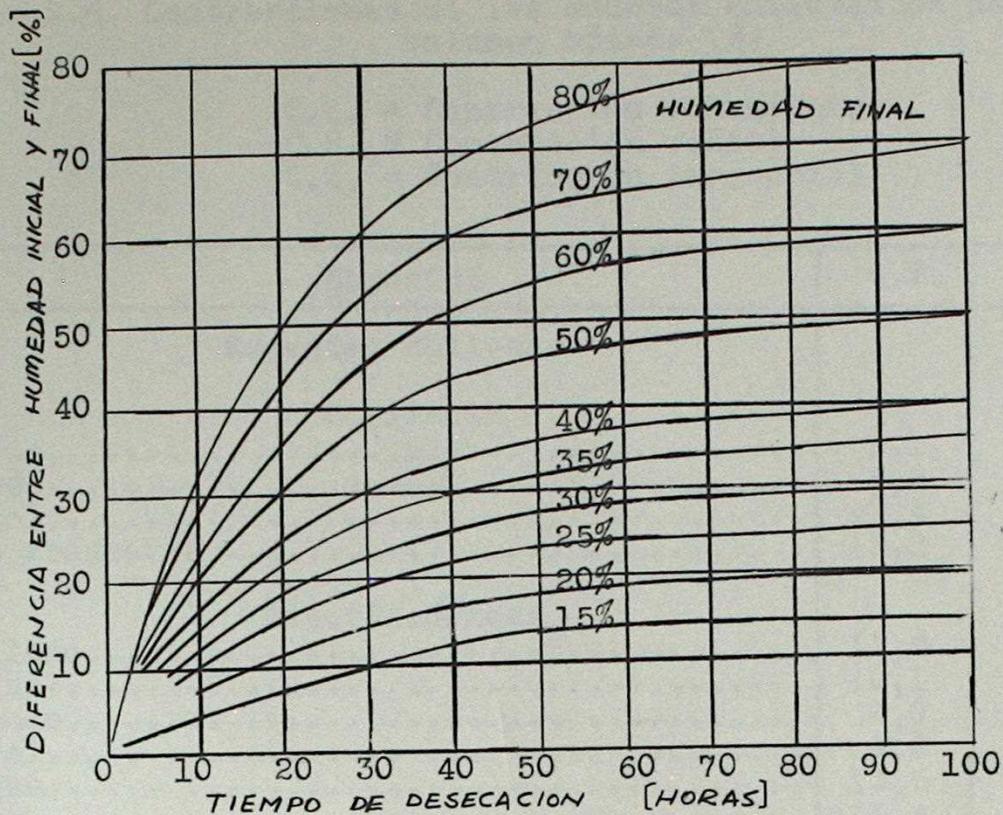


Fig. 2.3 Gráfico para calcular el tiempo de desecación. (Calculado para maderas blandas y espesor de 25 mm; peso específico de 450 kg/m^3 ; temperatura del aire, 65°C , horario de trabajo, 12 horas; ventilación natural. Para distintas condiciones de la madera y del secado véase "Pistono", bibliografía. En el libro mencionado hay otro gráfico similar para maderas duras.)

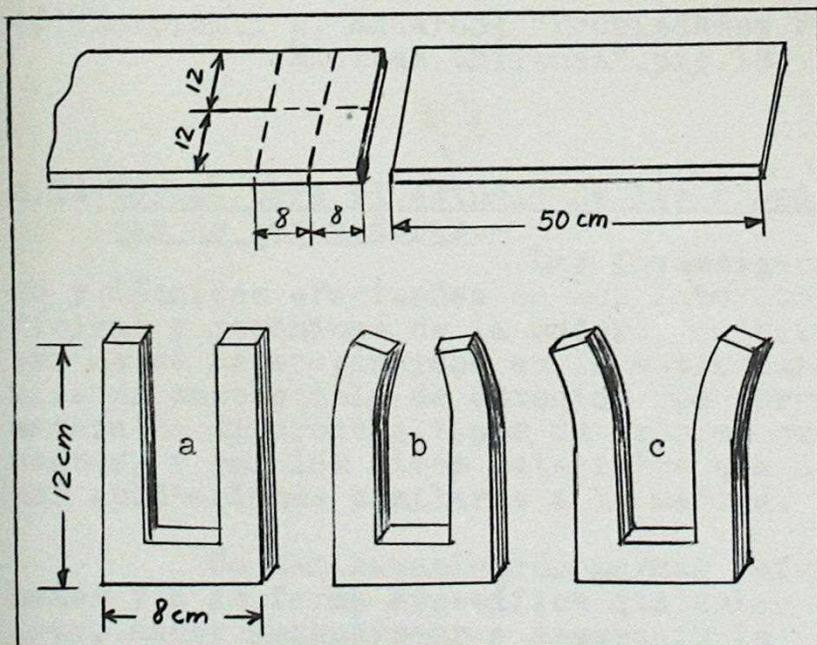


Fig. 2.4 Probetas para el control de la desecación

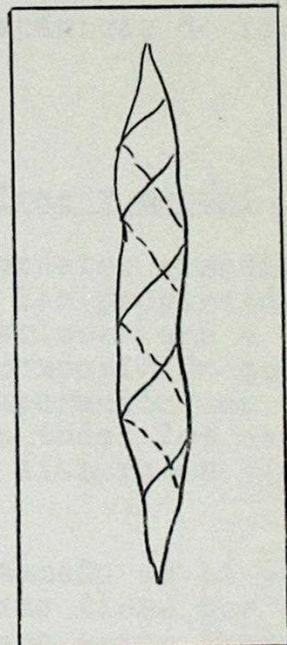


Fig. 2.5

Tabla 2.6 Contracciones de las maderas chilenas en porcentaje del volumen húmedo (#)

C.V. = Contracción volumétrica
 C.R. = Contracción radial
 C.T. = Contracción tangencial

Especies	C.V.	C.R.	C.T.
Especies chilenas			
Coníferas			
Alerce.....	9,1	3,8	5,8
Ciprés.....	8,8	3,7	5,8
Mañío.....	12,4	4,1	8,1
Pino Araucaria.....	13,5	4,6	8,3
Dicotiledóneas			
Avellano.....	11,5	3,8	6,9
Coigüe.....	18,1	4,9	12,2
Huahuan.....	9,0	3,9	7,0
Laurel.....	9,0	4,0	7,0
Lingue.....	13,5	4,8	9,5
Luma.....	15,4	5,5	9,0
Olivillo.....	13,1	4,4	7,9
Picha-picha.....	14,5	5,5	10,0
Raulí.....	10,9	3,5	7,0
Roble.....	12,5	4,5	11,0
Temu.....	16,1	5,5	9,8
Ulmo.....	13,2	4,5	8,2
Especies extranjeras			
Alamo.....	10,5	3,9	7,1
Eucalyptus Glóbulus.....	22,5	7,6	15,3
Pino Insignis.....	10,9	4,0	7,1

(#) Torricelli D, Eduardo; "Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas Chilenas", pag.18, (1941)

2.14 Normas para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas.-

Las investigaciones de carácter científico y técnicas efectuadas en los laboratorios sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera, coinciden en establecer que a pesar de su heterogeneidad en la estructura y en su composición química es susceptible de estudios que permiten su comparación con la madera de diferentes tipos de árboles que crecen en todos los continentes, y con los otros materiales que debidamente elaborados tienen aplicaciones similares a la madera.

Se han establecido normas referentes al tamaño de la probetas y a la forma específica que deben tener. Esto tiene por objeto, hacer desaparecer o disminuir la influencia que estos factores pueden tener en la resistencia mecánica en cualquier tipo de sollicitación clásico indicado por la Resistencia de Materiales. Además debe considerarse el aspecto de la humedad en la madera, que tiene una influencia de importancia fundamental en la resistencia mecánica de ella.

El análisis de estas consideraciones, ha inducido al Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales la conveniencia de adoptar la norma norteamericana A.S.T.M. N° D 143-49 para los ensayos de resistencia mecánica de las maderas chilenas.

Esta consideración tiene la ventaja de poder establecer una comparación entre las maderas chilenas y las norteamericanas y entre éstas, y todas las que se ensayan con probetas y métodos determinados por esa norma (2)

2.15 Instalaciones para el secado artificial de la madera.- Pueden distinguirse, según sus características fundamentales en los cuatro grupos siguientes:

2.15.1 Secadores de celda, con circulación natural de aire (Figs. 2.6 y 2.7)

Son secadores de carga intermitente, por lo general contruídos de mampostería gruesa, con una amplia celda para dos o más unidades de carga. El aire frío penetra en la celda por un conducto situado debajo del piso de aquélla en sentido longitudinal. El aire se calienta en contacto con una serie de tubos de vapor dispuestos a lo largo del hueco inferior del piso; penetra en la celda por el centro o por los costados, y la recorre de abajo arriba y de arriba abajo para volver a salir por unas chimeneas, laterales o centrales, respectivamente.

En la base de las chimeneas pueden instalarse inyectores de vapor con objeto de facilitar la circulación del aire, y el eventual humedecimiento de éste puede también conseguirse con tubos de vapor perforados. Los registros y conductos de aspiración estarán dispuestos de forma que faciliten también la circulación del aire

2.15.2 Secadores de celda, con circulación forzada.- Por lo general se construyen de mampostería, con materiales aislantes, y con cimentación de hormigón. El aire, impulsado por ventiladores centrífugos o helicoidales, se calienta por convección atravesando radiadores o haces de tubo de vapor; parte del aire sale al exterior, y parte es recirculado; ello reviste extraordinaria importancia térmica. Normalmente, el aire húmedo presenta una temperatura de unos 35°C, y para calentarlo a la temperatura normal de secado, que es de aproximadamente 80°C, las condiciones del aire, además de reguladas con la proporción de aire fresco que pueda introducirse, se modifican con inyecciones de vapor. También el volumen de aire circulante puede ser modificado, así como su distribución en la celda

(1) Con ventilador exterior (Fig. 2.8).- La ventaja que ofrece este sistema consiste en el fácil acceso al ventilador, y en el hecho de poder variar las condiciones del aire sin necesidad de penetrar en la celda.

El ventilador tiene el eje paralelo a la marcha de las vagonetas. La circulación del aire es siempre transversal; entra primeramente por un costado, en el hueco existente entre la pared de la celda y unos tableros perforados de distribución, y pasa a través de la carga hasta el hueco similar, existente en el costado opuesto. Desde este vuelve a ser aspirado, en parte o en su totalidad, por el ventilador.

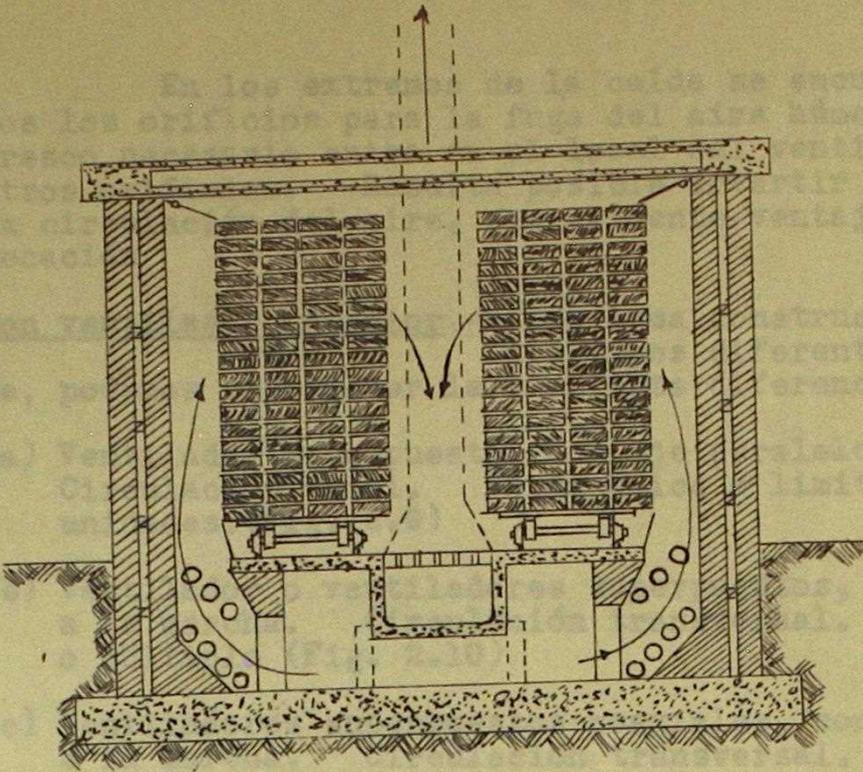


FIG. 2.6

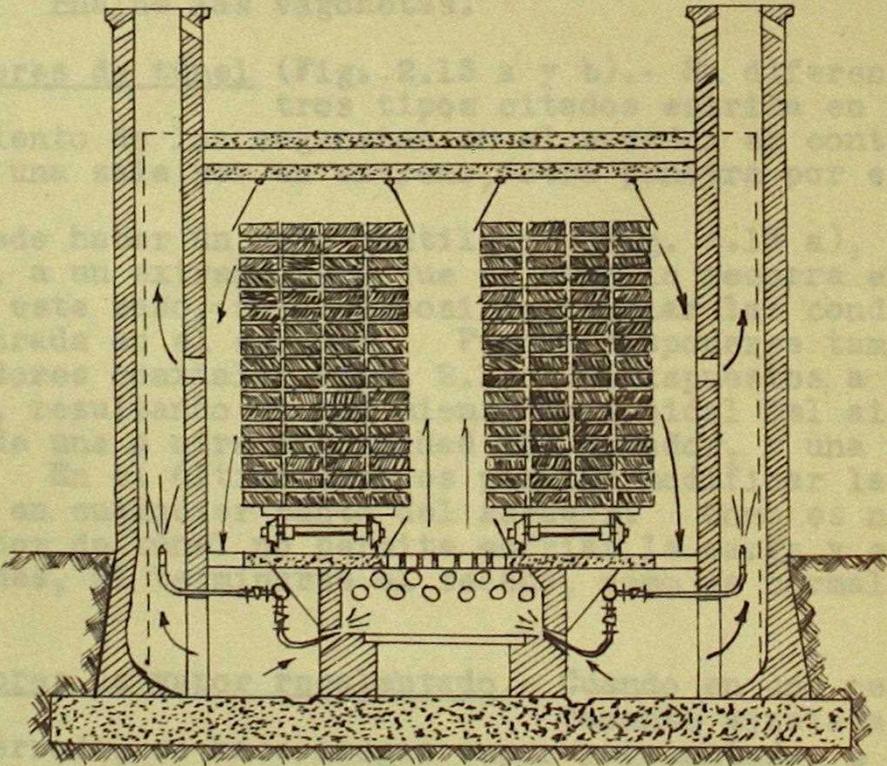


FIG. 2.7

En los extremos de la celda se encuentran situados los orificios para la fuga del aire húmedo. El aire fresco necesario entra en el local del ventilador por otros orificios. Resulta posible invertir el sentido de la circulación del aire, con evidente ventaja para la desecación

- (2) Con ventilador interior.- Cada casa constructora suministra tipos diferentes; no obstante, podemos establecer la siguiente diferenciación:
- (a) Ventilador superpuesto, con eje paralelo a la marcha. Circulación axial. Carga única o limitada a pocas unidades.(Fig. 2.9)
 - (b) Ventilador o ventiladores superpuestos, con eje normal a la marcha. Circulación transversal. Carga única o múltiple (Fig. 2.10)
 - (c) Ventiladores superpuestos coaxiales, con eje paralelo a la marcha. Circulación transversal. Carga múltiple (Fig. 2.11)
 - (d) Ventiladores por debajo del piso, coaxiales, con eje paralelo a la marcha, circulación transversal. Carga múltiple (Fig. 2.12)

Los secadores con ventiladores múltiples coaxiales constituyen una verdadera economía, ya que con ellos se simplifican las transmisiones y se requiere un solo motor. No obstante, este sistema presenta cierta dificultad en la inversión de circulación, que resulta muy sencilla cuando los ventiladores se hallan dispuestos con sus ejes en sentido normal al de la marcha de las vagonetas.

2.15.3 Secadores de túnel (Fig. 2.13 a y b).- Su diferencia de los otros tipos citados estriba en el hecho de que el movimiento de las vagonetas en el secador es continuo, pues en tanto que una sale por un extremo, otra penetra por el otro.

Puede haber un solo ventilador (Fig. 2.13 a), colocado fuera del túnel, a un extremo para que el aire lo recorra en toda su longitud; en este caso, sólo es posible regular las condiciones del aire a su entrada en el secador. Pueden disponerse también múltiples ventiladores coaxiales (Fig. 2.13 b), dispuestos a todo el largo del túnel, resultando un movimiento helicoidal del aire con progresión, desde una a otra extremidad del secador, y una circulación transversal. En el último caso es posible modificar las condiciones del aire en cualquier punto del secador. Como es natural, el tipo de secador de túnel no permite enfriar la carga y equilibrar las condiciones, al terminarse el secado, como es normal hacer en los de celda.

2.15.4 Secadores de vapor recalentado.- Cuando en una celda perfectamente ajustada, conteniendo madera aserrada, se hace llegar vapor recalentado, a temperatura superior a los 100°C, expulsando por completo el aire, el agua contenida en la madera se vaporiza con rapidez, siendo absorbida por el vapor. Este va perdiendo sus condiciones de recalentado, baja de temperatura y se convierte en vapor saturado.

El contenido de humedad de la madera, en una atmósfera constituida únicamente por vapor, depende tan sólo de la temperatura de éste. Sobre todos estos fenómenos se basan los secadores de vapor recalentado.

Las características que diferencian estos secadores de los de aire caliente son:

- (1) Su construcción metálica, su cuidadoso aislamiento y sus cierres herméticos.
- (2) El ancho de la pila de madera en el interior de la celda es inferior al normal (por lo general, 1 mt).
- (3) La velocidad de circulación del vapor es bastante mayor que la del aire en los secadores corrientes, y llega, por lo general, a sobrepasar los 3 mt/seg.
- (4) Tienen que estar dotados de regulación automática, para la temperatura del vapor, a lo largo del proceso de desecación, con arreglo a las "Tablas" apropiadas a cada espesor y especie. Sólo se regula la temperatura del vapor, no existiendo necesidad de preocuparse por la humedad. Esta regulación automática ofrece una completa seguridad de poder conducir el secado según las características establecidas de antemano.

La ventaja principal de este sistema de desecación es la de reducir el tiempo de secado a una octava (1/8) y hasta una décima (1/10) parte del requerido por el aire caliente, y también de evitar el temible fenómeno del endurecimiento, así como permitir una notable economía de vapor. El gráfico de la Fig. 2.14 permite confrontar las características de secado con vapor recalentado y con aire, (7)

2.16 Bibliografía (Consultada).-

- (1) Brotero, Frederico A.- "Secagem da madeira em estufa" (Boletín N° 27), Instituto de Pesquisas Tecnológicas de S.Paulo, Brasil (1941)
- (2) Carreño, Froilán.- "Propiedades Físicas y Mecánicas de las maderas" Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, pags. 63 ÷ 70, Vol.13 (1956)
- (3) Carreño, Froilán.- "Estudio sobre maderas nacionales. Secamiento y preservación" (Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile)
- (4) Confederation Nationale Des Industries Du Bois.- "Les Industries Du Bois", pags.38, 39 y 48, N° 2-4^e Trimestre, (1954)
- (5) Corporación Chilena de la Madera.- "Maderas", Vol. I, 2^a Ed. (1960)
- (6) Corporación Chilena de la Madera.- "El Maderero", pags.10 y 26, N° 2, Enero-Abril, (1959)
- (7) Pistono R, J.- "Desecación de los productos vegetales" pags. 217 - 248, Editorial Reverté, S.A., Buenos Aires (1955)
- (8) Thomas, Edmundo.- "Estudio sobre maderas chilenas" Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, pags. 92 - 107, Vol.1 (1944)

- (9) Torricelli, Eduardo.- "Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas Chilenas" (Ministerio de Tierras y Colonización) (1941)
- (10) Zárate, Gregorio.- "Aplicación de la higrometría al secamiento de maderas" (Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile), 1956

Capítulo 3

SECADOR ROTATORIO.

3.1 Descripción.- Un secador rotatorio consiste en un cilindro, por lo general ligeramente inclinado con respecto a la horizontal, que gira sobre soportes apropiados. El material húmedo se introduce por un extremo del cilindro y avanza a lo largo de él, en virtud de su rotación e inclinación, saliendo seco por el otro extremo, debido a la transmisión de calor por convección, conducción o radiación, según el tipo de secador utilizado.(13, 15)

3.2 Clasificación.- De ordinario los secadores rotatorios pueden clasificarse como sigue:

3.2.1 Secadores rotatorios de calentamiento directo.- En los cuales el material es puesto en contacto directo con el medio secante, aire o gases de combustión, pasando ya sea en paralelo o en contracorriente al recorrido del material siendo secado. Hay dos tipos de secadores de calentamiento directo:

- (1) De alta temperatura, empleando gases de combustión.
- (2) De temperatura moderada o baja, usando generalmente aire limpio calentado por algún tipo de intercambiador de calor.

3.2.2 Secadores rotatorios de calentamiento indirecto.- En el cual el calor del medio fluido es transmitido a través de una pared metálica al material siendo secado. Dentro de este tipo puede distinguirse dos modos de transmitir el calor al material:

- (1) Desde el exterior del secador, como sucede cuando el cilindro rotatorio está encerrado en una cámara, a la cual se hace llegar gases de combustión.(Fig. 3.1)
- (2) Desde el interior del secador, disponiendo conductos que se extiendan a lo largo de él y que en los extremos del secador terminan en cámaras colectoras. El calor es transmitido al material a través de las paredes de los tubos, cuando estos son recorridos por un fluido caliente, aire, vapor. (C.E.Bill "Rotary Steam Tube Dryer", Ind.Eng.Chem.,30, 997-999,(1938) Figs. 3.2 ; 3.3 ; 3.4 ; 3.5 ; 3.6 ; 3.7

3.2.3 Secadores rotatorios de calentamiento directo e indirecto.- En los cuales el calor es transmitido al material por contacto directo con el medio secante y por transmisión a través de las paredes metálicas. Tales secadores son combinación de aquellos mencionados anteriormente. En esta clase de secadores existe dos variantes:

- (1) Los gases de combustión pasan alrededor del exterior del cilindro rotatorio, después de lo cual circulan a través de su interior.Fig. 3.1
- (2) Los gases de combustión, primero pasan a través de un conducto central, axial con el cilindro, y después por el espacio anular existente entre el cilindro interior y el exterior, generalmente en contracorriente al movimiento del material.(17) Figs. 3.8 ; 3.9 ; 3.10 ; 3.11

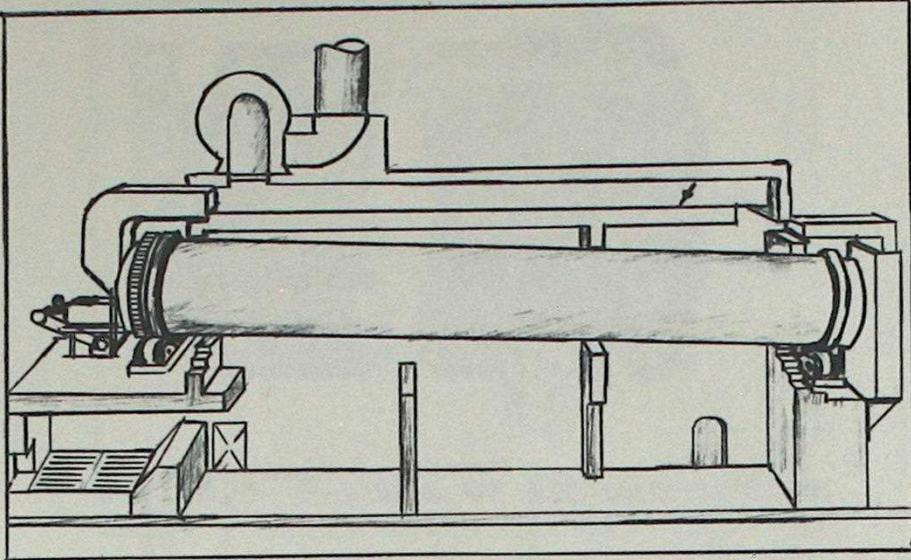


Fig. 3.1 Disposición general de un secador rotatorio de calentamiento indirecto (o directo-indirecto)

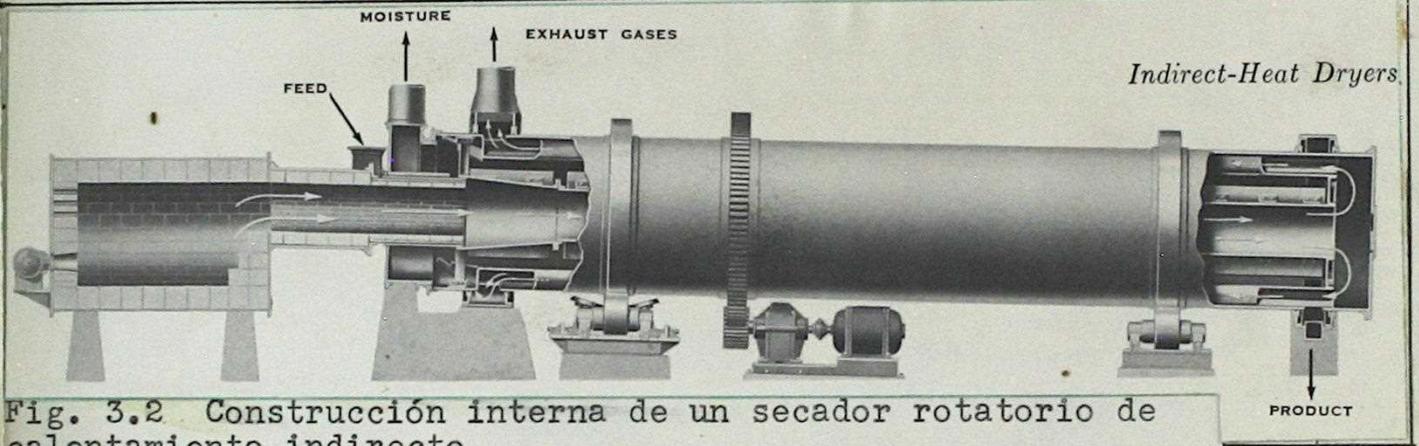


Fig. 3.2 Construcción interna de un secador rotatorio de calentamiento indirecto.

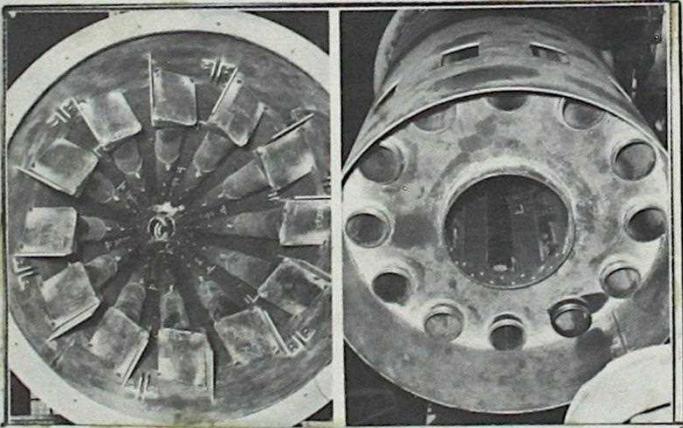


Fig. 3.3 Extremos de alimentación (izq) y de descarga (der) de un secador rotatorio de calentamiento indirecto que utiliza tubos para la circulación de los gases, después que éstos han pasado a través del conducto central

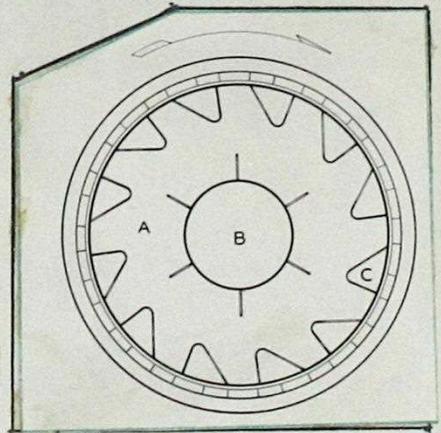


Fig. 3.4 B y C son los conductos para el gas (en B circula paralelamente con el material), A es espacio anular por el cual el material atraviesa el secador.

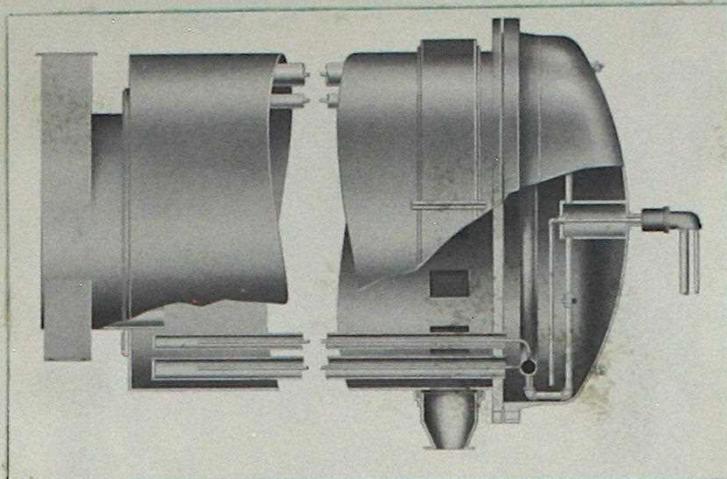


Fig. 3.5 Sistema de alimentación de vapor y eliminación de aire en un secador rotatorio de calentamiento indirecto.

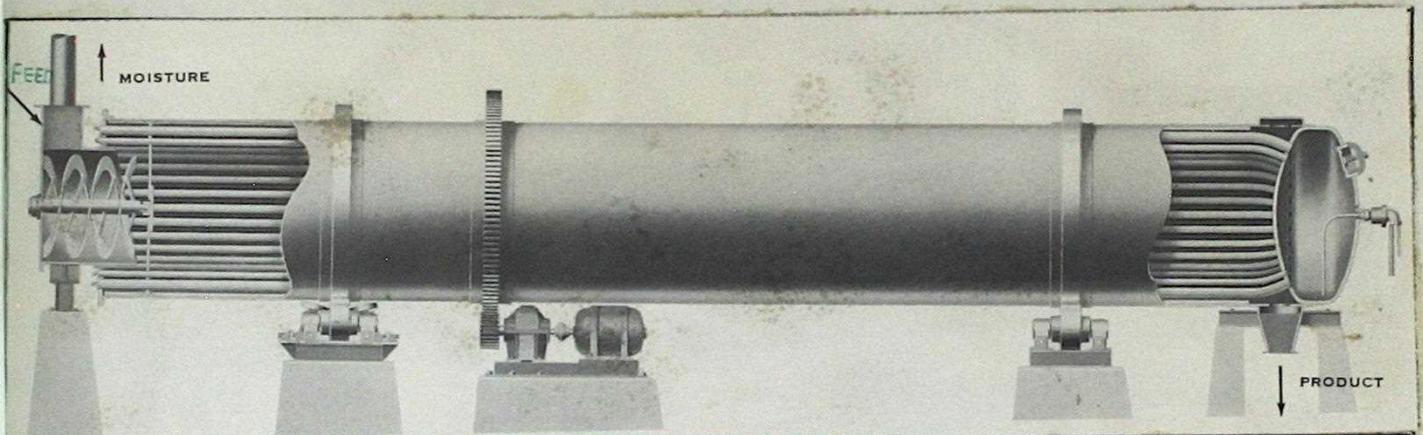


Fig. 3.6 Secador rotatorio de calentamiento indirecto. A la derecha se observa el cabezal colector de vapor y el sifón para el condensado y a la izquierda se aprecia la válvula para purgar el condensado.

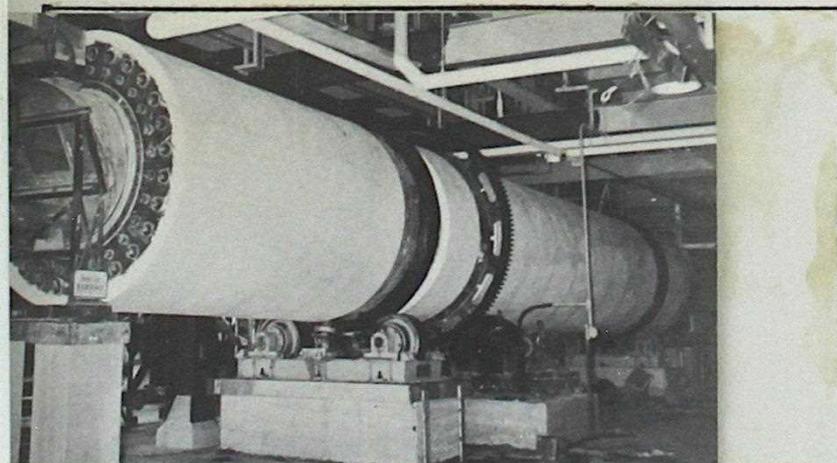


Fig. 3.7 Secador de calentamiento indirecto (con vapor). Obsérvese la envoltura de aislación.

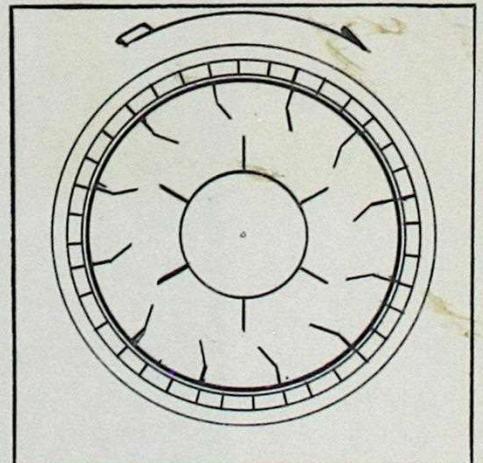


Fig. 3.8 Detalle de las aletas que levantan el material en un secador de calentamiento directo-indirecto.

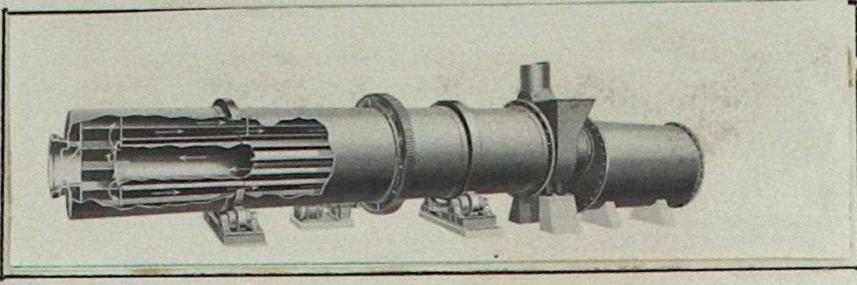


Fig. 3.9

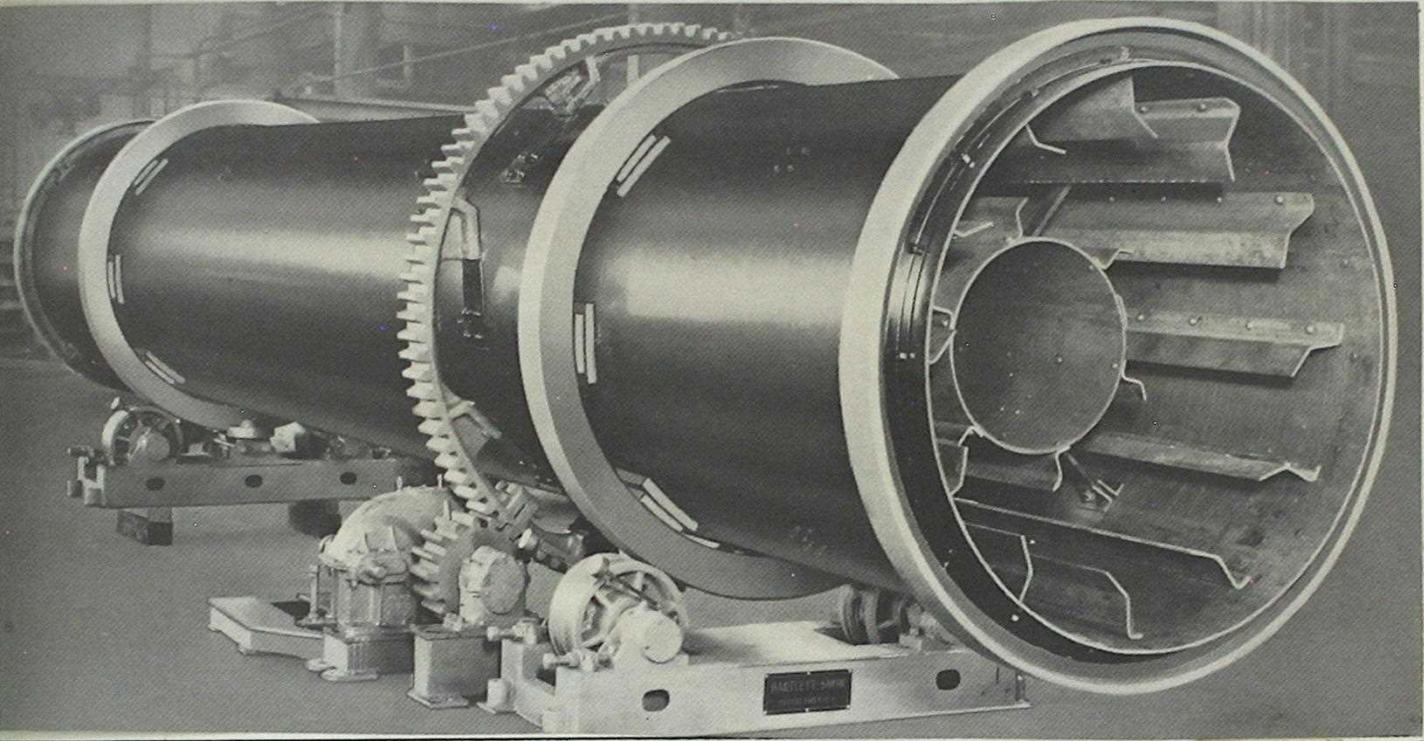


Fig. 3.10

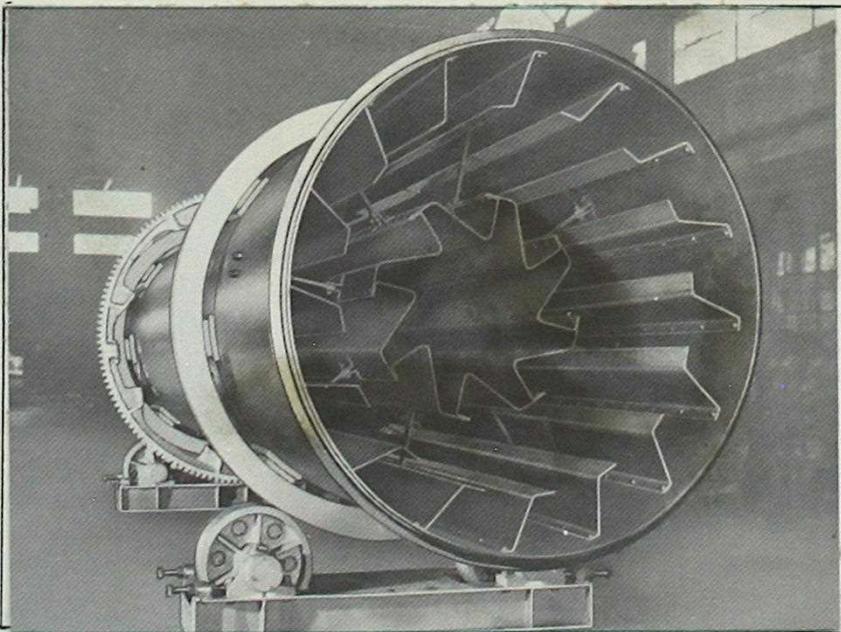


Fig. 3.11

3.3 Transferencia de calor.-

3.3.1 Secadores de calentamiento directo.- En estos secadores por ser de contacto directo, es manifiesto que la transmisión de calor por convección, es el factor dominante. La conducción y la radiación representan una pequeña parte del calor transmitido al material, pero su principal efecto es contribuir a las inevitables pérdidas de calor desde el secador. Para asegurar una máxima utilización de la transmisión de calor por convección, el interior del cilindro rotatorio está provisto de aletas fijas a su pared, que elevan y dispersan el material en el fluido caliente, con lo cual se logra un íntimo contacto entre ambos.

El principal factor en la utilización efectiva del calor en éstos secadores, es la caída de temperatura del medio secante a medida que pasa a través del cilindro.

La experiencia indica que para secadores de alta temperatura, la máxima utilización efectiva del calor es cerca de 80%, mientras que para los secadores de baja temperatura es 30%

3.3.2 Secadores de calentamiento indirecto.- Puesto que en ellos la transmisión de calor se realiza a través de paredes metálicas, el principal medio de transmisión es la radiación, siendo insignificante la conducción y baja la convección.

El uso efectivo del calor en estos secadores es relativamente bajo, pues raras veces excede el 50% y frecuentemente es cercano a 30%. El factor que limita la transmisión de calor desde el combustible al material, es la radiación.

3.3.3 Secadores de calentamiento directo-indirecto.- En este tipo de secadores el mecanismo de transmisión de calor es complejo, puesto que la radiación, la convección y la conducción desempeñan papeles significativos. En el secador con un tubo central, el calor pasa a través de las paredes metálicas del tubo por conducción y transferido a las partículas de material principalmente por radiación. Los gases de combustión que abandonan el conducto central, y vuelven por el espacio anular existente entre el tubo interior y el cilindro exterior, ceden directamente su calor al material por convección.

Análisis de secadores directo-indirecto muestran que, del total del calor captado por el material al ser secado, solamente 15 a 20% proviene de las paredes del tubo central y 85 a 80% es transferido por convección en el espacio anular.

La utilización efectiva del calor en los secadores directo-indirecto varía con el tipo de secador; así los del tipo (1), bajo buenas condiciones de operación alcanzan una utilización efectiva del calor de 85%, mientras que los del tipo (2), generalmente muestran una utilización efectiva de 70 a 80%. (3, 17)

3.4 Limitaciones para una efectiva utilización del calor.-

3.4.1 Temperatura.- En secadores de calentamiento directo y en los de calentamiento directo-indirecto, la utilización máxima del calor, se consigue haciendo circular el menor número de lb. de gases de combustión o aire caliente a través del secador, de tal manera que entren a la temperatura más alta y lo abandonen a la más baja temperatura práctica. El factor que limita la temperatura del gas o del aire que sale del secador, es el grado al cual estos gases están saturados con humedad.

Para mejores resultados, la humedad de los gases de escape del secador no debería ser mayor que 60%. Cuando los gases de escape pasan a través de un ciclón colector de polvo, localizado en un edificio sin calefacción, o fuera del recinto, y se desea recuperar el polvo en estado seco, los gases no deberían tener una humedad mayor del 10 a 30%, dependiendo de la temperatura del aire ambiente.

Si en los secadores indirectos el secado es realizado a temperaturas no demasiado superiores al punto de ebullición, gran cantidad de aire atmosférico debe pasar a través del cilindro, para prevenir la recondensación de los vapores en el material húmedo y fino que entra al cilindro. Cuando el secado es efectuado a temperaturas muy superiores a la del punto de ebullición, sólo es necesario dar salida al vapor desde el cilindro, puesto que, bajo estas condiciones el vapor estará suficientemente sobrecalentado para permitirle salir como gas seco.

3.4.2 Velocidad.- Es muy importante que el diámetro del secador sea de una medida apropiada, para que la velocidad del gas de combustión que pasa a través del cilindro, no sea suficientemente elevada para arrastrar una cantidad inconveniente de finos.

Aún cuando es efectivo que mucho del polvo arrastrado fuera del secador por los gases y vapores, puede ser recuperado en un ciclón; debe considerarse que ellos nunca tienen una eficiencia de 100%, por lo cual la cantidad de material perdido en la atmósfera será función de la cantidad de polvo arrastrado fuera del cilindro.

Cuando el valor del producto seco es apreciable o si el polvo que escapa del ciclón origina daño, la mejor economía consiste en elegir un secador de gran diámetro en lugar de uno de pequeño diámetro, aún cuando un buen ciclón sea usado en ambos casos.

3.4.3 Tiempo.- Además de actuar como equipo de transmisión de calor, el secador rotatorio cumple la función de un transportador (conveyor). En efecto, traslada el material desde un extremo al otro del cilindro, en forma gradual y lenta, pues el material húmedo debe permanecer en el secador el tiempo suficiente para asegurar la difusión y evaporación de la humedad. La importancia de esta función de transportador, a menudo es descuidada obteniéndose resultados inaceptables.(3)

3.5 Propósito de esta investigación.- Es determinar la eficiencia del equipo y variables de funcionamiento en un secador rotatorio de calentamiento directo y predecir los cambios que podrían efectuarse en su operación con modificaciones en las variables de funcionamiento, puesto que a pesar de haberse desarrollado procedimientos empíricos satisfactorios para el diseño y la correlación de datos, los factores fundamentales y relaciones que gobiernan el funcionamiento no han sido analizados completamente.(8, 14)

3.6 Publicaciones sobre datos de operación de secadores rotatorios de calentamiento directo.-

3.6.1 Horgan, T.J ; Trans.Inst.Chem.Egrs.(Londres), 6, 131, (1928)

3.6.2 Miller, C.O; Prutton, C.F; Schuette, W.H; Trans.Am.Inst.Chem. Engrs., 38, 123, (1942)

3.6.3 Miller, C.O; Schuette, W.H; Smith, B.A; Trans.Am.Inst.Chem. Engrs., 38, 841, (1942)

Estos datos sin embargo son generalmente demasiado incompletos, para permitir un análisis crítico de la operación del secador y no pueden ser generalizados para utilizarse como base de diseño

Datos experimentales sobre secadores rotatorios pequeños han sido publicados por:

- 3.6.4 Friedman, S.J; Marshall, W.R; Chem.Eng.Progr., 45, 482-493, (1949), y 45, 573-588, (1949)
- 3.6.5 Johnstone, H.F; Singh, A.D; Boletín Univ.de Illinois, 324,p 56 (1940)
- 3.6.6 citado como 3.6.2
- 3.6.7 citado como 3.6.3
- 3.6.8 Mitchell, T.R; Saeman, W.C; Chem.Eng.Progr., 50, 467-475, (1954)
- 3.6.9 Raymond, D.J; Sturges, R.A; Tesis, Case Institute of Technology (1942)
- 3.6.10 Spraul, J.R; Ind.Eng.Chem., 47, 368-374, (1955)

3.7 Secador rotatorio de calentamiento directo.-

3.7.1 De alta temperatura.-

- (1) Flujo en paralelo.- Consiste en un cilindro en el cual el material húmedo y el medio secante utilizado (gases de combustión), entran a la unidad por un mismo extremo, recorriéndola en el mismo sentido.(Fig. 3.12)

Debido a las altas temperaturas (2500^oF en secadores Hardinge) de los gases que se ponen en contacto con el material húmedo y frío que entra al secador, es posible una transferencia de calor inicial muy alta, lográndose así una velocidad de evaporación elevada que origina un rápido descenso en la temperatura del gas, y una eficiente utilización del calor.

El hecho que los gases de combustión se enfrien progresivamente con el secado del material, permite utilizar éste equipo para el secado de sustancias sensibles al calor. Además es ventajoso para el secado de materiales pegajosos sin que exista el peligro de la adhesión de éste a las paredes del secador, puesto que el metal en el extremo de la alimentación de este tipo de secador, está amenudo relativamente caliente.

La temperatura a la cual los gases pueden ser aspirados del secador es limitada, para evitar la condensación y reincorporación de la humedad al material. Por lo tanto, las más altas temperaturas del gas entrante, hacen más eficiente su uso.(Fig. 3.13)

Los secadores de flujo paralelo, son más simples para operar y controlar que otros tipos de secadores.(3, 10, 13, 19)

- (2) Flujo en contracorriente.- En este tipo de secador los gases pasan a través de él en sentido contrario al movimiento del material.

Este secador es muy apropiado cuando se desea obtener un producto completamente seco y cuando el calor sensible transmitido al material es conveniente.(10)

3.7.2 De temperatura moderada o baja.- Son los secadores que utilizan serpentines de vapor para calentar el aire u otro gas utilizado como medio secante, (Figs. 3.14 y 3.15) el cual puede circular en paralelo o en contracorriente. Su uso está destinado para aquellas sustancias orgánicas e inorgánicas que deben secarse a temperaturas uniformes, donde es conveniente controlar la temperatura de entrada del aire al secador.

Debido a las limitaciones de las temperaturas de entrada y salida del medio secante, este tipo de secador no tiene una economía térmica comparable a la conseguida con secadores de alta temperatura citados anteriormente, puesto que por lo general, la calidad del producto es la consideración más importante.

Este tipo es fácil de adaptarlo a dos etapas de operación, donde la primera unidad elimina la mayor parte de la humedad con aire caliente y la segunda elimina el resto de humedad, junto con enfriar el material seco, utilizando generalmente aire a temperatura ambiente. Este método es apropiado para el secado de sales cristalinas tales como: nitrato de amonio, sulfato de amonio y otras, las cuales tienen una tendencia a aterrorarse durante su almacenaje, si no son enfriadas inmediatamente después del secado. (3)

3.7.3 Tipos especiales.-

- (1) Secador "Standard Double Duty" (Fig. 3.16).- Es un secador rotativo de calentamiento directo y flujo en paralelo, que incorpora el principio del secado instantáneo (Flash) como preliminar en el proceso de secado de un material en el cilindro rotatorio. En este equipo el proceso se realiza en dos etapas: siendo la primera de secado instantáneo y la segunda de secado convencional en el secador rotatorio; en ambas el flujo es en paralelo.

La explicación del proceso es la siguiente: el aire caliente pasa primero a través del secador rotatorio donde pierde calor por su contacto con el material que está siendo secado, luego recorre el conducto que une la salida del secador con un ciclón cuya descarga (de material) está situada inmediatamente arriba de la tolva que descarga el material en el secador.

El conducto que une el secador con el ciclón posee en su parte intermedia un tubo por donde se introduce el material húmedo y frío, el cual es transportado hasta el ciclón por el aire caliente proveniente del secador, precalentando el material durante este trayecto. En el ciclón el material es colectado y dejado caer en la tolva, desde donde es alimentado al secador para completar su secado.

Este sistema tiene dos ventajas: (i) Todo el polvo arrastrado por el aire desde el secador, es captado por el material húmedo y esta mezcla es colectada por el ciclón, para ser luego descargada dentro del secador rotatorio. De éste modo el sistema permite secar el material sin pérdida visible de polvo. (ii) Esta disposición permite aprovechar el calor que tiene el aire al abandonar el secador rotatorio, puesto que él sirve para precalentar el material húmedo y frío que se desea secar; mientras que en los secadores convencionales dicho calor se pierde. Es por ello que con este tipo de secador se consigue una utilización mayor del calor, que con los secadores rotatorios de flujo paralelo habituales. (19)

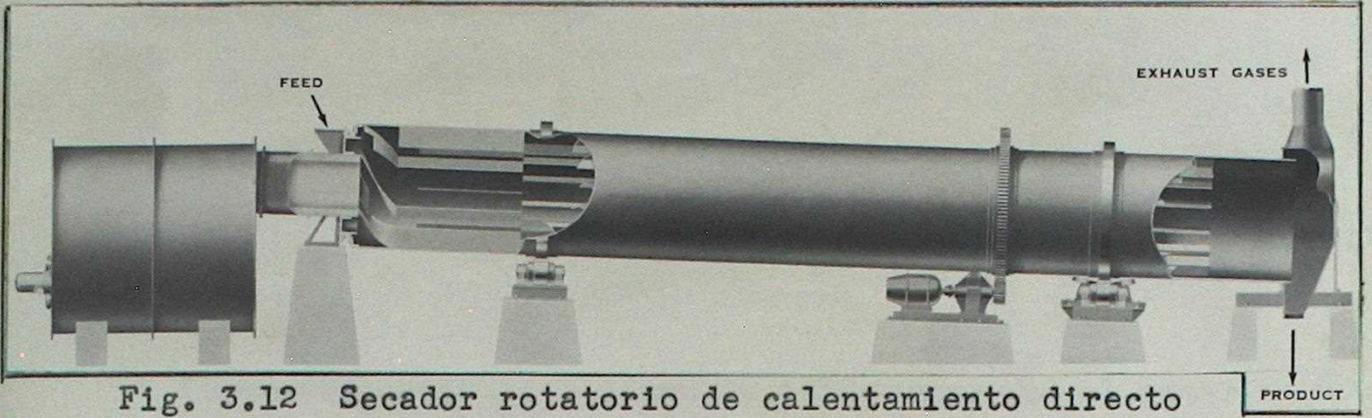


Fig. 3.12 Secador rotatorio de calentamiento directo

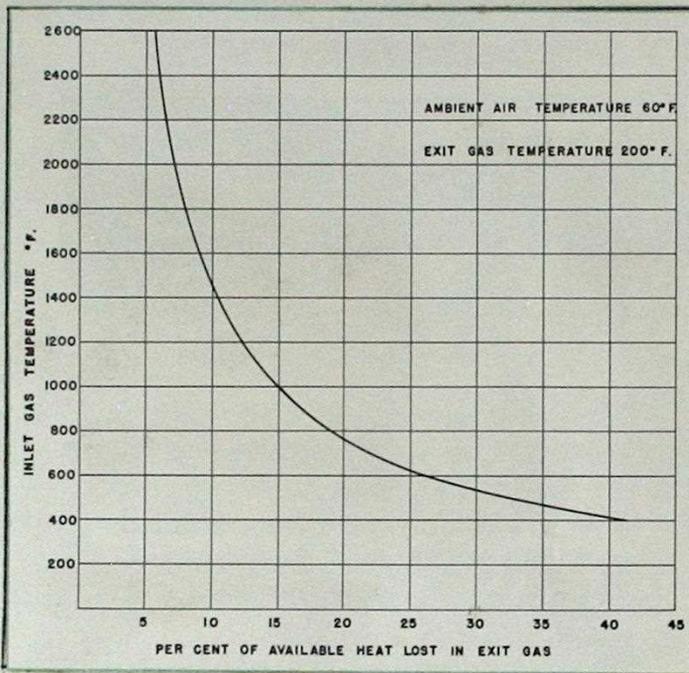


Fig. 3.13

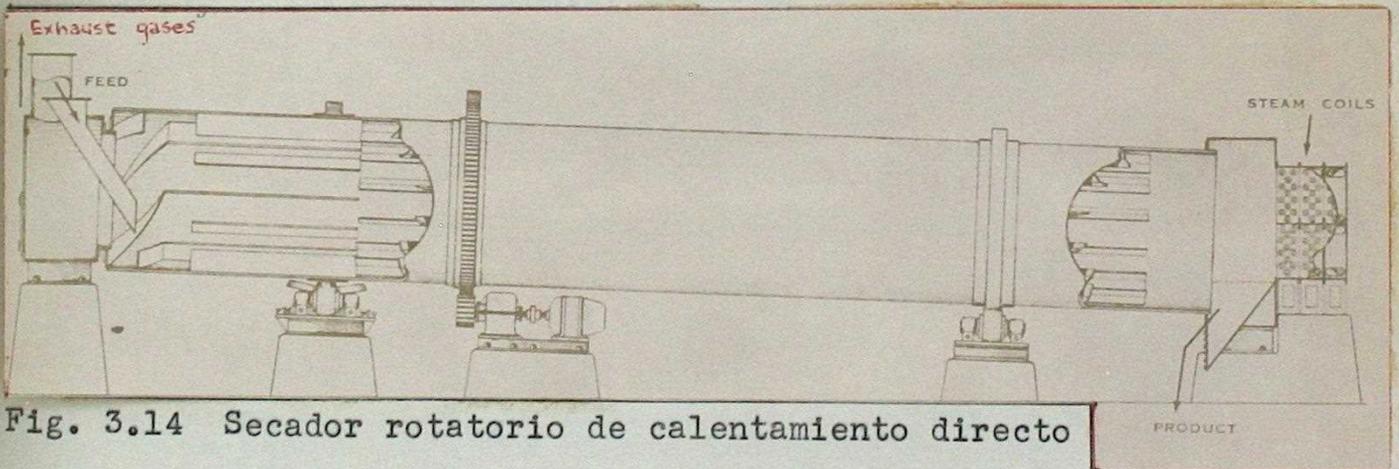
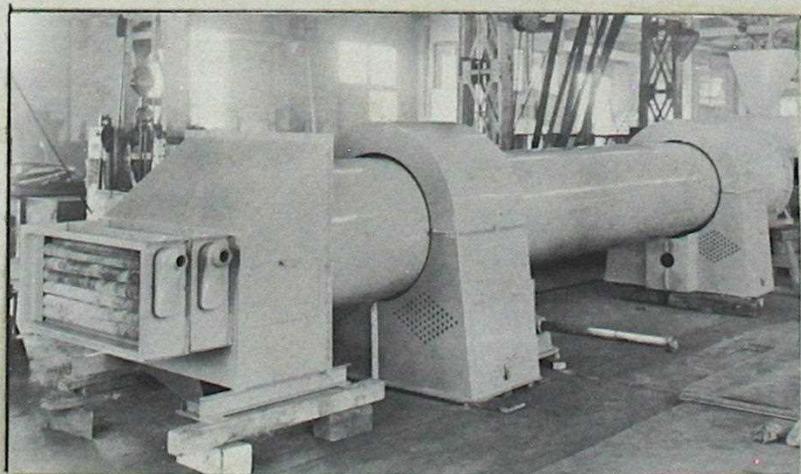


Fig. 3.14 Secador rotatorio de calentamiento directo

Fig. 3.15



- (2) Secador "Roto-Louvre" o secador Pehrson. (Figs. 3.17 ; 3.18 ; 3.19).- Es un tipo especial de secador rotatorio de calentamiento directo con circulación atravesadora.

Basicamente consiste en una superficie exterior cilíndrica y una interior cónica, que es un conjunto de placas (o persianas) traslapadas. Placas radiales, dividen el espacio existente entre las dos superficies en canales longitudinales, abiertos en el extremo donde su altura es mayor y cerrados en el extremo opuesto. Las persianas (louvers) están inclinadas de tal manera que al rotar el cilindro, el material deslice sobre ellas, impidiendo que el sólido penetre en los canales.

El aire caliente se introduce al secador sólo por aquellos canales situados debajo del material, los cuales por disponer de una separación entre las persianas traslapadas, permiten que el aire ascienda a través de la capa de material granular que se mueve continuamente a medida que gira el cilindro. Los gases de escape salen por el extremo del cilindro rotatorio, por el cual se descarga el producto. El traslado del material a través del secador es posible a la forma cónica del interior y a la rotación del cilindro, evitándose así su inclinación, como sucede con el resto de los secadores rotatorios. (5, 6, 7, 11)

Antes de terminar con el secador "Roto-Louvre", considero de interés señalar la existencia de un secador "Roto-Louvre" de calentamiento indirecto, sobre el cual la revista "Engineering" 189, 495, (1960) ha publicado un artículo. (12)

- (3) Secador "Renneburg Dehydro-Mat" (Fig. 3.20).- Consiste en un secador rotatorio de calentamiento directo, con flujo en paralelo, que difiere del tipo convencional, por el hecho que su cuerpo rotatorio se compone de varias secciones cilíndricas de distinto diámetro, unidas entre sí mediante superficies cónicas. La razón de tal construcción se basa en la necesidad de proporcionar al material el tiempo suficiente para que la humedad interna sea difundida a la superficie a baja temperatura.

Para conseguir el objetivo mencionado en los secadores rotatorios habituales, la unidad debe ser hecha mucho más grande, disminuyendo de este modo el flujo y velocidad del aire, lo cual tiende a limitar la máxima capacidad de secado para una cierta medida de secadores. En el secador "Dehydro-Mat" la variación de su sección transversal, cambia la velocidad del aire y material a medida que pasan a través de él. El tiempo de retención del producto es por lo tanto automáticamente controlado, y al mismo tiempo, la temperatura es regulada en cada zona para producir un secado óptimo. (5, 16)

3.8 Funciones de un secador.- Se ha admitido (1c, 5c, 9c) que hay dos funciones distintas cumplidas en un secador rotatorio: como transportador (conveyor) y como dispositivo de transmisión de calor. Puesto que estas dos funciones son dependientes, ambas son afectadas por las mismas variables, pero ellas son tratadas con mayor facilidad separadamente.

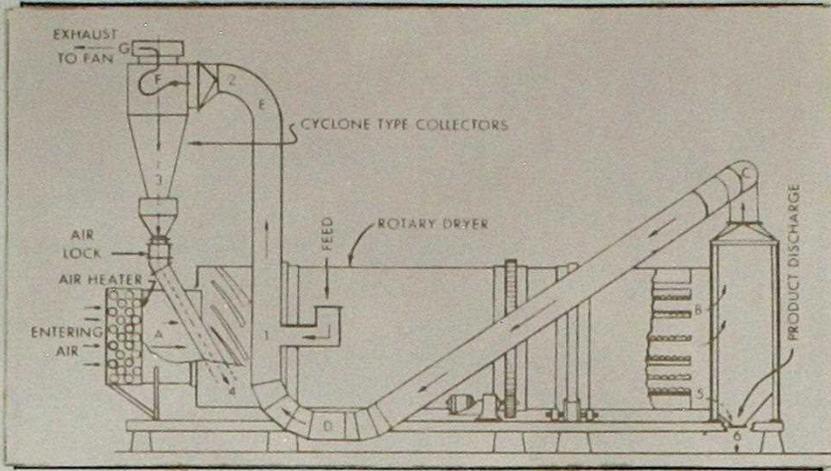


Fig. 3.16 Secador Standard Double Duty

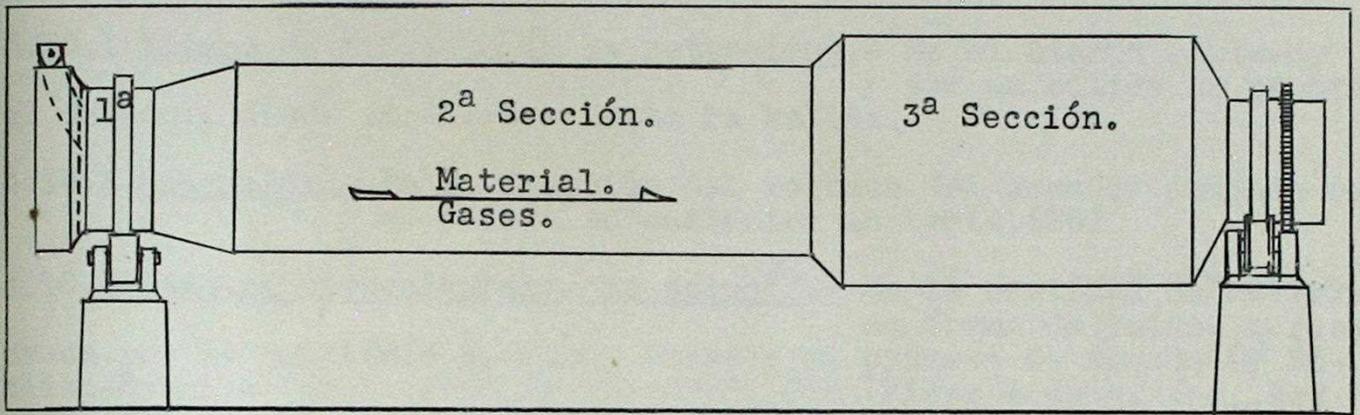


Fig. 3.20 Secador Renneburg Dehydro-Mat

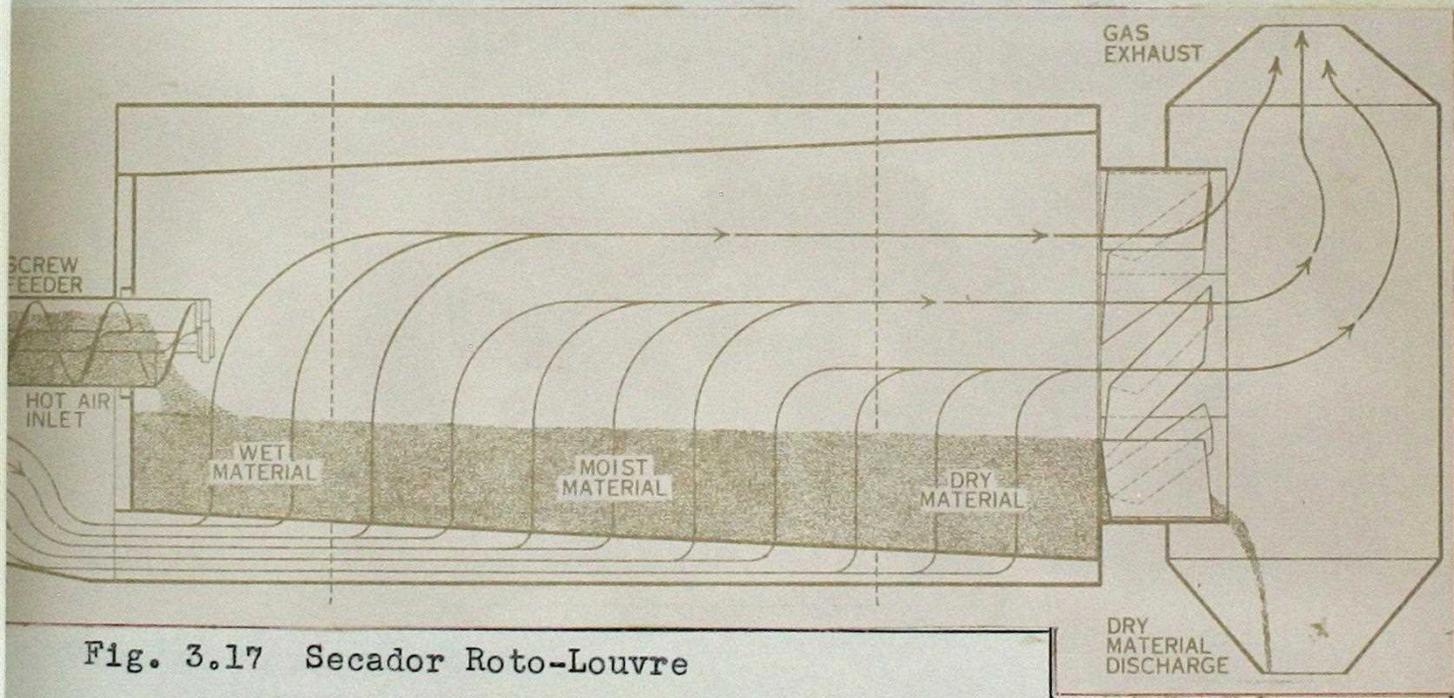


Fig. 3.17 Secador Roto-Louvre

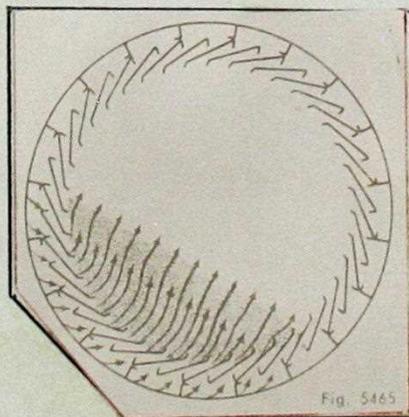
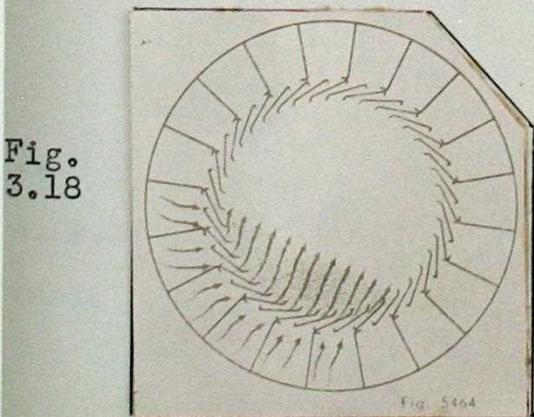


Fig. 3.18

Fig. 3.19

3.9 Función del secador como transportador (conveyor).- Un secador rotatorio de calentamiento directo debe manejarse de modo que:

3.9.1 El material permanezca en el secador el tiempo suficiente para secarse.

3.9.2 No sea sobrecargado, puesto que ello implica la posibilidad que el material avance a través del secador demasiado rápido, sin permitir un secado con el contenido final de humedad requerido, además que la potencia necesaria para mover el equipo es excesiva.

3.9.3 No tenga lugar un excesivo levantamiento de polvo dentro de los gases de escape.(8)

3.10 Definiciones.-

3.10.1 Tiempo de tránsito (o de retención).- Es el tiempo empleado por un sólido en recorrer el secador, desde la entrada hasta la salida.

3.10.2 Retención.- Es la fracción del volumen del secador ocupado por el sólido en cualquier instante.(20)

3.10.3 Dusting (levantamiento de polvo[#]).- Es la cantidad de material en forma de polvo, arrastrada por la corriente de aire, durante el proceso de secado (# English-Spanish "Engineers' Dictionary", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958)

3.11 Variables que influyen en la retención y el dusting.-

3.11.1 Las variables del secador.-

- (1) Diámetro
- (2) Longitud
- (3) Anillos de retención
- (4) Aletas (forma y número)

3.11.2 Las características del material.-

- (1) Tamaño de las partículas
- (2) Forma de las partículas
- (3) Densidad (aparente, real)
- (4) Angulo de reposo.
- (5) Contenido de humedad.

3.11.3 Las variables de operación.-

- (1) Velocidad de alimentación al secador.
- (2) Velocidad del aire.
- (3) Dirección del aire.
- (4) Inclinación del secador
- (5) Velocidad de giro del secador (8, 7c, 9c, 10c)

3.12 Determinación teórica del tiempo de tránsito y de la retención.-

3.12.1 En las Tablas 3.1 y 3.2, se ha resumido las ecuaciones recomendadas por los autores de trabajos acerca de ésta materia, tanto para hornos como secadores rotatorios

Tabla 3.1 Ecuaciones para el tiempo de tránsito

Autor	Año	Equipo	Fórmula
(7c) Maier, Ralston, Sullivan	1927	Horno	$\mathcal{T} = \frac{0,000517 \cdot L \cdot \sqrt{\theta}}{S_d \cdot D \cdot N}$
(2c) Ginstling, Gvozdev, Zil'berman	1939	Horno	$\mathcal{T} = \frac{0,00783 \cdot L}{S_d \cdot D \cdot N}$
(6c) Johnstone, Singh	1940	Secador	$\mathcal{T} = \frac{0,000723 \cdot L \cdot \sqrt{\theta}}{S_d \cdot D \cdot N}$
(9c) Miller, Prutton, Schuette	1942	Secador	$\mathcal{T} = \frac{k \cdot L}{S_d \cdot D \cdot N} + m \cdot V$
(11c) Smith	1942	Secador	$\mathcal{T} = \frac{k' \cdot L}{S_d \cdot D \cdot N}$
(4) Bayard	1945	Horno	$\mathcal{T} = \frac{0,0000513(\theta+24)L}{S_d \cdot D \cdot N}$
(4c) Hoftijzer, Van Krevelen	1949	Secador	$\mathcal{T} = \frac{c \cdot L}{\text{tg} \alpha \cdot D \cdot N}$
..	$\mathcal{T} = \frac{L \cdot X}{100 \cdot F}$

Tabla 3.2 Ecuaciones para la retención

Autor	Año	Equipo	Fórmula
(7c) Maier, Ralston, Sullivan	1927	Horno	$X = \frac{0,0517 \cdot F \cdot \sqrt{\theta}}{S_d \cdot D \cdot N}$
(2c) Ginstling, Gvozdev, Zil'berman	1939	Horno	$X = \frac{0,783 \cdot F}{S_d \cdot D \cdot N}$
(6c) Johnstone, Singh	1940	Secador	$X = \frac{0,0723 \cdot F \cdot \sqrt{\theta}}{S_d \cdot D \cdot N}$
(9c) Miller, Prutton, Schuette	1942	Secador	$X = \frac{100 \cdot k \cdot F}{S_d \cdot D \cdot N} + \frac{100mFV}{L}$
(11c) Smith	1942	Secador	$X = \frac{100 \cdot k' \cdot F}{S_d \cdot D \cdot N}$
(4) Bayard	1945	Horno	$X = \frac{0,00513 \cdot F(\theta+24)}{S_d \cdot D \cdot N}$
(4c) Hoftijzer, Van Krevelen	1949	Secador	$X = \frac{100 \cdot c \cdot F}{\text{tg} \alpha \cdot D \cdot N}$
(8) Friedman, Marshall	1949	Secador	$X_a = X_o \pm K \cdot G$
(18) Spraul	1955	Secador	$X_a = X_o \pm K(G_a - G_b)$

Observación.- Las ecuaciones para la retención, se han obtenido igualando las fórmulas propuestas para \mathcal{T} con $\mathcal{T} = L \cdot X / 100 \cdot F$

La nomenclatura empleada en las Tablas 3.1 y 3.2 es la siguiente:

- c = constante de la ecuación de "Hoftijzer, Van Krevelen"
 D = diámetro del secador, ft
 F = velocidad de alimentación al secador, $\text{ft}^3/(\text{hr})(\text{ft}^2)$
 G = velocidad de masa del aire, $\text{lb}/(\text{hr})(\text{ft}^2)$
 k = constante de la ecuación de Miller, Prutton, Schuette
 k' = " " " " " Smith
 K = " " " " " Friedman, Marshall. (Spraul)
 L = longitud del secador, ft
 m = constante de la ecuación de Miller, Prutton, Schuette
 N = velocidad de rotación del secador, rpm.
 S_d = inclinación del secador, ft/ft
 V = velocidad del aire, ft/min.
 X = retención de material, % del volumen del secador
 X_a = " " " , con flujo de aire
 X_o = " " " , sin flujo de aire
 α = ángulo de inclinación del secador, grados
 \mathcal{T} = tiempo de tránsito, hr
 θ = ángulo dinámico de reposo del material, grados

Los valores de las constantes utilizadas en las ecuaciones de las Tablas 3.1 y 3.2 son:

- Constantes de Miller, Prutton, Schuette

$$k = 0,0046 \text{ (para 6 aletas)} \div 0,0053 \text{ (para 12 aletas)}$$

k es una característica del diseño, particularmente del tipo y número de aletas.

$$m = (- 0,00025) \div (- 0,00075) \text{ para flujo en paralelo}$$

$$m = (+ 0,00033) \div (+ 0,00133) \text{ para flujo en contracorriente}$$

m depende de la naturaleza del material y de la dirección del flujo de aire.

- Constante de Smith

$$k' = 0,0017 \div 0,0058 \text{ para flujo en paralelo}$$

$$k' = 0,0042 \div 0,017 \text{ para flujo en contracorriente}$$

Tabla 3.3 Comparación de varias fórmulas para retención en hornos y secadores rotatorios.

Investigador	Equipo	k'	$k'/k'_{M...}$
Maier, Ralston, Sullivan	Horno	$k'_{M...} = 0,00325$	1,00
Ginstling, Gvozdev, Zil'berman	Horno	0,00783	2,41
Johnstone, Singh	Secador	0,00456	1,40
Miller, Prutton, Schuette	Secador	0,0046-0,0063	1,41-1,94
Smith (flujo en paralelo)	Secador	0,0017-0,0058	0,52-1,78
Smith (flujo en contracorriente)	Secador	0,0042-0,017	1,29-5,23
Bayard	Horno	0,00329	1,01

$$k' \text{ definido por: } k' = \frac{X \cdot S_d \cdot D \cdot N}{100 \cdot F}$$

Para realizar la comparación se supuso $\theta = 40^\circ$

3.12.2 Análisis de los estudios realizados.- "Maier, Ralston y Sullivan", los primeros en publicar un trabajo sobre hornos rotatorios (1927), realizaron sus estudios experimentales con hornos cuyos diámetros variaban entre 1/16 a 1 ft. En vista del pequeño diámetro de su unidad experimental, no hay seguridad que la fórmula sugerida por ellos exprese correlaciones coherentes de funcionamiento para un rango de variación del diámetro de 6 a 10 veces, tal como se encuentra en la práctica.

"Johnstone y Singh", (1940) extendieron la utilización de la fórmula propuesta por Maier, Ralston y Sullivan, a los secadores rotatorios. Para ello sugieren multiplicar por un factor 1,4 la fórmula citada anteriormente, por el efecto de las aletas que poseen los secadores.

En el estudio realizado por "Miller, Prutton y Schuette", (1942) con un secador rotatorio con diferentes tipos y números de aletas, proponen una fórmula para el tiempo de retención que incorpora un factor de velocidad de aire.

"Redmon y Sturges", (1942) extendieron el trabajo de Miller, Prutton y Schuette, para los casos de contracorriente y flujo en paralelo y determinaron valores de m para diferentes materiales. Un trabajo similar realizó "Spraul" en (1955), concluyendo que el valor de la constante m , tiene una variación más amplia que la atribuida por sus autores, y que para el flujo en contracorriente m varía con la velocidad de alimentación volumétrica (F) y en todos los casos llega a ser pequeña a medida que la velocidad de alimentación (R) es aumentada.

La fórmula propuesta por "Smith" (1942), tiene una ventaja sobre la ecuación de Miller, Prutton y Schuette, en que la constante k puede ser determinada bajo las condiciones actuales de operación en una planta piloto, y que con las mismas condiciones de inclinación, tiempo de retención y velocidad de rotación obtenidas en la planta piloto, la ecuación de Smith permite ser utilizada para calcular la longitud de un secador.

En 1945 "Bayard" recorrelacionó los datos de Maier, Ralston y Sullivan, que junto con sus investigaciones en un horno rotatorio sin anillos de retención, le permitieron formular una nueva ecuación para el tiempo de tránsito en el equipo mencionado y a partir de esta expresión deducir una fórmula general válida para hornos con anillos de retención. Debe señalarse que la ecuación de Bayard anotada anteriormente en tabla 3.1, está modificada puesto que la expresión original es

$$\mathcal{T} = \frac{0,037 \cdot (\theta + 24) \cdot L}{S_d \cdot D \cdot N}$$

donde \mathcal{T} y S_d están expresadas en min. y in./ft., pero cambiando las unidades de dichos factores a hr. y ft/ft se llega a la ecuación escrita en Tabla 3.1

"Hoftijzer y Van Krevelen" (1949) quienes estudiaron el tiempo de tránsito en un pequeño secador de 10 cm. de diámetro y 76 cm. de largo, manifiestan que la constante "c", es una constante para cada secador, dependiendo de su construcción, en especial de la estructura interna y que también considera la naturaleza del material secado. Spraul determinó el valor de "c", encontrando que la ecuación propuesta es aplicable solamente en rangos muy limitados, para la mayoría de los materiales.

La fórmula $\mathcal{T} = L \cdot X/100 \cdot F$, según Spraul no es válida si el cambio en la velocidad de alimentación, retención, o tiempo de tránsito produce cualquier cambio apreciable en las características de manejo del material en el secador. Además estima que no es necesariamente válida sobre amplia rango de velocidad de alimentación.

El trabajo más extenso sobre retención y tiempo de tránsito es el realizado por "Friedman y Marshall" (1949). Desgraciadamente, mucho de su trabajo fue hecho con materiales secos sin flujo de aire. Desde un punto de vista experimental la ecuación propuesta por ellos tiene la misma desventaja de la ecuación de Miller, Prutton y Schuette, en que una de las condiciones de la ecuación requiere pruebas efectuadas sin flujo de aire. Con muchos materiales las características de manejo sin flujo de aire, son diferentes a las con flujo de aire, en que el material puede cambiar considerablemente durante el secado.

Spraul sugiere utilizar una comparación de la retención a las velocidades de masa de aire diferentes, teniendo cuidado que la extrapolación no sea ensayada sobre un amplio rango de velocidad del aire. Características de manejo del todo diferentes, pueden resultar de ligeras variaciones de la velocidad del aire por motivo de los cambios de humedad o temperatura en el producto, y de este modo en la acción de secador.

CONCLUSION.- Cualquiera de las ecuaciones discutidas en este estudio, referentes a tiempo de tránsito y retención, tiene un limitado rango de aplicación, el cual varía con el material secado. Desde el punto de vista de utilización práctico, empleése la ecuación que no requiera determinación de características de manejo del material, con material sin flujo de aire (Spraul). (4, 8, 18)

.13 Valores recomendados para la retención.-

.13.1 Allis-Chalmers sugiere mantener la retención entre 6 - 12,5% estimando 10% como normal.

.13.2 Bartlett-Snow señala que su experiencia con varios cientos de secadores de todos los tipos, le permite recomendar que la retención no debe exceder el 16% del volumen del secador, debiendo estar comprendida entre 8 - 15%

- 3.13.3 Friedman y Marshall, ha observado que la condición conveniente para el secado, consiste en retener en el secador un 2% de su volumen.
- 3.13.4 Perry estima que para lograr que el secador retenga al material el tiempo suficiente para eliminar la humedad interna, debe trabajar con 3 - 12% de su volumen lleno de material
- 3.13.5 Smith estableció que prácticamente el 18% del volumen del secador, es lo máximo que puede retenerse en el equipo durante su operación, y que para una buena experiencia la retención es 10 - 15%
- 3.13.6 Treybal indica que una retención comprendida en el rango 3 - 7% parece ser lo mejor.

Para las opiniones expuestas se deduce que la cantidad conveniente a retener en el secador, para obtener una operación satisfactoria puede determinarse solamente por la experiencia y depende del diseño de las aletas y del material que se esté manejando. (1, 3, 8, 15, 20, 11c)

3.14 Valores recomendados para el dusting.- El levantamiento de polvo admisible, depende de varios factores tales como:

- (1) el valor del material
- (2) la dificultad en reprocesarlo
- (3) la dificultad de recolectar el polvo.

Una proporción de 2 a 5% de la alimentación, no es excesiva si el polvo puede ser colectado en un ciclón. (8, 20)

3.15 Determinación experimental de la retención y del tiempo de tránsito.-

3.15.1 Retención.- En pruebas para determinar la retención de material en el secador, el primer trámite a realizar consiste, en ajustar su velocidad de rotación e inclinación, como asimismo la velocidad del aire en los valores deseados. Luego se alimenta una cantidad conveniente de material, que permita descargar parte de él, por el extremo de salida del secador a intervalos constantes de tiempo, con el fin de establecer el momento en que la velocidad de salida es constante.

Cuando esa condición se ha cumplido, se espera al instante en que se termina el material que se está alimentando, deteniendo simultáneamente el secador rotatorio y el flujo de aire. El material que permanece en el secador representa la retención, siendo descargado y pesado; todo el material colectado en el ciclón durante la corrida, es pesado y la velocidad de dusting, es calculada.

La velocidad de alimentación se supone que es la suma de la velocidad de descarga y la velocidad de dusting medidas.

La retención puede determinarse con exactitud, excepto aquellos casos donde hay una cantidad apreciable de material pegado al cilindro rotatorio.

La determinación de la retención en porcentaje del volumen del secador, es posible a través de la densidad y del peso del material que permanece en él. En numerosos casos, sin embargo, es muy difícil obtener una muestra representativa del material, lo cual impide la determinación de la densidad actual del mismo. En estos casos es conveniente utilizar el promedio de las densidades de la alimentación y

producto seco como densidad del material y calcular la retención con esta cifra y el peso H.

Después de las explicaciones precedentes, la retención y el dusting se pueden calcular como sigue:

$$X = \frac{100 \cdot H}{\rho_B \cdot V_d} \quad (3-1)$$

donde: X = retención, % del volumen del secador

H = retención, lb de sal seca

ρ_B = densidad aparente del material seco, lb/ft³

V_d = volumen del secador, ft³

$$D_c = \frac{W_{dD}}{W_{dF}} \cdot 100 \quad (3-2)$$

en la cual:

D_c = dusting, % de la alimentación

W_{dD} = peso del polvo seco colectado en el ciclón, lb

W_{dF} = peso del material seco alimentado al secador, lb

3.15.2 Tiempo de tránsito.- Su determinación es posible realizarla de dos maneras, según como se exprese la retención; en función del porcentaje del volumen del secador o función de las lb. de sal seca. Las ecuaciones correspondientes a los casos señalados son:

$$\mathcal{T}_X = \frac{L \cdot X_a}{100 \cdot F_{dF}} \quad (3-3)$$

$$\mathcal{T}_H = \frac{H_a}{R_{dF}} \quad (3-4)$$

en las cuales:

\mathcal{T}_X = tiempo de tránsito (en función de la retención en porcentaje), hr

\mathcal{T}_H = tiempo de tránsito (en función de la retención en peso) lb.

L = longitud del secador, ft

X_a = retención (con flujo de aire), % del volumen de secador

H_a = retención (con flujo de aire), lb. de sal seca

F_{dF} = velocidad de alimentación volumétrica, ft³ de sal seca / (hr)(ft² de sección del secador)

R_{dF} = velocidad de alimentación, lb. de sal seca/hr.

La utilización de una u otra fórmula es indiferente pues ellas son equivalentes, tal como lo demostraré a continuación. (8, 18)

Sustituyendo $V_d = S_t \cdot L$ (3-5)

en X_a se tiene: $X_a = \frac{100 \cdot H_a}{\rho_B \cdot S_t \cdot L}$ (3-6)

y puesto que: $F_{dF} = \frac{R_{dF}}{\rho_B \cdot S_t}$ (3-7)

$$\mathcal{T}_X = \frac{L \cdot \frac{100 \cdot H_a}{\rho_B \cdot S_t \cdot L}}{100 \cdot \frac{R_{dF}}{\rho_B \cdot S_t}} \quad (3-8)$$

$$\mathcal{T}_X = \frac{H_a}{R_{dF}} \quad (3-9)$$

luego: $\mathcal{T}_X = \mathcal{T}_H$ (3-10)

La densidad aparente se determina pesando un volumen determinado de material.

3.16 Resultados experimentales.-

3.16.1 Retención sin flujo de aire. (Fig 3.21) Friedman y Marshall, para propósitos de comparación graficó la fórmula de Maier, Ralston y Sullivan, suponiendo un ángulo de reposo de 40° y que el efecto de la velocidad de rotación puede expresarse sin gran error como una potencia de 0,9 para N comprendido entre 1 y 10. Esta fórmula es representada por:

$$X = \frac{0,294 \cdot F}{S_d \cdot N^{0,9} \cdot D} \quad (3-11)$$

En la Fig. 3.21 se observa que para valores altos de la velocidad de alimentación, las curvas para $n_r = 4, 6-8,$ y 12 tienden a cortarse con la línea de Maier, Ralston y Sullivan modificada, indicando sobrecarga del secador.

La explicación de Friedman y Marshall para graficar:

$$X \text{ vs. } F/S_d \cdot N^{0,9} \cdot D$$

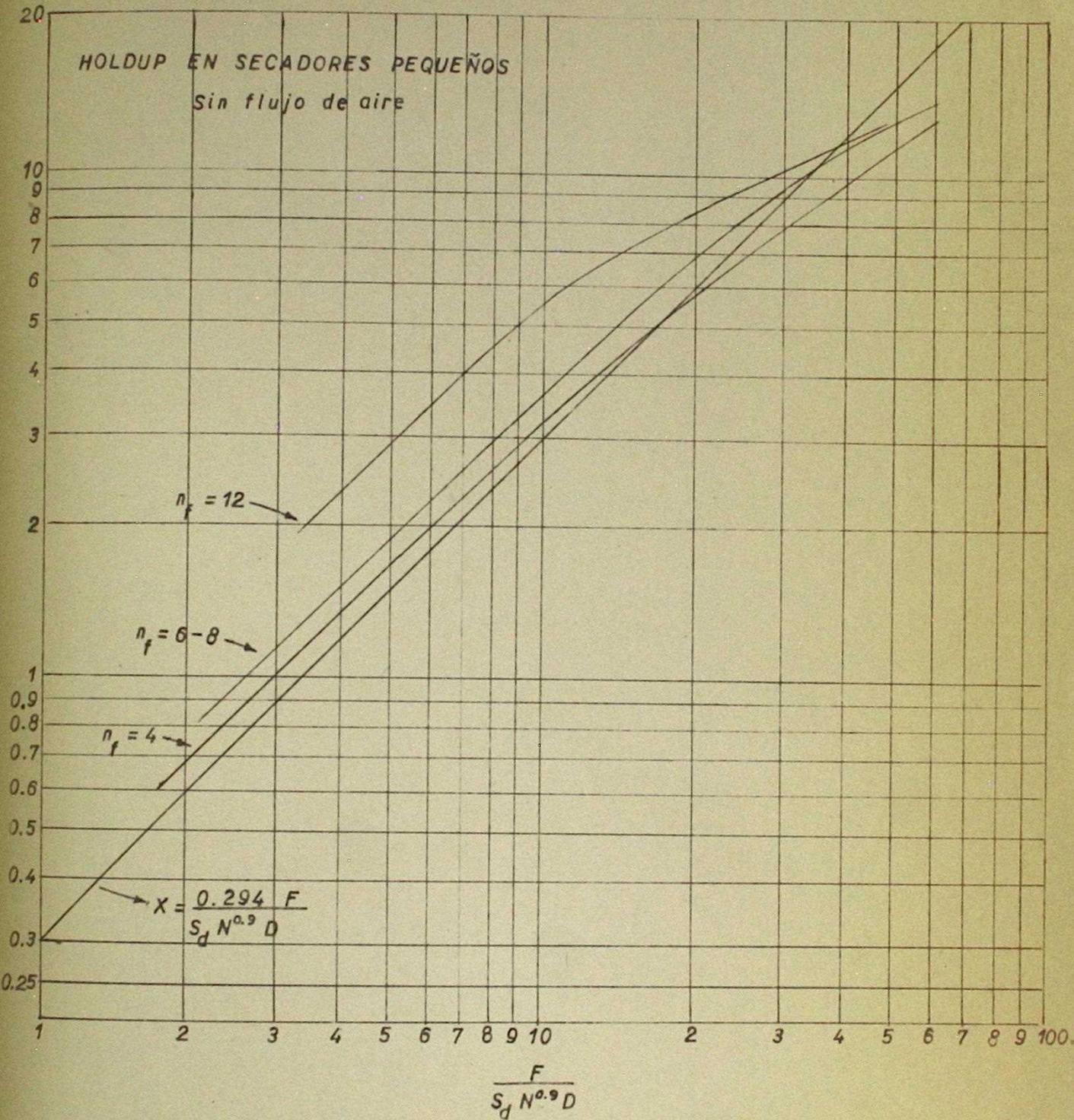
se basa en el hecho que para mantener una retención constante, es preciso que la velocidad de alimentación varíe directamente con la velocidad de rotación del secador elevado a una potencia menor que uno; a lo señalado agregan que el gráfico:

$$S_d \text{ vs. } F/N^{0,9}$$

para una retención constante, indica que la abscisa puede variar inversamente a S_d , y considerando la geometría del sistema concluyen, que la velocidad de alimentación puede variar directamente con el diámetro del secador.

3.16.2 Retención con flujo de aire a través del secador.- Estos datos pueden presentarse en un gráfico del tipo mostrado en Fig. 3.21. Este nuevo gráfico Fig. 3.22 indica que el efecto de una velocidad dada de aire,

FIG. 3.21



es aumentar la retención en una cantidad constante. Si la Fig. 3.22 se realiza en papel milimétrico, la distancia vertical entre las líneas para velocidad constante del aire, es aproximadamente independiente del valor de la abscisa, mostrando que el incremento en la retención con la velocidad del aire es esencialmente independiente de la velocidad de alimentación, velocidad de rotación, inclinación y diámetro del secador. Esto es aproximadamente verdadero para todos los materiales estudiados por Friedman y Marshall, para inclinaciones del secador mayores o iguales a 0,01 ft/ft y velocidad de aire lo bastante bajas para evitar un excesivo dusting.

3.16.3 En Fig. 3.23 se ha graficado la diferencia entre la retención con y sin flujo de aire vs. la velocidad del aire. Una sola línea recta para cada material, representa los datos para flujo de aire en paralelo y en contracorriente, razonablemente bien. De este modo, la retención de un material dado, bajo condiciones regulares de flujo de aire, puede estimarse a partir de la retención sin flujo de aire, agregando a este valor la velocidad de masa del aire multiplicada por una constante K.

$$X_a = X_o \pm K.G \quad (3-12)$$

Donde: X_a = retención con flujo de aire, % del volumen del secador

X_o = retención sin flujo de aire, % del volumen del secador

K = constante

G = velocidad de masa del aire, lb/(hr)(ft²)

(+) = para flujo de aire en contracorriente

(-) = para flujo de aire en paralelo

3.16.4 Una relación no teórica parece existir entre K y las propiedades del material. La mejor concordancia aparece al graficar β vs. diámetro medio de las partículas del material manejado. (Fig. 3.24); para ello es necesario determinar K de la Fig. 3.23, puesto que:

$$K = \frac{\beta}{\rho_B} \quad (3-13)$$

De la Fig. 3.24 se tiene: $\beta = \frac{5,15}{\sqrt{D_p}} \quad (3-14)$

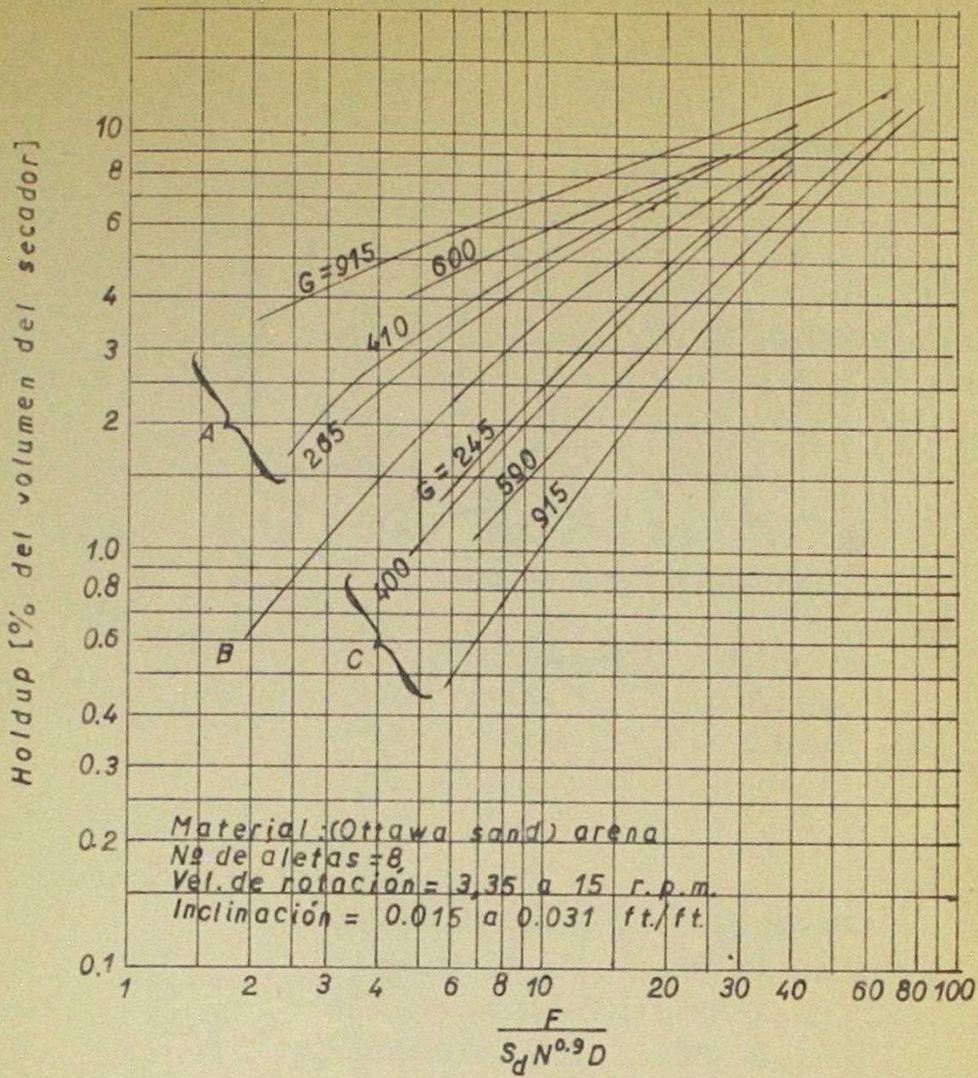
siendo D_p = diámetro medio de las partículas, micrones

Aún cuando la relación (3-14), está lejos de ser exacta, puede utilizarse para estimar el efecto de la velocidad del aire en la retención de un material dado, si no hay datos disponibles excepto D_p y ρ_B

Las relaciones que se ha presentado son válidas solamente para secadores que tengan una inclinación positiva de 0,01 ft/ft o mayor y las cuales operan con velocidades de aire que no produzcan un excesivo dusting

3.16.5 Las Figs. 3.25 y 3.26 permiten obtener las siguientes conclusiones relativas al dusting.

FIG. 3.22



EFECTO DEL FLUJO DE AIRE EN EL HOLDUP

- A) Flujo de aire en contracorriente
 B) Sin flujo de aire
 C) Flujo de aire en paralelo

FIG. 3.23

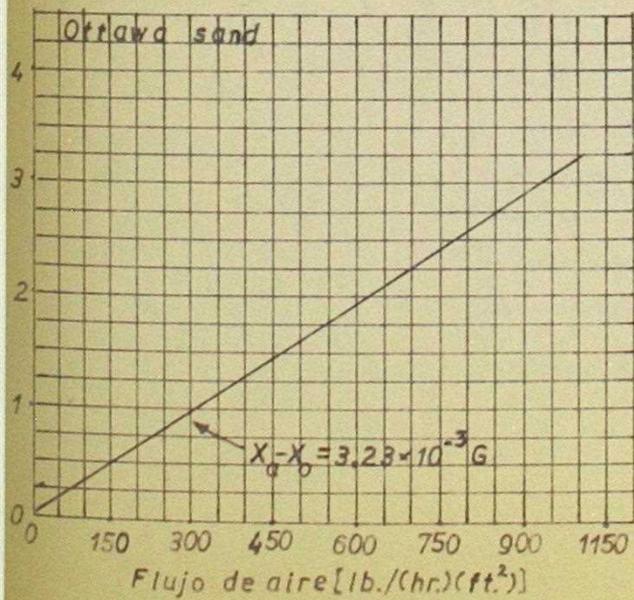
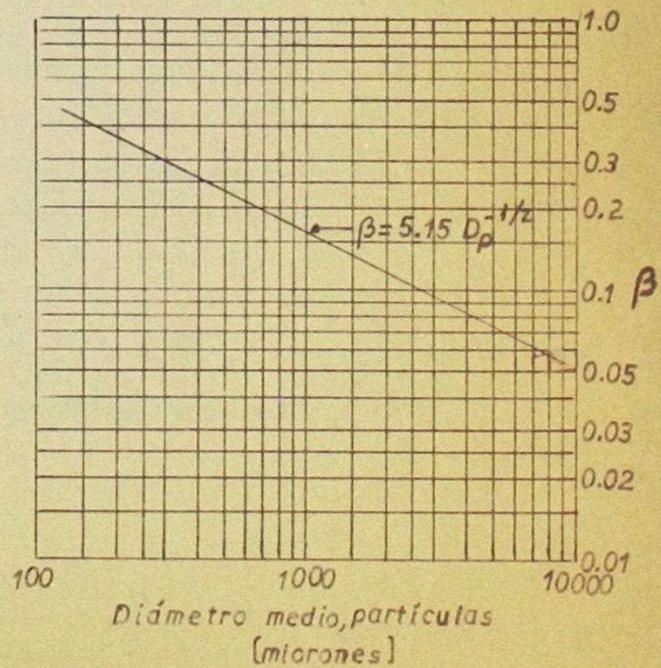


FIG. 3.24



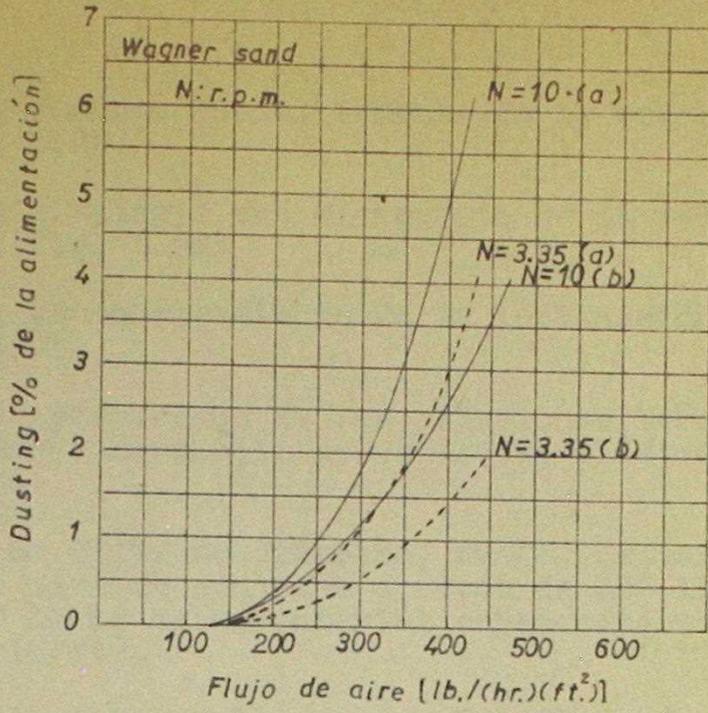


FIG. 3.25

	F [lb./hr.)(ft²)]	S_d [ft./ft]
(a)	1.4	0.0154
(b)	3.35	0.0154

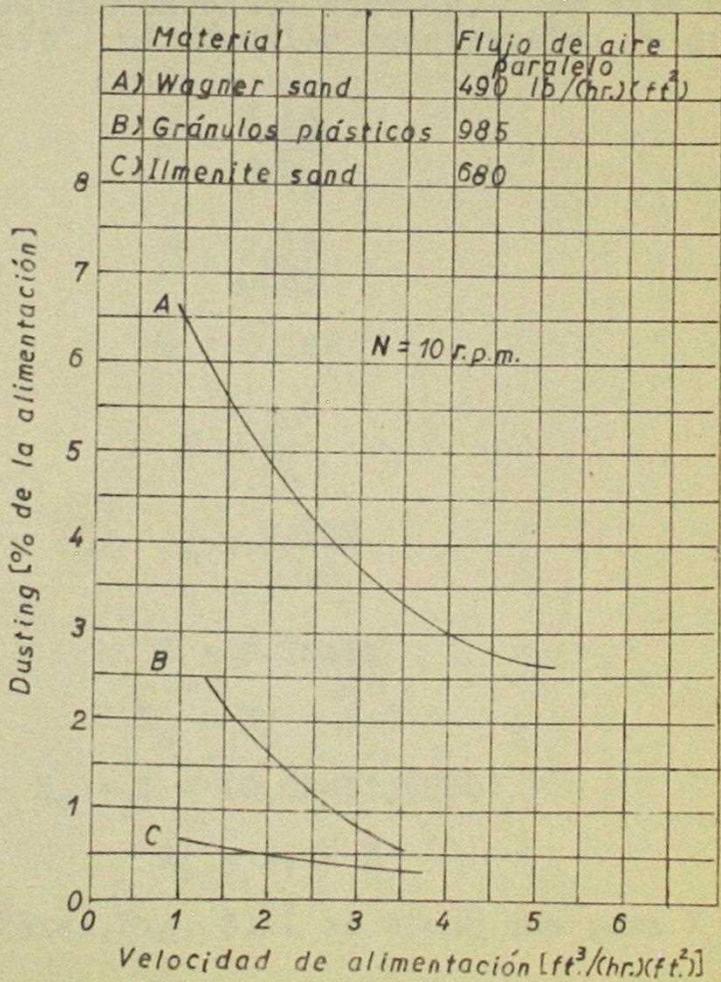


FIG. 3.26

- (1) El dusting aumenta con el aumento de la velocidad de rotación. (Fig. 3.25)
- (2) El dusting disminuye con el aumento de la velocidad de alimentación. (Fig. 3.26)
- (3) El dusting es independiente de la inclinación del secador. (Fig. 3.25)

3.16.6 Para una mejor apreciación de las relaciones teóricas propuestas por Friedman y Marshall, es ventajoso ilustrar su aplicación con un problema.

Un secador de 8 ft. de diámetro, 50 ft. de largo y 16 aletas, opera a 3,5 rpm., con aire en contra-c a razón de 500 lb/(hr)(ft²), alimentándose con 8000 lb/hr de un material cuyas características son: $D_p = 800 \mu$ y $\rho_B = 40 \text{ lb/ft}^3$.

¿ Cual es el máximo valor seguro del flujo de aire que puede utilizarse en este secador con el material en cuestión?

¿ Cual sería la inclinación del secador para asegurar una retención de 5%?

Solución.- Por comparación con los materiales dados en Fig. 3.27, es probable que una velocidad del aire superior a 1000 lb/(hr)(ft²) podría tolerarse sin excesivo dusting. De este modo, una velocidad de 500 lb/(hr)(ft²) es un valor conservativo de diseño. (8)

$$\beta = \frac{5,15}{\sqrt{D_p}} \quad (3-13)$$

$$\beta = \frac{5,15}{\sqrt{800}}$$

$$\beta = 0,182$$

$$K = \frac{\beta}{\rho_B} \quad (3-14)$$

$$K = \frac{0,182}{40}$$

$$K = 0,00455$$

$$X_a = X_o + K \cdot G \quad (3-12)$$

$$X_o = 5 - (0,00455)(500)$$

$$X_o = 2,72 \%$$

De la curva para 8 aletas, Fig. 3.21 se tiene que para $X_o = 2,72 \%$

$$\frac{F}{S_d \cdot N^{0,9} \cdot D} = 7,40$$

y como $F = \frac{R}{\rho_B \cdot S_t} \quad (3-7)$

$$S_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,785 \cdot D^2$$

luego:

$$F = \frac{8000}{(40)(0,785)(8)^2}$$

$$F = 3,98 \text{ ft}^3/(\text{hr})(\text{ft}^2)$$

entonces:

$$S_d = \frac{3,98}{(7,40)(3,5)^{0,9} \cdot (8)}$$

$$S_d = 0,022 \text{ ft/ft}$$

3.17 Análisis de la transmisión de calor en un secador rotatorio.-

3.17.1 Estudios realizados por "Mitchell y Saeman" indican que la relación predominante en la transmisión de calor, es la velocidad de esparcimiento del material desde las aletas y la razón aire-material arrastrada desde las corrientes de esparcimiento, limitando así el flujo de aire horizontal en el secador, principalmente a los vacíos existentes entre el material en dispersión.

La cantidad de aire arrastrado con el material que cae, comparado con la masa de este último es pequeña, por lo cual alcanza rápido la temperatura de equilibrio con la superficie del material. Desde el lecho del material, el aire caliente se desplaza hacia los vacíos producidos entre las cortinas de material para repetir el ciclo.

Esta hipótesis fué verificada experimentalmente por sus autores, los cuales al medir la temperatura superior del flujo de aire y la temperatura inferior correspondiente al lecho, pudieron observar que las temperaturas del lecho son permanentemente más altas que las temperaturas de la parte superior, mostrando así que estas últimas, corresponden a las más altas velocidades de flujo de aire y producen el mejor balance de calor con el material.

Puesto que las temperaturas de la parte superior son las señaladas para ejercer el efecto dominante en la velocidad de transmisión de calor, permiten comprobar que Friedman y Marshall estaban acertados en basar su coeficiente de transmisión de calor en la temperatura del aire.

En resumen, los principales factores que determinan la velocidad de transmisión de calor son: la velocidad de cascada del material, la cual es función de la medida y número de aletas, la retención y la velocidad de rotación; y la razón de arrastre de aire-material, la cual es función de la medida de las aletas, teniendo como posibles efectos secundarios la velocidad de rotación y dentaduras realizadas en el borde de las aletas. Efectos de otras variables, tales como el tamaño de las partículas de material, velocidad del aire, escalonamiento de las aletas, etc., parecen ser de menor importancia.

3.17.2 Casos de operación de secado para los cuales este mecanismo de transmisión de calor es inaplicable, son las condiciones de operación para las cuales la distribución de material en el secador es suficientemente uniforme para evitar completamente los huecos, forzando al aire a fluir a través del material suspendido. Otro caso de inaplicabilidad se presenta al operar con materiales viscosos o apelmados, donde no hay corrientes de cascada de material bien definidas.

En el primer caso excepcionalmente pueden anticiparse coeficientes de transmisión de calor altos, y en las últimas condiciones se tendrá una transmisión de calor excesivamente baja. (14)

3.18 Ecuaciones para determinar la transmisión de calor al material.-

En un secador rotatorio el calor entregado por el aire, es distribuido entre el material sólido que cae a través de la corriente de aire y aquel que momentaneamente constituye el lecho sobre la parte inferior del cilindro rotatorio. Existe la posibilidad de transmisión de calor al material, desde el cilindro secador caliente, cuando la pérdida de calor desde él, es pequeña. Sin embargo, si la pérdida es grande, el material sólido puede transmitir calor al cilindro. De este modo, el proceso de transmisión de calor en un secador rotatorio, puede expresarse para una longitud diferencial dL , como sigue:

$$dq_G = G \cdot S_t \cdot c_G \cdot dt_G = F \cdot S_t \cdot c_M \cdot dt + h_L \cdot S_c \cdot (t_s - t_o) \quad (3-15)$$

$$dq_G = h_1 A_1 (t_G - t) dL + h_2 A_2 (t_G - t) dL + h_3 A_3 (t_s - t) dL + h_L S_c (t_s - t_o) \quad (3-16)$$

$$S_c = \pi \cdot D \cdot dL$$

Puesto que la determinación de las áreas individuales y coeficientes de transmisión de calor indicados en las ecuaciones anteriores, requeriría un vasto equipo experimental, se ha estimado necesario simplificar su estructura. Esto es posible si la cantidad de calor transmitida desde el cilindro al material es pequeña comparada con el transmitido directamente desde la corriente de aire, en ese caso la ecuación 3.16 puede expresarse como:

$$dq_G = Ua \cdot S_t \cdot (t_G - t) \cdot dL + h_L \cdot S_c \cdot (t_s - t_o) \quad (3-17)$$

$$dq_G = Ua \cdot S_t \cdot (t_G - t) \cdot dL + dq_L \quad (3-18)$$

Si hay pérdidas de calor desde las paredes del secador, la ecuación puede ser integrada a (9):

$$q_M = q_G - q_L \quad (3-19)$$

$$q_M = Ua \cdot V_d \cdot (\Delta t)_m \quad (3-20)$$

y si no hay pérdidas de calor, la forma integrada sería:

$$q_M = q_G \quad (3-21)$$

$$q_M = Ua \cdot V_d \cdot (\Delta t)_{l.m.} \quad (3-22)$$

donde: a = área promedio de contacto entre gas y sólido, ft^2/ft^3 de volumen del secador

A = área de transmisión de calor, ft^2

c = calor específico, $Btu/(lb)(^{\circ}F)$

d = operador diferencial

F = velocidad de alimentación (volumétrica) al secador, $ft^3/(hr)(ft^2$ de sección del secador)

G = velocidad de masa del aire, $lb/(hr)(ft^2$ de sección del secador)

h = coeficiente de transmisión de calor, $Btu/(lb)(ft^2)(^{\circ}F)$

L = longitud del secador, ft

q = velocidad de transmisión de calor, Btu/hr

t = temperatura del material, °F

t_o = temperatura alrededor del secador, °F

t_s = temperatura del cilindro secador, °F

Δt = diferencia de temperaturas entre gas y sólido, °F

t_G = temperatura del gas, °F

U = coeficiente promedio de transmisión de calor entre gas y sólido, Btu/(hr)(ft²)(°F)

V_d = volumen del secador, ft³

Sub-índices

1 = área y velocidad de transmisión de calor entre gas y sólido suspendido en el gas

2 = área y velocidad de transmisión de calor entre gas y sólido en el fondo del secador

3 = área y velocidad de transmisión de calor entre sólido y cilindro secador

G = gas

L = pérdida de calor

M = material

l.m. = logarítmica media (LMTD)

m = media

En el diseño de secadores rotatorios a veces es conveniente utilizar el concepto de número de unidades de transmisión de calor (NTU), como sucede en el caso que sólo se considere transmisión de calor al material desde el gas, despreciando cualquier transmisión indirecta entre el sólido y el secador mismo, y entre el secador y el ambiente.

Consideraremos que el secador trabaja en contracorriente y que se divide en tres zonas: (1) zona de precalentamiento de la alimentación, (2) zona de evaporación, (3) zona de sobre-calentamiento del producto (Ver Badger y Bancharo pag. 504)

Combinando las ecuaciones 3.15 y 3.17

$$- G \cdot S_t \cdot c_G \cdot dt_G = U_a \cdot S_t \cdot (t_G - t) \cdot dL \quad (3-23)$$

Y suponiendo que U_a es constante y que c_G lo es aproximadamente.

$$- \frac{dt_G}{t_G - t} = \frac{U_a}{G \cdot c_G} \cdot dL \quad (3-24)$$

integrando se tiene:

$$-\int_{t_{G1}}^{t_{G2}} \frac{dt_G}{t_G - t} = \frac{Ua}{G \cdot c_G} \int_0^L dL \quad (3-25)$$

$$\int_{t_{G2}}^{t_{G1}} \frac{dt_G}{t_G - t} = \frac{Ua \cdot L}{G \cdot c_G} \quad (3-26)$$

para la zona de evaporación, la temperatura t del sólido permanece constante a la temperatura de bulbo húmedo del aire, por lo cual:

$$\int_{t_{G2}}^{t_{G1}} \frac{dt_G}{t_G - t} = \text{Log} \left| \frac{t_{G1} - t_w}{t_{G2} - t_w} \right| \quad (3-27)$$

luego

$$\frac{Ua \cdot L}{G \cdot c_G} = \text{Log} \left| \frac{t_{G1} - t_w}{t_{G2} - t_w} \right| \quad (3-28)$$

puesto que para las zonas donde t no es constante, la ecuación

$$G \cdot S_t \cdot c_G \cdot dt_G = F \cdot S_t \cdot c_M \cdot dt \quad (3-29)$$

todavía es válida y puede resolverse para dt , si c_G y c_M pueden considerarse constantes

$$dt = \frac{G \cdot c_G}{F \cdot c_M} dt_G \quad (3-30)$$

$$dt = b \cdot dt_G \quad (3-31)$$

y como b es una constante, t es una función lineal de t_G . Por esta situación, la ecuación 3.27 puede integrarse para este caso

$$\int_{t_{G2}}^{t_{G1}} \frac{dt_G}{t_G - t} = \frac{t_{G1} - t_{G2}}{(t_G - t)_m} \quad (3-32)$$

donde

$$(t_G - t)_m = \frac{(t_{G1} - t_1) - (t_{G2} - t_2)}{\text{Log} \left| \frac{t_{G1} - t_1}{t_{G2} - t_2} \right|} \quad (3-33)$$

y como la ecuación 3.32 es la integral del término del miembro izquierdo de la ecuación 3.26

$$\frac{Ua \cdot L}{G \cdot c_G} = \frac{t_{G1} - t_{G2}}{(t_G - t)_m} \quad (3-34)$$

la ecuación 3.34 es utilizada para la zona de precalentamiento y la de sobrecalentamiento, empleando valores apropiados de t_{G1} y t_{G2} para cada zona.

La suma de las longitudes calculadas para cada zona mediante ecuación 3.28 y ecuación 3.34, es la longitud total del secador.

De acuerdo con el concepto de número de unidades de transmisión de calor, definido por

$$\text{NTU} = \int_{t_{G2}}^{t_{G1}} \frac{dt_G}{t_G - t} \quad (3-35)$$

$$NTU = \frac{U_a \cdot L}{G \cdot c_G} \quad (3-36)$$

para mayor simplicidad $N_t = NTU$

$$L = N_t \cdot \left(\frac{G \cdot c_G}{U_a} \right) \quad (3-37)$$

$$L_G = \frac{G \cdot c_G}{U_a} \quad (3-38)$$

$$L = N_t \cdot L_G \quad (3-39)$$

donde L_G = longitud de una unidad de transmisión de calor, ft.
(2, 9, 20)

3.19 Transferencia de masa.- La evaluación de datos de transferencia de masa es más difícil que la de transmisión de calor, puesto que la temperatura del material húmedo en el secador, no es función directa del calor transmitido.

Durante el secado de un material en una corriente de aire, se puede distinguir tres períodos distintos, que permiten dividir teóricamente el secador en tres zonas, correspondientes a cada uno de los períodos de secado. (Fig. 3.28)

3.19.1 Zona de precalentamiento.- En ella la alimentación es calentada por el gas hasta que la velocidad de transmisión de calor hacia el sólido, equilibre la demanda para mantener una temperatura de evaporación constante. Si la superficie de las partículas sólo es cubierta por agua sin aprisionar y si ellas reciben calor solamente por convección, esta temperatura de equilibrio constante será la temperatura de bulbo húmedo de la corriente de aire. Usualmente, una pequeña fracción del agua contenida por el material es evaporada durante este período.

3.19.2 Zona de evaporación.- Se denomina a aquella que comprende la temperatura de equilibrio alcanzada anteriormente, la cual se mantiene constante hasta eliminar el agua sin aprisionar que cubre la superficie de las partículas, es decir hasta alcanzar el contenido de humedad crítico (Fig. 3.28 ; punto B)

3.19.3 Zona de sobrecalentamiento.- Tal como lo indica su nombre, en esta zona el material experimenta un sobrecalentamiento, puesto que al eliminarse el agua sin aprisionar, empieza la evaporación del agua aprisionada motivando un descenso en la velocidad de secado, y una elevación de la temperatura del sólido, la cual se aproxima a la del flujo de aire.

Utilizando el análisis hecho anteriormente, la transmisión de calor durante el secado puede ser expresada por:

$$q_T = q_P + q_E + q_S \quad (3-40)$$

suponiendo que U_a es constante a lo largo del secador y notando que:

$$V_T = V_P + V_E + V_S \quad (3-41)$$

se puede derivar una expresión para la diferencia media de temperaturas total en el secador, a través del siguiente desarrollo:

multiplicando la ecuación 3.41 por $Ua \cdot (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_E \cdot (\Delta t)_S$ y considerando que:

$$q = Ua \cdot V \cdot (\Delta t)_m$$

$$Ua \cdot V_T (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_E \cdot (\Delta t)_S = q_P (\Delta t)_E \cdot (\Delta t)_S + q_E (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_S + q_S (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_E \quad (3-42)$$

y el primer miembro de la ecuación 3.42 lo amplificamos por $(\Delta t)_T$

$$\frac{q_T \cdot (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_E \cdot (\Delta t)_S}{(\Delta t)_T} = q_P (\Delta t)_E \cdot (\Delta t)_S + q_E (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_S + q_S (\Delta t)_P \cdot (\Delta t)_E \quad (3-43)$$

$$\frac{1}{(\Delta t)_T} = \frac{q_P}{q_T \cdot (\Delta t)_P} + \frac{q_E}{q_T \cdot (\Delta t)_E} + \frac{q_S}{q_T \cdot (\Delta t)_S} \quad (3-44)$$

en la cual:

q_P = calor transmitido al material húmedo mientras se le calienta hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire, Btu/hr

q_E = calor latente transmitido al material mientras se está evaporando la humedad a temperatura constante, Btu/hr

q_S = calor sensible transmitido al material seco mientras se calienta hasta la temperatura de descarga, Btu/hr

q_T = calor total transmitido en el secador, Btu/hr

$(\Delta t)_P$ = diferencia media de temperaturas entre el aire y el material mientras se calienta hasta la temperatura de bulbo húmedo del aire, °F

$(\Delta t)_E$ = diferencia media de temperaturas entre el aire y el material, mientras se está evaporando la humedad a temperatura constante, °F

$(\Delta t)_S$ = diferencia media de temperaturas entre el aire y el material mientras se le calienta hasta la temperatura de descarga, °F

$(\Delta t)_T$ = diferencia media de temperaturas total en el secador, °F

La ecuación 3.44 permite evaluar la diferencia media de temperaturas total en el secador, en caso que se conozca la cantidad de calor y la diferencia media de temperaturas en cada una de las secciones del secador.

Debe señalarse que para materiales que contienen una cantidad considerable de agua, la mayor parte del calor será transmitido a la temperatura de evaporación y una buena aproximación de la verdadera temperatura media, será aquella de la media logarítmica de la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada y a la salida del secador. (9, 15, 20)

3.20 Resultados experimentales.- Las Figs. 3.29 a 3.35 pertenecientes al estudio de Friedman y Marshall, muestran distintas modalidades de presentar los resultados experimentales de transmisión de calor. El procedimiento empleado para la obtención de las curvas anteriormente citadas, no se ha incluido en este trabajo pues ello implicaría entrar a describir el equipo utilizado por los investigadores mencionados, lo cual no es el objetivo perseguido, sino el proporcionar normas de carácter general aplicables a la totalidad de los secadores de calentamiento directo.

3.21 Características de diseño de un secador rotatorio.(Fig. 3.36)

3.21.1 Aletas.- El secador rotatorio de calentamiento directo suele estar equipado con aletas en la superficie interior del cilindro para elevar y esparcir el material húmedo a través de los gases calientes durante su paso por el cilindro.(Figs. 3.37 a 3.43). Estas aletas pueden extenderse continuamente a lo largo del secador, o bien estar escalonadas cada 0,60 a 1,80 mt.

La forma de las aletas depende de las características del material desde el punto de vista de su manipulación. Para los materiales granulados que fluyen libremente se emplea una aleta radial con un labio de 90 grados. Para los materiales pegajosos, se usa una aleta radial recta sin labios. Cuando las características del material cambian durante la desecación, el diseño de la aleta varía a menudo a lo largo del secador. Las aletas en espiral suelen usarse durante los primeros tercios de metro del secador en el extremo de alimentación para acentuar el movimiento de avance del material en el secador antes de que empiece la acción normal de las aletas.

Cuando se usa circulación paralela del aire, suele prescindirse de las aletas en los últimos tercios de metro del secador para impedir un arrastre excesivo de polvo en los gases salientes. Algunos secadores tienen cadenas sujetas al interior del cilindro.(Fig. 3.40). Los extremos libres de las cadenas se agitan sobre la pared del secador durante la rotación, removiendo el material que normalmente se adheriría a la pared. En los secadores de gran sección transversal, se emplean a veces elementos internos o tabiques para aumentar la eficacia de la distribución del material y del aire, reduciendo así la formación de polvo y la pulverización del material.(Fig. 3.41). El empleo de esos miembros internos dificulta la limpieza del secador y eleva los costos de conservación cuando se manipulan materiales abrasivos.

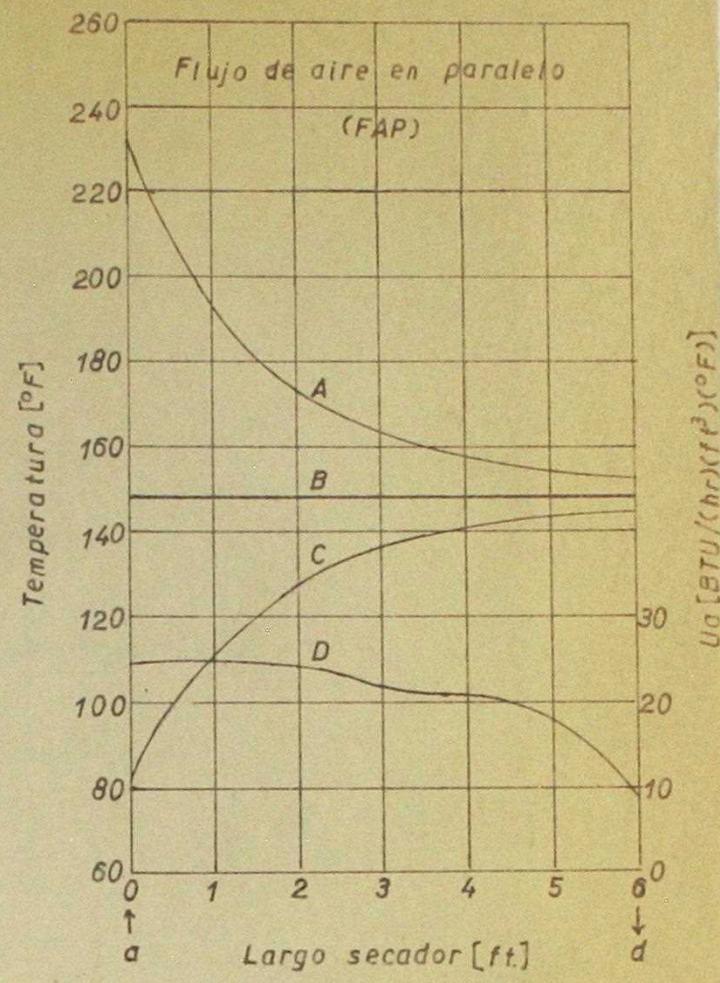
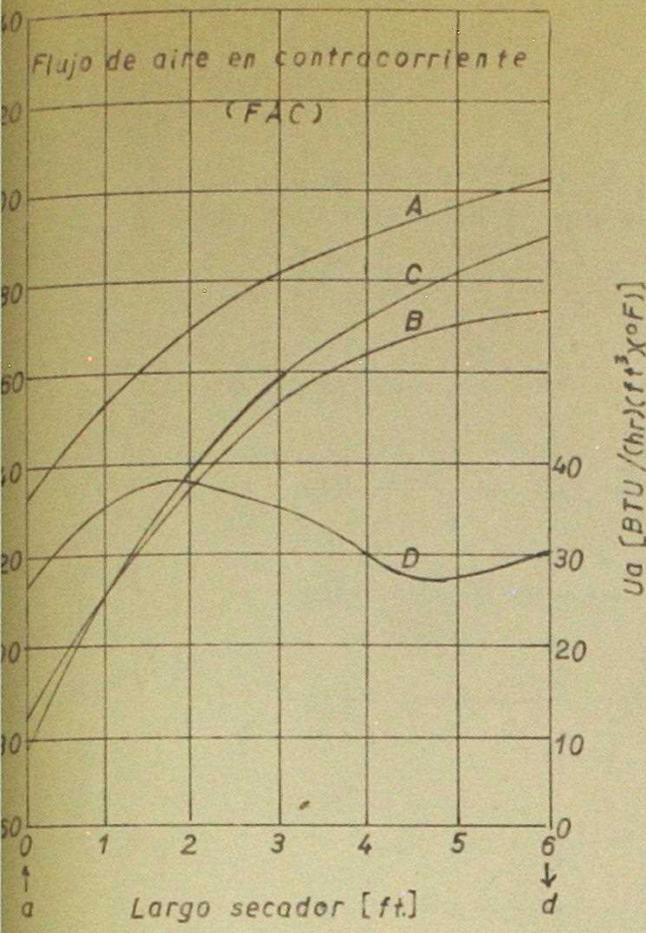
La altura radial de las aletas de un secador de calentamiento directo oscilará entre $1/12$ a $1/8$ del diámetro del secador. El número de aletas variará entre $6,5 D$ y $11,5 D$ para los secadores de diámetro superior a 60 cm.

3.21.2 Alimentación.- El método de alimentar los secadores rotatorios depende del material que se seca, de su colocación y el tipo del equipo empleado para la preparación preliminar. Cuando se alimenta el material desde encima del secador, puede emplearse una rampa que se prolongue hasta penetrar dentro del cilindro secador.(Fig. 3.44 ; 3.46 y 3.47). Si no es posible la alimentación por gravedad, se emplean alimentadores de tornillo sin fin.(Fig. 3.45) o vibratorios.(Fig. 3.44). Además de los tipos mencionados existe otra modalidad de alimentar un secador rotatorio tal como se indica en las Figs. 3.48 y 3.49

3.21.3 Ciclón.- Permite separar el polvo de los gases calientes.(Figs. 3.50 y 3.51)

FIG. 3.29

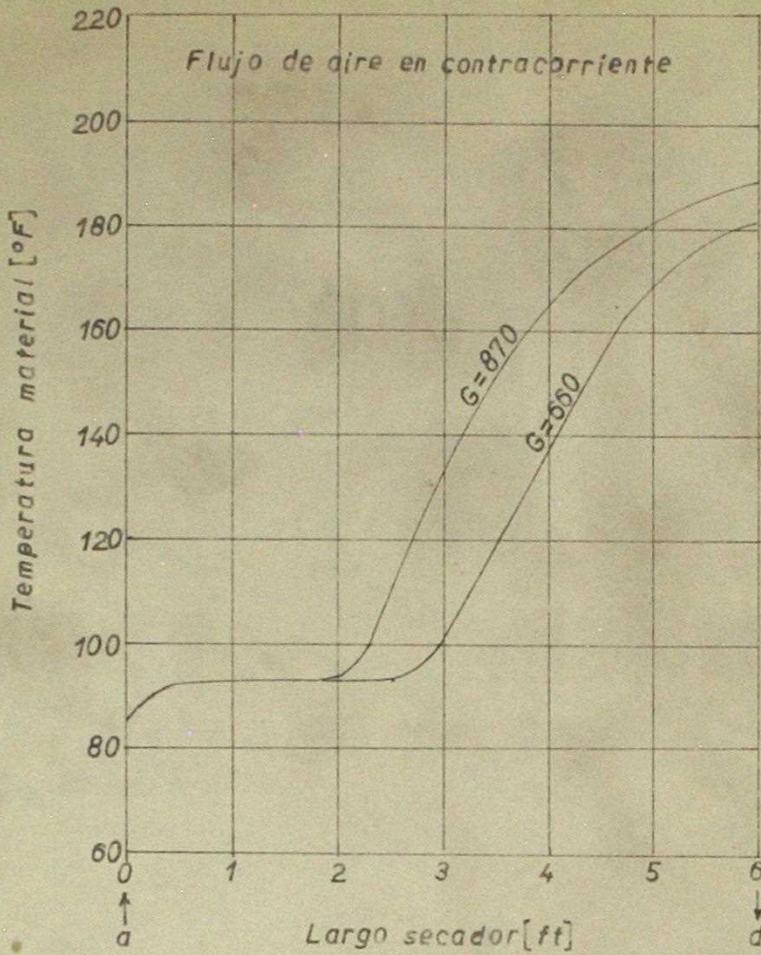
FIG. 3.30



- a.- alimentación
- d.- descarga
- A.- Temperatura aire
- B.- " cilindro secador
- C.- " material
- D.- Coeficiente transmisión de calor (Ua)

Flujo de aire	FAC	FAP
Material	Ottawa sand	A.G.S. N29 sand
Vel. alim. [lb./hr.]	201	448
Vel. aire [lb./hr)(ft²)]	350	254
Inclinación [ft./ft.]	0.0315	0.0300
Vel. rot. [r.p.m.]	10	10
Nº de aletas	8	8

FIG. 3.31



Velocidad aire (G)	lb / (hr)(ft ²)	870	660
D.B.T. aire entrada	°F	201	201
W.B.T. " "	°F	93	93
D.B.T. " salida	°F	167	156
W.B.T. " "	°F	94	98
Material (seca)		AGS No. 9 sand	
Velocidad alimentación (F)	lb / hr	125	115
Temperatura entrada material	°F	85	85
" salida "	°F	190	181
Contenido humedad alimentación	% B.S.	2.56	3.31
Velocidad rotación	r.p.m.	10	
Inclinación	ft / ft	0.031	

FIG. 3.32

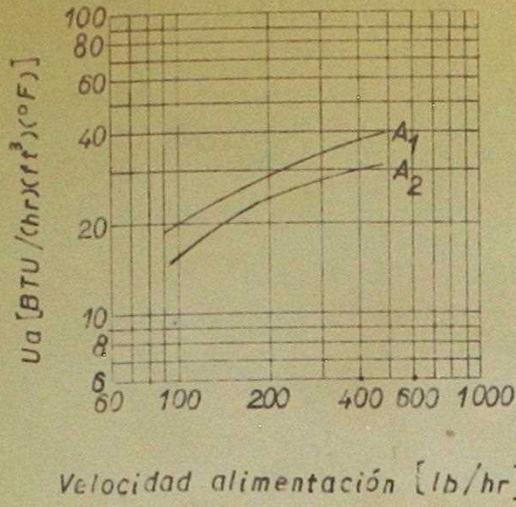
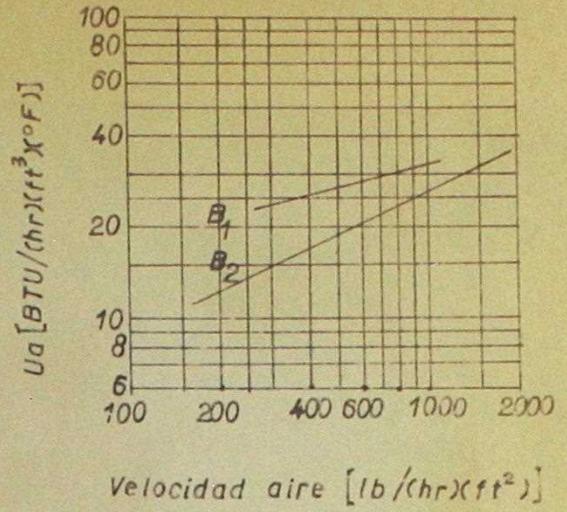


FIG. 3.33



Material.....	A.G.S. N° 9 sand	
Flujo de aire.....	contracorriente	
Velocidad rotación..... r.p.m.....	10	
Nº de aletas.....	8	
Inclinación..... ft/ft.....	A) 0,043	B) 0,030
Velocidad aire..... lb/(hr)(ft²)..... (Cte)	{ A1) 800-840 A2) 320-370	
Velocidad alimentación..... lb/hr..... (Cte)	{ B1) 240-250 B2) 104-108	

FIG. 3.34

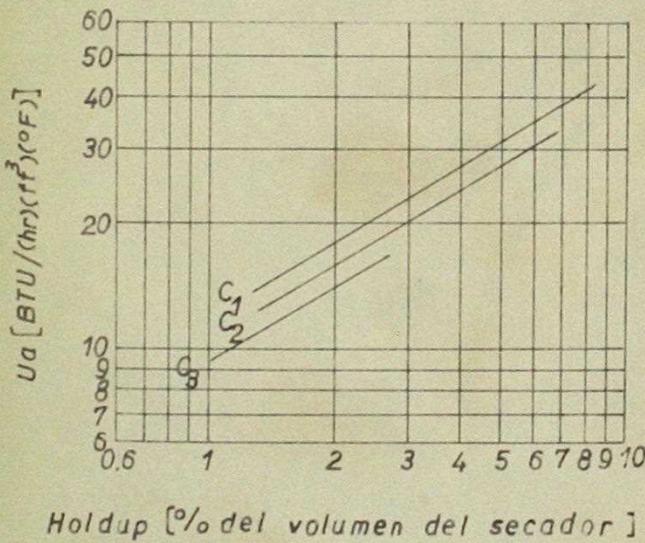
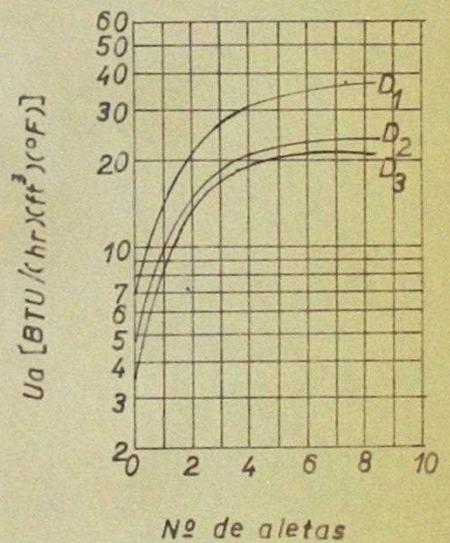


FIG. 3.35



Material.....	AGS N° 9 sand	AGS N° 1 sand
Flujo de aire.....	contracorriente	
Velocidad rotación..... r.p.m.....	10	
Nº de aletas.....	8	0 ÷ 8
Inclinación..... ft/ft.....	0,030	0,031
Velocidad aire..... lb/(hr)(ft²).....	{ C1) 820 D2) 154-170 C2) 320 D3) 318-340 C3) 180 D1) 316-347	
Velocidad alimentación..... lb/hr.....	{ D2) 89-92 D3) 85-95 D1) 224-245	

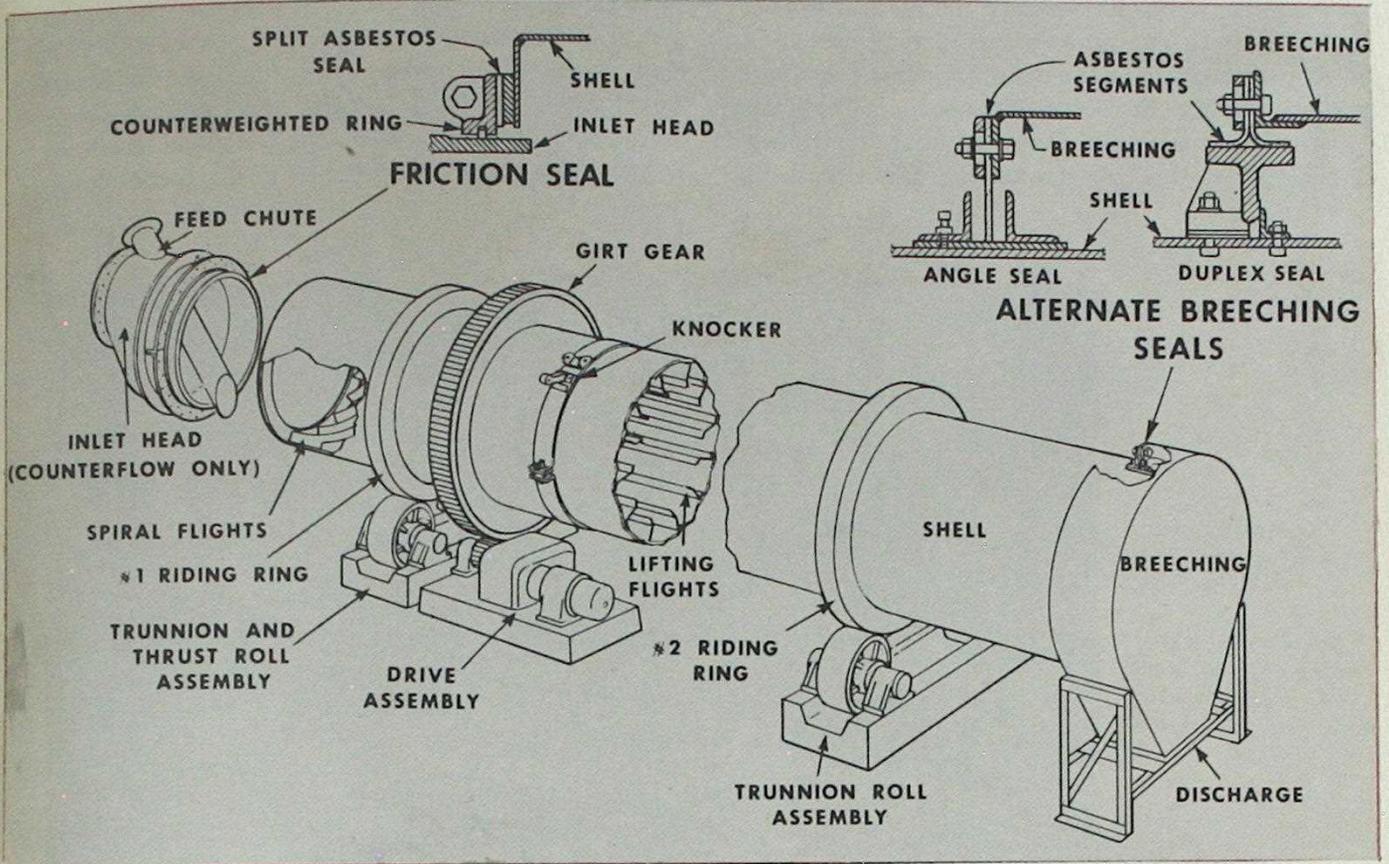


Fig. 3.36

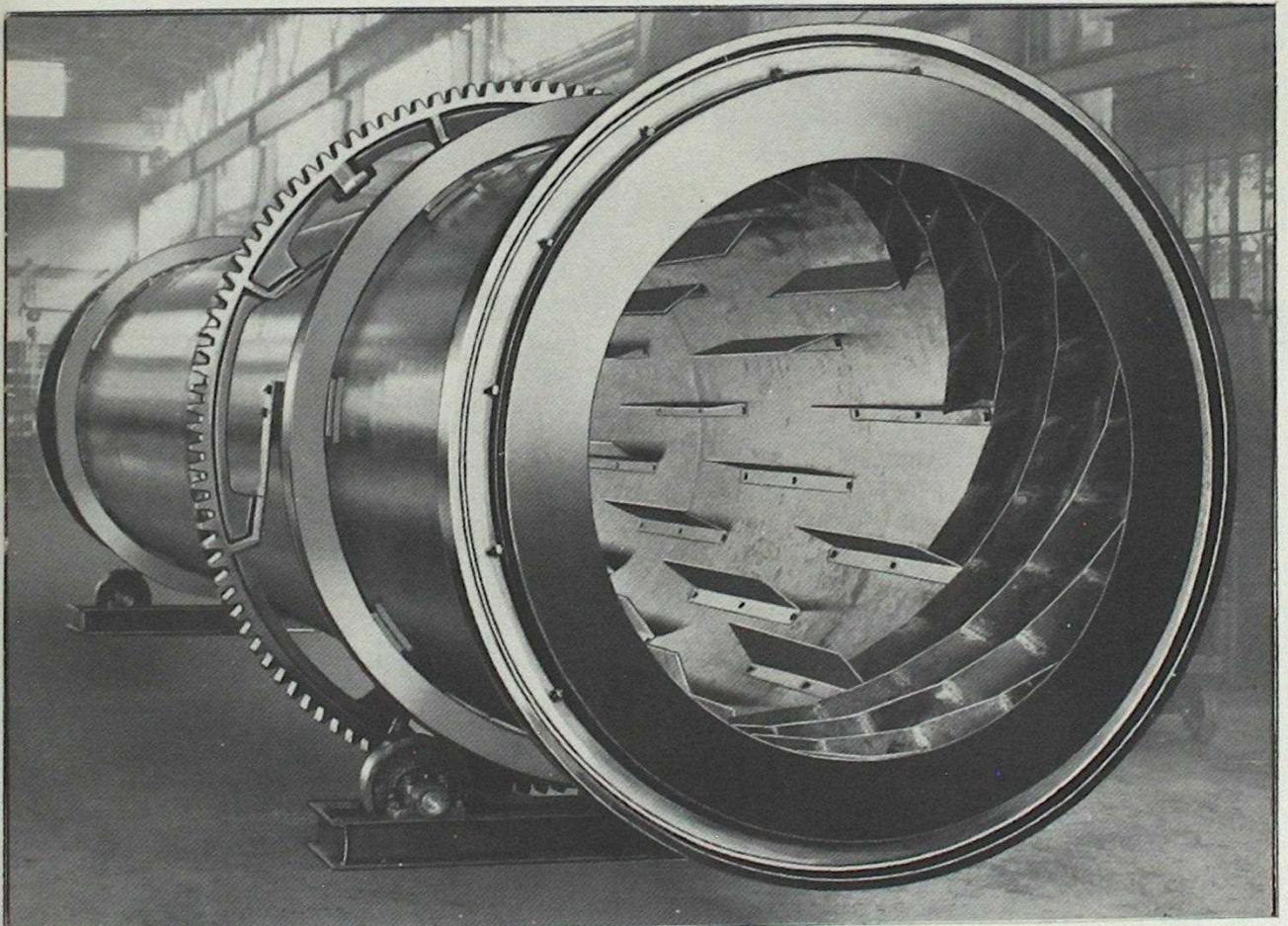


Fig. 3.37

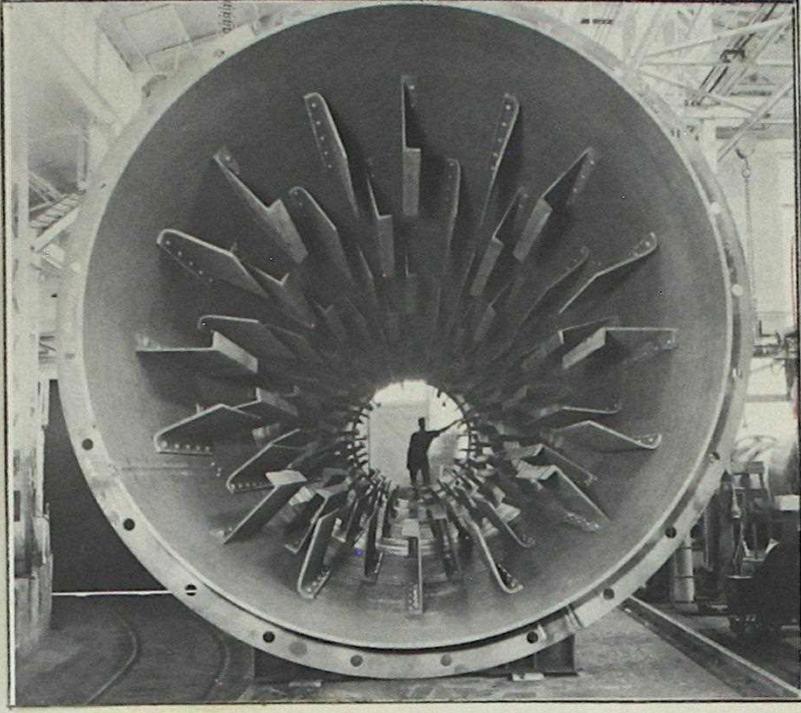


Fig. 3.38

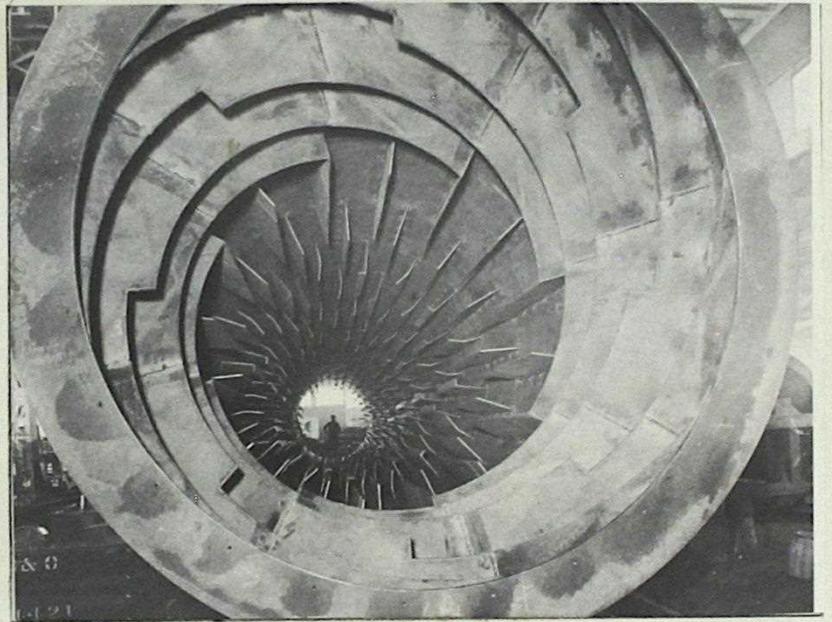


Fig. 3.39

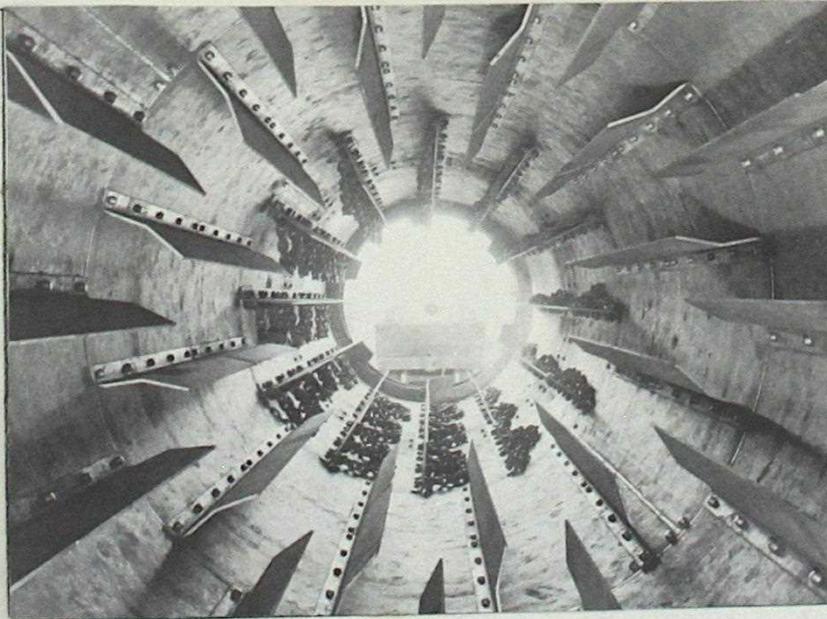


Fig. 3.40

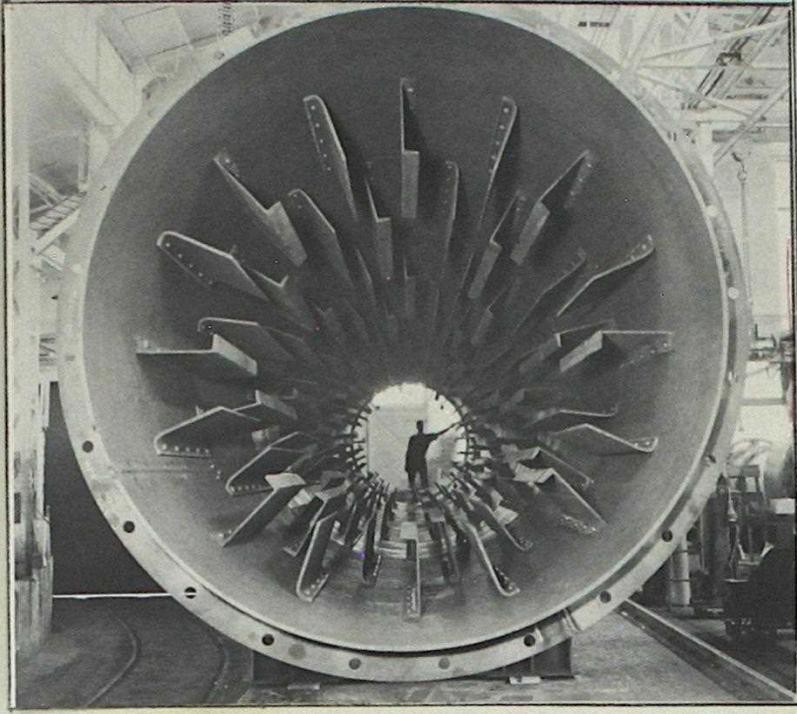


Fig. 3.38

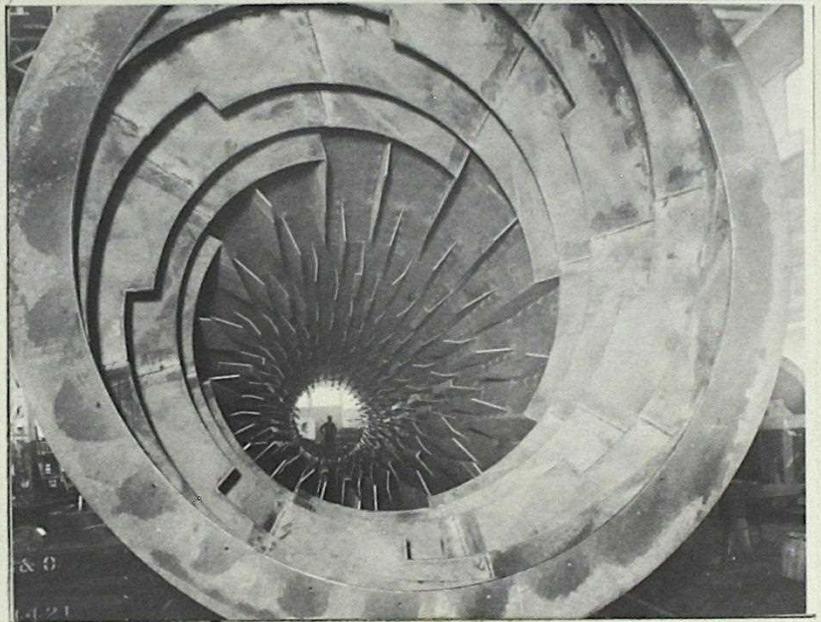


Fig. 3.39

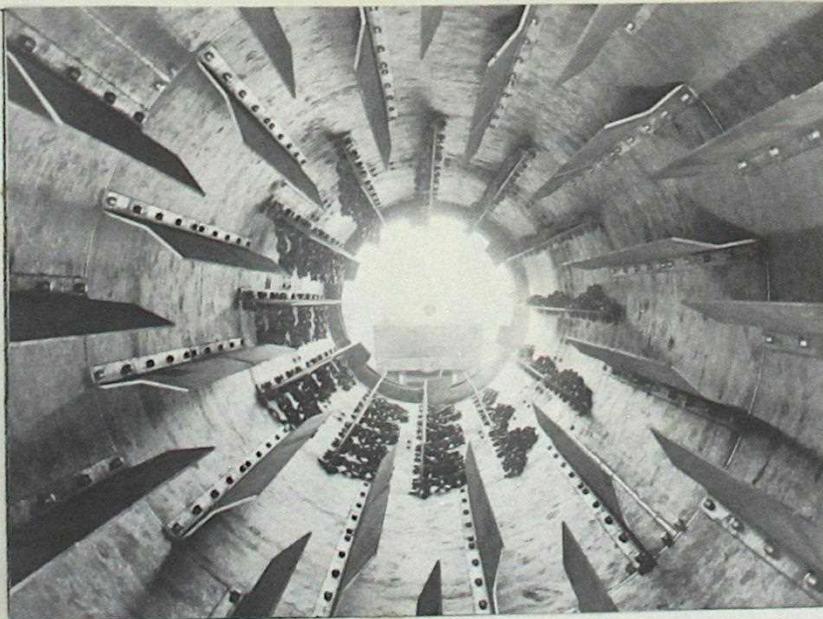


Fig. 3.40

Fig. 3.41

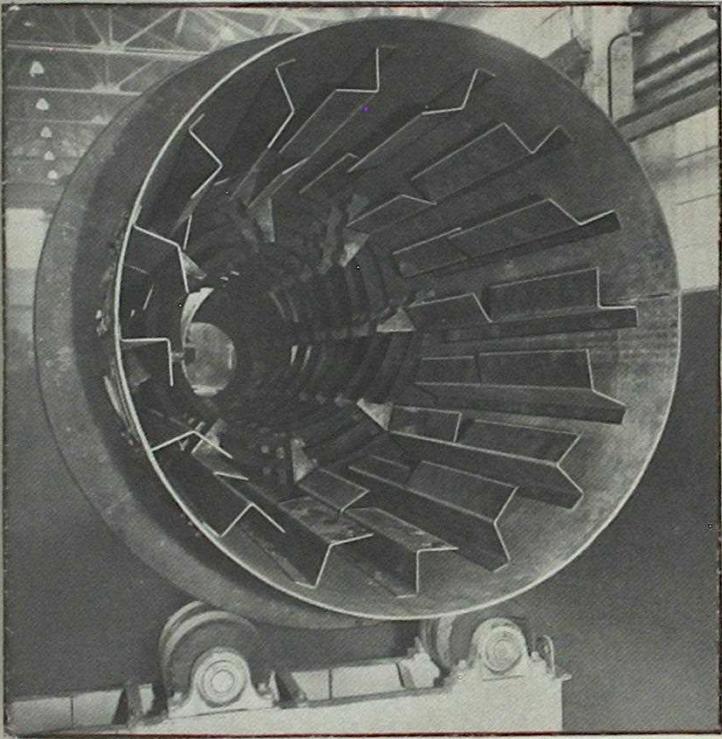
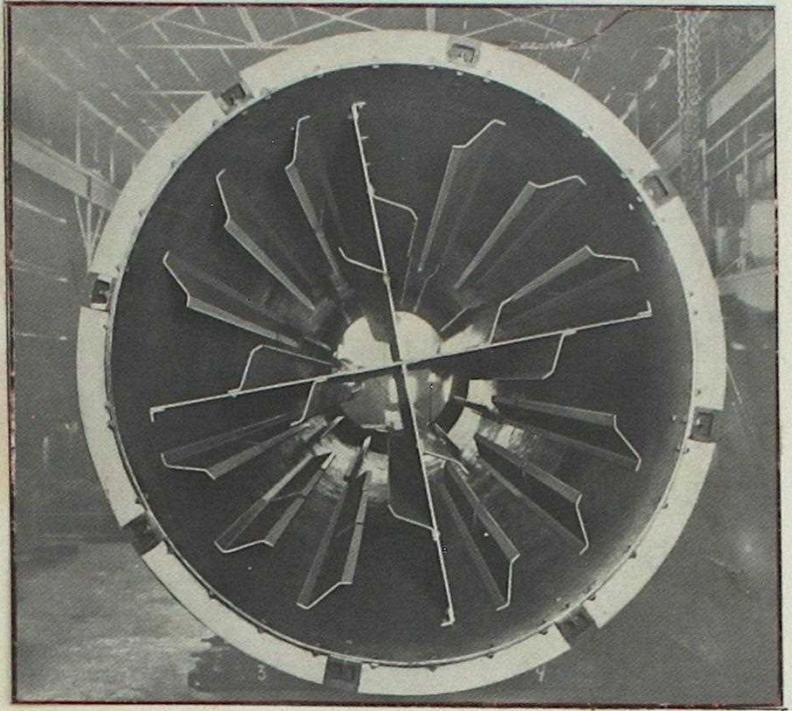
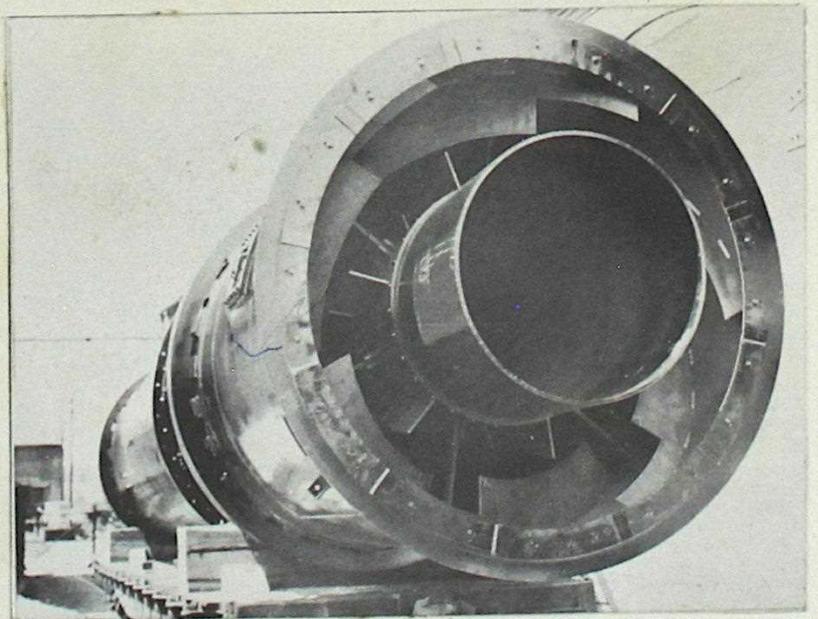


Fig. 3.42

Fig. 3.43



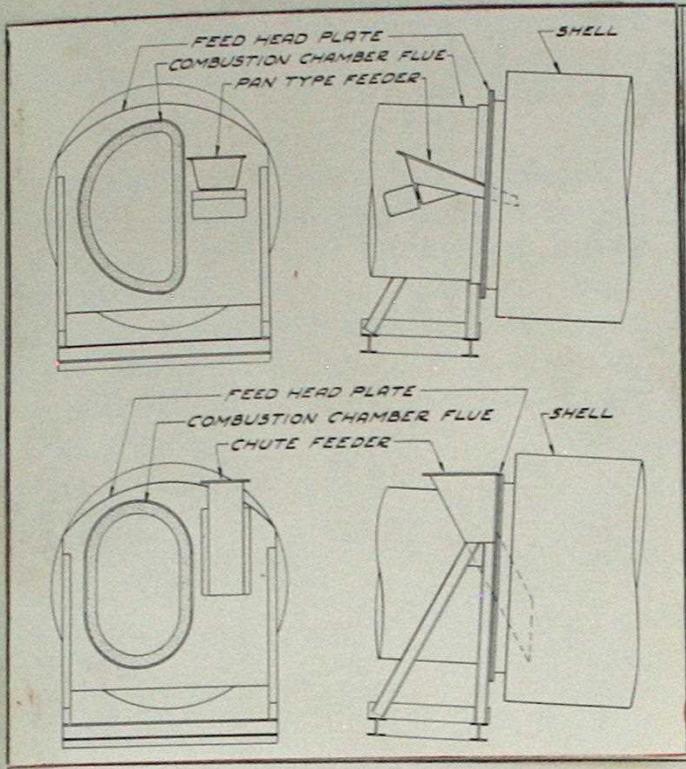


Fig. 3.44

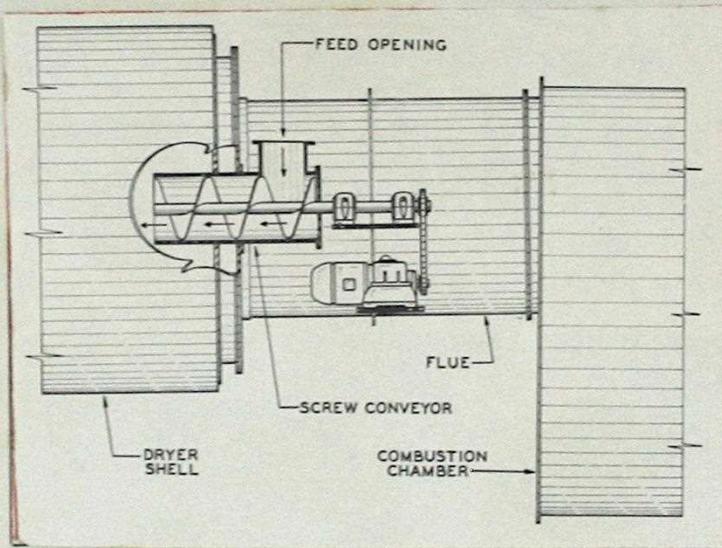
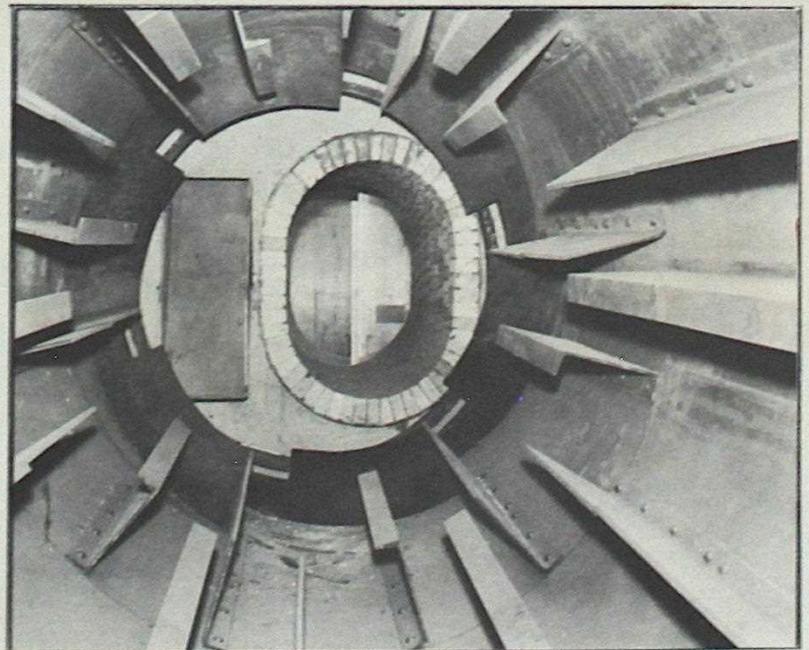


Fig. 3.45

Fig. 3.46



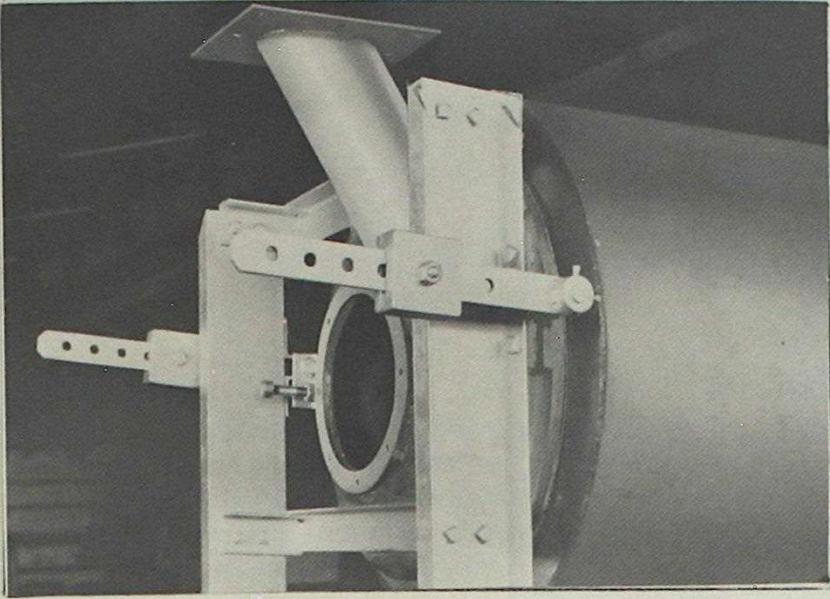


Fig. 3.47

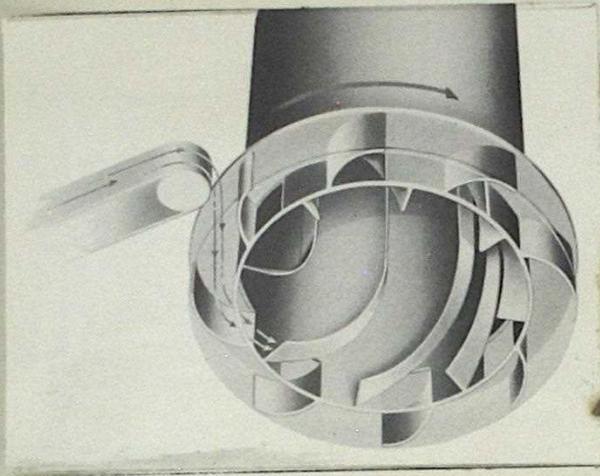


Fig. 3.48

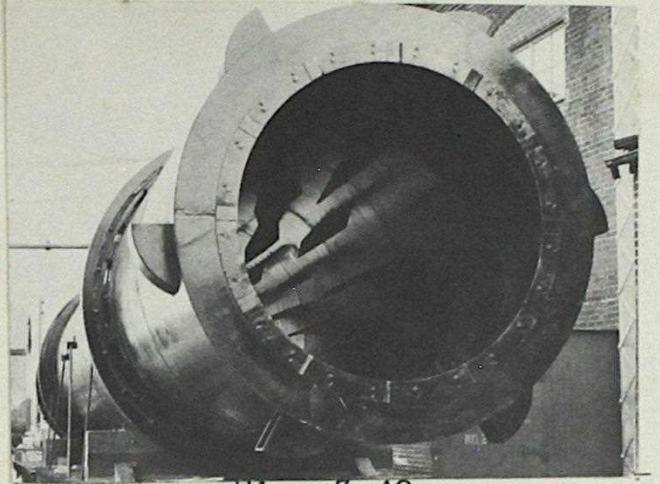
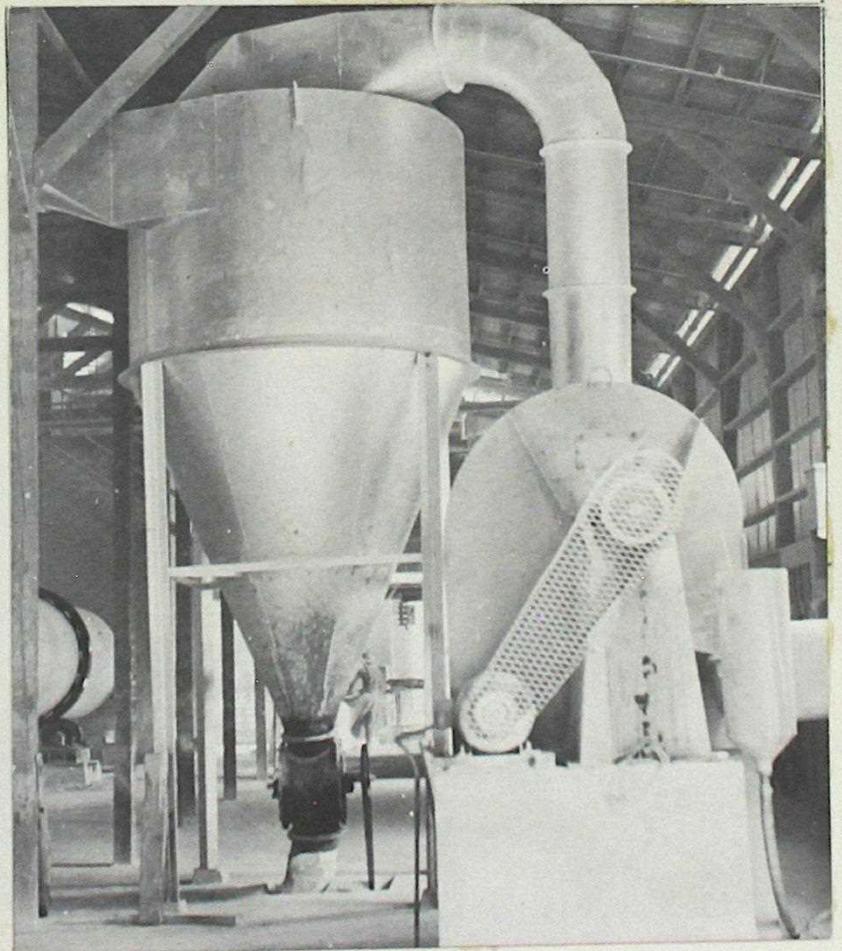


Fig. 3.49

Fig. 3.50



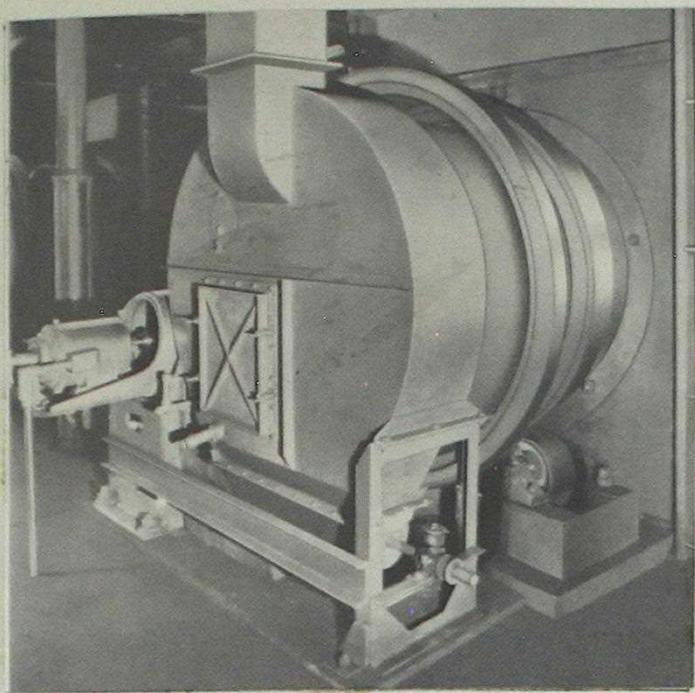


Fig. 3.56



Fig. 3.57

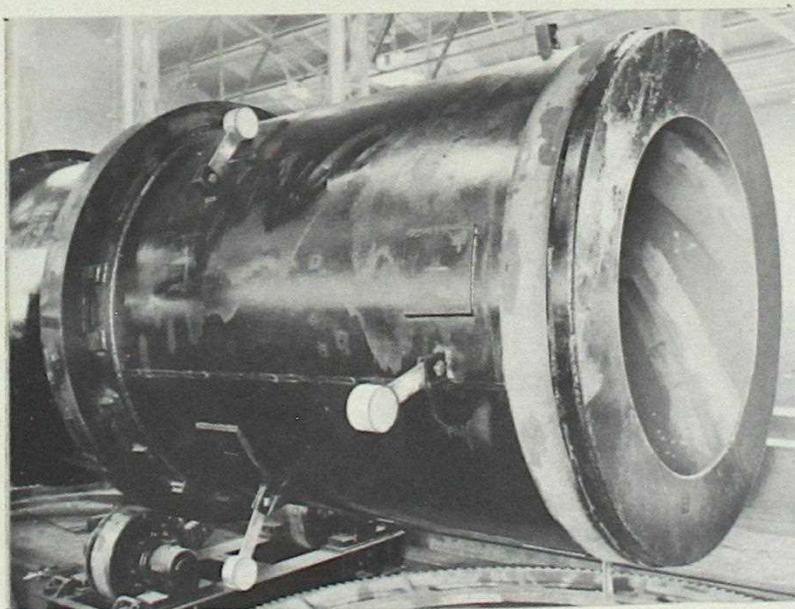


Fig. 3.58

- 3.21.4 Cierre hermético del secador.- Para cerrar herméticamente el cilindro rotativo en los extremos en los cuales se admiten los gases calientes y el material, se emplean varios métodos, cuyos objetivos son impedir la infiltraciones de aire al cilindro evitar las pérdidas de material.(Figs. 3.36 ; 3.52 y 3.53)
- 3.21.5 Descarga.- Mediante las Figs. 3.54 ; 3.55 y 3.56 se aprecia las diferentes modalidades empleadas en la industria para descargar del secador el producto seco.
- 3.21.6 Golpeadores.- Algunos materiales debido a su humedad u otra propiedad física, se adhieren al cilindro secador y a las aletas, lo cual reduce la efectividad del secado. Este inconveniente se ha resuelto colocando golpeadores tal como los indicados en las Figs. 3.57 y 3.58, en las zonas donde se presenta la adhesión de material.(10, 15)

3.22 Bibliografía (Consultada)

- (1) Allis-Chalmers., Milwaukee 1, Wisconsin., "Rotary Kilns" Bull. 07B6368A
- (2) Badger, W.L; Banchemo, J.T; Introduction to Chemical Engineering, pags 468-520, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1956)
- (3) Bartlett-Snow Co (The), Cleveland 5, Ohio, "Rotary Dryers-Coolers, Calciners, Kilns", Bull. N° 118
- (4) Bayard, R.A; "New Formula developed for Kiln time", Chemical & Metallurgical Engineering, 52, 100-102, (1945)
- (5) Clark, W.E; Lapple, W.S; "Drying, methods & equipment", Chemical Engineering, Vol. 62, October (1955)
- (6) Clark, W.E; Lapple, W.S; "Drying, design & costs", Chemical Engineering, Vol. 62, November, (1955)
- (7) Erisman, J.L; "Roto-Louvre Dryer", Industrial and Engineering Chemistry, 30, 996-997, (1938)
- (8) Friedman, S.J; Marshall, W.R; "Studies in rotary drying, Part I Holdup and Dusting", Chemical Engineering Progress, 45, 482-493, (1949)
- (9) Friedman, S.J; Marshall, W.R; "Studies in rotary drying, Part II, Heat and Mass transfer", Chemical Engineering Progress, 45, 573-588, (1949)
- (10) Hardinge Co, York, Pennsylvania, "Ruggles-Coles Dryers, Heaters and Coolers", Bull. N° 16-E
- (11) Link-Belt Co, "Roto-Louvre", Book 2511
- (12) McCormick, P.Y; "Drying", Industrial and Engineering Chemistry, 53, 583-585, (1961)
- (13) McKinney, A.H; "Control Solids-Drying Equipment", Chemical Engineering, 68, 79-82, (1961)
- (14) Mitchell, T.R; Saeman, W.C; "Analysis of rotary dryer and cooler performance", Chemical Engineering Progress, 50, 467-475, (1954)

- (15) Perry, J.H; Manual del Ingeniero Químico, Tomo I, pags 1239-1381, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana (UTEHA), México, 1958
- (16) Renneburg (Edw) & Sons Co, Baltimore 24, Md., "Renneburg Dehydro-Mat", Bull. D.959
- (17) Smith, B.A; "Rotary Dryers", Industrial and Engineering Chemistry, 30, 993-995, (1938)
- (18) Spraul, J.R; "Rotary dryer operation", Industrial and Engineering Chemistry, 17, 368-374, (1955)
- (19) Standard Steel Corp., Los Angeles 58, California, Bull.159 "Dryers, Kilns, Coolers"
- (20) Treybal, R.E; Mass-Transfer Operations, pags 524-583, McGraw Hill Book Co., Inc., New York, (1955)

.23 Bibliografía (Citada en el desarrollo del trabajo por algunos de los autores consultados)

- (1c) Alliot, C.E; J.Soc.Chem.Ind.(London), 38, 173, (1919)
- (2c) Ginstling, A.M; Gvozdev, N.V; Zil'berman, D.M; Khim.Mashinostroenie, N^o 8,8, (1939)
- (3c) Furnas, C.C; U.S.Bur.Mines, Bull 361, (1932)
- (4c) Hoftijzer, P.J; Krevelen, D.W; J.Soc.Chem.Ind,(London), 68, 91, (1949)
- (5c) Horgan, T.J; Trans.Inst.Chem.Engrs.(London), 6, 131, (1928)
- (6c) Johnstone, H.F; Singh, A.D; Bull.Univ.Illinois 324, pag 56, (1940)
- (7c) Maier, G.C; Ralston, O.C; Sullivan, J.D; U.S.Bur.Mines, Tech. paper 384, (1927)
- (8c) Miller, C.O; Schuette, W.H; Smith, B.A; Trans.Am.Inst.Chem. Engrs, 38, 841, (1942)
- (9c) Miller, C.O; Prutton, C.F; Schuette, W.H; Trans.Am.Inst.Chem. Engrs, 38, 123, (1942)
- (10c) Redmond, D.J; Sturges, R.A; Thesis, Case Institute of Technology, (1942)
- (11c) Smith, B.A; Trans.Am.Inst.Chem.Engrs, 38, 251, (1942)

Capítulo 4

SECADOR DE BANDEJAS.

4.1 Clasificación.- Considerando la forma de transmitir el calor al material, estos secadores de operación discontinua pueden dividirse en:

4.1.1 Secador de bandejas de calentamiento indirecto.- Generalmente es conocido como "Secador de vacío con anaqueles" y está formado por una cámara herméticamente cerrada, construída con fierro fundido o de láminas de acero, conectada a un condensador y éste a una fuente productora de vacío. (Fig. 4.1). La cámara de vacío está provista de anaqueles huecos fijos a ella, conectados en paralelo a colectores de entrada y salida. (Fig. 4.2)

El material a ser secado es esparcido sobre bandejas, que a su vez, se ponen sobre los anaqueles calentados con vapor, agua caliente o electricidad, después de lo cual se cierra la puerta de la cámara, haciéndose operar la fuente de vacío. (4, 6)

La desecación al vacío constituye el único método mediante el cual ciertas sustancias pueden ser deshidratadas, a fin de que obtengan la suficiente utilidad y estabilidad para almacenarse sin deterioro. Esa fase de elaboración al vacío ya ha adquirido amplia importancia esencial, pero sus potencialidades han sido probablemente explotadas sólo en un grado insignificante. La diversidad de los problemas de secado es tal que en la industria se les ha clasificado en varias subdivisiones como sigue:

- (1) Secado en vacío en la ausencia de aire.- La destilación de solventes útiles para recobrarlos, tales como alcohol, éter, hexano, tetracloruro de carbono, y otros más. Semejante recuperación reduce el costo final del producto principal, y los solventes se vuelven a utilizar otra vez. La destilación al alto vacío del producto mismo se ejemplifica por la recuperación de aceites volátiles, aromáticos, y la extracción de alimentos y drogas.
- (2) Secado al vacío a bajas temperaturas.- El secado a bajas temperaturas de alimentos, sustancias químicas y farmacéuticas en todos aquellos casos en los que los productos son afectados por el calor y puedan deteriorarse si se tratan a la temperatura ambiente o muy elevada. Semejante tratamiento puede efectuarse a una temperatura hasta de 0°C. La concentración al vacío de sustancias químicas y drogas encuadra en esta clasificación.
- (3) Eliminación de la humedad congelada por sublimación en vacío a bajas temperaturas.- Los productos congelados pierden su contenido de humedad, mediante la sublimación real del agua congelada a bajas temperaturas menores de 0°C y bajo alto vacío. Los ejemplos clásicos son el secado de plasma de la sangre sin deteriorarlo durante el procedimiento y preservarlo para un prolongado almacenaje; la destilación de valiosas vitaminas; el secado de huesos humanos vivos para los "bancos de huesos"; el secado de las hormonas; estreptomycin y demás productos similares

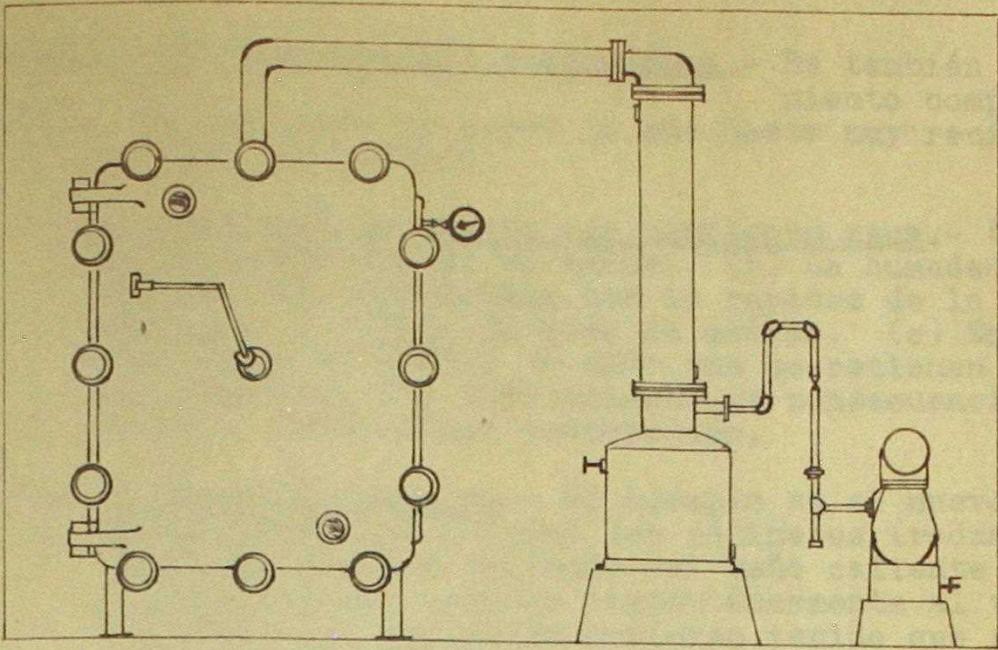


FIG. 4.1

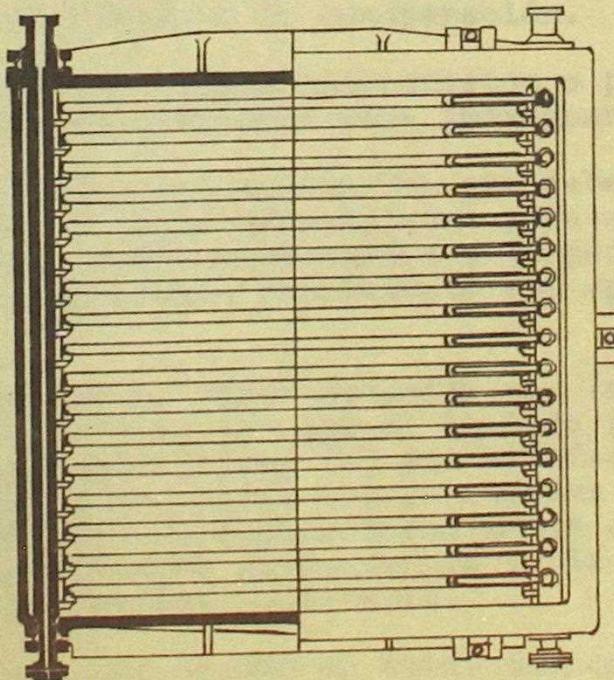
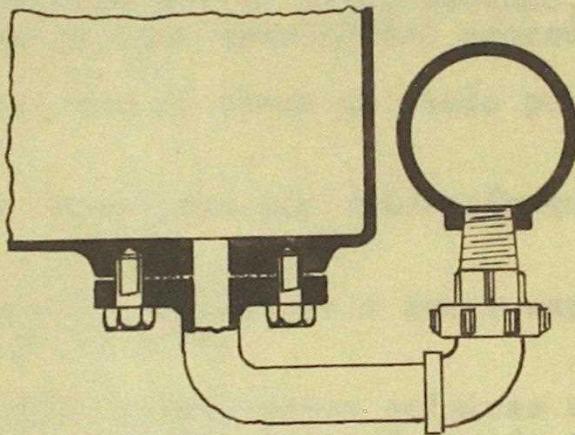


FIG. 4.2

(4) Secado por vaporización instantánea.- Es también un procedimiento completamente nuevo que facilita el hacer lo que hasta muy recientemente se consideró imposible:

- (i) La expansión de dulces que contienen agua.- (a) El azúcar es plastificada al calor. (b) La humedad es expandida tan bruscamente que la rapidez de la evaporación desfigura y dilata la masa de azúcar. (c) Enfriamiento que fragua el azúcar de modo que se retienen las burbujas internas. Ese enfriamiento es consecuencia de la rápida o instantánea evaporación.
- (ii) Limpieza de metales.- Un ejemplo es el nuevo procedimiento mediante el cual los cojinetes (rodamientos) "Timken" que van saliendo del baño caliente de lavado y limpieza son secados instantáneamente al vacío. Sin el vacío los cojinetes hubieran tenido que soportar el tedioso procedimiento de secamiento en hornos para eliminarles la humedad retenida en los espacios profundamente escondidos y protegidos por la masa de metal que los rodea

Las subdivisiones indicadas anteriormente, han sido impuestas por las características necesarias de la índole individual de cada problema de secado, la que a su vez, obedece al efecto que pueda tener sobre los materiales que se están secando, el resultado final, la eficiencia y capacidad que resulte del procedimiento.

Las materias que se secan al vacío pueden agruparse de la siguiente manera:

- (1) Las que se deterioran por oxidación cuando se exponen al aire.
- (2) Las que pueden incendiarse o hacer explosión al entrar en contacto con el aire.
- (3) Las que sufren alteraciones químicas al exponérseles a las temperaturas normales para el secado al aire.
- (4) Aquellas que contienen solventes de tal valor que justifiquen un procedimiento de recuperación.
- (5) Aquellos sólidos cuyos intersticios o poros deben secarse como medida preparatoria para impregnarlos.
- (6) Aquellas sustancias inestables que deben secarse mediante congelación a bajas temperaturas para que se conserven durante largo tiempo almacenadas a temperaturas normales, y que se reconstituyan rápidamente con agua

De lo anterior es fácil apreciar que las razones principales para secar al vacío son: (a) que el trabajo puede ejecutarse a temperaturas relativamente bajas; (b) sin el efecto contaminador o destructivo del oxígeno del aire; (c) la rapidez con que se seca debido al elevado gradiente de temperaturas entre el medio calefactor y el producto, y también como consecuencia de la aceleración de la vaporización a bajas presiones absolutas.

Las ventajas del secado al vacío son consecuencia de lo antedicho:

- (1) Economía de tiempo, en la realización del secado.
- (2) Conservación de la utilidad original del producto que de otro modo podría perderse
- (3) Recuperación de solventes valiosos, que con otra clase de secado se perderían
- (4) El contenido de humedad bajo y uniforme con que se obtienen los productos secos. (5)

Para mayores antecedentes véase:

- Ardern, D.B; Ernst, R.C; Schmied, O.K; Tiller, F.M; "Drying commercial solids" Ind.Eng.Chem., 30, 1119-1122, (1938)
- Ernst, R.C; Ridgway, J.W; Tiller, F.M; "Practical vacuum drying" Ind.Eng.Chem., 30, 1122-1125, (1938)
- Perry: pags. 1324-1327 (Ver Bibliografía)

4.1.2 Secador de bandejas de calentamiento directo.- Consiste esencialmente en una cámara rectangular de paredes aisladas, provista de bandejas para soportar el sólido húmedo esparcido sobre ellas. En este tipo de secador se establece un contacto directo entre el material a secar y el medio secante utilizado, pudiendo este último circular paralelamente a la superficie del material o a través de ella, dependiendo del diseño del equipo. (Figs. 4.3 y 4.4)

Los secadores con circulación de aire paralela a la superficie pueden ser del tipo de bandejas en carretillas o fijas. En el primero, las bandejas se cargan en carretillas que se empujan dentro del secador. (Figs. 4.5 y 4.6), y en el segundo, las bandejas se colocan directamente sobre soportes fijos a las paredes laterales del secador. (Figs. 4.3 y 4.4).

Las bandejas pueden construirse de cualquier material compatible con las condiciones que imperan en el secador desde el doble punto de vista de la corrosión y la temperatura, pudiendo tener su fondo perforado o consistir en una malla metálica para suministrar una superficie adicional de desecación, cuando las características del material y su manejo así lo permiten.

Los secadores de bandeja pueden utilizarse para secar una gran variedad de materiales, pero su uso es limitado porque su funcionamiento resulta costoso. Se aplican para secar pequeñas cargas de materiales y para los estudios relacionados con las plantas pilotos. (6)

Parte de la teoría del secado correspondiente a este equipo, ha sido expuesta en el Capítulo I, y el resto del estudio a realizarse estará dedicado al secador de bandejas con circulación de aire paralela a la superficie del material depositado sobre las bandejas.

4.2 Transmisión de calor. (Fig 4.7).- En un secador de bandejas con circulación de gas paralela a la superficie del material que se está secando, el calor puede transmitirse a la superficie húmeda de tres modos:

- por convección desde la corriente de gas.
- por radiación desde las paredes del secador o bandejas vecinas.
- por conducción a través del sólido.

- (1) Economía de tiempo, en la realización del secado.
- (2) Conservación de la utilidad original del producto que de otro modo podría perderse
- (3) Recuperación de solventes valiosos, que con otra clase de secado se perderían
- (4) El contenido de humedad bajo y uniforme con que se obtienen los productos secos.(5)

Para mayores antecedentes véase:

- . Ardern, D.B; Ernst, R.C; Schmied, O.K; Tiller, F.M; "Drying comercial solids" Ind.Eng.Chem., 30, 1119-1122, (1938)
- . Ernst, R.C; Ridgway, J.W; Tiller, F.M; "Practical vacuum drying" Ind.Eng.Chem., 30, 1122-1125, (1938)
- . Perry: pags. 1324-1327 (Ver Bibliografía)

4.1.2 Secador de bandejas de calentamiento directo.- Consiste esencialmente en una cámara rectangular de paredes aisladas, provista de bandejas para soportar el sólido húmedo esparcido sobre ellas. En este tipo de secador se establece un contacto directo entre el material a secar y el medio secante utilizado, pudiendo este último circular paralelamente a la superficie del material o a través de ella, dependiendo del diseño del equipo. (Figs. 4.3 y 4.4)

Los secadores con circulación de aire paralela a la superficie pueden ser del tipo de bandejas en carretillas o fijas. En el primero, las bandejas se cargan en carretillas que se empujan dentro del secador.(Figs. 4.5 y 4.6), y en el segundo, las bandejas se colocan directamente sobre soportes fijos a las paredes laterales del secador. (Figs. 4.3 y 4.4).

Las bandejas pueden construirse de cualquier material compatible con las condiciones que imperan en el secador desde el doble punto de vista de la corrosión y la temperatura, pudiendo tener su fondo perforado o consistir en una malla metálica para suministrar una superficie adicional de desecación, cuando las características del material y su manejo así lo permiten.

Los secadores de bandeja pueden utilizarse para secar una gran variedad de materiales, pero su uso es limitado porque su funcionamiento resulta costoso. Se aplican para secar pequeñas cargas de materiales y para los estudios relacionados con las plantas pilotos.(6)

Parte de la teoría del secado correspondiente a este equipo, ha sido expuesta en el Capítulo I, y el resto del estudio a realizarse estará dedicado al secador de bandejas con circulación de aire paralela a la superficie del material depositado sobre las bandejas.

4.2 Transmisión de calor.(Fig 4.7).- En un secador de bandejas con circulación de gas paralela a la superficie del material que se está secando, el calor puede transmitirse a la superficie húmeda de tres modos:

- . por convección desde la corriente de gas.
- . por radiación desde las paredes del secador o bandejas vecinas.
- . por conducción a través del sólido.

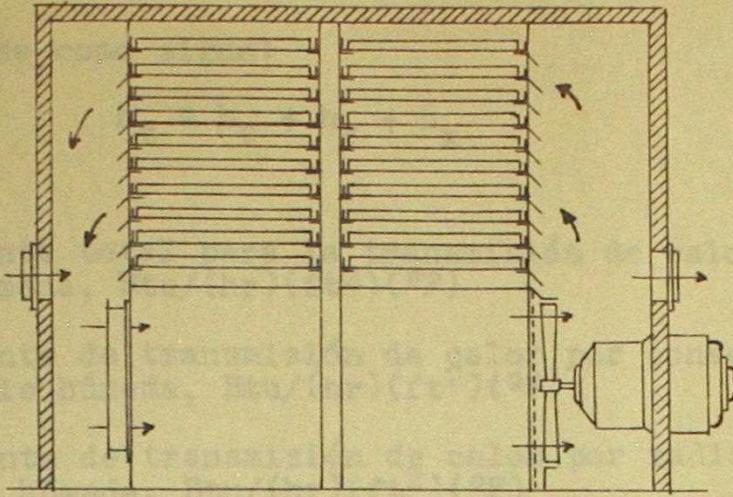


FIG. 4.3

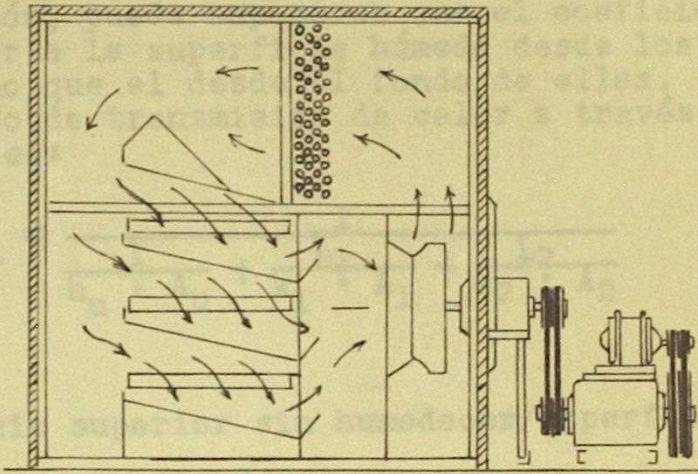


FIG. 4.4

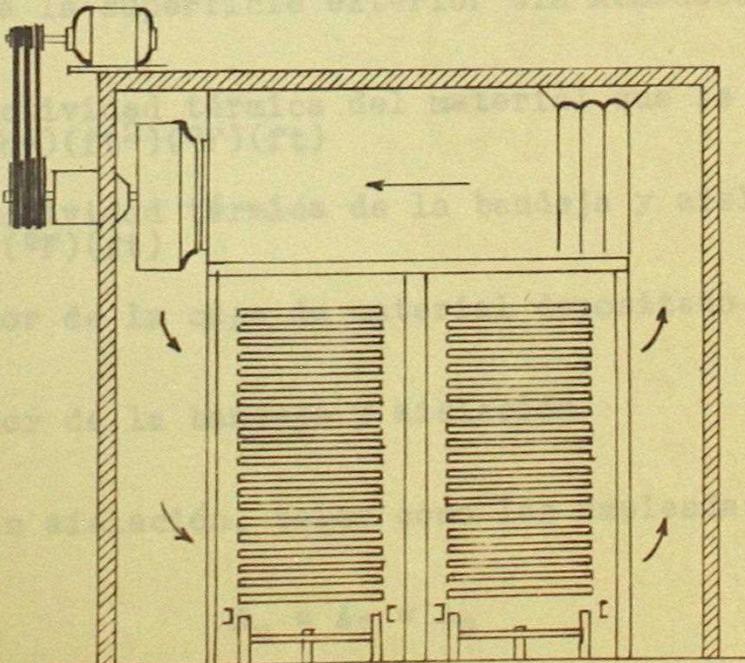


FIG. 4.5

esto puede expresarse como sigue:

$$h_t = h_c + h_r + h_x \quad (4-1)$$

donde:

h_t = coeficiente total para la transmisión de calor a la superficie húmeda, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$

h_c = coeficiente de transmisión de calor por convección a la superficie húmeda, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$

h_r = coeficiente de transmisión de calor por radiación a la superficie húmeda, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$
es igual al coeficiente h_r' , dado por las fórmulas para radiación, corregido a la misma base que h_c para lo cual es preciso multiplicarlo por $(t_G - t_s)/(t_w - t_s)$

h_x = coeficiente completo de transmisión de calor (over-all heat transfer coefficient), $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$

Como una aproximación, puede suponerse que el coeficiente completo de transmisión de calor a la superficie húmeda desde los lados de las bandejas es el mismo que el desde el fondo de ellas. Entonces el coeficiente completo de transmisión de calor a través de las superficies sin humedecer es:

$$h_x = \frac{1}{\frac{1}{h_u \cdot A_u} + \frac{L_1}{k_1 \cdot A_1} + \frac{L_2}{k_2 \cdot A_2}} \quad (4-2)$$

en la cual:

A_u = superficie superior sin humedecer/superficie húmeda.

A_1 = superficie inferior sin humedecer/superficie húmeda.

$$A_2 = \frac{A_u + A_1}{2}$$

h_u = coeficiente de transmisión de calor por convección y radiación a la superficie exterior sin humedecer, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$.

k_1 = conductividad térmica del material que se está secando, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})(\text{ft})$

k_2 = conductividad térmica de la bandeja y aislación, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})(\text{ft})$

L_1 = espesor de la capa de material depositado sobre la bandeja, ft

L_2 = espesor de la bandeja y aislación

Para bandejas sin aislación, tales como las empleadas generalmente en la práctica:

$$A_u = A_1 = A_2$$

Además, la resistencia a la conducción del calor a través de la bandeja cuando esta es de metal, prácticamente es despreciable y la expresión (4-2) se reduce a:

$$h_x = \frac{1}{\frac{1}{h_u \cdot A_u} + \frac{L_1}{K_1 \cdot A_u}} \quad (4-3)$$

$$h_x = \frac{A_u}{\frac{1}{h_u} + \frac{L_1}{k_1}} \quad (4-4)$$

En la ecuación (4-2) A_u , A_1 , A_2 , L_1 y L_2 son conocidos para cualquier caso y k_2 puede obtenerse desde tablas, k_1 es el valor más difícil de obtener, pero una vez que su valor es conocido o estimado, el único factor desconocido de la expresión es h_u . Ambas ecuaciones (4-2) y (4-4) pueden expresarse como sigue:

$$h_x = \frac{A_u}{\frac{1}{h_u} + C} \quad (4-5)$$

$$h_x = \frac{A_u \cdot h_u}{1 + C \cdot h_u} \quad (4-6)$$

donde C es una constante dependiente de las conductividades térmicas del material y la bandeja; entonces en el caso general:

$$C = \frac{L_1 \cdot A_u}{k_1 \cdot A_1} + \frac{L_2 \cdot A_u}{K_2 \cdot A_2} \quad (4-7)$$

Sustituyendo h_x en (4-1) se obtiene la siguiente ecuación:

$$h_t = h_c + h_r + \frac{A_u \cdot h_u}{1 + C \cdot h_u} \quad (4-8)$$

Es razonable suponer que el coeficiente por convección será el mismo para ambas superficies, húmeda y sin humedecer. Además en la mayoría de los secadores industriales la radiación hacia y desde una bandeja es prácticamente cero, luego la ecuación (4-8) se simplifica a:

$$h_t = h_c + \frac{A_u \cdot h_c}{1 + C \cdot h_c} \quad (4-9)$$

$$h_t = h_c \left(1 + \frac{A_u}{1 + C \cdot h_c} \right) \quad (4-10)$$

La ecuación (4-10) muestra que para tener el coeficiente total de transmisión de calor, es necesario multiplicar el coeficiente de transmisión de calor por convección por el factor:

$$\left(1 + \frac{A_u}{1 + C \cdot h_c} \right)$$

Si la radiación a la bandeja es un factor importante, una aproximación de este efecto se obtiene suponiendo el mismo valor de h_r para ambas superficies: húmeda y sin humedecer. En este caso la ecuación (4-10) se reduce a:

$$h_t = (h_c + h_r) \left[1 + \frac{A_u}{1 + C (h_c + h_r)} \right] \quad (4-11)$$

En realidad, h_r puede ser ligeramente diferente para las superficies húmeda y sin humedecer, puesto que la temperatura de la segunda superficie será más alta, dependiendo de la conductividad térmica del material, bandeja y aislación.

Para bandejas de metal sin aislación, la diferencia en el coeficiente de radiación no será suficiente para afectar el valor de h_t apreciablemente y la ecuación (4-11) será satisfactoria.

Las ecuaciones (4-10) y (4-11) muestran la posibilidad de poder pronosticar la velocidad de secado durante el período de velocidad constante, en un secador de bandejas, en caso de disponer del coeficiente de transmisión de calor por convección.(1). (Fig. 4.8)

4.3 Secado con vapor recalentado como medio secante.- El uso del vapor recalentado como medio secante para la desecación de sólidos granulares en lugar de aire, no modifica las características generales del proceso de desecación y ha sido recomendado como un método de secado sumamente eficiente por varios autores (4c, 5c, 6c), pero su uso comercial ha sido limitado (1c, 5c) por la carencia de equipo apropiado.

"Gilliland, Lewis, McAdams, Walker"(2c) mencionan brevemente sus ventajas, mientras que "Hausbrand"(3c) y "Ungewitter"(7c) han discutido sus ventajas termodinámicas con respecto al aire.

En la Fig. 4.9 se muestra los resultados obtenidos en el secado de arena (Ottawa sand) empleando vapor recalentado y aire respectivamente.

El coeficiente de transmisión de calor por convección a la superficie de la muestra durante el período de velocidad constante fué correlacionado con las propiedades del sistema usando una ecuación de la forma:

$$\left| \frac{h_c}{c_p G} \right| \left| \frac{c_p \mu}{k} \right|^{2/3} = a \left| \frac{L G}{\mu} \right|^n \quad (4-12)$$

tal como la propuesta por A.P.Colburn., Trans.Am.Inst.Chem.Engrs.,29, 174-210,(1933) y en la cual:

c_p = calor específico, Btu/(lb)(°F)

G = velocidad de masa, lb/(hr)(ft²)

h_c = coeficiente de transmisión de calor por convección, Btu/(hr).(ft²)(°F)

k = conductividad térmica, Btu/(hr)(ft²)(°F)(ft)

L = longitud de la superficie de la muestra paralela a la dirección del flujo, ft

μ = viscosidad, lb/(ft)(hr)

a = constante

b = constante

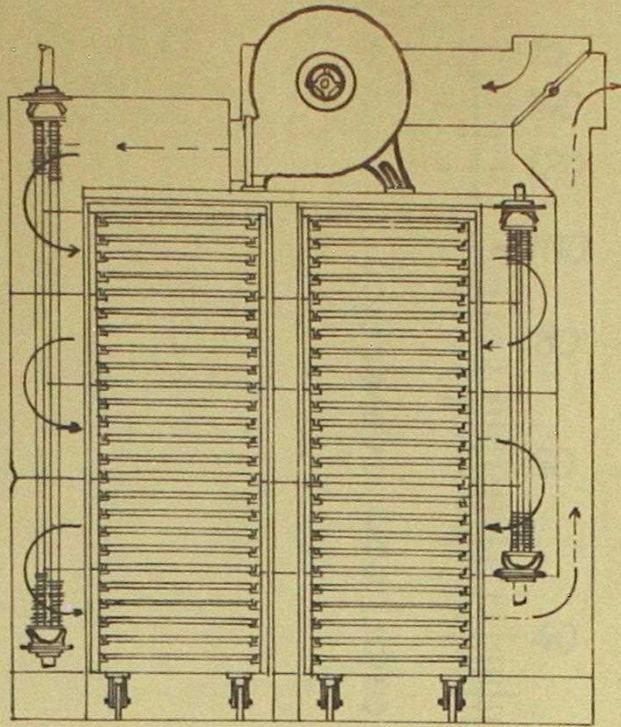


FIG. 4.6

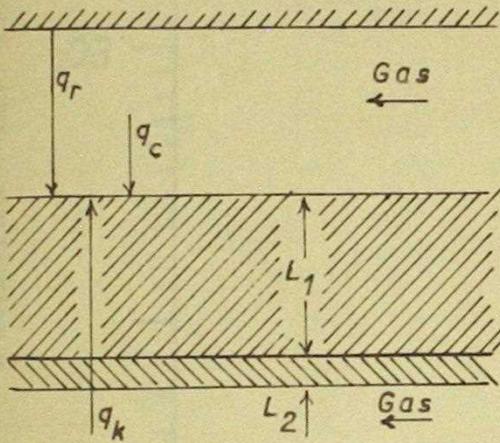


FIG. 4.7

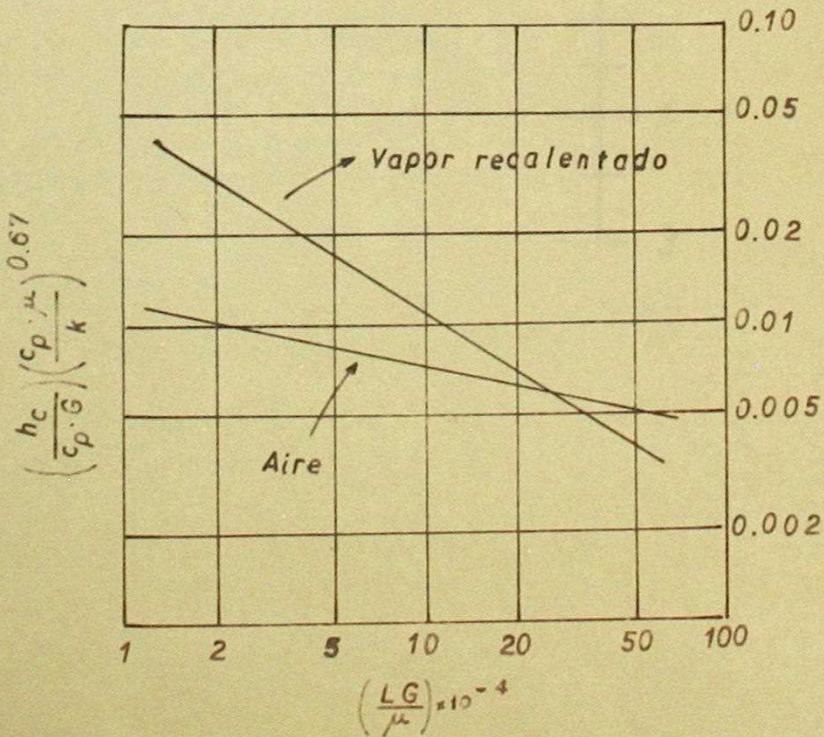
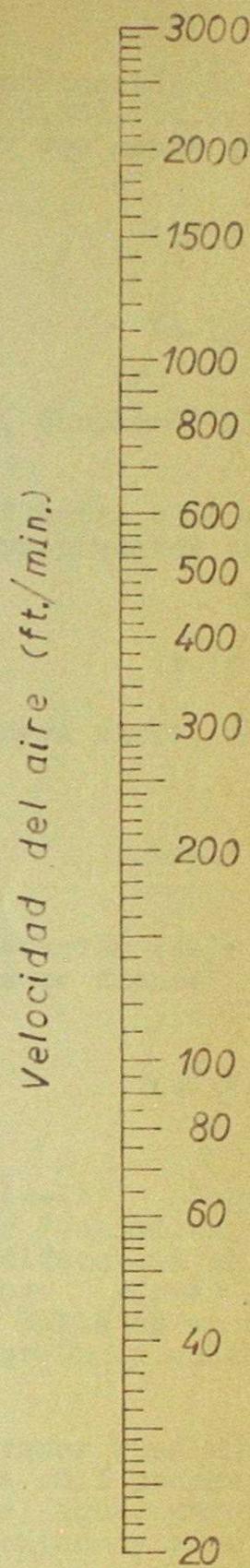
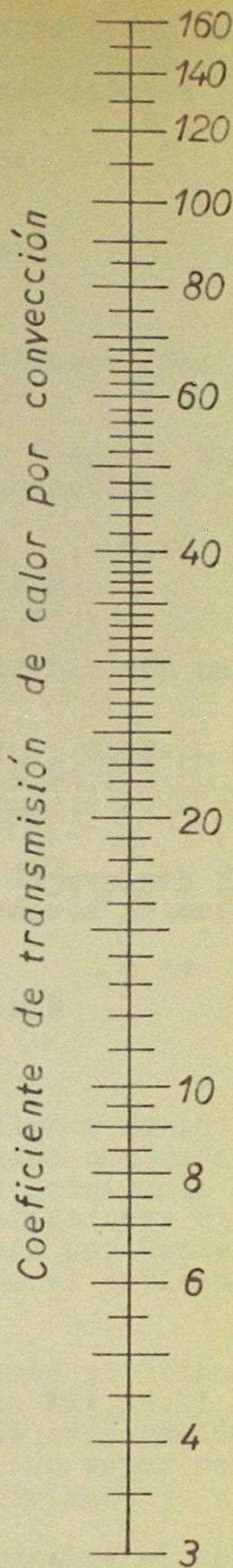
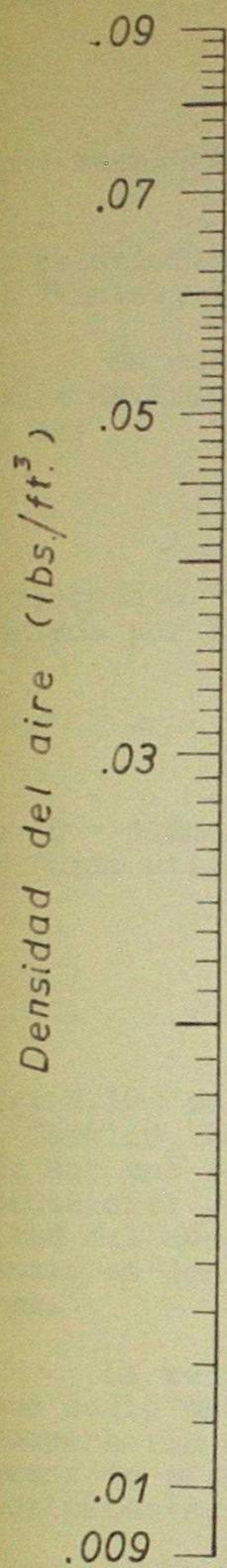


FIG. 4.9



La línea para el secado con aire tiene una inclinación de (- 0,25), mientras que la obtenida para el vapor es (- 0,65), lo que permite expresar el coeficiente de transmisión de calor por convección h_c como:

$$\text{(aire)} \quad h_c = f(G)^{0,75} \quad (4-13)$$

$$\text{(vapor recalentado)} \quad h_c = f(G)^{0,35} \quad (4-14)$$

Estas relaciones fueron obtenidas por "Brewer, Hadlock, Shepherd"(aire) y "Wenzel, White"(vapor recalentado)

La correlación encontrada por "Wenzel, White" entre el coeficiente de transmisión de calor por convección y las propiedades del vapor es:

$$\left(\frac{h_c}{c_p G} \right) \left| \frac{c_p \mu}{k} \right|^{2/3} = 18,8 \left(\frac{L G}{\mu} \right)^{-0,65} \quad (4-15)$$

posteriormente "Chu, Conklin, Lane" determinaron una nueva curva, representada por la ecuación:

$$\left(\frac{h_c D}{k} \right) \left| \frac{c_p \mu}{k} \right|^{-1/3} = 5,90 \left(\frac{D G}{\mu} \right)^{0,50} \quad (4-16)$$

donde D = diámetro equivalente, ft. Expresando la ecuación (4-16) en la forma utilizada por los investigadores anteriores se tiene:

$$\left(\frac{h_c}{c_p G} \right) \left| \frac{c_p \mu}{k} \right|^{2/3} = 10,5 \left(\frac{L G}{\mu} \right)^{-0,57} \quad (4-17)$$

En Fig. 4.10 se ha graficado las ecuaciones (4-15) y (4-17). Según "Chu, Conklin, Lane", la técnica de pesada empleada por "Wenzel, White" podría ser una posible fuente de error, originando la diferencia entre las ecuaciones propuestas por los investigadores citados. Además la magnitud del número de Reynolds utilizado por Wenzel y White en su experiencia es considerablemente mayor que el empleado por Chu y colaboradores.

La ventaja que podría alcanzarse utilizando vapor recalentado como medio secante es ilustrada en la Fig. 4.11, la cual presenta una comparación entre las velocidades de evaporación del agua, para los casos de efectuar las experiencias con vapor recalentado y aire respectivamente, ambas a presión atmosférica.

En las Figs. 4.12 y 4.13 se muestra el consumo de calor necesario para el secado, cuando se emplea vapor recalentado y aire separadamente. La Fig. 4.12 es para secado en condiciones adiabáticas, mientras que la Fig. 4.13 es para condiciones isotérmicas.

Con los antecedentes expuestos se puede afirmar que las velocidades de secado obtenidas con vapor recalentado son mayores que las conseguidas con aire como medio secante, excepto cuando la temperatura de operación es cercana a la temperatura de saturación del líquido. (1, 3, 7)

4.4 Secado con mezclas de vapor recalentado y aire como medio secante.

"Chu, Finelt, Hoerrner" han encontrado que en una operación de secado realizada con aire como agente secante, la velocidad de secado aumenta rápidamente con la adición de vapor recalentado, hasta un porcen-

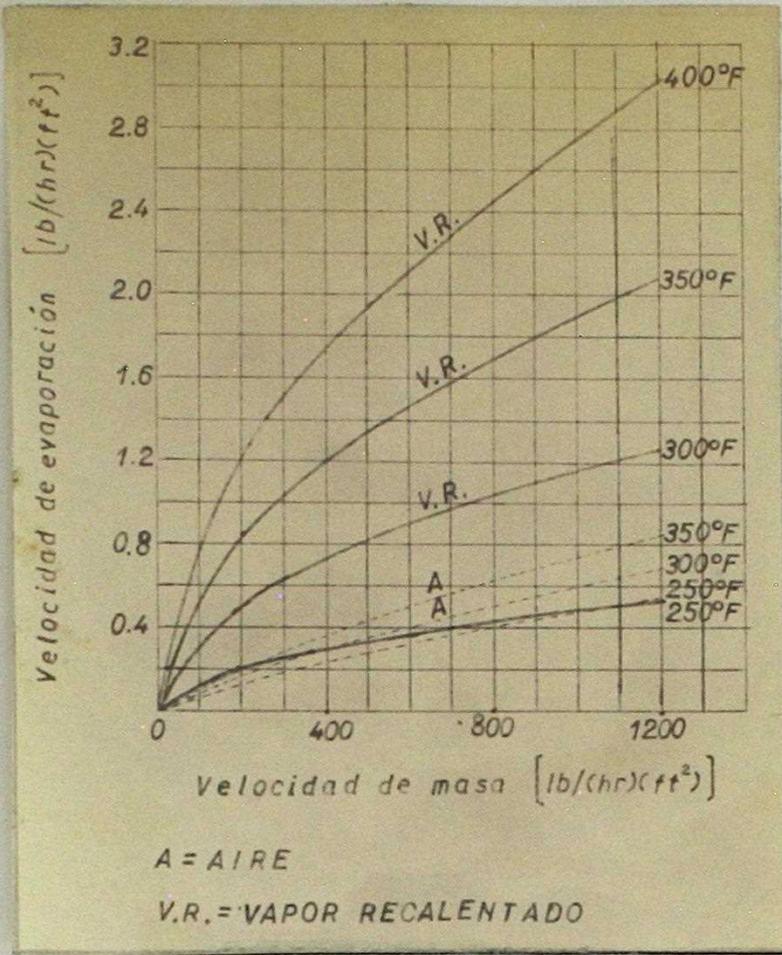


Fig. 4.11

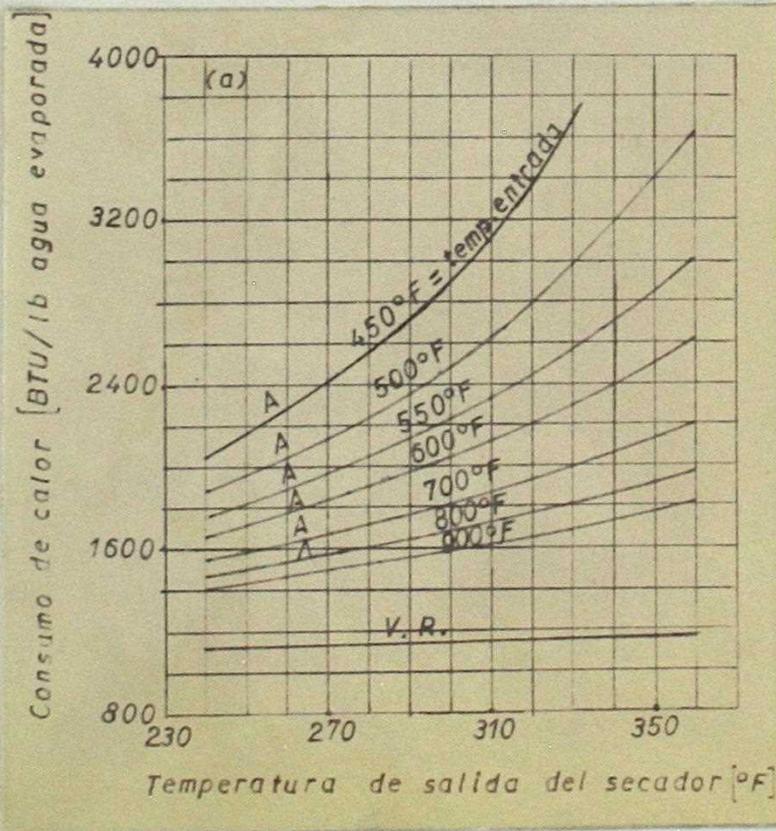


Fig. 4.12

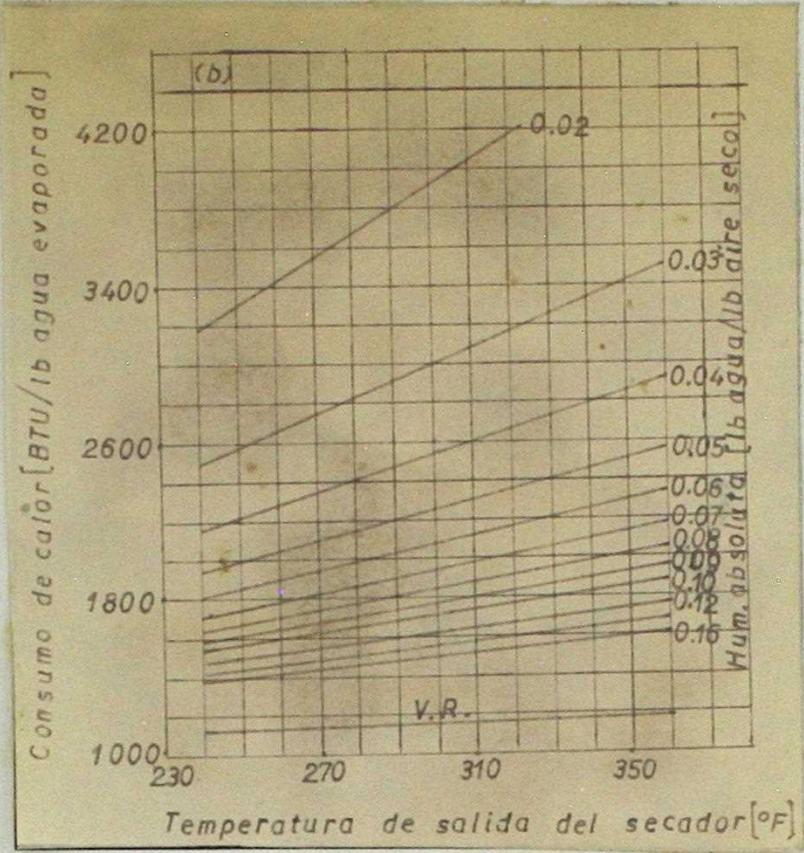


Fig. 4.13

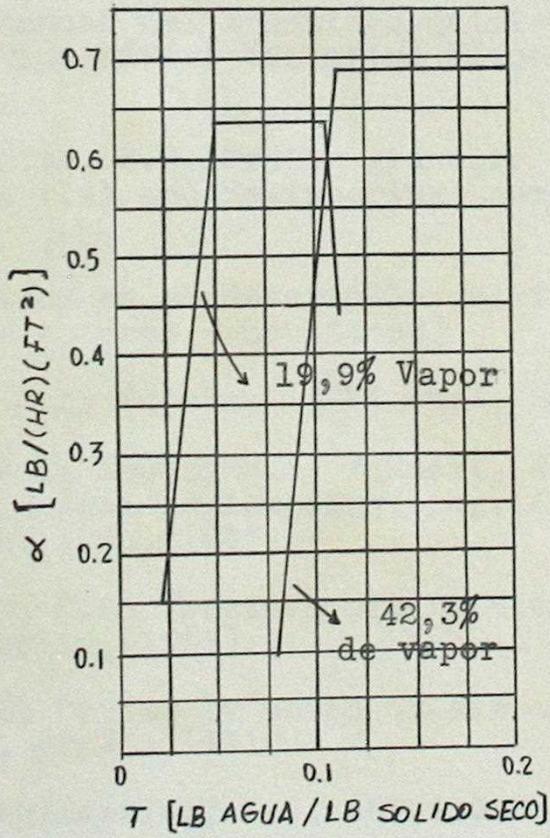


Fig. 4.14

taje cercano al 50%, lo cual señala que mezclas de aire y vapor recalentado constituyen un medio secante más eficiente que el aire, pero en todo caso inferior al vapor recalentado sólo. Sin embargo mezclas con más de 50% de vapor recalentado no muestran apreciable beneficio en la velocidad de secado durante el período de velocidad constante, mientras que en el período de velocidad decreciente el aire es superior a la mezcla.

En la Fig. 4.14 se muestra el efecto que tiene en la velocidad de secado la variación del porcentaje de vapor en la mezcla "aire-vapor recalentado".(2)

4.5 Bibliografía (Consultada)

- (1) Brewer, R.C; Hadlock, C; Shepherd, C.B; "Drying materials in trays", Industrial and Engineering Chemistry, 30, 388-397, (1938)
- (2) Chu, J.C; Finelt, S; Hoerrner, W; Lin, M; "Drying with superheated steam-air mixtures", Industrial and Engineering Chemistry, 51, 275-280, (1959)
- (3) Chu, J.C; Conklin, D; Lane, A.M; "Evaporation of liquids into their superheated vapor", Industrial and Engineering Chemistry, 45, 1586-1591, (1953)
- (4) Devine (J.P.) Mfg., Co., Pittsburgh, Pa. "Devine Drying Equipment", Bull. N° 201
- (5) El Exportador Americano Industrial, (Informe especial), "Usos industriales del vacío"
- (6) Perry, J.H; Manual del Ingeniero Químico, Tomo I, pags. 1239-1381, Union Tipográfica Editorial Hispano Americana (UTEHA), México, 1958
- (7) Wenzel, L; White, R.R; "Drying granular solids in superheated steam", Industrial and Engineering Chemistry, 43, 1829, (1951)

4.6 Bibliografía (Citada en el desarrollo del trabajo por algunos de los autores consultados)

- (1c) Bainbridge, J.R; Satchwell, K; Fuel, 26, 28, (1947)
- (2c) Gilliland, E.R; Lewis, W.K; McAdams, W.H; Walker, W.H; Principles of Chemical Engineering, pag. 635, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1937)
- (3c) Hausbrand, E; "Das Trocknen mit Luft und Dampf", Julius Springer, Berlin, (1908)
- (4c) Hausbrand, E; Drying by means of air and steam, Scott, Greenwood & Sons, London, (1912)
- (5c) Kaner, O; Engineering, 110, 821, (1920)
- (6c) Lane, A.M; Stern, S; Mech. Eng., 78, 423, (1956)
- (7c) Ungewitter, C; Science and Salvage, Crosley Lockwood and Son, London, 1944

Capítulo 5

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

5.1 El propósito del trabajo y los principios teóricos del secado mediante secador rotatorio, han sido expuestos en el capítulo 3.

5.2 Aparato.- Es un secador rotatorio de calentamiento directo de 9 ft de largo y 1 ft de diámetro, en el cual el material es alimentado mediante un tornillo sin fin, accionado directamente por el cilindro rotatorio, a través del cual el material circula en contracorriente al movimiento del aire calefaccionado con serpentines de vapor. En la zona de alimentación de material, el cilindro tiene 4 aletas en espiral que cubren una longitud de 12", y el resto del mismo está provisto de 4 aletas radiales continuas.

5.3 Procedimiento.-

- (1) Antes de iniciar cualquier experiencia se procedía a fijar la inclinación a la cual iba a trabajar el secador, utilizando una gata, a la vez que se controlaba la inclinación con una escala graduada que está colocada a 1 mt. del punto en torno al cual se realiza el movimiento de inclinación.
- (2) Se observaba si la correa en "V" que transmite el movimiento del motor al reductor de velocidades, estaba colocada en las poleas adecuadas para proporcionar al secador la velocidad de rotación con la cual se quería trabajar.
- (3) Fijar la velocidad del aire dentro del secador, actuando sobre los deflectores A y B de Fig. 5.5 de acuerdo a las indicaciones de la tabla 5.1

Tabla 5.1 Velocidad del aire a través del secador mt/seg.

A \ B	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	2,10	3,47	5,97	8,51	10,10	10,86	11,11	11,42	11,42
10	2,09	3,49	5,95	8,33	9,95	10,69	10,98	11,11	11,11
20	1,94	3,34	5,68	8,00	9,09	10,25	10,47	10,69	10,69
30	1,81	3,29	5,43	7,49	8,77	9,43	9,70	9,90	9,90
40	1,62	2,84	4,71	6,57	7,84	8,36	8,65	8,62	8,62
50	1,51	2,63	4,33	5,69	6,57	7,04	7,25	7,29	7,29

- (4) Instalar el potenciómetro para efectuar las mediciones de temperatura. La ubicación más apropiada, es la mostrada en Fig. 5.6
- (5) Colocar un balde debajo de la descarga del secador.
- (6) Aprovisionar de agua los termómetros de bulbo húmedo del aire de entrada y salida, cuidando que no se produzca rebalse por los tubos situados en el interior del secador, dentro de los cuales está la muselina que humedece el termómetro.
- (7) Conectar el secador a la red eléctrica del Laboratorio.
- (8) Poner en marcha el secador y el ventilador, cuidando que el ciclón tenga colocado el depósito receptor de polvo.

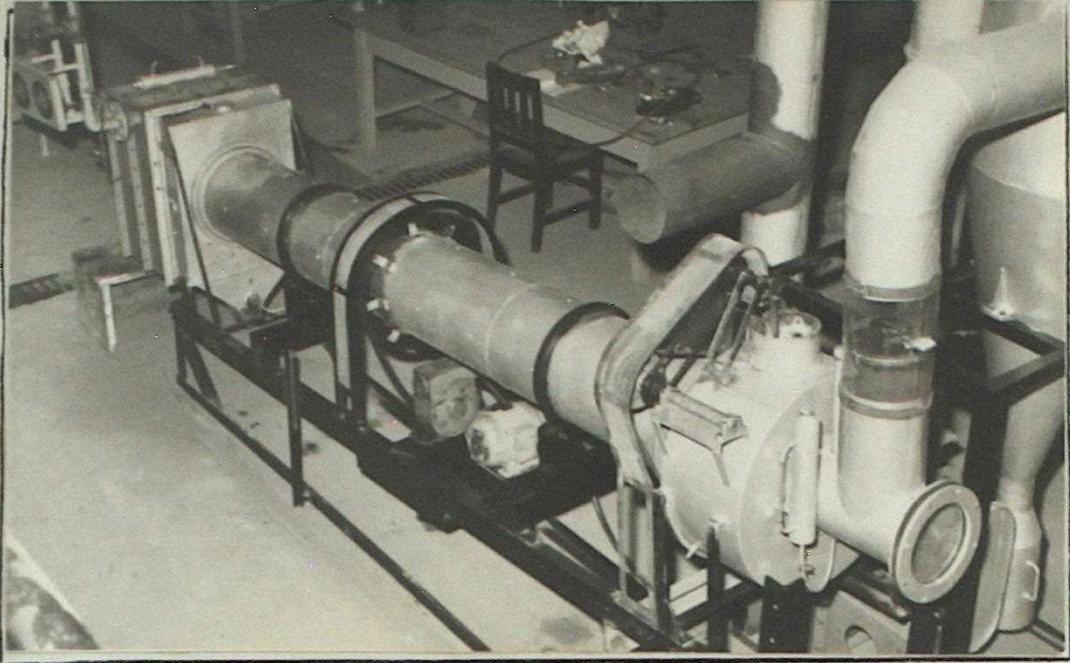


Fig. 5.1

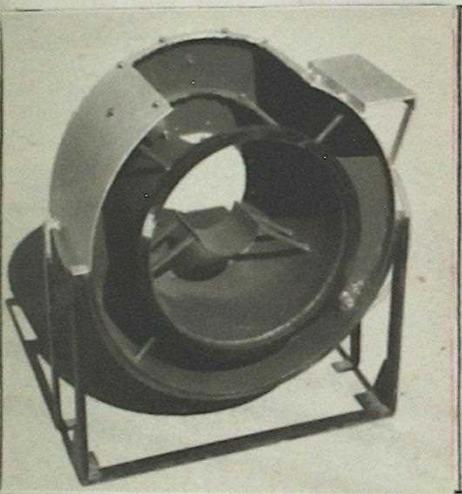


Fig. 5.2

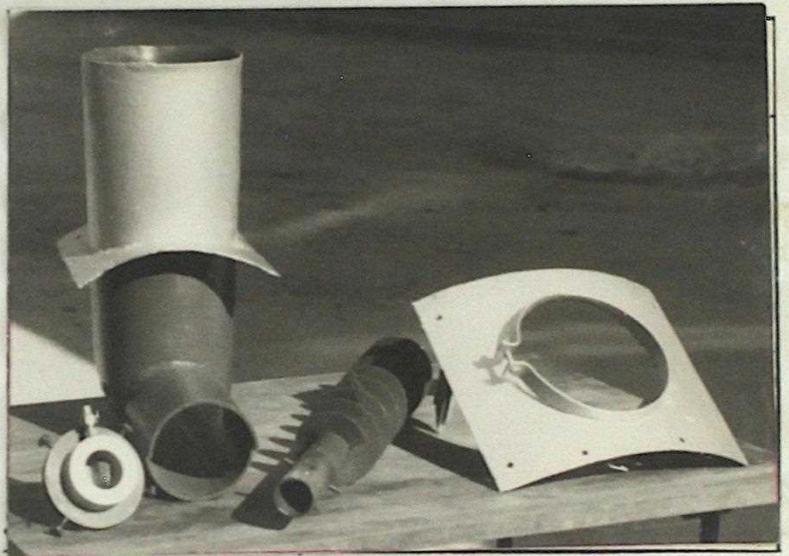


Fig. 5.3

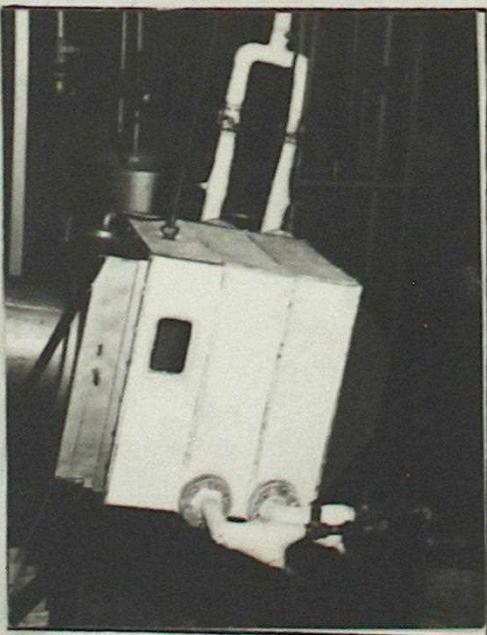


Fig. 5.4

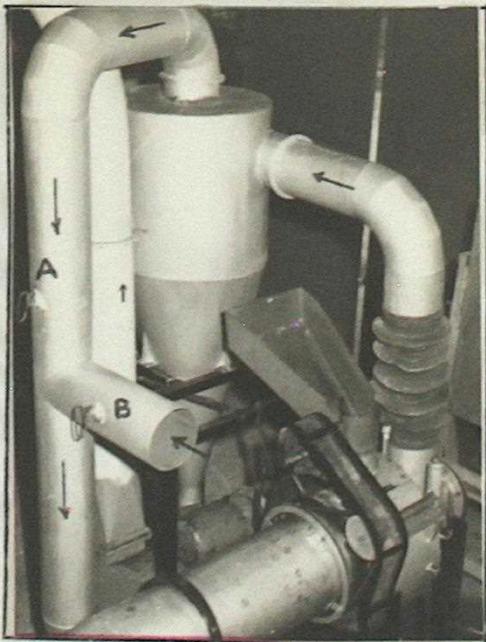


Fig. 5.5

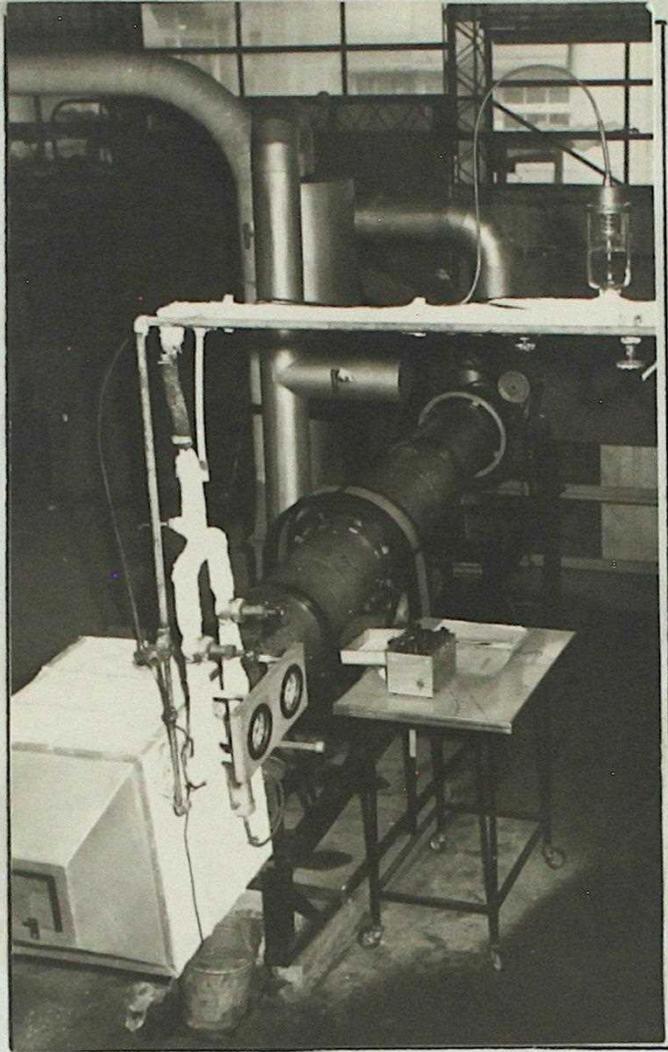


Fig. 5.6

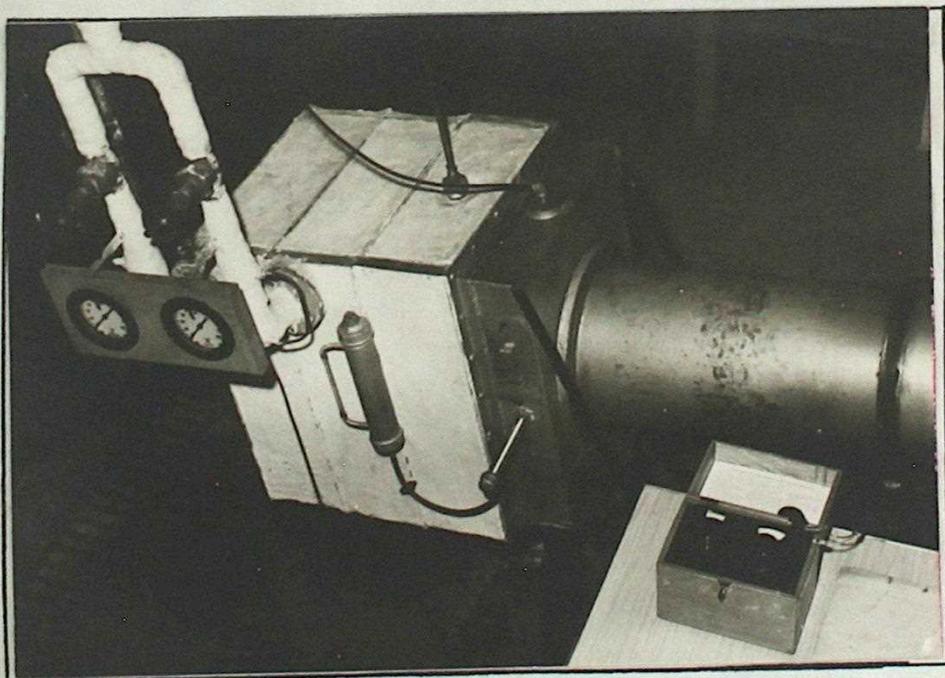


Fig. 5.7

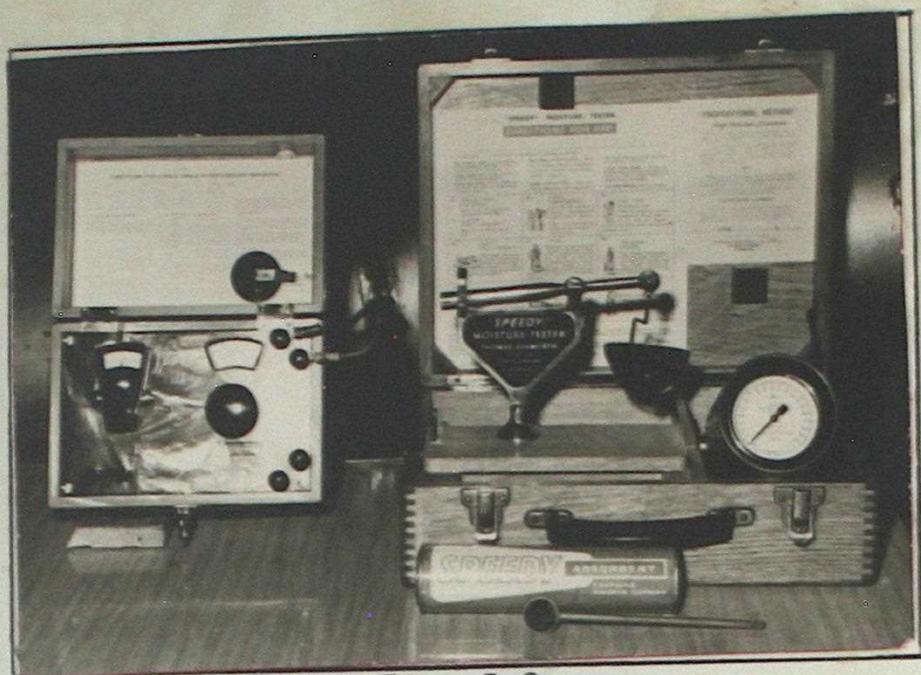


Fig. 5.8

Explicación de las figuras.-

- Fig. 5.1 Secador rotatorio durante la determinación de la velocidad del aire a través de él.
- Fig. 5.2 Cabezal superior del secador después de realizados los trabajos para fijar a él un dispositivo de alimentación.
- Fig. 5.3 Elementos componentes del sistema de alimentación al secador.
- Fig. 5.4 Muestra el sistema calefactor del aire empleado como medio secante y la instalación para eliminar el condensado.
- Fig. 5.5 Detalle de la conexión entre el secador y el ciclón, que permite operar con diferentes inclinaciones del cilindro rotatorio. Se observan también los deflectores A (conducto vertical) y B (tubo horizontal) con los cuales se varía la velocidad del aire en el secador.
- Fig. 5.6 Vista del sistema de válvulas para controlar la alimentación de vapor al intercambiador.
- Fig. 5.7 Dispositivos para el control de la presión del vapor y temperatura del aire.
- Fig. 5.8 Potenciómetro (izquierda); Humidímetro (derecha)

- (9) Purgar el secador y las cañerías de vapor.
- (10) Cerrar las válvulas de purga, cuidando que los manómetros no sobrepasen la presión de 60 lb.
- (11) Determinar la humedad del material que se va a secar.
- (12) Pesar la alimentación.
- (13) Estabilizada la temperatura del aire a la condición de trabajo, se realizan las siguientes operaciones (si es posible simultáneamente)
- Alimentar el material húmedo
 - Colocar un balde para recibir el condensado
 - Cronometrar el tiempo de la operación, a partir del instante que se alimenta material al secador.
- (14) Cuando se estabiliza la velocidad de salida del producto seco se efectúan las siguientes mediciones:
- t_d y t_w aire entrada
 - t_d y t_w aire salida
 - temperatura del material entrada (alimentación)
 - temperatura del material salida (producto)
 - temperatura y presión del vapor
- (15) En el momento que se termina el material que se está alimentando, se detiene el secador y el cronómetro, retirando el balde que recibe el condensado y el depósito receptor de polvo del ciclón
- Nota: a) El material húmedo alimentado al secador debe ser suficiente, para obtener una velocidad de salida de producto seco constante, antes de terminar la alimentación (ver 3.15)
- b) El ventilador no conviene cortarlo, pues ello significaría tener que volver a estabilizar la temperatura del aire al reiniciar el trabajo, debido a que el cilindro rotatorio se enfría rápidamente.
- (16) Pesar el condensado, el producto seco, el polvo del ciclón y la pérdida si la hubiere. (La pérdida puede sacarse del secador por una abertura realizada en el cabezal superior del cador con ese fin.)

(17) Determinar la densidad y la humedad del producto

- 4 Datos de las experiencias. - Tablas I a IV
- 5 Resultados. - Tablas V a XIII
- 6 Ejemplo de calculo. - Para la experiencia N°26

EJEMPLO DE CALCULO
Exp. N^o 26.

I) RETENCION

$$I-1) W_{dF} = W_{wF} \left[1 - \frac{\mathcal{H}_F}{100} \right]$$

$$W_{dF} = 121,2 (1 - 0,073)$$

$$W_{dF} = 112,35 \text{ [lb de sal seca]}$$

$$I-2) W_{dP} = W_{wP} \left[1 - \frac{\mathcal{H}_P}{100} \right]$$

$$W_{dP} = 37,26 (1 - 0,000)$$

$$W_{dP} = 37,26 \text{ [lb de sal seca]}$$

$$I-3) W_{dD} = W_{wD}$$

$$W_{dD} = 0,66 \text{ [lb de sal seca]}$$

$$I-4) W_{dL} = W_{wL} \left[1 - \frac{\mathcal{H}_L}{100} \right]$$

$$W_{dL} = 8,59 (1 - 0,000)$$

$$W_{dL} = 8,59 \text{ [lb de sal seca]}$$

Con aire

$$I-5) H_a = W_{dF} - (W_{dP} + W_{dD} + W_{dL})$$

$$H_a = 112,35 - (37,26 + 0,66 + 8,59)$$

$$H_a = 65,84 \text{ [lb de sal seca]}$$

Sin aire

$$I-6) H_o = W_{wH} \left[1 - \frac{\mathcal{H}_H}{100} \right]$$

$$H_o = 123,48 (1 - 0,018)$$

$$H_o = 121,25 \text{ [lb de sal seca]}$$

Con aire

$$I-7) X_a = \frac{100 \cdot H_a}{\rho_B \cdot V_d}$$

$$X_a = \frac{100 \cdot 65,84}{97 \cdot 7,06}$$

$$X_a = 9,61 \text{ [% del volumen del secador]}$$

Sin aire

$$I-8) X_o = \frac{100 \cdot H_o}{\rho_B \cdot V_d}$$

$$X_o = \frac{100 \cdot 125,25}{97 \cdot 7,06}$$

$$X_o = 17,7 \text{ [% del volumen del secador]}$$

II) DUSTING

$$II-1) D_C = \frac{W_{dD}}{W_{dF}} \cdot 100$$

$$D_C = \frac{0,66}{112,35} \cdot 100$$

$$D_C = 0,58 \text{ [% de la alimentación]}$$

$$II-2) D_L = \frac{W_{dL}}{W_{dF}} \cdot 100$$

$$D_L = \frac{8,59}{112,35} \cdot 100$$

$$D_L = 7,64 \text{ [% de la alimentación]}$$

EJEMPLO DE CALCULO
Exp. N° 26.

$$\text{II-3) } D_T = D_C + D_L$$

$$D_T = 0,58 + 7,64$$

$$D_T = 8,22 \left[\begin{array}{l} \% \text{ de la ali-} \\ \text{mentación} \end{array} \right]$$

III) VELOCIDAD DE ALIMENTACION

De sal húmeda

$$\text{III-1) } R_{wF} = \frac{W_{wF}}{O_E}$$

$$R_{wF} = \frac{121,2}{0,197}$$

$$R_{wF} = 615,2 \left[\frac{\text{lb de sal húmeda}}{\text{hr}} \right]$$

De sal seca

$$\text{III-2) } R_{dF} = R_{wF} \left[1 - \frac{\%_F}{100} \right]$$

$$R_{wF} = 615,2 (1 - 0,073)$$

$$R_{wF} = 570,3 \left[\frac{\text{lb de sal seca}}{\text{hr}} \right]$$

Volumétrica de sal seca

$$\text{III-3) } F_{dF} = \frac{R_{dF}}{\rho_B \cdot \frac{\pi D^2}{4}}$$

$$F_{dF} = \frac{570,30}{97 \cdot 0,7853}$$

$$F_{dF} = 7,48 \left[\frac{\text{ft}^3 \text{ de sal seca}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \text{ de secc}} \right]$$

IV) VELOCIDAD DE PRODUCTO

$$\text{IV-1) } R_P = \frac{R_{dF}}{\left[1 - \frac{\%_P}{100} \right]}$$

$$R_P = \frac{570,3}{1 - 0,000}$$

$$R_P = 570,3 \left[\frac{\text{lb de sal}}{\text{hr}} \right]$$

V) TIEMPO DE RETENCION

En función de la retención en "% "

$$\text{V-1) } \mathcal{T}_x = \frac{L \cdot X_a}{100 \cdot F_{dF}}$$

$$\mathcal{T}_x = \frac{9 \cdot 9,61}{100 \cdot 7,48}$$

$$\mathcal{T}_x = 0,115 \text{ [hr.]}$$

En función de la retención en " lb "

$$\text{V-2) } \mathcal{T}_H = \frac{H_a}{R_{dF}}$$

$$\mathcal{T}_H = \frac{65,84}{570,30}$$

$$\mathcal{T}_H = 0,115 \text{ [hr.]}$$

VI) CONSTANTE " K " DE LA ECUACION DE SMITH

$$\text{VI-1) } K = \frac{S_d \cdot N \cdot \mathcal{T}_x}{L}$$

$$K = \frac{0,04 \cdot 15,96 \cdot 0,115}{9}$$

$$K = 0,0081 \text{ [—]}$$

EJEMPLO DE CALCULO

Exp. N^o 26.

VII) BALANCE DE MATERIALES

VII-1) $T = \frac{\mathcal{H}}{100 - \mathcal{H}}$

	F	P
\mathcal{H}	7,3	0

$$\begin{aligned} T_F &= 0,0787 \\ T_P &= 0,0000 \end{aligned}$$

$$T_F - T_P = 0,0787 \left[\frac{\text{lb agua}}{\text{lb sal seca}} \right]$$

VII-2) $E'_W = R_{dF} \cdot (T_F - T_P)$

$$E'_W = 570,3 \cdot 0,0787$$

$$E'_W = 44,88 \left[\frac{\text{lb agua}}{\text{hr}} \right]$$

	e	i
t_d °F	107,6	217,0
t_w °F	93,2	97,7

"Y" lo da la carta psicrométrica

$$Y_e = 0,0308$$

$$Y_i = 0,0117$$

$$Y_e - Y_i = 0,0191 \left[\frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

VII-3) $E''_W = G \cdot (Y_e - Y_i)$

$$E''_W = 2110,831 \cdot 0,0191$$

$$E''_W = 40,31 \left[\frac{\text{lb agua}}{\text{hr}} \right]$$

VIII) BALANCE TERMICO

$$\begin{aligned} t_F &= 73,4 \\ t_O &= 32,0 \end{aligned}$$

$$t_F - t_O = 41,4 \text{ [}^\circ\text{F]} \quad \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca.}^\circ\text{F}} \right]$$

$$\begin{aligned} c_S &= 0,2700 \\ T_F \cdot c_W &= 0,0787 \end{aligned}$$

$$c_S + T_F \cdot c_W = 0,3487 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca.}^\circ\text{F}} \right]$$

VIII-1) $h_{S,F} = (c_S + T_F \cdot c_W) \cdot (t_F - t_O)$

$$h_{S,F} = 14,43 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca}} \right]$$

$$\begin{aligned} t_P &= 109,4 \\ t_O &= 32,0 \end{aligned}$$

$$t_P - t_O = 77,4 \text{ [}^\circ\text{F]} \quad \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca.}^\circ\text{F}} \right]$$

$$\begin{aligned} c_S &= 0,27 \\ T_P \cdot c_W &= 0,00 \end{aligned}$$

$$c_S + T_P \cdot c_W = 0,27 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca.}^\circ\text{F}} \right]$$

VIII-2) $h_{S,P} = (c_S + T_P \cdot c_W) \cdot (t_P - t_O)$

$$h_{S,P} = 20,89 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca}} \right]$$

$$\begin{aligned} h_{S,P} &= 20,89 \\ h_{S,F} &= 14,43 \end{aligned}$$

$$h_{S,P} - h_{S,F} = 6,46 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb sal seca}} \right]$$

VIII-3)

$$q_S = R_{dF} \cdot (h_{S,P} - h_{S,F})$$

$$q_S = 570,3 \cdot 6,46$$

$$q_S = 3.684,13 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr}} \right]$$

$$t_{di} = 217,0$$

$$\frac{t}{t_{di} - t} = \frac{61,5}{155,5} \text{ [}^\circ\text{F]} \quad \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr}} \right]$$

$$t_{de} = 107,6$$

$$\frac{t}{t_{de} - t} = \frac{61,5}{46,1} \text{ [}^\circ\text{F]} \quad \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr}} \right]$$

VIII-4)

$$q_L = \frac{(t_{di} - t) + (t_{de} - t)}{2} \cdot (\pi DL) \cdot (h)$$

$$q_L = (100,8) \cdot (\pi \cdot 1,9) \cdot (2)$$

$$q_L = 5.699,22 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr}} \right]$$

EJEMPLO DE CALCULO
Exp. N^o 26.

$$q_S = 3.684,13$$

$$q_L = 5.699,22$$

$$\overline{q_S + q_L} = 9.383,35 \left[\frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \right]$$

$$c_{a,i} = 0,24 + 0,45 Y_i$$

$$c_{a,i} = 0,24 + 0,45 \cdot 0,0117$$

$$c_{a,i} = 0,245.26$$

$$c_{a,i} = \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco} \cdot ^\circ\text{F}} \right]$$

$$t_{di} = 217,0$$

$$t_o = 32,0$$

$$\overline{t_{di} - t_o} = 185,0 \left[^\circ\text{F} \right]$$

$$c_{a,i}(t_{di} - t_o) = 0,24526 \cdot 185$$

$$c_{a,i}(t_{di} - t_o) = 45,37$$

$$c_{a,i}(t_{di} - t_o) = \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$\lambda_o \cdot Y_i = 1.075,2 \cdot 0,0117$$

$$\lambda_o \cdot Y_i = 12,57 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$\text{VIII-5)} \quad h_{a,i} = c_{a,i}(t_{di} - t_o) + \lambda_o \cdot Y_i$$

$$h_{a,i} = 57,94 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$c_{a,e} = 0,24 + 0,45 Y_e$$

$$c_{a,e} = 0,24 + 0,45 \cdot 0,0308$$

$$c_{a,e} = 0,253.86$$

$$c_{a,e} = \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco} \cdot ^\circ\text{F}} \right]$$

$$t_{de} = 107,6$$

$$t_o = 32,0$$

$$\overline{t_{de} - t_o} = 75,6 \left[^\circ\text{F} \right]$$

$$c_{a,e}(t_{de} - t_o) = 0,25386 \cdot 75,6$$

$$c_{a,e}(t_{de} - t_o) = 19,19$$

$$c_{a,e}(t_{de} - t_o) = \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$\lambda_o \cdot Y_e = 1.075,2 \cdot 0,0308$$

$$\lambda_o \cdot Y_e = 33,11 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$\text{VIII-6)} \quad h_{a,e} = c_{a,e}(t_{de} - t_o) + \lambda_o \cdot Y_e$$

$$h_{a,e} = 52,30 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

$$h_{a,i} = 57,94$$

$$h_{a,e} = 52,30$$

$$\overline{h_{a,i} - h_{a,e}} = 5,64 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{lb aire seco}} \right]$$

VIII-7)

$$q_a = G \cdot (h_{a,i} - h_{a,e})$$

$$q_a = 2.110,831 \cdot 5,64$$

$$q_a = 11.905,08 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr}} \right]$$

EJEMPLO DE CALCULO
Exp. N^o 26.

IX) RENDIMIENTOS

$$t_p = 109,4$$

$$t_F = 73,4$$

$$t_p - t_F = 36,0 \text{ [}^\circ\text{F]}$$

IX-1)

$$q'_s = R_{dF} \cdot c_s \cdot (t_p - t_F)$$

$$q'_s = 570,3 \cdot 0,27 \cdot 36$$

$$q'_s = 5.543,28 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

$$t_{de} = 107,6$$

$$t = 61,5$$

$$t_{de} - t = 46,1 \text{ [}^\circ\text{F]}$$

IX-2)

$$q'_a = G \cdot c_a \cdot (t_{de} - t)$$

$$q'_a = 2110,8 \cdot 0,2447 \cdot 46,1$$

$$q'_a = 23.811,58 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

$$h_{w,V} = 1.107,72$$

$$h_{w,L} = 41,44$$

$$h_{w,V} - h_{w,L} = 1.066,28$$

IX-3)

$$q'_w = E'_w \cdot (h_{w,V} - h_{w,L})$$

$$q'_w = 44,9 \cdot 1.066,28$$

$$q'_w = 47.875,97 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

$$q'_s = 5.543,28$$

$$q'_a = 23.811,58$$

$$q'_w = 47.875,97$$

$$q'_s + q'_a + q'_w = 77.230,83 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

Térmico

IX-4)

$$q'_v = R'_c \cdot \lambda_v$$

$$q'_v = 79,6 \cdot 933,5$$

$$q'_v = 74.306,60 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

IX-5)

$$q''_v = R''_c \cdot \lambda_v$$

$$q''_v = 84,91 \cdot 933,5$$

$$q''_v = 79.263,48 \text{ [} \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \text{]}$$

IX-6)

$$\eta'_t = \frac{q'_s + q'_a + q'_w}{q'_v}$$

$$\eta'_t = \frac{77.230,83}{74.306,60}$$

$$\eta'_t = 103,93 \text{ [%]}$$

IX-7)

$$\eta''_t = \frac{q'_s + q'_a + q'_w}{q''_v}$$

$$\eta''_t = \frac{77.230,83}{79.263,48}$$

$$\eta''_t = 97,43 \text{ [%]}$$

De secado.

IX-8)

$$\eta_s = \frac{q'_w}{q'_s + q'_a + q'_w}$$

$$\eta_s = \frac{47.875,97}{77.230,83}$$

$$\eta_s = 61,99 \text{ [%]}$$

X) COEFICIENTE VOLUMETRICO DE TRANSMISION DE CALOR

EJEMPLO DE CALCULO
Exp. N^o 26.

$$\begin{array}{l} t_{di} = 217,0 \\ t_m = 91,4 \\ \hline t_{di} - t_m = 125,6 \quad [^{\circ}\text{C}] \end{array}$$

$$\begin{array}{l} t_{de} = 107,6 \\ t_m = 91,4 \\ \hline t_{de} - t_m = 16,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \end{array}$$

$$\frac{t_{di} - t_m}{t_{de} - t_m} = \frac{125,6}{16,2}$$

$$X-1) \quad N_t = 2,3 \log_{10} \frac{t_{di} - t_m}{t_{de} - t_m}$$

$$N_t = 2,3 \log_{10} (7,75)$$

$$N_t = (2,3)(0,88930)$$

$$N_t = 2,0453 \quad [-]$$

$$X-2) \quad L_G = \frac{L}{N_t}$$

$$L_G = \frac{9}{0,0453}$$

$$L_G = 4,40 \quad [\text{ft}]$$

$$X-3) \quad U_a = \frac{N_t \cdot c_a \cdot G'}{L}$$

$$U_a = \frac{(2,0453)(0,2447)(2.687,929)}{9}$$

$$U_a = 149,47 \left[\frac{\text{Btu.}}{\text{hr} \cdot ^{\circ}\text{F} \cdot \text{ft}^3} \right]$$

Nota.- Los resultados anotados en las hojas en las cuales se ha hecho un resumen de los cálculos, se han obtenido reemplazando en las fórmulas indicadas anteriormente, datos con tantos decimales como los que aparecen en el ejemplo de cálculo; empleando además máquina de calcular.

Con respecto a los cálculos realizados debe mencionarse las siguientes consideraciones:

(1) $\mathcal{H}_F = 7,3$ (W.B.) es la humedad de la alimentación la cual se supuso constante para todo el salitre utilizado en las experiencias (excepto en las N^o 36, 37 y 38, donde el valor considerado fué 9,9 %). Esta suposición, se basó en el hecho que los valores obtenidos en las 10 primeras experiencias eran muy parecidos, por lo que se determinó un valor promedio, que se consideró común a todas las experiencias.

(2) En el caso de W_{AD} , se estimó que el polvo recibido en el ciclón estaba totalmente seco.

(3) Para W_{WL} se consideró que su humedad era igual a la del producto, por no haberse realizado las determinaciones respectivas.

(4) La humedad de la retención $\mathcal{H}_H = 1,8$ % (W.B.), es el contenido de humedad en equilibrio del salitre, cuando la humedad relativa del aire ambiente es 70% ($t_d = 61,5$ °F ; $t_w = 56,1$ °F). En el caso de la determinación de la retención sin flujo de aire a través del secador, la humedad de la alimentación y la de la retención son iguales, pues el salitre en su tránsito a lo largo del secador no ha perdido ni ha ganado humedad, pues siempre ha estado en contacto con el aire ambiente

(5) El valor de ρ_B es un valor promedio que fué determinado con el material con el cual se realizó las experiencias, desestimando los valores que aparecen en las Tablas. (#), ya que el salitre empleado tenía un diámetro de partícula comprendido entre límites predeterminados, lo cual seguramente no ocurre con los valores que aparecen en Tablas

(#) En el boletín N^o 118 pag. 59 de "The Bartlett & Snow", se indica un valor de $\rho_B = 80$ lb/ft³ para el salitre seco.

(6) La pérdida expresada como porcentaje de la alimentación, la he incorporado al "Dusting", dado que ella es originada por la acción del aire que circula a través del secador. Al hablar de pérdida, con ello quiere indicarse el material que al ser arrastrado por la corriente de aire es depositado en el interior del cabezal superior del secador y en el tubo de salida del aire.

(7) La humedad absoluta del aire que entra al secador fué determinada, considerando las temperaturas t_{di} y t_{wi} que resultan de promediar las lecturas de t_d y t_w respectivamente antes de iniciar la experiencia y durante su desarrollo

$$t_{di} = \frac{\sum_{i=1}^{i=82} (\text{lect } i)}{82} = \frac{8437}{82} = 102,8 \text{ } ^\circ\text{C} = 217 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{wi} = \frac{\sum_{i=1}^{i=82} (\text{lect } i)}{82} = \frac{2999}{82} = 36,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 97,7 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Esta suposición la hice considerando que la operación de secado, aunque realizada intermitentemente, puede ser estimada como un proceso continuo para los efectos de la determi-

nación de una temperatura de aire promedio a la entrada del secador, puesto que el aire ambiente que se calentó hasta las temperaturas t_{di} y t_{wi} ya indicadas mantuvo su humedad absoluta (aproximadamente), durante los días en que se realizaron las experiencias. Esto permitió una simplificación del trabajo, evitando las determinaciones de humedades absolutas del aire al entrar al secador, que al diferir, lo único que indicaría sería un mal funcionamiento del termómetro de bulbo húmedo.

(8) De acuerdo a la relación que se cumple en un balance de materiales

$$R_d F (T_F - T_P) = G (Y_e - Y_i)$$

que establece que el agua evaporada del sólido, es igual al agua arrastrada por el aire secante, se desprende que la diferencia que existe entre los valores de E'_w y E''_w habrá que atribuirla al funcionamiento del termómetro de bulbo húmedo, situado en la salida del aire, puesto que dicho termómetro tal vez sea afectado por el salitre en polvo que arrastra el aire, el cual se adhiere a la muselina que humedece el termómetro, formando una delgada capa que afecta la evaporación del agua desde la muselina, variando de ese modo la lectura del termómetro. Esta explicación, en ciertos casos puede ser válida al termómetro de bulbo húmedo de la entrada del aire. Otro factor que influye en la determinación de humedades son las termocuplas que desempeñan el papel de termómetro de bulbo seco, tanto a la entrada como a la salida. En efecto se pudo comprobar que al realizar la medición de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada mediante la termocupla y además mediante el termómetro de bulbo húmedo en el cual la muselina estaba totalmente seca, que existía una diferencia de aproximadamente 2 °C, entre la lectura de la termocupla y la lectura del termómetro.

5.7 Discusión.- Los valores de la retención con flujo de aire están comprendidos dentro de los límites recomendados en

3.13 La retención sin flujo de aire resultó mayor, que la con flujo de aire, lo cual contradice lo establecido por Friedman y Marhall al proponer su fórmula (3.12). La explicación puede encontrarse considerando que en la retención con flujo de aire, la transmisión de calor juega un papel muy importante, puesto que el material por efecto del calor pierde gradualmente su humedad, facilitando así su transporte dentro del cilindro rotatorio, que por tener caliente la superficie evita en parte que el material permanezca pegado a él. En la determinación de la retención sin flujo de aire, las condiciones señaladas anteriormente no son válidas, puesto que no hay transmisión de calor, facilitando así la adhesión del material al secador.

Efecto de la cantidad de material alimentado al secador sobre la retención y el tiempo de tránsito.- El examen de los resultados de las experiencias 1 a 4, en las cuales las condiciones de operación han sido las mismas para todas ellas, variándose la cantidad de material alimentado al secador 44,1 lb para las experiencias 1 y 2, y 88,4 para las experiencias 3 y 4, muestra que con el aumento de la alimentación la retención también aumenta, alargándose el tiempo de tránsito. Lo expuesto permite recomendar que para la realización de experiencias de determinación de retención y tiempo de tránsito, en el Laboratorio, es conveniente alimentar al secador una misma cantidad de material, para poder comparar sus resultados con facilidad.

Efecto de la velocidad de rotación del secador en la retención.- Puesto que en el secador el tornillo sin fin que alimenta el material es accionado directamente por el cilindro rotatorio, la variación de la velocidad del cilindro afecta igualmente al tornillo, por lo cual la retención prácticamente no resulta afectada, produciéndose variaciones solo en la velocidad de salida del producto y tiempo de tránsito.

...to, los cuales disminuyen y aumentan respectivamente, a medida que se baja la velocidad de rotación. La disminución de la velocidad de rotación permite obtener un producto más seco debido al aumento del tiempo de tránsito, a condición de aceptar una velocidad de salida de producto menor.

Efecto de la inclinación en la retención.- Analizando las experiencias realizadas con inclinación de 0,14 ; 0,09 y 0,04 ft/ft, $N = 15.96$ RPM y $G = 787, 2110$ y 3426 lb/hr se aprecia que la retención para $S_d = 0,14$ ft/ft disminuye al reducir la inclinación a 0,09, pero al utilizar $S_d = 0,04$ ft/ft este aumenta con respecto a los valores obtenidos en los dos casos anteriores. La humedad del producto disminuye al disminuir la inclinación del secador, en el caso de trabajar con N y G constantes.

Efecto de G sobre la retención y el dusting.- A medida que G aumenta disminuye la retención, pero en cambio aumenta el dusting, llegando incluso a valores que son mucho mayores que los recomendados en 3.14. Comparando los valores de $G = 2110$ y 3426 lb/hr utilizados en esta experiencia con aquellos empleados por Friedman y Marshall, debe indicarse que los primeros son demasiado elevados, puesto que el valor máximo de Friedman y Marshall llegó a 720 lb/hr

3.8 Nomenclatura.-

- c_a Calor específico del aire, Btu/(lb)(°F)
- c_s Calor específico del sólido, Btu/(lb)(°F)
- c_w Calor específico del agua, Btu/(lb)(°F)
- D Diámetro del secador, ft
- D_c Polvo ciclón (Dusting), % de la alimentación
- D_L Pérdida, % de la alimentación
- D_T Arrastre de material por efecto del aire, % de la alimentación
- E_w Agua evaporada, lb/hr
- F_{dF} Velocidad de alimentación volumétrica, $ft^3/(hr)(ft^2)$
- G' Velocidad de masa del aire, lb de aire seco/(hr)(ft^2)
- G Velocidad de masa del aire, lb de aire seco/(hr)(ft^2)
- $h_{a,e}$ Entalpía aire, salida, Btu/lb aire seco
- $h_{a,i}$ Entalpía aire, entrada, Btu/lb aire seco
- $h_{s,F}$ Entalpía sólido, alimentación, Btu/lb sólido seco
- $h_{s,P}$ Entalpía sólido, producto, Btu/lb sólido seco
- $h_{w,L}$ Entalpía agua, (líquido)
- $h_{w,V}$ Entalpía agua, (vapor)
- H_a Retención (sal seca) con aire, lb
- H_o Retención (sal seca) sin aire, lb

- $\%_F$ Humedad sólido, alimentación, % (W.B.)
 $\%_P$ Humedad sólido, producto, % (W.B.)
 K Constante ecuación de Smith
 h Coeficiente de transmisión de calor (convección y radiación), $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)$
 ($^{\circ}\text{F}$)
 L Longitud del secador, ft
 N Velocidad de rotación del secador, RPM
 N_t Número de unidades de transmisión
 q_a Calor absorbido por el aire, Btu/hr
 q_s Calor absorbido por el sólido seco, Btu/hr
 q_v Calor absorbido por el vapor, Btu/hr
 R_p Velocidad de salida de producto, lb/hr
 R_{dF} Velocidad de alimentación (sal seca), lb/hr
 R_{wF} Velocidad de alimentación (sal húmeda), lb/hr
 S_d Inclinación secador, ft/ft
 t Temperatura aire ambiente, $^{\circ}\text{F}$
 t_m Temperatura media del material en el secador = $(t_F - t_P)/2$, $^{\circ}\text{F}$
 t_{de} Temperatura de bulbo seco, aire salida, $^{\circ}\text{F}$
 t_{di} Temperatura de bulbo húmedo, aire entrada, $^{\circ}\text{F}$
 t_F Temperatura alimentación, $^{\circ}\text{F}$
 t_P Temperatura producto, $^{\circ}\text{F}$
 T_F Contenido de humedad, alimentación, lb agua/ lb sólido seco
 T_P Contenido de humedad, producto, lb agua/ lb sólido seco
 U_a Coeficiente volumétrico de transmisión de calor, $\text{Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^3)(^{\circ}\text{F})$
 V Volumen de aire, ft^3/hr
 $W_{c,R}$ Peso condensado real, lb
 $W_{c,T}$ Peso condensado teórico, lb
 W_{dD} Peso polvo ciclón, (sal seca), lb
 W_{dL} Peso pérdida, (sal seca), lb
 W_{dF} Peso alimentación (sal seca), lb
 W_{dP} Peso producto, (sal seca), lb
 W_{wL} Peso pérdida, (sal húmeda), lb

W_{WF}	Peso alimentación, (sal húmeda), lb
W_{WP}	Peso producto, (sal húmeda), lb
X_a	Retención (con aire), % del volumen del secador
X_o	Retención (sin Aire), % del volumen del secador
Y_e	Humedad absoluta aire, salida, lb agua/lb aire seco
Y_i	Humedad absoluta aire, entrada, lb agua/lb aire seco
U_t	Rendimiento térmico, %
U_s	Rendimiento de secado, %
λ_v	Calor latente vapor, Btu/lb
T_X	Tiempo de tránsito, hr
T_H	Tiempo de tránsito, hr
θ_E	Tiempo experiencia, hr

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA I.- Datos experimentales

Exp.	θ_E	Secador		Aire					
		N	S_d	V		G	G'	t_{di}	
		RPM	mt/mt ft/ft	$\frac{m^3}{hr}$	$\frac{ft^3}{hr}$	$\frac{lb}{hr}$	$\frac{lb}{hr \cdot ft^2}$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$
1	0,066	15,96	0,14	297	10.488	787	1.002	108	226,4
2	0,066	15,96	0,14	297	10.488	787	1.002	107	224,6
3	0,125	15,96	0,14	297	10.488	787	1.002	96	204,8
4	0,103	15,96	0,14	297	10.488	787	1.002	110	230,0
5	0,195	9,42	0,14	297	10.488	787	1.002	91	195,8
6	0,207	9,42	0,14	297	10.488	787	1.002	105	221,0
7	0,346	5,40	0,14	297	10.488	787	1.002	98	208,4
8	0,354	5,40	0,14	297	10.488	787	1.002	103	217,4
9	0,160	15,96	0,09	297	10.488	787	1.002	104	219,2
10	0,148	15,96	0,09	297	10.488	787	1.002	103	217,4
11	0,124	15,96	0,09	297	10.488	787	1.002	96	204,8
12	0,214	9,42	0,09	297	10.488	787	1.002	102	215,6
13	0,207	9,42	0,09	297	10.488	787	1.002	100	212,0
14	0,403	5,40	0,09	297	10.488	787	1.002	105	221,0
15	0,233	15,96	0,04	297	10.488	787	1.002	102	215,6
16	0,233	15,96	0,04	297	10.488	787	1.002	98	208,4
17	0,190	15,96	0,04	297	10.488	787	1.002	101	213,8
18	0,417	9,42	0,04	297	10.488	787	1.002	103	217,4
19	0,547	5,40	0,04	297	10.488	787	1.002	102	215,6
20	0,131	15,96	0,14	796	28.109	2.110	2.687	110	230,0
21	0,200	9,42	0,14	796	28.109	2.110	2.687	103	217,4
22	0,349	5,40	0,14	796	28.109	2.110	2.687	92	197,6
23	0,143	15,96	0,09	796	28.109	2.110	2.687	103	217,4
24	0,221	9,42	0,09	796	28.109	2.110	2.687	107	224,6
25	0,383	5,40	0,09	796	28.109	2.110	2.687	107	224,6
26	0,197	15,96	0,04	796	28.109	2.110	2.687	107	224,6
27	0,304	9,42	0,04	796	28.109	2.110	2.687	101	213,8
28	0,522	5,40	0,04	796	28.109	2.110	2.687	113	235,4
29	0,130	15,96	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	109	228,2
30	0,220	9,42	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	109	228,2
31	0,373	5,40	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	101	213,8
32	0,124	15,96	0,09	1.292	45.625	3.426	4.362	100	212,0
33	0,208	9,42	0,09	1.292	45.625	3.426	4.362	98	208,4
34	0,368	5,40	0,09	1.292	45.625	3.426	4.362	102	215,6
35	0,204	15,96	0,04	1.292	45.625	3.426	4.362	105	221,0
36	0,196	15,96	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	99	210,2
37	0,216	9,42	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	105	221,0
38	0,358	5,40	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	100	212,0
39	0,148	15,96	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	102	215,6
40	0,233	9,42	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	105	221,0
41	0,398	5,40	0,14	1.292	45.625	3.426	4.362	99	210,2

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA II.- Datos experimentales

Exp. Nº	Aire						Material				
	t_{wi}		t_{de}		t_{we}		W_{wF}		W_{wP}		W_{wD}
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	kg	lb	kg	lb	kg
1	39	102,2	56	132,8	30	86,0	20	44,1	3,0	6,7	-
2	38	100,4	56	132,8	29	84,2	20	44,1	4,8	10,5	-
3	36	96,8	45	113,0	30	86,0	40	88,2	10,7	23,5	-
4	39	102,2	51	123,8	30	86,0	40	88,2	10,2	22,4	-
5	36	96,8	49	120,2	30	86,0	40	88,2	9,1	20,0	-
6	37	98,6	49	120,2	29	84,2	40	88,2	8,8	19,5	-
7	37	98,6	52	125,6	31	87,8	40	88,2	11,4	25,1	-
8	35	95,0	56	132,8	30	86,0	40	88,2	14,6	32,1	-
9	35	95,0	56	132,8	33	91,4	40	88,2	14,6	32,1	-
10	37	98,6	52	125,6	33	91,4	40	88,2	15,0	33,0	-
11	35	95,0	48	118,4	30	86,0	40	88,2	6,7	14,7	-
12	38	100,4	52	125,6	30	86,0	40	88,2	5,9	13,1	-
13	34	93,2	48	118,4	27	80,6	40	88,2	7,4	16,4	-
14	36	96,8	53	127,4	29	84,2	40	88,2	10,3	22,7	-
15	31	87,6	48	118,4	32	89,6	60	132,3	15,5	34,1	-
16	34	93,2	45	113,0	30	86,0	60	132,3	12,2	26,9	-
17	37	98,6	40	104,0	25	77,0	60	132,3	7,2	15,8	-
18	36	96,8	47	116,6	28	82,4	60	132,3	9,0	19,8	-
19	35	95,0	52	125,6	31	87,8	60	132,3	13,7	30,2	-
20	39	102,2	60	140,0	35	95,0	40	88,2	17,9	39,4	-
21	38	100,4	61	141,8	35	95,0	40	88,2	16,0	35,3	-
22	30	86,0	55	131,0	32	89,6	40	88,2	19,1	42,1	0,05
23	36	96,8	55	131,0	34	93,2	40	88,2	18,1	39,9	0,50
24	32	89,6	57	134,6	36	96,8	40	88,2	19,3	42,5	0,10
25	33	91,4	61	141,8	43	109,4	40	88,2	18,6	41,0	0,30
26	34	93,2	42	107,6	34	93,2	55	121,2	16,9	37,2	0,30
27	35	95,0	53	127,4	40	104,0	55	121,2	16,7	36,8	0,20
28	38	100,4	54	129,2	36	96,8	55	121,2	13,5	29,7	0,20
29	40	104,0	63	145,4	40	104,0	40	88,2	17,6	38,8	0,25
30	36	96,8	58	136,4	44	111,2	40	88,2	16,5	36,3	0,50
31	35	95,0	60	140,0	41	105,8	40	88,2	15,6	34,3	0,35
32	36	96,8	52	125,6	35	95,0	40	88,2	9,9	21,8	2,35
33	35	95,0	51	123,8	31	87,8	40	88,2	10,7	23,5	0,20
34	35	95,0	54	129,2	36	96,8	40	88,2	6,0	13,2	5,30
35	36	96,8	43	109,4	26	78,8	60	132,3	7,7	17,0	3,21
36	43	109,4	60	140,0	37	98,6	40	88,2	11,6	25,5	1,55
37	38	100,4	60	140,0	35	95,0	40	88,2	14,1	31,2	0,05
38	33	91,4	57	134,6	29	84,2	40	88,2	11,4	25,1	0,10
39	40	104,0	53	127,4	33	91,4	40	88,2	19,6	43,2	0,45
40	36	96,8	58	136,4	33	91,4	40	88,2	18,4	40,6	0,02
41	39	102,2	60	140,0	35	95,0	40	88,2	21,8	48,0	0,35

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA III.- Datos experimentales

Exp. Nº	Material									
	W _{wD} lb	W _{wL}		t _F		t _P		H _F	H _P	ρ _B kg/mt ³
		kg	lb	°C	°F	°C	°F	%	%	
1	-	-	-	24	75,2	31	87,8	7,3	2,8	1.550
2	-	-	-	28	82,4	33	91,4	7,3	1,6	1.550
3	-	-	-	19	66,2	30	86,0	7,3	2,6	1.550
4	-	-	-	16	60,8	31	87,8	7,3	2,8	1.550
5	-	-	-	18	64,4	33	91,4	7,3	1,1	1.550
6	-	-	-	22	71,6	32	89,6	7,3	1,6	1.550
7	-	-	-	19	66,2	35	95,0	7,3	1,0	1.550
8	-	-	-	20	68,0	37	98,6	7,3	0,7	1.550
9	-	-	-	47	116,6	34	93,2	7,3	0,5	1.550
10	-	-	-	46	114,8	32	89,6	7,3	1,1	1.550
11	-	-	-	25	77,0	30	86,0	7,3	1,2	1.550
12	-	-	-	23	73,4	31	87,8	7,3	0,5	1.550
13	-	-	-	9	48,2	31	87,8	7,3	0,8	1.550
14	-	-	-	9	48,2	33	91,4	7,3	0,0	1.550
15	-	1,00	2,20	20	68,0	32	89,6	7,3	0,1	1.550
16	-	1,00	2,20	27	80,6	34	93,2	7,3	0,2	1.550
17	-	0,50	1,10	10	50,0	32	89,6	7,3	0,2	1.550
18	-	0,40	0,80	22	71,6	34	93,2	7,3	0,0	1.550
19	-	-	-	24	75,2	37	98,6	7,3	0,0	1.550
20	-	-	-	20	68,0	31	87,8	7,3	1,1	1.550
21	-	0,55	1,21	19	66,2	33	91,4	7,3	0,5	1.550
22	0,11	0,45	0,99	19	66,2	34	93,2	7,3	0,0	1.550
23	1,10	1,05	2,31	10	50,0	32	89,6	7,3	0,8	1.550
24	0,22	1,20	2,64	20	68,0	43	109,4	7,3	0,0	1.550
25	0,66	1,40	3,08	22	71,6	50	122,0	7,3	0,0	1.550
26	0,66	3,90	8,59	23	73,4	43	109,4	7,3	0,0	1.550
27	0,44	2,70	5,95	24	75,2	48	118,4	7,3	0,0	1.550
28	0,44	3,60	7,93	26	78,8	52	125,6	7,3	0,0	1.550
29	0,55	0,60	1,32	25	77,0	37	98,6	7,3	1,4	1.550
30	1,10	4,01	8,84	26	78,8	47	116,6	7,3	0,0	1.550
31	0,77	4,31	9,50	24	75,2	54	129,2	7,3	0,0	1.550
32	5,18	8,61	18,98	24	75,2	42	107,6	7,3	0,0	1.550
33	0,44	5,02	11,06	15	59,0	49	120,2	7,3	0,0	1.550
34	11,68	9,64	21,25	19	66,2	59	138,2	7,3	0,0	1.550
35	7,07	18,46	40,70	15	59,0	82	179,6	7,3	0,0	1.550
36	3,41	4,22	9,30	19	66,2	43	109,4	9,9	0,8	1.550
37	0,11	2,17	4,78	19	66,2	47	116,6	9,9	0,7	1.550
38	0,22	4,02	8,86	19	66,2	52	125,6	9,9	0,0	1.550
39	0,99	3,67	8,09	13	55,4	47	116,6	7,3	0,8	1.550
40	0,05	3,32	7,32	22	71,6	53	127,4	7,3	0,4	1.550
41	0,77	1,17	2,57	21	69,8	59	138,2	7,3	0,0	1.550

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA IV.- Datos experimentales

Exp	Material		Vapor			Condensado			
	ρ	d_p	t_s		p_s	W_c		R_c^1	R_c^2
	$\frac{lb}{ft^3}$	mm.	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	psig	kg	lb	$\frac{lb}{hr}$	$\frac{lb}{hr}$
1	97	-12,7 +1,6	140	284,0	37	1,61	3,55	53,8	31,6
2	97	-12,7 +1,6	141	285,8	39	1,96	4,32	65,4	31,6
3	97	-12,7 +1,6	139	282,2	35	2,81	6,19	49,6	31,6
4	97	-12,7 +1,6	144	291,2	41	2,91	6,41	62,2	31,6
5	97	-12,7 +1,6	108	226,4	7	3,36	7,40	38,0	31,6
6	97	-12,7 +1,6	105	221,0	0	5,06	11,15	53,9	31,6
7	97	-12,7 +1,6	133	271,4	25	5,86	12,92	37,3	31,6
8	97	-12,7 +1,6	108	226,4	15	8,31	18,32	51,7	31,6
9	97	-12,7 +1,6	131	267,8	23	3,06	6,74	42,2	31,6
10	97	-12,7 +1,6	130	266,0	28	3,21	7,07	47,8	31,6
11	97	-12,7 +1,6	107	224,6	5	2,86	6,30	50,9	31,6
12	97	-12,7 +1,6	135	275,0	30	4,61	10,16	47,5	31,6
13	97	-12,7 +1,6	136	276,8	37	3,31	7,29	35,2	31,6
14	97	-12,7 +1,6	110	230,0	6	10,22	22,53	55,8	31,6
15	97	-12,7 +1,6	130	266,0	23	5,11	11,26	48,2	31,6
16	97	-12,7 +1,6	118	244,4	10	5,61	12,37	53,1	31,6
17	97	-12,7 +1,6	110	230,0	5	5,81	12,81	67,3	31,6
18	97	-12,7 +1,6	133	271,4	29	7,56	16,66	40,0	31,6
19	97	-12,7 +1,6	122	251,6	13	14,62	32,23	58,9	31,6
20	97	-12,7 +1,6	124	255,2	31	4,66	10,27	78,3	84,9
21	97	-12,7 +1,6	132	269,6	26	6,61	14,57	72,8	84,9
22	97	-12,7 +1,6	118	244,4	15	13,77	30,36	86,9	84,9
23	97	-12,7 +1,6	132	269,6	26	5,41	11,92	83,4	84,9
24	97	-12,7 +1,6	135	275,0	32	9,06	19,97	90,4	84,9
25	97	-12,7 +1,6	134	273,2	31	13,73	30,27	79,0	84,9
26	97	-12,7 +1,6	137	278,6	35	7,11	15,67	79,6	84,9
27	97	-12,7 +1,6	132	269,6	29	7,02	15,47	50,9	84,9
28	97	-12,7 +1,6	134	273,2	38	20,02	44,14	85,3	84,9
29	97	-12,7 +1,6	148	298,4	53	5,01	11,04	84,8	84,9
30	97	-12,7 +1,6	147	296,6	56	9,41	20,74	94,3	137,8
31	97	-12,7 +1,6	130	266,0	27	15,42	34,00	91,0	137,8
32	97	-12,7 +1,6	130	266,0	28	5,06	11,15	89,9	137,8
33	97	-12,7 +1,6	126	258,8	23	8,52	18,78	90,1	137,8
34	97	-12,7 +1,6	138	280,4	35	16,04	35,36	96,1	137,8
35	97	-12,7 +1,6	97	206,6	52	9,06	19,97	97,9	137,8
36	97	-1,6	140	284,0	41	8,02	17,68	90,4	137,8
37	97	-1,6	141	285,8	43	9,27	20,44	94,5	137,8
38	97	-1,6	130	266,0	27	15,79	34,81	97,2	137,8
39	97	- 3,3 +1,6	139	282,2	39	6,92	15,25	103,1	137,8
40	97	- 3,3 +1,6	143	289,4	46	10,97	24,18	103,8	137,8
41	97	- 3,3 +1,6	139	282,2	38	15,49	34,15	85,7	137,8

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA V.- Resumen cálculos (Retención.)

Exp.	W _{dF}	W _{dP}	W _{dD}	W _{dL}	H _a	H _o	X _a	X _o	D _C
Nº	lb	lb	lb	lb	lb	lb	%	%	%
1	40,88	6,53	-	-	34,35	38,97	5,01	5,68	-
2	40,88	10,41	-	-	30,47	38,97	4,44	5,68	-
3	81,76	22,97	-	-	58,79	-	8,58	-	-
4	81,76	21,86	-	-	59,90	-	8,74	-	-
5	81,76	19,83	-	-	61,93	73,62	9,04	10,74	-
6	81,76	19,19	-	-	62,57	73,62	9,13	10,74	-
7	81,76	24,87	-	-	56,89	-	8,30	-	-
8	81,76	31,96	-	-	49,80	-	7,27	-	-
9	81,76	32,02	-	-	49,74	75,78	7,26	11,06	-
10	81,76	32,70	-	-	49,06	80,11	7,16	11,69	-
11	81,76	14,59	-	-	67,17	75,78	9,80	11,06	-
12	81,76	13,04	-	-	68,72	101,76	10,03	14,85	-
13	81,76	16,28	-	-	65,48	101,76	9,56	14,85	-
14	81,76	22,71	-	-	59,03	-	8,62	-	-
15	122,64	34,13	-	2,17	86,34	121,25	12,60	17,70	-
16	122,64	26,84	-	2,19	93,61	121,25	13,66	17,70	-
17	122,64	15,83	-	1,09	105,72	121,25	15,43	17,70	-
18	122,64	19,84	-	0,80	102,00	-	14,89	-	-
19	122,64	30,20	-	-	92,44	-	13,49	-	-
20	81,76	39,02	-	-	42,74	38,97	6,24	5,68	-
21	81,76	35,21	-	1,20	45,35	73,62	6,62	10,74	-
22	81,76	42,11	0,11	0,99	38,55	-	5,62	-	0,13
23	81,76	39,59	1,10	2,29	38,78	75,78	5,66	11,06	1,34
24	81,76	42,55	0,22	2,64	36,35	101,76	5,30	14,85	0,26
25	81,76	41,01	0,66	3,08	37,01	-	5,40	-	0,80
26	112,35	37,26	0,66	8,59	65,84	121,25	9,61	17,70	0,58
27	112,35	36,82	0,44	5,95	69,14	-	10,09	-	0,39
28	112,35	29,76	0,44	7,93	74,22	-	10,83	-	0,39
29	81,76	38,25	0,55	1,30	41,66	38,97	6,08	5,68	0,67
30	81,76	36,38	1,10	8,84	35,44	73,62	5,17	10,74	1,34
31	81,76	34,39	0,77	9,50	37,10	-	5,41	-	0,94
32	81,76	21,82	5,18	18,98	35,78	75,78	5,22	11,06	6,33
33	81,76	23,59	0,44	11,06	46,67	101,76	6,81	14,85	0,53
34	81,76	13,23	11,68	21,25	35,60	-	5,19	-	14,28
35	122,64	17,08	7,07	40,70	57,79	121,25	8,43	17,70	5,76
36	79,46	25,36	3,41	9,22	41,47	19,48	6,05	2,84	4,29
37	79,46	30,98	0,11	4,74	43,63	32,47	6,36	4,74	0,13
38	79,46	25,13	0,22	8,86	45,25	45,46	6,60	6,63	0,27
39	81,76	42,86	0,99	8,02	29,89	-	4,36	-	1,21
40	81,76	40,51	0,05	7,29	33,91	-	4,95	-	0,06
41	81,76	48,06	0,77	2,57	30,36	-	4,43	-	0,94

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA VI.- Resumen cálculos (Dusting¹, tiempo de retención.)

Exp.	D _L	D _T	R _{wF}	R _{dF}	R _P	F _{dF}	T _X	T _H	K
Nº	%	%	$\frac{\text{lb}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{lb}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{lb}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{ft}^3}{\text{hr.ft}^2}$	hr	hr	-
1	-	-	668,1	619,3	637,1	8,13	0,055	0,055	0,0135
2	-	-	668,1	619,3	629,3	8,13	0,049	0,049	0,0121
3	-	-	705,6	654,1	671,5	8,58	0,090	0,089	0,0223
4	-	-	856,3	793,8	816,6	10,42	0,075	0,075	0,0185
5	-	-	452,3	419,2	423,9	5,50	0,147	0,147	0,0214
6	-	-	426,0	394,9	401,3	5,18	0,158	0,158	0,0231
7	-	-	254,9	236,3	238,6	3,10	0,240	0,240	0,0201
8	-	-	249,1	230,9	232,5	3,03	0,215	0,215	0,0180
9	-	-	551,2	510,9	513,5	6,70	0,097	0,097	0,0154
10	-	-	595,9	552,4	558,5	7,25	0,088	0,088	0,0140
11	-	-	711,2	659,2	667,2	8,65	0,101	0,101	0,0161
12	-	-	412,1	382,0	383,9	5,01	0,180	0,179	0,0168
13	-	-	426,0	394,9	398,0	5,18	0,166	0,165	0,0155
14	-	-	218,8	202,8	202,8	2,66	0,291	0,291	0,0156
15	1,76	1,76	567,8	526,3	526,8	6,91	0,164	0,164	0,0115
16	1,78	1,78	567,8	526,3	527,4	6,91	0,177	0,177	0,0124
17	0,88	0,88	696,3	645,4	646,7	8,47	0,163	0,163	0,0114
18	0,65	0,65	317,2	294,0	294,0	3,86	0,347	0,346	0,0144
19	-	-	241,8	224,1	224,1	2,94	0,412	0,412	0,0097
20	-	-	673,2	624,0	630,9	8,19	0,068	0,068	0,0160
21	1,46	1,46	441,0	408,8	410,8	5,36	0,111	0,110	0,0162
22	1,21	1,34	252,7	234,2	234,2	3,07	0,164	0,164	0,0136
23	2,80	4,14	616,7	571,6	576,2	7,50	0,067	0,067	0,0106
24	3,22	3,48	399,0	369,8	369,8	4,85	0,098	0,098	0,0092
25	3,76	4,56	230,2	213,4	213,4	2,80	0,173	0,173	0,0093
26	7,64	8,22	615,2	570,3	570,3	7,48	0,115	0,115	0,0081
27	5,29	5,68	398,6	369,5	369,5	4,85	0,187	0,187	0,0077
28	7,05	7,44	232,1	215,1	215,1	2,82	0,345	0,344	0,0082
29	1,59	2,26	678,4	628,8	637,8	8,25	0,066	0,066	0,0163
30	10,81	12,15	400,9	371,6	371,4	4,87	0,095	0,095	0,0138
31	11,61	12,55	236,4	219,1	219,1	2,87	0,169	0,169	0,0141
32	23,21	29,54	711,2	659,2	659,2	8,65	0,054	0,054	0,0085
33	13,52	14,05	424,0	393,0	393,0	5,16	0,118	0,118	0,0110
34	25,99	40,27	239,6	222,1	222,1	2,91	0,160	0,160	0,0085
35	33,18	38,94	648,5	601,1	601,1	7,89	0,096	0,096	0,0067
36	11,60	15,89	450,0	405,4	408,7	5,32	0,102	0,102	0,0252
37	5,96	6,09	408,3	367,8	370,4	4,82	0,118	0,118	0,0172
38	11,15	11,42	246,3	221,9	221,9	2,91	0,204	0,203	0,0171
39	9,80	11,01	595,9	552,4	556,8	7,25	0,054	0,054	0,0133
40	8,91	8,97	378,5	350,8	352,2	4,60	0,096	0,096	0,0140
41	3,14	4,08	221,6	205,4	205,4	2,69	0,148	0,147	0,0123

1) Se ha utilizado el término inglés "Dusting", en lugar de la traducción española "Levantamiento de polvo", indicado en ENGINEERS' DICTIONARY "ROBB", por considerarlo más adecuado.

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA VII.- Resumen cálculos (Balance de materiales.)

Exp.	T_F	T_P	$T_F - T_P$	E_W	Y_e	Y_1	$Y_e - Y_1$	E_W
Nº	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sal}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sal}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb sal}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{hr}^2}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb aire}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb aire}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{lb aire}}$	$\frac{\text{lb H}_2\text{O}}{\text{hr}}$
1	0,0787	0,0288	0,0499	30,9	0,0162	0,0117	0,0045	3,5
2	0,0787	0,0162	0,0625	38,7	0,0142	0,0117	0,0025	1,9
3	0,0787	0,0266	0,0521	34,0	0,0208	0,0117	0,0091	7,1
4	0,0787	0,0288	0,0499	39,6	0,0183	0,0117	0,0066	5,1
5	0,0787	0,0111	0,0676	28,3	0,0192	0,0117	0,0075	5,9
6	0,0787	0,0162	0,0625	24,6	0,0172	0,0117	0,0055	4,3
7	0,0787	0,0101	0,0686	16,2	0,0201	0,0117	0,0084	6,6
8	0,0787	0,0070	0,0717	16,5	0,0162	0,0117	0,0045	3,5
9	0,0787	0,0050	0,0737	37,6	0,0226	0,0117	0,0109	8,5
10	0,0787	0,0111	0,0676	37,3	0,0244	0,0117	0,0127	10,0
11	0,0787	0,0121	0,0666	43,9	0,0195	0,0117	0,0078	6,1
12	0,0787	0,0050	0,0737	28,1	0,0180	0,0117	0,0063	4,9
13	0,0787	0,0080	0,0707	27,9	0,0139	0,0117	0,0022	1,7
14	0,0787	0,0000	0,0787	15,9	0,0155	0,0117	0,0038	2,9
15	0,0787	0,0010	0,0777	40,8	0,0237	0,0117	0,0120	9,4
16	0,0787	0,0020	0,0767	40,3	0,0208	0,0117	0,0091	7,1
17	0,0787	0,0020	0,0767	49,5	0,0137	0,0117	0,0020	1,5
18	0,0787	0,0000	0,0787	23,1	0,0163	0,0117	0,0046	3,6
19	0,0787	0,0000	0,0787	17,6	0,0201	0,0117	0,0084	6,6
20	0,0787	0,0111	0,0676	42,1	0,0259	0,0117	0,0142	29,9
21	0,0787	0,0050	0,0737	30,1	0,0255	0,0117	0,0138	29,1
22	0,0787	0,0000	0,0787	18,4	0,0208	0,0117	0,0091	19,2
23	0,0787	0,0080	0,0707	40,4	0,0252	0,0117	0,0235	49,6
24	0,0787	0,0000	0,0787	29,1	0,0298	0,0117	0,0181	38,2
25	0,0787	0,0000	0,0787	16,7	0,0502	0,0117	0,0385	81,2
26	0,0787	0,0000	0,0787	44,8	0,0308	0,0117	0,0191	40,3
27	0,0787	0,0000	0,0787	29,0	0,0431	0,0117	0,0314	66,2
28	0,0787	0,0000	0,0787	16,9	0,0310	0,0117	0,0193	40,7
29	0,0787	0,0141	0,0646	40,6	0,0388	0,0117	0,0271	92,8
30	0,0787	0,0000	0,0787	29,2	0,0550	0,0117	0,0433	148,3
31	0,0787	0,0000	0,0787	17,2	0,0434	0,0117	0,0317	108,6
32	0,0787	0,0000	0,0787	51,8	0,0291	0,0117	0,0174	59,6
33	0,0787	0,0000	0,0787	30,9	0,0205	0,0117	0,0088	30,1
34	0,0787	0,0000	0,0787	17,4	0,0310	0,0117	0,0193	66,1
35	0,0787	0,0000	0,0787	47,3	0,0142	0,0117	0,0025	8,5
36	0,1098	0,0080	0,1018	41,2	0,0310	0,0117	0,0193	66,1
37	0,1098	0,0070	0,1028	37,8	0,0259	0,0117	0,0142	48,6
38	0,1098	0,0000	0,1098	24,3	0,0128	0,0117	0,0011	3,7
39	0,0787	0,0080	0,0707	39,0	0,0238	0,0117	0,0121	41,4
40	0,0787	0,0040	0,0747	26,2	0,0218	0,0117	0,0101	34,6
41	0,0787	0,0000	0,0787	16,1	0,0259	0,0117	0,0142	48,6

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA VIII.- Resumen cálculos (Balance térmico.)

Exp	$c_s \uparrow T_F \cdot c_w$	$t_F - t_o$	h_{sF}	$c_s \uparrow T_P \cdot c_w$	$t_P - t_o$	h_{sP}	$h_{sP} - h_{sF}$	q_s	$t_{di} - t$
Nº		ºF	$\frac{Btu.}{lb}$		ºF	$\frac{Btu}{lb}$	$\frac{Btu}{lb}$	$\frac{Btu}{hr}$	ºF
1	0,3487	43,2	15,06	0,2988	55,8	16,67	1,61	997	155,5
2	0,3487	50,4	17,57	0,2862	59,4	17,00	-0,57	---	155,5
3	0,3487	34,2	11,92	0,2966	54,0	16,01	4,09	2.675	155,5
4	0,3487	28,8	10,04	0,2988	55,8	16,67	6,63	5.262	155,5
5	0,3487	32,4	11,29	0,2811	59,4	16,69	5,40	2.264	155,5
6	0,3487	39,6	13,80	0,2862	57,6	16,48	2,68	1.058	155,5
7	0,3487	34,2	11,92	0,2801	63,0	17,64	5,72	1.351	155,5
8	0,3487	36,0	12,55	0,2770	66,6	18,44	5,89	1.360	155,5
9	0,3487	84,6	29,50	0,2750	61,2	16,83	-12,67	---	155,5
10	0,3487	82,8	28,87	0,2811	57,6	16,19	-12,68	---	155,5
11	0,3487	45,0	15,69	0,2821	54,0	15,23	-0,46	---	155,5
12	0,3487	41,4	14,43	0,2750	55,8	15,34	0,91	347	155,5
13	0,3487	16,2	5,64	0,2780	55,8	15,50	9,86	3.893	155,5
14	0,3487	16,2	5,64	0,2700	59,4	16,03	10,39	2.107	155,5
15	0,3487	36,0	12,55	0,2710	57,6	15,60	3,05	1.605	155,5
16	0,3487	48,6	16,94	0,2720	61,2	16,64	-0,30	---	155,5
17	0,3487	18,0	6,27	0,2720	57,6	15,66	9,39	6.061	155,5
18	0,3487	39,6	13,80	0,2700	61,2	16,52	2,72	799	155,5
19	0,3487	43,2	15,06	0,2700	66,6	17,98	2,92	654	155,5
20	0,3487	36,0	12,55	0,2811	55,8	15,68	3,13	1.953	155,5
21	0,3487	34,2	11,92	0,2750	59,4	16,33	4,41	1.802	155,5
22	0,3487	34,2	11,92	0,2700	61,2	16,52	4,60	1.077	155,5
23	0,3487	18,0	6,27	0,2780	57,6	16,01	9,74	5.568	155,5
24	0,3487	36,0	12,55	0,2700	77,4	20,89	8,34	3.084	155,5
25	0,3487	39,6	13,80	0,2700	90,0	24,30	10,50	2.240	155,5
26	0,3487	41,4	14,43	0,2700	77,4	20,89	6,46	3.684	155,5
27	0,3487	43,2	15,06	0,2700	86,4	23,30	8,24	3.044	155,5
28	0,3487	46,8	16,31	0,2700	93,6	25,27	8,96	1.927	155,5
29	0,3487	45,0	15,69	0,2841	66,6	18,79	3,10	1.949	155,5
30	0,3487	46,8	16,31	0,2700	84,6	22,84	6,53	2.426	155,5
31	0,3487	43,2	15,06	0,2700	97,2	26,24	11,18	2.450	155,5
32	0,3487	43,2	15,06	0,2700	75,6	20,41	5,35	3.527	155,5
33	0,3487	27,0	9,41	0,2700	88,2	23,81	14,40	5.659	155,5
34	0,3487	34,2	11,92	0,2700	106,2	28,67	16,75	3.720	155,5
35	0,3487	27,0	9,41	0,2700	147,6	39,85	30,44	18.299	155,5
36	0,3798	34,2	12,98	0,2780	77,4	21,51	8,53	3.458	155,5
37	0,3798	34,2	12,98	0,2770	84,6	23,43	10,45	3.844	155,5
38	0,3798	34,2	12,98	0,2700	93,6	25,27	12,29	2.727	155,5
39	0,3487	23,4	8,15	0,2780	84,6	23,51	15,36	8.484	155,5
40	0,3487	39,6	13,80	0,2740	95,4	26,13	12,33	4.326	155,5
41	0,3487	37,8	13,18	0,2700	106,2	28,67	15,49	3.182	155,5

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA IX.- Resumen cálculos (Balance térmico.)

Exp	$t_{de} - t$	$\frac{\Sigma(\Delta t)}{2}$	q_L	$q_s + q_L$	c_{ai}	$t_{di} - t_o$	$c_{ai}(t_{di} - t_o)$	$\lambda_o \cdot Y_i$
Nº	ºF	ºF	$\frac{Btu.}{hr}$	$\frac{Btu.}{hr}$	$\frac{Btu.}{lb. \cdot \text{ºF}}$	ºF	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{lb}$
1	71,3	113,4	6.411	7.408	0,2452	185	45,37	12,57
2	71,3	113,4	6.411	-----	0,2452	185	45,37	12,57
3	51,5	103,5	5.851	8.527	0,2452	185	45,37	12,57
4	62,3	108,9	6.111	11.374	0,2452	185	45,37	12,57
5	58,7	107,1	6.055	8.319	0,2452	185	45,37	12,57
6	58,7	107,1	6.055	7.113	0,2452	185	45,37	12,57
7	64,1	109,8	6.208	7.559	0,2452	185	45,37	12,57
8	71,3	113,4	6.411	7.771	0,2452	185	45,37	12,57
9	71,3	113,4	6.411	-----	0,2452	185	45,37	12,57
10	64,1	109,8	6.208	-----	0,2452	185	45,37	12,57
11	56,9	106,2	6.004	-----	0,2452	185	45,37	12,57
12	64,1	109,8	6.208	6.555	0,2452	185	45,37	12,57
13	56,9	106,2	6.004	9.898	0,2452	185	45,37	12,57
14	65,9	110,7	6.258	8.366	0,2452	185	45,37	12,57
15	56,9	106,2	6.004	7.609	0,2452	185	45,37	12,57
16	51,5	103,5	5.851	-----	0,2452	185	45,37	12,57
17	42,5	99,0	5.597	11.658	0,2452	185	45,37	12,57
18	55,1	105,3	5.953	6.753	0,2452	185	45,37	12,57
19	64,1	109,8	6.208	6.862	0,2452	185	45,37	12,57
20	78,5	117,0	6.615	8.568	0,2452	185	45,37	12,57
21	80,3	117,9	6.666	8.468	0,2452	185	45,37	12,57
22	69,5	112,5	6.360	7.438	0,2452	185	45,37	12,57
23	69,5	112,5	6.360	11.929	0,2452	185	45,37	12,57
24	73,1	114,3	6.462	9.547	0,2452	185	45,37	12,57
25	80,3	117,9	6.666	8.906	0,2452	185	45,37	12,57
26	46,1	100,8	5.699	9.383	0,2452	185	45,37	12,57
27	65,9	110,7	6.258	9.303	0,2452	185	45,37	12,57
28	67,7	111,6	6.309	8.237	0,2452	185	45,37	12,57
29	83,9	119,7	6.767	8.717	0,2452	185	45,37	12,57
30	74,9	115,2	6.513	8.940	0,2452	185	45,37	12,57
31	78,5	117,0	6.615	9.065	0,2452	185	45,37	12,57
32	64,1	109,8	6.208	9.735	0,2452	185	45,37	12,57
33	62,3	108,9	6.157	11.817	0,2452	185	45,37	12,57
34	67,7	111,6	6.309	10.030	0,2452	185	45,37	12,57
35	47,9	101,7	5.750	24.049	0,2452	185	45,37	12,57
36	78,5	117,0	6.615	10.073	0,2452	185	45,37	12,57
37	78,5	117,0	6.615	10.459	0,2452	185	45,37	12,57
38	73,1	114,3	6.462	9.189	0,2452	185	45,37	12,57
39	65,9	110,7	6.258	14.743	0,2452	185	45,37	12,57
40	74,9	115,2	6.513	10.839	0,2452	185	45,37	12,57
41	78,5	117,0	6.615	9.797	0,2452	185	45,37	12,57

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA X.- Resumen cálculos (Balance térmico.)

Exp.	c_{ae}	$t_{de}-t_o$	$c_{ae}(t_{de}-t_o)$	$\lambda_o \cdot Y_e$	h_{ai}	h_{ae}	$h_{ai}-h_{ae}$	q_a
Nº	$\frac{Btu.}{lb. ^\circ F}$	$^{\circ}F$	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{lb}$	$\frac{Btu.}{hr}$
1	0,2472	100,8	24,92	17,41	57,9	42,3	15,6	12.294
2	0,2463	100,8	24,83	15,26	57,9	40,0	17,8	14.048
3	0,2493	81,0	20,19	22,36	57,9	42,5	15,3	12.120
4	0,2482	91,8	22,78	19,67	57,9	42,4	15,4	12.199
5	0,2486	88,2	21,93	20,64	57,9	42,5	15,3	12.105
6	0,2477	88,2	21,85	18,49	57,9	40,3	17,6	13.861
7	0,2490	93,6	23,31	21,61	57,9	44,9	13,0	10.254
8	0,2472	100,8	24,92	17,41	57,9	42,3	15,6	12.294
9	0,2501	100,8	25,21	24,29	57,9	49,5	8,4	6.647
10	0,2509	93,6	23,49	26,23	57,9	49,7	8,2	6.473
11	0,2487	86,4	21,49	20,96	57,9	42,4	15,4	12.554
12	0,2481	93,6	23,22	19,35	57,9	42,5	15,3	12.105
13	0,2462	86,4	21,27	14,94	57,9	36,2	21,7	17.114
14	0,2469	95,4	23,56	16,66	57,9	40,2	17,7	13.955
15	0,2506	86,4	21,65	25,48	57,9	47,1	10,8	8.513
16	0,2493	81,0	20,19	22,36	57,9	42,5	15,3	12.120
17	0,2461	72,0	17,72	14,73	57,9	32,4	25,4	20.075
18	0,2473	84,6	20,92	17,52	57,9	38,4	19,5	15.357
19	0,2490	93,6	23,31	21,61	57,9	44,9	13,0	10.254
20	0,2516	108,0	27,17	27,84	57,9	55,0	2,9	6.184
21	0,2514	109,8	27,61	27,41	57,9	55,0	2,9	6.163
22	0,2493	99,0	24,68	22,36	57,9	47,0	10,9	23.008
23	0,2513	99,0	24,88	27,09	57,9	51,9	5,9	12.601
24	0,2534	102,6	25,99	32,04	57,9	58,0	- 0,09	-----
25	0,2625	109,8	28,83	53,97	57,9	82,8	-24,8	-----
26	0,2538	75,6	19,19	33,11	57,9	52,3	5,6	11.905
27	0,2593	95,4	24,74	46,34	57,9	71,0	-13,1	-----
28	0,2539	97,2	24,68	33,33	57,9	58,0	- 0,07	-----
29	0,2574	113,4	29,19	41,71	57,9	70,9	-12,9	-----
30	0,2647	104,4	27,63	59,13	57,9	86,7	-28,8	-----
31	0,2595	108,0	28,02	46,66	57,9	74,6	-16,7	-----
32	0,2530	93,6	23,68	31,28	57,9	54,9	2,9	10.209
33	0,2492	91,8	22,87	22,04	57,9	44,9	13,0	44.642
34	0,2539	97,2	24,68	33,33	57,9	58,0	- 0,07	-----
35	0,2463	77,4	19,07	15,26	57,9	34,3	23,6	80.890
36	0,2539	108,0	27,42	33,33	57,9	60,7	- 2,8	-----
37	0,2516	108,0	27,17	27,84	57,9	55,0	2,9	10.038
38	0,2457	102,6	25,21	13,76	57,9	38,9	18,9	64.993
39	0,2507	95,4	23,91	25,58	57,9	49,4	8,4	28.950
40	0,2498	104,4	26,08	23,43	57,9	49,5	8,4	28.882
41	0,2516	108,0	27,17	27,84	57,9	55,0	2,9	10.038

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA XI.- Resumen cálculos (Rendimientos.)

Exp.	$t_p - t_F$	q_s'	q_a'	h_{wL}	h_{wV}	$h_{wV} - h_{wL}$	q_w'
Nº	ºF	Btu. hr	Btu. hr	Btu. lb	Btu. lb	Btu. lb	Btu. hr
1	12,6	2.106	13.741	43,24	1.118,56	1.075,3	33.270
2	9,0	1.504	13.741	50,39	1.118,56	1.068,1	41.348
3	19,8	3.496	9.925	34,20	1.110,05	1.075,8	36.632
4	27,0	5.786	12.006	28,86	1.114,81	1.085,9	43.047
5	27,0	3.056	11.312	32,46	1.113,28	1.080,8	30.641
6	18,0	1.919	11.312	39,64	1.113,28	1.073,6	26.497
7	28,8	1.837	12.353	34,20	1.115,54	1.081,3	17.414
8	30,6	1.907	13.741	36,05	1.118,56	1.082,5	17.926
9	-23,4	-3.228	13.741	84,52	1.118,56	1.034,0	38.952
10	-25,2	-3.758	12.353	82,74	1.115,54	1.032,8	38.596
11	9,0	1.602	10.965	45,03	1.112,48	1.067,4	46.871
12	14,4	1.485	12.353	41,44	1.115,54	1.074,1	30.257
13	39,6	4.222	10.965	16,27	1.112,48	1.096,2	30.606
14	43,2	2.365	12.700	16,27	1.116,15	1.099,8	17.565
15	21,6	3.069	10.965	36,05	1.112,48	1.076,4	44.047
16	12,6	1.790	9.925	48,62	1.110,05	1.061,4	42.871
17	39,6	6.901	8.190	18,07	1.106,10	1.088,0	53.890
18	21,6	1.714	10.618	39,64	1.111,67	1.072,0	24.817
19	23,4	1.416	12.353	43,24	1.115,54	1.072,3	18.926
20	19,8	3.336	40.546	36,05	1.121,60	1.085,5	45.821
21	25,2	2.781	41.476	34,20	1.122,32	1.088,1	32.795
22	27,0	1.707	35.898	34,20	1.117,80	1.083,6	19.981
23	39,6	6.112	35.898	18,07	1.117,80	1.099,7	44.440
24	41,4	4.134	37.757	36,05	1.119,26	1.083,2	31.543
25	50,4	2.903	41.476	39,64	1.122,32	1.082,6	18.189
26	36,0	5.543	23.811	41,44	1.107,72	1.066,2	47.875
27	43,2	4.309	34.038	43,24	1.116,33	1.073,0	31.216
28	46,8	2.718	34.968	46,82	1.117,08	1.070,2	18.130
29	21,6	3.667	70.339	45,03	1.123,83	1.078,8	43.799
30	37,8	3.792	62.794	46,82	1.120,08	1.073,2	31.403
31	54,0	3.194	65.812	43,24	1.121,60	1.078,3	18.601
32	32,4	5.767	53.739	43,24	1.115,54	1.072,3	55.663
33	61,2	6.494	52.230	27,07	1.114,81	1.087,7	33.665
34	72,0	4.317	56.757	34,20	1.117,08	1.082,8	18.939
35	120,6	19.574	40.158	27,07	1.108,53	1.081,4	51.196
36	43,2	4.729	65.812	34,20	1.121,60	1.087,4	44.898
37	50,4	5.005	65.812	34,20	1.121,60	1.087,4	41.147
38	59,4	3.558	61.285	34,20	1.119,34	1.085,1	26.455
39	61,2	9.127	55.248	23,47	1.116,33	1.092,8	42.687
40	55,8	5.285	62.794	39,64	1.120,08	1.080,4	28.339
41	68,4	3.793	65.812	37,85	1.121,60	1.083,7	17.524

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA XII.- Resumen cálculos (Rendimientos.)

Exp.	$q'_s + q'_a + q'_w$	q'_v	q''_v	η'_t	η''_t	η'_s	$t_{di} - t_m$	$t_{de} - t_m$
Nº	Btu. hr	Btu. hr	Btu. hr	%	%	%	°F	°F
1	49.118	50.222	29.582	97,8	166,0	67,7	135,5	51,3
2	56.594	61.125	29.582	92,5	191,3	73,0	130,1	45,9
3	50.054	46.310	29.582	108,0	169,2	73,1	140,9	36,9
4	60.840	58.147	29.582	104,6	205,6	70,7	142,7	49,5
5	45.010	35.501	29.582	126,7	152,1	68,0	139,1	42,3
6	39.729	50.324	29.582	78,9	134,2	66,6	136,4	39,6
7	31.605	34.884	29.582	90,5	106,8	55,0	134,4	45,0
8	23.575	48.327	29.582	48,7	79,6	76,0	133,7	49,5
9	49.465	39.412	29.582	125,5	167,2	78,7	112,1	27,9
10	47.191	44.658	29.582	105,6	159,5	81,7	114,8	23,4
11	59.439	47.543	29.582	125,0	200,9	78,8	135,5	36,9
12	44.096	44.350	29.582	99,4	149,0	68,6	136,4	45,0
13	45.794	32.933	29.582	139,0	154,8	66,8	149,0	50,4
14	32.631	52.173	29.582	62,5	110,3	53,8	147,2	57,6
15	58.082	45.069	29.582	128,8	196,3	75,8	138,2	39,6
16	54.586	49.606	29.582	110,0	184,5	78,5	130,1	26,1
17	68.981	62.880	29.582	109,7	233,1	78,1	147,2	34,2
18	37.151	37.358	29.582	99,4	125,5	66,8	134,6	34,2
19	32.695	55.057	29.582	59,3	110,5	57,8	130,1	38,7
20	89.704	73.167	79.263	122,6	113,1	51,0	139,1	62,1
21	77.053	68.024	79.263	113,2	97,2	42,5	138,2	63,0
22	57.587	81.195	79.263	70,9	72,6	34,6	137,3	51,3
23	86.450	77.900	79.263	110,9	109,0	51,4	147,2	61,2
24	73.434	84.388	79.263	87,0	92,6	42,9	128,3	45,9
25	62.569	73.783	79.263	84,8	78,9	29,0	120,2	45,0
26	77.230	74.306	79.263	103,9	97,4	61,9	125,6	16,2
27	69.564	47.543	79.263	146,3	97,7	44,8	120,2	30,6
28	55.817	79.655	79.263	70,0	70,4	32,4	114,8	27,0
29	117.806	79.244	128.692	148,6	91,5	37,1	129,2	57,6
30	97.990	88.094	128.692	111,2	76,1	32,0	119,3	38,7
31	87.608	85.004	128.692	103,0	68,0	21,2	114,8	37,8
32	115.169	83.977	128.692	137,1	89,4	48,3	125,6	34,2
33	92.390	84.183	128.692	109,7	71,7	36,4	127,4	34,2
34	80.014	89.737	128.692	89,1	62,1	23,6	114,8	27,0
35	110.928	91.389	128.692	121,3	86,1	46,1	-----	-----
36	115.440	84.388	128.692	136,7	89,7	38,8	129,2	52,2
37	111.965	88.299	128.692	126,8	87,0	36,7	125,6	48,6
38	91.299	90.773	128.692	100,5	70,9	28,9	121,1	38,7
39	107.063	96.327	128.692	111,4	83,1	39,8	131,0	41,4
40	96.419	96.943	128.692	99,4	74,9	29,3	117,5	36,9
41	87.129	80.066	128.692	108,8	67,7	20,1	113,0	36,0

DESECACION EN SECADOR ROTATORIO

TABLA XIII.- Resumen cálculos (Coeficiente volumétrico de transmisión de calor.)

Exp.	$\frac{t_{di}-t_m}{t_{de}-t_m}$	$\log_{10} \left \frac{t_{di}-t_m}{t_{de}-t_m} \right $	N_t	L_G	U_a
Nº	--	--	--	ft	$\frac{\text{Btu.}}{\text{hr.}^{\circ}\text{F. ft}^3}$
1	2,64	0,421.60	0,9696	9,28	26,43
2	2,83	0,451.79	1,0391	8,66	28,33
3	3,81	0,580.92	1,3361	6,73	36,43
4	2,88	0,459.39	1,0565	8,51	28,80
5	3,28	0,515.87	1,1865	7,58	32,35
6	3,44	0,536.56	1,2340	7,29	33,64
7	3,03	0,480.01	1,1040	8,15	30,10
8	2,70	0,431.36	0,9921	9,07	27,05
9	4,01	0,603.14	1,3872	6,48	37,82
10	4,90	0,690.20	1,5874	5,66	43,28
11	3,67	0,564.67	1,2987	6,93	35,41
12	3,03	0,481.44	1,1073	8,12	30,19
13	2,95	0,469.82	1,0805	8,32	29,46
14	2,55	0,406.54	0,9350	9,62	25,49
15	3,48	0,541.58	1,2456	7,22	33,96
16	4,98	0,697.23	1,6036	5,61	43,72
17	4,30	0,633.47	1,4569	6,17	39,72
18	3,93	0,594.39	1,3670	6,58	37,27
19	3,36	0,526.34	1,2105	7,43	33,00
20	2,23	0,348.30	0,8010	11,23	58,53
21	2,19	0,340.44	0,7830	11,49	57,22
22	2,67	0,426.51	0,9809	9,17	71,68
23	2,40	0,380.21	0,8744	10,29	63,90
24	2,79	0,445.60	1,0248	8,78	74,89
25	2,67	0,426.51	0,9809	9,17	71,68
26	7,75	0,889.30	2,0453	4,40	149,47
27	3,92	0,593.29	1,3645	6,59	99,71
28	4,25	0,628.39	1,4452	6,22	105,61
29	2,24	0,350.25	0,8055	11,17	95,54
30	3,08	0,488.55	1,1236	8,00	133,28
31	3,03	0,481.44	1,1073	8,12	131,34
32	3,67	0,564.67	1,1287	6,93	154,05
33	3,72	0,570.54	1,3122	6,85	155,65
34	4,25	0,628.39	1,4452	6,22	171,42
35	----	-----	-----	----	-----
36	2,47	0,392.70	0,9032	9,96	107,13
37	2,58	0,411.62	0,9467	9,50	112,29
38	3,12	0,494.15	1,1365	7,91	134,81
39	3,16	0,499.69	1,1492	7,83	136,31
40	3,18	0,502.43	1,1555	7,78	137,06
41	3,13	0,495.54	1,1397	7,89	135,19

Capítulo 6

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

1 Propósito del trabajo.

1.1 Determinar las velocidades de desecación de los siguientes materiales:

- (1) Asbesto
- (2) Madera

1.2 Estudiar la influencia de la temperatura sobre:

- (1) la velocidad de secado (α)
- (2) el contenido crítico de humedad (T_c)
- (3) el coeficiente de desecación (K)

2 Principios teóricos.- Han sido expuestas en los capítulos 1 y 4

3 Aparato.-

3.1 Descripción.- Es similar a la realizada en (4.1.2) para los secadores de bandejas de calentamiento directo, debiendo señalarse que el calentamiento del aire se realiza con resistencias eléctricas, a través de las cuales circula el aire impulsado por un ventilador. (Figs. 6.1 y 6.2). El secador está provisto de una balanza en la cual se coloca la muestra húmeda, permitiendo conocer el peso de ella en cualquier momento del secado. (Fig. 6.3)

3.2 Operación.- Las etapas a seguir para dejar el secador en condiciones de realizar una experiencia, son las siguientes:

- (1) Llenar con agua la bureta que abastece al termómetro de bulbo húmedo (salida)
- (2) Comprobar la horizontalidad de la balanza.
- (3) Cerrar los deflectores de los tubos de entrada y salida de aire; abrir el deflector situado entre los tubos anteriormente citados. (En caso de operar con recirculación de aire)
- (4) Purgar el filtro de agua del termómetro de bulbo húmedo (entrada) accionando la llave inferior del filtro.
- (5) Dar el agua que humedece el termómetro de bulbo húmedo (entrada), operando las llaves de paso laterales al filtro, de modo que la cañería que trae el exceso de agua del termómetro gotee en forma continua.
- (6) Observar si la porcelana del termómetro de bulbo húmedo (entrada) se humedece, en caso que ello no suceda debe procederse a un lavado de ella.
- (7) Ver si las agujas del registrador de temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo (entrada), están con tinta.
- (8) Poner en marcha el registrador de temperaturas, operando sobre el interruptor correspondiente.
- (9) Subir la palanca que conecta el secador a la red eléctrica del Laboratorio.

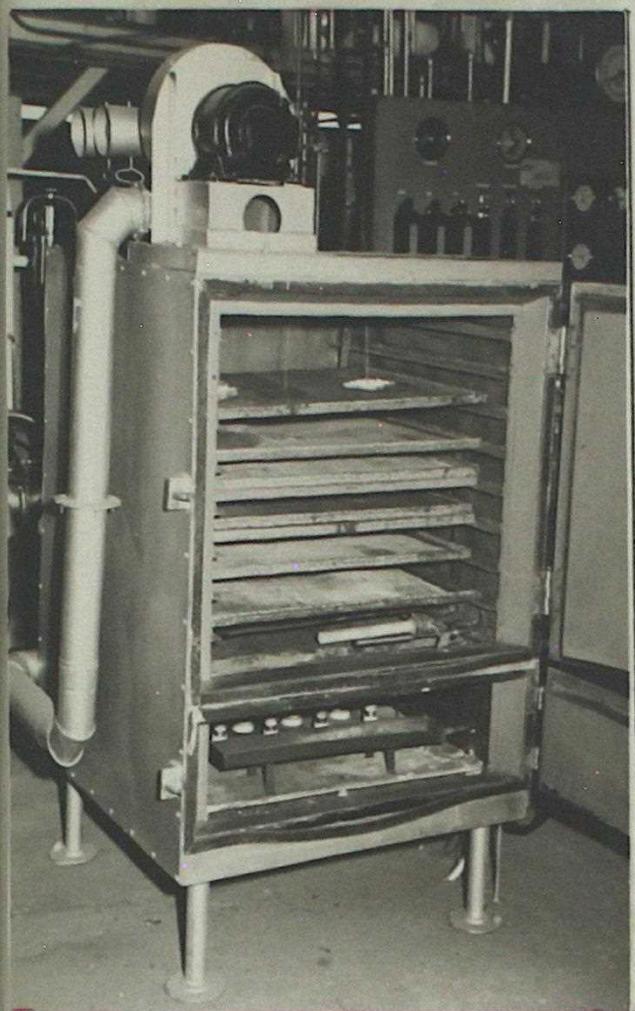


Fig. 6.1 Vista del interior del secador de bandejas.

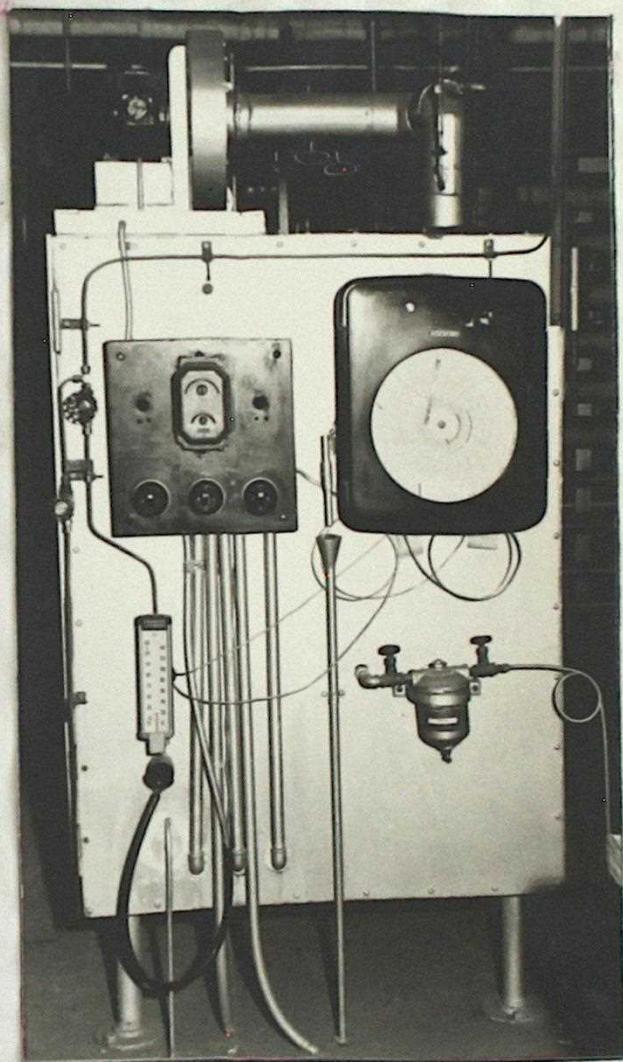


Fig. 6.2 Registrador de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire(entrada). A la izquierda se observa el tablero de control.

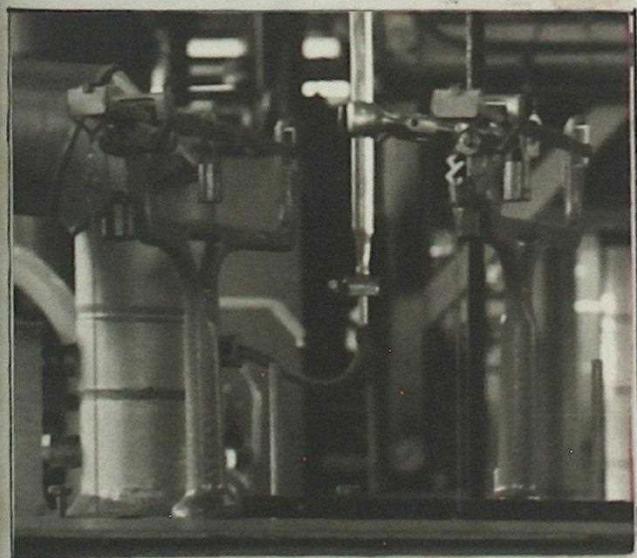


Fig. 6.3 Detalle de las balanzas empleadas en las experiencias de secado.

- (10) Poner en marcha el ventilador, oprimiendo el botón de partida. (Debe encenderse la luz verde del tablero de control del secador)
- (11) Encender las resistencias y una vez alcanzada la temperatura a la cual se va a realizar la experiencia, manipular sus interruptores tratando de estabilizar la temperatura. (A veces basta con actuar sobre el termostato)

4. Procedimiento.-

4.1 Secado de asbesto.

- (1) Se cortaron cinco placas (de 10x10 cm), de una misma plancha de asbesto.
- (2) Las muestras fueron pesadas y después de comparados sus pesos, se igualaron al menor de ellos.
- (3) Las muestras de asbesto se sumergieron en agua durante 15 minutos, después de lo cual se expusieron al aire un tiempo determinado.
- (4) Estabilizado el secador a la temperatura de operación, se introdujo una muestra depositándola sobre el canastillo que cuelga de la balanza.
- (5) Después de realizada la primera pesada de la muestra, estas se repitieron cada cinco minutos.
- (6) Cuando el peso de la muestra se estabilizó, esta se mantuvo en el secador un tiempo adicional ($\frac{3}{4}$ de hora) para verificar esta constancia.
- (7) Se repitió el secado con una segunda muestra, variándose la temperatura del aire de entrada

4.2 Secado de madera.-

- (1) Se midió la longitud, ancho y espesor de las muestras secas, antes de humedecerlas.
- (2) Las muestras posteriormente se sumergieron en agua durante ocho horas.
- (3) Se midió nuevamente la muestra después de retirada del agua.
- (4) Alcanzada la humedad relativa de 70% en el interior del secador (mediante inyección de vapor) y la temperatura a la cual se realizará la experiencia, se introdujo la muestra iniciándose la operación de secado.
- (5) Puesto que el secado no fué posible realizarlo en un sólo día debiendo proseguirse la experiencia al día siguiente, se procedió a retirar la muestra conservándola en una campana de vidrio herméticamente cerrada.
- (6) Para reiniciar la experiencia al día siguiente, fué preciso, calentar las muestras lentamente, con el objeto de restablecer en parte las condiciones en que se encontraban en el momento de interrumpir el trabajo. El tiempo empleado en el período de precalentamiento fué estimado en una hora y se consideró como una nueva medida.
- (7) Finalizado el secado se procedió nuevamente a la medición de la muestra.

6.5 Datos de las experiencias.- Tablas I a XI

6.6 Resultados.- Tablas (Ia) a (XIa)

6.7 Ejemplo de cálculo (para lectura 13, Tabla I)

I) HUMEDAD LIBRE

$$W = \text{peso}_{\text{lect.13}} - \text{peso}_{\text{lect.23}} \quad W = 38,50 - 32,50$$

$$W = 6 \quad [\text{gr.de agua}]$$

II) CONTENIDO DE HUMEDAD LIBRE

$$T = \frac{W}{\text{peso}_{\text{lect.23}}} \quad T = \frac{6}{32,50}$$

$$T = 0,184 \quad \left[\frac{\text{gr.de agua}}{\text{gr de sol.seco}} \right]$$

III) INCREMENTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

$$\Delta T = T_{\text{lect.13}} - T_{\text{lect.12}} \quad \Delta T = 0,223 - 0,184$$

$$\Delta T = 0,039 \quad \left[\frac{\text{gr.de agua}}{\text{gr de sol.seco}} \right]$$

IV) INCREMENTO DEL TIEMPO

$$\Delta \theta = \theta_{\text{lect.13}} - \theta_{\text{lect.12}} \quad \Delta \theta = 1 - 0,916$$

$$\Delta \theta = 0,084 \quad [\text{hr.}]$$

V) RAZON $\Delta T/\Delta \theta$

Las ecuaciones de la curva $\Delta T/\Delta \theta$ vs. T, están calculadas en Tabla Ib

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{0,039}{0,084}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,47 \quad \left[\frac{\text{gr. de agua}}{\text{gr de sol.seco x hr}} \right]$$

VI) VELOCIDAD DE SECADO

a) $dT/d\theta$ se determina midiendo las inclinaciones de las tangentes trazadas a la curva T vs. θ

$$\frac{dT}{d\theta} = 0,392 \quad \left[\frac{\text{gr. de agua}}{\text{gr de sol.seco x hr}} \right]$$

b) $\alpha = \frac{(dT/d\theta)_{\text{C.R.P.}}}{\text{peso}_{\text{lect.23}}}$

$$\alpha = \frac{0,392}{32,50}$$

$$\alpha = 0,1274 \quad \left[\frac{\text{gr de agua}}{\text{hr x cm}^2} \right]$$

VII) COEFICIENTE DE DESECACION

Es el coeficiente angular de la ecuación del período de velocidad decreciente calculada en Tabla Ic

$$K = 2,07 \quad \left[\frac{1}{\text{hr}} \right]$$

6.8 Discusión.-

6.8.1 Secado de asbesto.- Estudiando los resultados anotados en las Tablas Ie y Iie, se repara en el hecho, que los tiempos de secado empleados para las placas de 0,62 cm de espesor, son aproximadamente el doble de aquellos necesarios para el secado de las placas de 0,32 cm de espesor y además la relación entre los espesores de las placas es la misma que la de los tiempos de secado. De donde se desprende la existencia de una ley de proporcionalidad entre el tiempo de secado y el espesor (en el Perry pag.1252 aparece una fórmula que relaciona el tiempo de secado con el espesor). Lo señalado queda comprobado al comparar las velocidades de secado obtenidas empleando los materiales en estudio, las cuales son aproximadamente iguales, esto ha sido graficado en Fig. 6.11 utilizando una sola recta para ambas placas, puesto que los valores de la velocidad de evaporación son lo suficientemente parecidos como para ser considerados puntos de una misma experiencia; la recta interpolada se calculó por el método de los mínimos cuadrados, al igual que todas las rectas que figuran en este trabajo.

En la Figs. 6.4 y 6.5 (θ vs. T) se advierte que a medida que aumenta la temperatura del aire de entrada al secador, las curvas tienden a ser cada vez más rectas lo que representa economía de tiempo en el secado.

Con respecto al contenido crítico de humedad puede decirse, que para las placas de 0,32 cm de espesor, este disminuye linealmente con el aumento de temperatura del aire secante.(Fig. 6.10), mientras que con las de 0,62 no existe una tendencia definida; al contrario según los datos el contenido crítico de humedad tendería a aumentar directamente con la temperatura (razón por la cual no incluí su curva en la Fig. 6.10), pero esto podría atribuirse al hecho que a medida que aumenta el espesor y la temperatura se produzca un endurecimiento de la superficie debido a la acción del calor, limitando así la humedad crítica. Las curvas de la Fig. 6.12 muestran que la velocidad decreciente en las placas de 0,32 cm de espesor es mayor que en las placas de 0,62 cm, lo que vendría a confirmar el hipotético endurecimiento de la superficie de estas últimas placas.

6.8.2 Secado de madera.- Sobre el canastillo que cuelga de la balanza se soldó un cono de lata para proteger la muestra del agua que condensa en el orificio que permite el paso del alambre que sostiene colgado el canastillo a la balanza.

La presencia del cono de protección, es probable que haya alterado algo la lectura de las pesadas de la muestra, debido a la acción de la corriente de aire que pasa sobre ella, incidiendo con el cono haciendo oscilar la balanza. Además debe considerarse que el agua que condensa en el orificio del techo del secador y que cae sobre el cono introduzca un nuevo error en las lecturas, pues esa agua demora algún tiempo en deslizar sobre el cono y desprenderse de él o demora en evaporarse.

Junto con observar las muestras, se hizo otro tanto con trozos de tabla (de 60 cm de largo) de laurel y mañío, las cuales permanecieron 28 horas en el interior del secador. Finalizada su exposición al vapor saturado, estas tablas presentaban indicios de dobladura y principios de partidura en sus extremos. Estos defectos no es posible explicarlos utilizando para ello los resultados de una sola experiencia, pues eso equivaldría a generalizar, lo que no es posible dado la intermitencia con la cual se desarrolló el proceso y la carencia de mayores antecedentes al respecto.

Se realizó un intento de trabajar con vapor de 30 lb de presión no presentando ventajas considerables sobre el vapor de 15 lb de presión, que fué el que se empleó en las experiencias.

La única ventaja es permitir trabajar con una humedad relativa de 70%, a temperaturas superiores, esto es $t_d = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_w = 81,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las experiencias realizadas en el secador de bandejas, tanto con placas de asbesto como con madera, tienen el defecto que dichas muestras no son representativas por el pequeño tamaño de ellas (2), esto se debió no a un error del investigador, sino a la carencia de una balanza apropiada, puesto que las existentes de por sí limitaban el tamaño de las muestras, ya que ellas tienen un rango muy pequeño de medida (hasta 200 grs.), lo cual es insuficiente dado que las diminutas muestras utilizadas una vez húmedas pesaban lo justo para poder emplear dicha balanza.

6.9 Resumen de los calculos.

TABLA Ie (Placa de asbesto de 0,32 cm de espesor)

t_d	$\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$		T_c		$\frac{dT}{d\theta}$	
	C.R.P	F.R.P	analítico	gráfico	C.R.P	F.R.P
70	0,394	1,87 T + 0,098	0,157	0,156	0,392	2,07 T + 0,065
80	0,449	3,78 T + 0,077	0,098	0,114	0,460	3,41 T + 0,054
90	0,565	5,52 T + 0,112	0,082	0,093	0,544	4,89 T + 0,092
100	0,674	4,10 T + 0,266	0,099	0,100	0,656	4,68 T + 0,195
110	0,865	6,75 T + 0,360	0,074	0,074	0,860	4,75 T + 0,318

t_d	Sup.	Peso	$\frac{\text{Sup.}}{\text{Peso}}$	α	K	θ_c	θ_T
70	100	32,50	3,075	0,1274	2,07	1,070	2,000
80	100	32,25	3,105	0,1483	3,41	0,990	1,500
90	100	32,50	3,075	0,1770	4,89	0,880	1,250
100	100	32,50	3,075	0,2133	4,68	0,725	1,000
110	100	32,50	3,075	0,2795	4,75	0,590	0,750

TABLA IIe (Placa de asbesto de 0,62 cm de espesor)

t_d	$\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$		T_c		$\frac{dT}{d\theta}$	
	C.R.P	F.R.P	analítico	gráfico	C.R.P	F.R.P
70	0,192	1,19 T + 0,050	0,119	0,118	0,204	1,26 T + 0,040
80	0,242	1,48 T + 0,050	0,129	0,124	0,244	1,52 T + 0,040
90	0,314	1,50 T + 0,102	0,141	0,140	0,308	1,48 T + 0,086
100	0,391	1,56 T + 0,144	0,158	0,158	0,376	2,19 T + 0,102
110	0,445	2,84 T + 0,131	0,110	0,110	0,444	2,48 T + 0,119

t_d	Sup.	Peso	$\frac{\text{Sup.}}{\text{Peso}}$	α	K	θ_c	θ_T
70	100	61,00	1,640	0,1243	1,26	2,390	3,666
80	100	59,75	1,674	0,1457	1,52	1,945	3,166
90	100	60,25	1,660	0,1855	1,48	1,495	2,333
100	100	60,25	1,660	0,2265	2,19	1,160	1,833
110	100	60,25	1,660	0,2676	2,48	1,100	1,583

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA I.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect. Nº	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T.. °C	D.B.T.. °C
1	0	0	51,25	38	69,9	33	65,4
2	5	5	50,00	38	69	32	63,8
3	10	5	48,75	38	70	32,1	64
4	15	5	47,75	38	69,5	32	63,5
5	20	5	47,00	38,5	69,3	31,8	64,5
6	25	5	45,50	38,5	70	31,9	64,3
7	30	5	44,25	38,5	69,1	31,8	63
8	35	5	43,50	38,5	69,5	32	63
9	40	5	42,50	38,5	70	31,8	64,5
10	45	5	41,75	38,5	70	32	65
11	50	5	40,50	38,5	70	31,8	63,8
12	55	5	39,75	38,5	70	31,8	64
13	60	5	38,50	38,5	70	31,5	64
14	65	5	37,50	38,5	70	31,8	64
15	70	5	36,75	38,5	70	31,5	63
16	75	5	35,75	38,5	70,8	32	64,6
17	80	5	35,25	38,5	70	31,8	63,1
18	85	5	34,25	38,5	70	32	64,9
19	90	5	33,75	38,5	70,8	32,4	65,1
20	95	5	33,25	38,5	70	31,9	63,5
21	100	5	33,00	38,5	70	31,7	63,1
22	110	10	32,75	38,5	70,5	32	63,5
23	120	10	32,50	38,5	71	32,1	66

TABLA II.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0	0	50,50	37,5	81,7	34,2	73,2
2	5	5	49,75	37,5	80,1	34,2	73,6
3	10	5	48,25	37,5	80,8	34,5	74,2
4	15	5	47,00	37,5	81,3	35	75
5	20	5	45,75	38	80,8	34,6	73,9
6	25	5	44,75	38,5	80,3	34,6	73,6
7	30	5	43,25	38,5	80,3	34,2	73,2
8	35	5	42,00	38,5	80,9	35	75
9	40	5	40,75	38,5	80,2	34,2	73,2
10	45	5	39,25	38,5	80,3	35	74,1
11	50	5	38,25	38,5	80,5	34,9	74,5
12	55	5	37,25	38,5	80,5	34,9	74,2
13	60	5	36,00	38,5	80,3	35,1	73
14	65	5	35,00	39	81	35,5	75
15	70	5	34,00	39	81	35,4	74,5
16	75	5	33,25	39	81	35,5	75
17	80	5	32,75	39	80,5	35,5	74,6
18	85	5	32,50	39	81,1	35,8	75
19	90	5	32,25	39	80,4	35,8	73,5

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA III.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect. N ^o	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T. °C	D.B.T. °C
1	0	0	51,50	41	91,2	33,2	82,5
2	5	5	50,00	41	90,5	35	83
3	10	5	48,00	41	89	35	82
4	15	5	46,75	41	91,3	35,8	84
5	20	5	45,25	41	90,9	35,5	84,7
6	25	5	43,75	40,5	88,7	35,1	83,1
7	30	5	42,00	40,5	89,5	35	82,5
8	35	5	40,75	40,5	89	35	81,2
9	40	5	39,00	40,5	90,1	35,2	84,1
10	45	5	37,75	40,7	90,9	35,8	83,3
11	50	5	35,25	41	89,1	35	82,1
12	55	5	35,00	41	89,7	35	82,5
13	60	5	33,75	41,3	90,1	35,6	83,2
14	65	5	33,25	41,5	90	35,2	83
15	70	5	32,75	41,5	90,3	36	83,5
16	75	5	32,50	41,7	90	36	83,2

TABLA IV.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0	0	51,50	47	99	36	81,8
2	5	5	49,25	48	101,5	37	84
3	10	5	48,00	48	100	36,7	84
4	15	5	45,75	48	100	37	86,5
5	20	5	44,00	48	100	37	87
6	25	5	42,25	48	101	37	87,5
7	30	5	40,75	49	102	37,5	90
8	35	5	38,75	49	101	37,5	90
9	40	5	37,00	49	100	37	87
10	45	5	35,50	49	100	37,2	89
11	50	5	34,00	49,5	101	37,5	88
12	55	5	32,75	49,5	100	37,5	88,2
13	60	5	32,50	50	101	37,1	90,2

TABLA V.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0	0	51,50	56	110,5	46	98
2	5	5	48,50	56	110	46	100
3	10	5	46,00	57	110	46	98
4	15	5	44,00	57	110,5	47	100
5	20	5	41,75	57,5	110	47	99
6	25	5	39,50	57,5	109	47	99
7	30	5	37,50	58	110	47,2	100
8	35	5	35,00	59	110	43,8	101
9	40	5	33,50	60	110	46	100,5
10	45	5	32,50	60	109	46	101

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA VI.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect. Nº	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T. °C	D.B.T. °C
1	0	0	96,50	37,5	71	29	60
2	5	5	96,00	37,5	70	29,5	60
3	10	5	95,50	37,5	70	30,4	61,6
4	15	5	94,00	37	70,2	31	62,5
5	20	5	93,50	37	70	31,3	62,5
6	25	5	92,25	37	69,9	31,5	62,2
7	30	5	91,50	37	70	31,8	62,9
8	35	5	90,50	37,5	69,5	31,6	61,6
9	40	5	89,00	37,5	69,3	32	62,4
10	45	5	88,00	37,5	69,5	32	63
11	50	5	87,25	37,5	69,3	31,8	62,3
12	55	5	86,00	37,5	69,5	32	62,9
13	60	5	85,00	37,5	70	32,5	63,6
14	65	5	84,00	37,5	70	32,5	63,5
15	70	5	83,00	37,5	70,5	33	64,3
16	75	5	82,00	37,5	69,5	32,3	63
17	80	5	80,75	38	70	32,8	63,2
18	85	5	80,00	38	70	32,8	63,6
19	90	5	79,00	38	71	32,1	65
20	95	5	77,75	38	71,2	33	65,1
21	100	5	76,75	38,1	71,2	32,4	65,2
22	105	5	75,75	38,1	69,3	31,8	62,5
23	110	5	75,00	38,3	70	32	64,1
24	115	5	74,00	38,5	71	32,1	65
25	120	5	72,50	38,5	70,1	32	63,8
26	125	5	71,75	38,5	70	31,8	63,1
27	130	5	70,75	38,5	70,5	32	65
28	135	5	69,75	38,5	70	32	64
29	140	5	68,50	38,5	70,1	32,1	63,8
30	145	5	67,75	38,5	69,5	31,5	62,8
31	150	5	67,25	38,5	69,9	32	63,4
32	155	5	66,25	38,5	70	31,9	64
33	160	5	65,50	38,5	69,3	31,5	63
34	165	5	64,75	38,5	69,9	32	64
35	170	5	64,00	38,5	70	32,2	65
36	175	5	63,75	38	69,9	32	63,5
37	180	5	63,25	38	70,2	32,1	65
38	190	10	62,50	38	70,5	32,1	64,1
39	200	10	61,75	38	70	32,5	64
40	220	20	61,00	38	69,2	32	63,2

TABLA VII.- Placa de asbesto (superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0	0	95,00	36	79,8	33,3	69,5
2	5	5	94,75	36	81	33,5	69
3	10	5	93,50	36	79,8	33,8	68,8
4	15	5	92,25	36,5	79,9	34,1	69,9
5	20	5	91,00	36,5	79,9	34,5	70,5
6	25	5	89,75	36,5	79,8	34,1	71
7	30	5	88,50	36,5	79,9	34,5	71

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA VII.- Continuación

Lect. Nº	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T. °C	D.B.T. °C
8	35	5	87,50	36,5	80,8	35	72,1
9	40	5	86,00	36,5	80,9	34,5	72,3
10	45	5	84,75	36,5	79,8	34,1	71,2
11	50	5	83,25	36,5	79,8	34	71,1
12	55	5	82,25	36,5	79,9	34,2	72,5
13	60	5	81,00	36,5	79,9	34,9	72,6
14	65	5	79,75	36,5	79,9	34,2	73
15	70	5	78,25	36,5	80,8	34,9	74,2
16	75	5	77,00	36,5	80,2	35	73
17	80	5	75,75	37	81	35,1	74,6
18	85	5	74,00	37	80,5	34,6	74
19	90	5	73,25	37	81	35,3	75
20	95	5	72,00	37	80,9	35	74
21	100	5	70,50	37	79,5	35	72,1
22	105	5	69,75	37	80,1	35,2	73,3
23	110	5	68,25	37	79,8	35,1	72,9
24	115	5	67,50	37	79,6	34,9	73
25	120	5	66,25	37	80	34,9	74,5
26	125	5	65,50	37	79,8	34,3	73
27	130	5	64,75	37	80,4	35	74,6
28	137	7	63,50	37	79,9	35	74
29	140	3	63,00	37	79,6	35	73
30	145	5	62,25	37	80,4	36	74
31	150	5	61,75	37	80	36	73,1
32	155	5	61,25	37	80	36,5	73,3
33	160	5	60,75	37	80	35,5	74
34	165	5	60,50	37	80,1	35,8	74
35	170	5	60,25	37	79,9	35,6	72,9
36	180	10	60,00	37	80	35,3	73,2
37	190	10	59,75	37	80	36	75

TABLA VIII.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0	0	96,50	45	90	36	76
2	5	5	95,00	44	90,5	36,2	78
3	10	5	93,50	44	90	36,4	80
4	15	5	92,00	44	89,5	36,3	78,8
5	20	5	91,25	44	90	36	79
6	25	5	88,75	44	91	37	81,3
7	30	5	87,00	44	91	36,6	82,7
8	35	5	85,50	44	90	37	83,8
9	40	5	84,00	44	90	36,9	83,2
10	45	5	82,00	44	90	37,8	85
11	50	5	80,75	44	90	37,4	83,2
12	55	5	79,00	44	90	37,1	81
13	60	5	77,25	44,5	90	37,5	83
14	65	5	75,75	44,5	90	36,8	81,8
15	70	5	74,25	44,5	90	37	83
16	75	5	73,00	45	90	36,7	81
17	80	5	71,25	45	90,5	36,5	82,5

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA VIII.- Continuación

Lect. Nº	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T. °C	D.B.T. °C
18	85	5	70,25	45	90	36,5	83
19	90	5	68,75	44,5	90	36,8	82,8
20	95	5	67,25	44,5	90	37	82
21	100	5	66,00	44,5	91	37,8	83,5
22	105	5	65,25	45	90	37	81,5
23	110	5	64,00	45	90	37	83
24	115	5	62,00	45	90	37,1	83,7
25	120	5	62,25	45	91	37,5	83,5
26	130	10	61,00	45	91	37,1	83
27	140	10	60,25	45	90,5	38	86

TABLA IX.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0	0	96,50	54	100	37,8	83
2	5	5	94,75	52	100	37,3	83,6
3	10	5	92,50	51,5	100	38	87
4	15	5	90,50	51,5	99,5	38	86
5	20	5	89,00	51,5	100	38,8	87
6	25	5	86,75	51,5	100	39	88
7	30	5	85,25	52	100	38,8	88
8	35	5	83,00	52	101	39	90
9	40	5	81,25	52	100	39	89
10	45	5	79,00	53	101,5	39,6	91
11	50	5	77,25	53	100	41	91,5
12	55	5	75,25	53,5	102	40	92
13	60	5	73,25	53	100	40	91
14	65	5	71,00	53	99,3	39	91,3
15	70	5	69,25	53,5	100	39	90
16	75	5	67,75	52	98	39,8	89
17	80	5	66,00	53	100	41,8	91,5
18	85	5	64,75	53	100	41,6	90
19	90	5	63,75	53	100	42,4	92
20	95	5	62,25	53	100	42,5	92,1
21	100	5	61,25	53	100	42,5	92
22	105	5	60,75	53	100	43	92,5
23	110	5	60,25	53	100	42,8	93

TABLA X.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0	0	96,50	51	109	37,5	90
2	5	5	94,25	51	109	38	93,5
3	10	5	92,00	52	109,5	37,9	93,6
4	15	5	90,00	52,5	112	39	98,5
5	20	5	87,75	52	111	38,9	96
6	25	5	85,50	53	111	38,5	98
7	30	5	83,25	53	111	39,5	99,7

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA X.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62)

Lect. N ^o	Hora. min.	Tiempo. min.	Peso. grs.	Aire entrada		Aire Salida	
				W.B.T. °C	D.B.T. °C	W.B.T. °C	D.B.T. °C
8	35	5	80,75	53	110	39	99
9	40	5	78,25	54	111	39,5	100,5
10	45	5	76,25	54	109	39	99
11	50	5	74,00	54,5	110	39,2	98
12	55	5	71,75	55,5	111	39	98,2
13	60	5	69,75	56	111	39,5	99,5
14	65	5	67,50	56	109	39,5	98,7
15	70	5	65,50	57	110	41	101,5
16	75	5	64,00	58	110,5	41,2	103,2
17	80	5	62,75	59	110	40,5	103
18	85	5	61,75	60,5	110	40,5	102,5
19	90	5	61,00	63	110	40,5	102
20	95	5	60,25	65,5	110	40,5	101,5

TABLA XI.- Madera..... Superficie ; Espesor (#)

Alerce.....	89,32 cm ²	; 1,46 cm
Olivillo.....	98,90 cm ²	; 1,43 cm
Pino Araucaria..	80,98 cm ²	; 1,42 cm

Humedad relativa del aire 70%: W.B.T.= 71,7°C; D.B.T.=80°C

Lect. N ^o	Hora. hr.	Tiempo. hr.	Alerce.	Olivillo.	Pino Araucaria
			Peso grs.	Peso grs.	Peso grs.
1	0	0	67,3	106,7	89,0
2	1	1	65,6	105,8	87,8
3	2	1	63,6	103,0	85,9
4	3	1	62,3	101,3	84,0
5	4	1	61,3	100,7	82,5
6	5	1	60,3	97,7	80,5
7	6	1	59,3	96,0	79,8
8	7	1	58,4	94,6	78,3
9	8	1	57,9	92,7	77,0
10	9	1	58,0	86,6	76,1
11	10	1	58,0	85,9	74,9
12	11	1	57,8	85,0	73,7
13	12	1	57,9	84,2	73,0
14	13	1	57,8	83,9	72,2
15	14	1	57,3	82,9	71,7
16	15	1	57,0	81,8	71,2
17	16	1	56,9	81,6	70,7
18	17	1	56,8	81,0	70,3
19	18	1	57,0	80,6	69,9
20	19	1	57,7	80,5	69,9
21	20	1	57,6	80,1	69,9
22	21	1	57,6	80,0	
23	22	1	57,6	80,0	

(#) Superficie y espesor de la muestra al finalizar la experiencia

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA I a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	e.	$\Delta e.$	W.	T.	$\Delta T.$	$\Delta T/\Delta e.$	dT/d e
1	0,000	0,000	18,75	0,577			
2	0,083	0,083	17,50	0,538	0,039	0,470	0,392
3	0,166	0,083	16,25	0,500	0,038	0,458	0,392
4	0,250	0,083	15,25	0,470	0,030	0,361	0,392
5	0,333	0,083	14,50	0,446	0,024	0,289	0,392
6	0,416	0,083	13,00	0,400	0,046	0,554	0,392
7	0,500	0,083	11,75	0,362	0,038	0,458	0,392
8	0,583	0,083	11,00	0,338	0,024	0,289	0,392
9	0,666	0,083	10,00	0,308	0,030	0,361	0,392
10	0,750	0,083	9,25	0,284	0,024	0,289	0,392
11	0,833	0,083	8,00	0,246	0,038	0,458	0,392
12	0,916	0,083	7,25	0,223	0,023	0,277	0,392
13	1,000	0,083	6,00	0,184	0,039	0,470	0,392
14	1,083	0,083	5,00	0,154	0,030	0,361	0,340
15	1,116	0,083	4,25	0,131	0,023	0,277	0,320
16	1,250	0,083	3,25	0,100	0,031	0,373	0,304
17	1,333	0,083	2,75	0,084	0,016	0,193	0,276
18	1,416	0,083	1,75	0,054	0,030	0,361	0,224
19	1,500	0,083	1,25	0,038	0,016	0,193	0,168
20	1,583	0,083	0,75	0,023	0,015	0,180	0,124
21	1,666	0,083	0,50	0,015	0,008	0,096	0,076
22	1,833	0,167	0,25	0,008	0,007	0,042	0,048
23	2,000	0,167	0,00	0,000	0,008	0,048	0,028

TABLA II a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0,000	0,000	18,25	0,565			
2	0,083	0,083	17,50	0,543	0,022	0,265	0,460
3	0,166	0,083	16,00	0,496	0,047	0,566	0,460
4	0,250	0,083	15,25	0,473	0,023	0,277	0,460
5	0,333	0,083	13,50	0,419	0,054	0,650	0,460
6	0,416	0,083	12,50	0,388	0,031	0,373	0,460
7	0,500	0,083	11,00	0,341	0,047	0,566	0,460
8	0,583	0,083	9,75	0,302	0,039	0,470	0,460
9	0,666	0,083	8,50	0,263	0,039	0,470	0,460
10	0,750	0,083	7,00	0,217	0,046	0,554	0,460
11	0,833	0,083	6,00	0,186	0,031	0,373	0,460
12	0,916	0,083	5,00	0,155	0,031	0,373	0,460
13	1,000	0,083	3,75	0,116	0,039	0,470	0,404
14	1,083	0,083	2,75	0,085	0,031	0,373	0,348
15	1,166	0,083	1,75	0,054	0,031	0,373	0,280
16	1,250	0,083	1,00	0,031	0,023	0,277	0,212
17	1,333	0,083	0,50	0,016	0,016	0,193	0,148
18	1,416	0,083	0,25	0,008	0,007	0,082	0,112
19	1,500	0,083	0,00	0,000	0,008	0,096	0,068

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA III a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	dT/d θ
1	0,000	0,000	19,00	0,585			
2	0,083	0,083	17,50	0,539	0,046	0,554	0,544
3	0,166	0,083	15,50	0,477	0,062	0,746	0,544
4	0,250	0,083	14,25	0,439	0,038	0,458	0,544
5	0,333	0,083	12,75	0,392	0,047	0,566	0,544
6	0,416	0,083	11,25	0,346	0,046	0,554	0,544
7	0,500	0,083	9,50	0,292	0,054	0,650	0,544
8	0,583	0,083	8,25	0,254	0,038	0,458	0,544
9	0,666	0,083	7,50	0,230	0,024	0,289	0,544
10	0,750	0,083	5,25	0,162	0,068	0,819	0,544
11	0,833	0,083	2,75	0,085	0,077	0,927	0,516
12	0,916	0,083	2,50	0,077	0,008	0,096	0,448
13	1,000	0,083	1,25	0,038	0,039	0,470	0,292
14	1,083	0,083	0,75	0,023	0,015	0,180	0,204
15	1,166	0,083	0,25	0,008	0,015	0,180	0,140
16	1,250	0,083	0,00	0,000	0,008	0,096	0,084

TABLA IV a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0,000	0,000	19,00	0,585			
2	0,083	0,083	16,75	0,515	0,070	0,844	0,656
3	0,166	0,083	15,50	0,477	0,038	0,458	0,656
4	0,250	0,083	13,25	0,408	0,069	0,832	0,656
5	0,333	0,083	11,50	0,354	0,054	0,650	0,656
6	0,416	0,083	9,75	0,300	0,054	0,650	0,656
7	0,500	0,083	8,25	0,254	0,046	0,554	0,656
8	0,583	0,083	6,25	0,192	0,062	0,746	0,656
9	0,666	0,083	4,50	0,138	0,054	0,650	0,656
10	0,750	0,083	3,00	0,092	0,046	0,554	0,632
11	0,833	0,083	1,50	0,046	0,046	0,554	0,404
12	0,916	0,083	0,25	0,008	0,038	0,458	0,240
13	1,000	0,083	0,00	0,000	0,008	0,096	0,188

TABLA V a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

1	0,000	0,000	19,00	0,585			
2	0,083	0,083	16,00	0,492	0,093	1,120	0,860
3	0,166	0,083	13,50	0,415	0,077	0,927	0,860
4	0,250	0,083	11,50	0,354	0,061	0,735	0,860
5	0,333	0,083	9,25	0,285	0,069	0,832	0,860
6	0,416	0,083	7,00	0,215	0,070	0,844	0,860
7	0,500	0,083	5,00	0,154	0,061	0,735	0,860
8	0,583	0,083	2,50	0,077	0,077	0,927	0,652
9	0,666	0,083	1,00	0,038	0,039	0,470	0,524
10	0,750	0,083	0,00	0,000	0,038	0,458	0,324

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA VI a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	dT/d θ
1	0,000	0,000	35,50	0,582			
2	0,083	0,083	35,00	0,574	0,008	0,096	0,204
3	0,166	0,083	34,50	0,565	0,009	0,108	0,204
4	0,250	0,083	33,00	0,541	0,024	0,289	0,204
5	0,333	0,083	32,50	0,534	0,007	0,084	0,204
6	0,416	0,083	31,25	0,512	0,022	0,265	0,204
7	0,500	0,083	30,50	0,500	0,012	0,145	0,204
8	0,583	0,083	29,50	0,484	0,016	0,193	0,204
9	0,666	0,083	28,00	0,459	0,025	0,301	0,204
10	0,750	0,083	27,00	0,443	0,016	0,193	0,204
11	0,833	0,083	26,25	0,430	0,013	0,157	0,204
12	0,916	0,083	25,00	0,410	0,020	0,241	0,204
13	1,000	0,083	24,00	0,394	0,016	0,193	0,204
14	1,083	0,083	23,00	0,377	0,017	0,205	0,204
15	1,116	0,083	22,00	0,361	0,016	0,193	0,204
16	1,250	0,083	21,00	0,344	0,017	0,205	0,204
17	1,333	0,083	19,75	0,324	0,020	0,241	0,204
18	1,416	0,083	19,00	0,312	0,012	0,145	0,204
19	1,500	0,083	18,00	0,295	0,017	0,205	0,204
20	1,583	0,083	16,75	0,275	0,020	0,241	0,204
21	1,666	0,083	15,75	0,258	0,017	0,205	0,204
22	1,750	0,083	14,75	0,242	0,016	0,193	0,204
23	1,833	0,083	14,00	0,229	0,013	0,157	0,204
24	1,916	0,083	13,00	0,213	0,016	0,193	0,204
25	2,000	0,083	11,50	0,189	0,024	0,289	0,204
26	2,083	0,083	10,75	0,176	0,013	0,157	0,204
27	2,166	0,083	9,75	0,160	0,016	0,193	0,204
28	2,250	0,083	8,75	0,143	0,017	0,205	0,204
29	2,333	0,083	7,50	0,123	0,020	0,241	0,188
30	2,416	0,083	6,75	0,111	0,012	0,145	0,180
31	2,500	0,083	6,25	0,102	0,009	0,108	0,168
32	2,583	0,083	5,25	0,086	0,016	0,193	0,152
33	2,666	0,083	4,50	0,074	0,012	0,145	0,136
34	2,750	0,083	3,75	0,061	0,013	0,157	0,124
35	2,833	0,083	3,00	0,049	0,012	0,145	0,112
36	2,916	0,083	2,75	0,045	0,004	0,048	0,100
37	3,000	0,083	2,25	0,037	0,008	0,096	0,088
38	3,166	0,166	1,50	0,025	0,012	0,072	0,068
39	3,333	0,166	0,75	0,012	0,013	0,078	0,056
40	3,666	0,333	0,00	0,000	0,012	0,036	0,028

TABLA VII a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0,000	0,000	35,25	0,590			
2	0,083	0,083	35,00	0,586	0,004	0,048	0,244
3	0,166	0,083	33,75	0,565	0,021	0,253	0,244
4	0,250	0,083	32,50	0,543	0,022	0,265	0,244
5	0,333	0,083	31,25	0,522	0,021	0,253	0,244
6	0,416	0,083	30,00	0,502	0,020	0,241	0,244
7	0,500	0,083	28,75	0,482	0,020	0,241	0,244
8	0,583	0,083	27,75	0,465	0,017	0,205	0,244
9	0,666	0,083	26,25	0,439	0,026	0,313	0,244
10	0,750	0,083	25,00	0,418	0,021	0,253	0,244
11	0,833	0,083	23,50	0,393	0,025	0,301	0,244

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA VII a.- Continuación

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	dT/d θ
12	0,916	0,083	22,50	0,377	0,016	0,193	0,244
13	1,000	0,083	21,25	0,355	0,022	0,265	0,244
14	1,083	0,083	20,00	0,335	0,020	0,241	0,244
15	1,166	0,083	18,50	0,310	0,025	0,301	0,244
16	1,250	0,083	17,25	0,289	0,021	0,253	0,244
17	1,333	0,083	16,00	0,268	0,021	0,253	0,244
18	1,416	0,083	14,25	0,238	0,030	0,361	0,244
19	1,500	0,083	13,50	0,226	0,012	0,145	0,244
20	1,583	0,083	12,25	0,205	0,021	0,253	0,244
21	1,666	0,083	10,75	0,180	0,025	0,301	0,244
22	1,750	0,083	10,00	0,168	0,012	0,145	0,244
23	1,833	0,083	8,50	0,142	0,026	0,313	0,231
24	1,916	0,083	7,75	0,130	0,012	0,145	0,224
25	2,000	0,083	6,50	0,109	0,021	0,253	0,208
26	2,083	0,083	5,75	0,096	0,013	0,157	0,196
27	2,166	0,083	5,00	0,084	0,012	0,145	0,184
28	2,282	0,116	3,75	0,063	0,021	0,181	0,160
29	2,333	0,050	3,25	0,054	0,009	0,180	0,144
30	2,416	0,083	2,50	0,042	0,012	0,145	0,120
31	2,500	0,083	2,00	0,033	0,009	0,108	0,100
32	2,583	0,083	1,50	0,025	0,008	0,096	0,076
33	2,666	0,083	1,00	0,017	0,008	0,096	0,068
34	2,750	0,083	0,75	0,013	0,004	0,048	0,048
35	2,833	0,083	0,50	0,008	0,005	0,060	0,044
36	3,000	0,167	0,25	0,004	0,004	0,024	0,032
37	3,166	0,166	0,00	0,000	0,004	0,024	0,020

TABLA VIII a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0,000	0,000	36,25	0,620			
2	0,083	0,083	34,75	0,577	0,043	0,518	0,308
3	0,166	0,083	33,25	0,552	0,025	0,301	0,308
4	0,250	0,083	31,75	0,527	0,025	0,301	0,308
5	0,333	0,083	31,00	0,515	0,012	0,145	0,308
6	0,416	0,083	28,50	0,473	0,042	0,506	0,308
7	0,500	0,083	26,75	0,445	0,028	0,337	0,308
8	0,583	0,083	25,25	0,419	0,026	0,313	0,308
9	0,666	0,083	23,75	0,394	0,015	0,180	0,308
10	0,750	0,083	21,75	0,361	0,033	0,398	0,308
11	0,833	0,083	20,50	0,340	0,021	0,253	0,308
12	0,916	0,083	18,75	0,311	0,029	0,349	0,308
13	1,000	0,083	17,00	0,282	0,029	0,349	0,308
14	1,083	0,083	15,50	0,257	0,025	0,301	0,308
15	1,166	0,083	14,00	0,233	0,024	0,289	0,308
16	1,250	0,083	12,75	0,212	0,021	0,253	0,308
17	1,333	0,083	11,00	0,183	0,029	0,349	0,308
18	1,416	0,083	10,00	0,166	0,017	0,205	0,308
19	1,500	0,083	8,50	0,141	0,025	0,301	0,264
20	1,583	0,083	7,00	0,116	0,025	0,301	0,248
21	1,666	0,083	5,75	0,096	0,020	0,241	0,236
22	1,750	0,083	5,00	0,083	0,013	0,157	0,224
23	1,833	0,083	3,75	0,062	0,021	0,253	0,204
24	1,916	0,083	2,75	0,046	0,016	0,193	0,176
25	2,000	0,083	2,00	0,033	0,013	0,157	0,152
26	2,166	0,166	0,75	0,013	0,020	0,120	0,100
27	2,333	0,166	0,00	0,000	0,013	0,077	0,048

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA IX a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	dT/d θ
1	0,000	0,000	36,25	0,602			
2	0,083	0,083	34,50	0,572	0,030	0,361	0,376
3	0,166	0,083	32,25	0,535	0,037	0,445	0,376
4	0,250	0,083	30,25	0,502	0,033	0,398	0,376
5	0,333	0,083	28,75	0,477	0,025	0,301	0,376
6	0,416	0,083	26,50	0,440	0,037	0,445	0,376
7	0,500	0,083	25,00	0,415	0,025	0,301	0,376
8	0,583	0,083	22,75	0,378	0,037	0,445	0,376
9	0,666	0,083	21,00	0,349	0,029	0,349	0,376
10	0,750	0,083	18,75	0,311	0,038	0,458	0,376
11	0,833	0,083	17,00	0,282	0,029	0,349	0,376
12	0,916	0,083	15,00	0,249	0,033	0,398	0,376
13	1,000	0,083	13,00	0,216	0,033	0,398	0,376
14	1,083	0,083	10,75	0,178	0,038	0,458	0,376
15	1,116	0,083	9,00	0,149	0,029	0,349	0,376
16	1,250	0,083	7,50	0,124	0,025	0,301	0,356
17	1,333	0,083	5,75	0,096	0,028	0,337	0,324
18	1,416	0,083	4,50	0,075	0,021	0,253	0,288
19	1,500	0,083	3,50	0,058	0,017	0,205	0,232
20	1,583	0,083	2,00	0,033	0,025	0,301	0,188
21	1,666	0,083	1,00	0,017	0,016	0,193	0,148
22	1,750	0,083	0,50	0,008	0,009	0,108	0,112
23	1,833	0,083	0,00	0,000	0,008	0,096	0,072

TABLA X a.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

1	0,000	0,000	36,25	0,602			
2	0,083	0,083	34,00	0,565	0,037	0,445	0,444
3	0,166	0,083	31,75	0,527	0,038	0,458	0,444
4	0,250	0,083	29,75	0,494	0,033	0,398	0,444
5	0,333	0,083	27,50	0,456	0,038	0,458	0,444
6	0,416	0,083	25,25	0,419	0,037	0,445	0,444
7	0,500	0,083	23,00	0,382	0,037	0,445	0,444
8	0,583	0,083	20,50	0,340	0,042	0,506	0,444
9	0,666	0,083	18,00	0,299	0,041	0,493	0,444
10	0,750	0,083	16,00	0,266	0,033	0,398	0,444
11	0,833	0,083	13,75	0,228	0,038	0,458	0,444
12	0,916	0,083	11,50	0,191	0,037	0,445	0,444
13	1,000	0,083	9,50	0,158	0,033	0,398	0,444
14	1,083	0,083	7,25	0,120	0,038	0,458	0,396
15	1,116	0,083	5,25	0,087	0,033	0,398	0,356
16	1,250	0,083	3,75	0,062	0,025	0,301	0,288
17	1,333	0,083	2,50	0,042	0,020	0,241	0,244
18	1,416	0,083	1,50	0,025	0,017	0,205	0,184
19	1,500	0,083	0,75	0,012	0,013	0,157	0,136
20	1,583	0,083	0,00	0,000	0,012	0,145	0,096

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA XI a(1).- Alerce

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	dT/d θ
1	0	0	9,7	0,168			
2	1	1	8,0	0,139	0,029	0,029	0,0268
3	2	1	6,0	0,104	0,035	0,035	0,0268
4	3	1	4,7	0,0816	0,0224	0,0224	0,0268
5	4	1	3,7	0,0643	0,0173	0,0173	0,0236
6	5	1	2,7	0,0469	0,0174	0,0174	0,0148
7	6	1	1,7	0,0285	0,0184	0,0184	0,0096
8	7	1	0,8	0,0139	0,0146	0,0146	0,0068
10	9	2	0,4	0,0069	0,0070	0,0035	0,0032
13	12	3	0,3	0,0052	0,0017	0,00056	0,0008
14	13	1	0,2	0,0034	0,0018	0,0018	0,0008
20	19	6	0,1	0,0017	0,0017	0,00026	0,0008
21	20	1	0,0	0,0000	0,0017	0,0017	0,0008

TABLA XI a(2).- Olivillo

1	0	0	26,7	0,334			
2	1	1	25,8	0,322	0,012	0,012	0,0288
3	2	1	23,0	0,288	0,034	0,034	0,0288
4	3	1	21,3	0,266	0,022	0,022	0,0288
5	4	1	20,7	0,259	0,007	0,007	0,0288
6	5	1	17,7	0,221	0,038	0,038	0,0288
7	6	1	16,0	0,200	0,021	0,021	0,0288
8	7	1	14,6	0,182	0,018	0,018	0,0288
9	8	1	12,7	0,159	0,023	0,023	0,0288
10	9	1	6,6	0,0825	0,0765	0,0765	0,0288
11	10	1	5,9	0,0737	0,0088	0,0088	0,0288
12	11	1	5,0	0,0625	0,0112	0,0112	0,0288
13	12	1	4,2	0,0525	0,0100	0,0100	0,0288
14	13	1	3,9	0,0487	0,0038	0,0038	0,0288
15	14	1	2,9	0,0362	0,0125	0,0125	0,0164
16	15	1	1,8	0,0225	0,0137	0,0137	0,0120
17	16	1	1,6	0,0200	0,0025	0,0025	0,0080
18	17	1	1,0	0,0125	0,0075	0,0075	0,0056
19	18	1	0,6	0,0075	0,0050	0,0050	0,0044
20	19	1	0,5	0,0062	0,0013	0,0013	0,0032
21	20	1	0,1	0,0012	0,0050	0,0050	0,0020
22	21	1	0,0	0,0000	0,0012	0,0012	0,0016

TABLA XI a(3).- Pino Araucaria

1	0	0	19,1	0,273			
2	1	1	17,9	0,256	0,017	0,017	0,0236
3	2	1	16,0	0,229	0,027	0,027	0,0236
4	3	1	14,1	0,202	0,027	0,027	0,0236
5	4	1	12,6	0,180	0,022	0,022	0,0236
6	5	1	10,6	0,152	0,028	0,028	0,0236
7	6	1	9,9	0,142	0,010	0,010	0,0208
8	7	1	8,4	0,120	0,022	0,022	0,0192
9	8	1	7,1	0,102	0,018	0,018	0,0180
10	9	1	6,2	0,0887	0,0133	0,0133	0,0164
11	10	1	5,0	0,0716	0,0171	0,0171	0,0132

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

TABLA XI a(3).- Continuación

Lect.	θ .	$\Delta\theta$.	W.	T.	ΔT .	$\Delta T/\Delta\theta$.	$dT/d\theta$
12	11	1	3,8	0,0544	0,0172	0,0172	0,0104
13	12	1	3,1	0,0444	0,0100	0,0100	0,0092
14	13	1	2,3	0,0329	0,0115	0,0115	0,0084
15	14	1	1,8	0,0258	0,0071	0,0071	0,0076
16	15	1	1,3	0,0186	0,0072	0,0072	0,0072
17	16	1	0,8	0,0114	0,0072	0,0072	0,0068
18	17	1	0,4	0,0057	0,0057	0,0057	0,0064
19	18	1	0,0	0,0000	0,0057	0,0057	0,0064

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA I b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,470	14	0,154	0,361	0,055.594	0,023.716
3	0,458	15	0,131	0,277	0,036.287	0,017.161
4	0,361	16	0,100	0,373	0,037.300	0,010.000
5	0,289	17	0,084	0,193	0,016.212	0,007.056
6	0,554	18	0,054	0,361	0,019.494	0,002.916
7	0,458	19	0,038	0,193	0,007.334	0,001.444
8	0,289	20	0,023	0,180	0,004.140	0,000.529
9	0,361	21	0,015	0,096	0,001.440	0,000.225
10	0,289	22	0,008	0,042	0,000.338	0,000.064
11	0,458	23	0,000	0,048	0,000.000	0,000.000
12	0,277	Σ	0,607	2,124	0,178.139	0,063.111
13	0,470					
Σ	4,734					

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{4,734}{12}$$

a)

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,394$$

$$\begin{aligned} 0,178 &= 0,063 m + 0,607 b \\ 2,124 &= 0,607 m + 10 b \end{aligned}$$

$$m = 1,87 \quad b = 0,0989$$

b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 1,87 T + 0,0989$
para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,0989$
para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,0529

TABLA II b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,265	13	0,116	0,470	0,054.520	0,013.456
3	0,566	14	0,085	0,373	0,031.705	0,007.225
4	0,277	15	0,054	0,373	0,020.142	0,002.916
5	0,650	16	0,031	0,277	0,008.587	0,000.961
6	0,373	17	0,016	0,193	0,003.088	0,000.256
7	0,566	18	0,008	0,082	0,000.656	0,000.064
8	0,470	19	0,000	0,096	0,000.000	0,000.000
10	0,554	Σ	0,350	1,864	0,118.700	0,024.878
11	0,373					
12	0,373					
Σ	4,937					

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{4,937}{11}$$

a)

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,449$$

$$\begin{aligned} 0,118 &= 0,024 m + 0,350 b \\ 1,864 &= 0,350 m + 7 b \end{aligned}$$

$$m = 3,78 \quad b = 0,077$$

b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 3,78 T + 0,077$
para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,077$
para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,0204

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA III b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,554	11	0,085	0,927	0,078.795	0,007.225
3	0,746	12	0,077	0,096	0,007.392	0,005.929
4	0,458	13	0,038	0,470	0,017.860	0,001.444
5	0,566	14	0,023	0,180	0,004.140	0,000.529
6	0,554	15	0,008	0,180	0,001.440	0,000.064
7	0,650	16	0,000	0,096	0,000.000	0,000.000
8	0,458					
9	0,289	Σ	0,231	1,949	0,109.627	0,015.191
10	0,819					
Σ	5,094					
$\begin{array}{l} 0,109 = 0,015 m + 0,231 b \\ 1,949 = 0,231 m + 6 b \end{array}$ $m = 5,52 \quad b = 0,112$ <p>b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 5,52 T + 0,112$ para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,112$ para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,0203</p>						
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{5,094}{9}$ <p>a)</p> $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,565$						

TABLA IV b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,844	10	0,092	0,554	0,050.968	0,008.464
3	0,458	11	0,046	0,554	0,025.484	0,002.116
4	0,838	12	0,008	0,458	0,003.664	0,000.064
5	0,650	13	0,000	0,096	0,000.000	0,000.000
6	0,650	Σ	0,146	1,662	0,080.116	0,010.644
7	0,554					
8	0,746					
9	0,650					
Σ	5,390					
$\begin{array}{l} 0,080 = 0,010 m + 0,146 b \\ 1,662 = 0,146 m + 4 b \end{array}$ $m = 4,1 \quad b = 0,266$ <p>b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 4,1 T + 0,266$ para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,266$ para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,065</p>						
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{5,390}{8}$ <p>a)</p> $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,674$						

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA V b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect.	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	1,120	8	0,077	0,927	0,071.379	0,005.929
3	0,927	9	0,038	0,470	0,017.860	0,001.444
4	0,735	10	0,000	0,458	0,000.000	0,000.000
5	0,832					
6	0,844	Σ	0,115	1,855	0,089.239	0,007.373
7	0,735					
Σ	5,191					
$0,089 = 0,007 m + 0,115 b$ $1,855 = 0,115 m + 3 b$ $m = 6,75 \quad b = 0,36$						
b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 6,75 T + 0,36$ para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,36$ para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,053						
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{5,191}{6}$						
a)						
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,865$						

TABLA VI b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect.	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,096	29	0,123	0,241	0,029.643	0,015.129
3	0,108	30	0,111	0,145	0,016.095	0,012.321
4	0,289	31	0,102	0,108	0,011.016	0,010.404
5	0,084	32	0,086	0,193	0,016.598	0,007.396
6	0,265	33	0,074	0,145	0,010.730	0,005.476
7	0,145	34	0,061	0,157	0,009.577	0,003.721
8	0,193	35	0,049	0,145	0,007.105	0,002.401
9	0,301	36	0,045	0,048	0,002.160	0,002.025
10	0,193	37	0,037	0,096	0,003.552	0,001.369
11	0,157	38	0,025	0,072	0,001.800	0,000.625
12	0,241	39	0,012	0,078	0,000.936	0,000.144
13	0,193	40	0,000	0,036	0,000.000	0,000.000
14	0,205	Σ	0,725	1,464	0,109.212	0,061.011
15	0,193					
16	0,205					
17	0,241					
18	0,145					
19	0,205					
20	0,241					
21	0,205					
22	0,193					
23	0,157					
24	0,193					
25	0,289					
26	0,157					
27	0,193					
28	0,205					
Σ	5,292					
$0,109 = 0,061 m + 0,725 b$ $1,464 = 0,725 m + 12 b$ $m = 1,19 \quad b = 0,0502$						
b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 1,19 T + 0,05$ para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,05$ para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,042						
$a) \frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,192$						

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA VII b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect.	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,048	23	0,142	0,313	0,044.446	0,020.164
3	0,253	24	0,130	0,145	0,018.850	0,016.900
4	0,265	25	0,109	0,253	0,027.577	0,011.881
5	0,253	26	0,096	0,157	0,015.072	0,009.216
6	0,241	27	0,084	0,145	0,012.180	0,007.056
7	0,241	28	0,063	0,181	0,011.403	0,003.969
8	0,205	29	0,054	0,180	0,009.720	0,002.916
9	0,313	30	0,042	0,145	0,006.090	0,001.764
10	0,253	31	0,033	0,108	0,003.564	0,001.089
11	0,301	32	0,025	0,096	0,002.400	0,000.625
12	0,193	33	0,017	0,096	0,001.632	0,000.289
13	0,265	34	0,013	0,048	0,000.614	0,000.169
14	0,241	35	0,008	0,060	0,000.480	0,000.064
15	0,301	36	0,004	0,024	0,000.096	0,000.016
16	0,253	37	0,000	0,024	0,000.000	0,000.000
17	0,253					
18	0,361	Σ	0,820	1,975	0,154.124	0,076.118
19	0,145	$\begin{aligned} 0,154 &= 0,076 m + 0,820 b \\ 1,975 &= 0,820 m + 15 b \end{aligned}$				
20	0,253	$m = 1,48 \quad b = 0,0507$				
21	0,301	b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 1,48 T + 0,0507$				
22	0,145	para T = 0 ; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,05$				
Σ	5,084	para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; T = - 0,0338				
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{5,084}{21}$						
a)						
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,242$						

TABLA VIII b.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect.	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,518	19	0,141	0,301	0,042.441	0,019.881
3	0,301	20	0,116	0,301	0,034.916	0,013.456
4	0,301	21	0,096	0,241	0,023.136	0,009.216
5	0,145	22	0,083	0,157	0,013.031	0,006.889
6	0,506	23	0,062	0,253	0,015.686	0,003.844
7	0,337	24	0,046	0,193	0,008.878	0,002.116
8	0,313	25	0,033	0,157	0,005.181	0,001.089
9	0,180	26	0,013	0,120	0,001.560	0,000.169
10	0,398	27	0,000	0,077	0,000.000	0,000.000
11	0,253	Σ	0,590	1,800	0,144.829	0,056.660
12	0,349	$\begin{aligned} 0,144 &= 0,056 m + 0,590 b \\ 1,800 &= 0,590 m + 9 b \end{aligned}$				
13	0,349	$m = 1,5 \quad b = 0,102$				
14	0,301					
15	0,289					
16	0,253					
17	0,349					
18	0,205					

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA X b.- Continuación

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	$m = 2,84$ $b = 0,131$ b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 2,84 T + 0,131$ para $T = 0$; $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,131$ para $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0$; $T = - 0,046$
11	0,458	
12	0,445	
13	0,398	
Σ	5,347	
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{5,347}{12}$		
a)		
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,445$		

TABLA XI b(1).- Alerce

Lect.	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect.	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,029	5	0,064.3	0,017.3	0,001.112.39	0,004.134.49
3	0,035	6	0,046.9	0,017.4	0,000.816.06	0,002.199.61
4	0,022.4	7	0,028.5	0,018.4	0,000.524.40	0,000.812.25
		8	0,013.9	0,014.6	0,000.202.94	0,000.193.21
Σ	0,086.4	10	0,006.9	0,003.5	0,000.024.15	0,000.047.61
		13	0,005.2	0,000.56	0,000.002.91	0,000.027.04
		14	0,003.4	0,001.8	0,000.006.12	0,000.011.56
		20	0,001.7	0,000.26	0,000.000.44	0,000.003.24
		Σ	0,170.8	0,073.82	0,002.689.41	0,007.429.01
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{0,086.4}{3}$		$0,002.68 = 0,007.42 m + 0,170.8 b$ $0,073.8 = 0,170.8 m + 8 b$				
a)		$m = 0,289$ $b = 0,003.06$ b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,289 T + 0,003.06$				
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,028.8$		a) C.R.P. $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,028.8$ b) F.R.P. $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,289 T + 0,003.06$				
		$T_c = 0,086.5$				

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA XI b(2).- Olivillo

Lect	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²	
2	0,012	15	0,036.2	0,012.5	0,000.452.50	0,001.310.44	
3	0,034	16	0,022.5	0,013.7	0,000.308.25	0,000.506.25	
4	0,022	17	0,020.0	0,002.5	0,000.050.00	0,000.400.00	
5	0,007	18	0,012.5	0,007.5	0,000.093.75	0,000.156.25	
6	0,038	19	0,007.5	0,005.0	0,000.037.50	0,000.056.25	
7	0,021	20	0,006.2	0,001.3	0,000.008.06	0,000.038.44	
8	0,018	21	0,001.2	0,005.0	0,000.006.00	0,000.001.44	
9	0,023						
10	0,076.5	Σ	0,106.1	0,047.5	0,000.956.06	0,002.469.07	
11	0,008.8	$\begin{aligned} 0,000.95 &= 0,002.46 m + 0,106.1 b \\ 0,047.5 &= 0,106.1 m + 7 b \end{aligned}$					
12	0,011.2	$m = 0,27 \qquad b = 0,002.7$					
13	0,010	$b) \frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,27 T + 0,002.7$					
14	0,003.8	$\begin{aligned} a) \text{ C.R.P. } \frac{\Delta T}{\Delta \theta} &= 0,021.9 \\ b) \text{ F.R.P. } \frac{\Delta T}{\Delta \theta} &= 0,27 T + 0,002.7 \end{aligned}$					
Σ	0,285.3	$T_c = 0,071.3$					
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{0,285.3}{13}$		$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,021.9$					
a)		$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,27 T + 0,002.7$					
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,021.9$		$T_c = 0,071.3$					

TABLA XI b(3).- Pino Araucaria.

Lect	$\Delta T/\Delta \theta$	Lect	T	$\Delta T/\Delta \theta$	T · ($\Delta T/\Delta \theta$)	T ²
2	0,017	7	0,142	0,010	0,001.420	0,020.164
3	0,027	8	0,120	0,022	0,002.640	0,014.400
4	0,027	9	0,102	0,018	0,001.836	0,010.404
5	0,022	10	0,088.7	0,013.3	0,001.179.71	0,007.867.69
6	0,028	11	0,071.6	0,017.1	0,001.224.36	0,005.126.56
Σ	0,121	12	0,054.4	0,017.2	0,000.935.68	0,002.959.36
		13	0,044.4	0,010.0	0,000.444.00	0,001.971.36
		14	0,032.9	0,011.5	0,000.378.35	0,001.082.41
		15	0,025.8	0,007.1	0,000.183.18	0,000.665.64
		16	0,018.6	0,007.2	0,000.133.92	0,000.345.96
		17	0,011.4	0,007.2	0,000.082.08	0,000.129.96
		18	0,005.7	0,005.7	0,000.032.49	0,000.032.49
$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{0,121}{5}$		Σ	0,717.5	0,146.3	0,010.468.77	0,065.169.43

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ vs T

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA XI b(3).- Continuación.

a) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,024.2$	$\begin{array}{l} 0,010.46 = 0,065.16 m + 0,717.5 b \\ 0,146.3 = 0,717.5 m + 12 b \end{array}$ $m = 0,076.8$ $b = 0,007.59$ b) $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,076.8 T + 0,007.59$
	a) C.R.P. $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,024.2$ b) F.R.P. $\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = 0,076.8 T + 0,007.59$ $T_c = 0,216$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA I c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T · (dT/dθ)	T ²
14	0,154	0,340	0,052.360	0,023.716
15	0,131	0,320	0,041.920	0,017.161
16	0,100	0,304	0,030.400	0,010.000
17	0,084	0,276	0,023.184	0,007.056
18	0,054	0,224	0,012.096	0,002.916
19	0,038	0,168	0,006.384	0,001.444
20	0,023	0,124	0,002.852	0,000.529
21	0,015	0,076	0,001.140	0,000.225
22	0,008	0,048	0,000.384	0,000.064
23	0,000	0,028	0,000.000	0,000.000
Σ	0,607	1,908	0,170.720	0,063.111

$$\begin{aligned} 0,170 &= 0,063 m + 0,607 b \\ 1,908 &= 0,607 m + 10 b \end{aligned}$$

$$m = 2,07 \quad b = 0,065$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 2,07 T + 0,065$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,065$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,031$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,392$$

TABLA II c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T · (dT/dθ)	T ²
13	0,116	0,404	0,046.864	0,013.456
14	0,085	0,348	0,029.580	0,007.225
15	0,054	0,280	0,015.120	0,002.916
16	0,031	0,212	0,006.572	0,000.961
17	0,016	0,148	0,002.368	0,000.256
18	0,008	0,112	0,000.896	0,000.064
19	0,000	0,068	0,000.000	0,000.000
Σ	0,350	1,572	0,101.400	0,024.878

$$\begin{aligned} 0,101 &= 0,024 m + 0,350 b \\ 1,572 &= 0,350 m + 7 b \end{aligned}$$

$$m = 3,41 \quad b = 0,054$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 3,41 T + 0,054$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,054$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA II c.- Continuación.

para $\frac{dT}{d\theta} = 0$; T = - 0,015.8

a) $\frac{dT}{d\theta} = 0,460$

TABLA III c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T.(dT/dθ)	T ²
11	0,085	0,516	0,043.860	0,007.225
12	0,077	0,448	0,034.496	0,005.929
13	0,038	0,292	0,011.096	0,001.444
14	0,023	0,204	0,004.692	0,000.529
15	0,008	0,140	0,001.120	0,000.064
16	0,000	0,084	0,000.000	0,000.000
Σ	0,231	1,684	0,095.264	0,015.191

$$\begin{aligned} 0,095 &= 0,015 m + 0,231 b \\ 1,684 &= 0,231 m + 6 b \end{aligned}$$

$$m = 4,89 \quad b = 0,092$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 4,89 T + 0,092$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,092$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,018.8$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,544$$

TABLA IV c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T.(dT/dθ)	T ²
10	0,092	0,632	0,058.144	0,008.464
11	0,046	0,404	0,018.584	0,002.116
12	0,008	0,240	0,001.920	0,000.064
13	0,000	0,188	0,000.000	0,000.000
Σ	0,146	1,464	0,078.648	0,010.644

$$\begin{aligned} 0,078 &= 0,010 m + 0,146 b \\ 1,464 &= 0,146 m + 4 b \end{aligned}$$

$$m = 4,68 \quad b = 0,195$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA IV c.- Continuación.

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 4,68 T + 0,195$$

para $T = 0$; $\frac{dT}{d\theta} = 0,195$
 para $\frac{dT}{d\theta} = 0$; $T = - 0,041.8$

TABLA V c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T·(dT/dθ)	T ²
8	0,077	0,652	0,050.204	0,005.929
9	0,038	0,524	0,019.912	0,001.444
10	0,000	0,324	0,000.000	0,000.000
Σ	0,115	1,500	0,070.116	0,007.373

$$\begin{aligned} 0,070 &= 0,007 m + 0,115 b \\ 1,500 &= 0,115 m + 3 b \end{aligned}$$

$$m = 4,75 \quad b = 0,318$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 4,75 T + 0,318$$

para $T = 0$; $\frac{dT}{d\theta} = 0,318$

para $\frac{dT}{d\theta} = 0$; $T = - 0,067$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,860$$

TABLA VI c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T·(dT/dθ)	T ²
29	0,123	0,188	0,023.124	0,015.129
30	0,111	0,180	0,019.980	0,012.321
31	0,102	0,168	0,017.136	0,010.404
32	0,086	0,152	0,013.072	0,007.396
33	0,074	0,136	0,010.064	0,005.476
34	0,061	0,124	0,007.564	0,003.721
35	0,049	0,112	0,005.488	0,002.401
36	0,045	0,100	0,004.500	0,002.025
37	0,037	0,088	0,003.256	0,001.369
38	0,025	0,068	0,001.700	0,000.625
39	0,012	0,056	0,000.672	0,000.144
40	0,000	0,028	0,000.000	0,000.000
Σ	0,725	1,400	0,106.556	0,061.011

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA VI c.- Continuación.

$0,106 = 0,061 m + 0,725 b$
$1,400 = 0,725 m + 12 b$
$m = 1,260 \quad b = 0,040.5$
b) $\frac{dT}{d\theta} = 1,26 T + 0,040.5$
para $T = 0$; $\frac{dT}{d\theta} = 0,040.5$
para $\frac{dT}{d\theta} = 0$; $T = - 0,031$
a) $\frac{dT}{d\theta} = 0,204$

TABLA VII c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T · (dT/dθ)	T ²
23	0,142	0,231	0,032.802	0,020.164
24	0,130	0,224	0,029.120	0,016.900
25	0,109	0,208	0,022.672	0,011.881
26	0,096	0,196	0,018.816	0,009.216
27	0,084	0,184	0,015.476	0,007.056
28	0,063	0,160	0,010.080	0,003.969
29	0,054	0,144	0,007.776	0,002.916
30	0,042	0,120	0,005.040	0,001.764
31	0,033	0,100	0,003.300	0,001.089
32	0,025	0,076	0,001.900	0,000.625
33	0,017	0,068	0,001.156	0,000.289
34	0,013	0,048	0,000.624	0,000.169
35	0,008	0,044	0,000.352	0,000.064
36	0,004	0,032	0,000.128	0,000.016
37	0,000	0,020	0,000.000	0,000.000
Σ	0,820	1,855	0,149.242	0,076.118

$$\begin{aligned} 0,149 &= 0,076 m + 0,820 b \\ 1,855 &= 0,820 m + 15 b \end{aligned}$$

$$m = 1,52 \quad b = 0,040.6$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 1,52 T + 0,040.6$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,040$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,026$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,244$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA VIII c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T.(dT/dθ)	T ²
19	0,141	0,264	0,037.224	0,019.881
20	0,116	0,248	0,028.768	0,013.456
21	0,096	0,236	0,022.656	0,009.216
22	0,083	0,224	0,018.592	0,006.889
23	0,062	0,204	0,012.648	0,003.844
24	0,046	0,176	0,008.116	0,002.116
25	0,033	0,152	0,005.016	0,001.089
26	0,013	0,100	0,001.300	0,000.169
27	0,000	0,048	0,000.000	0,000.000
Σ	0,590	1,652	0,134.320	0,056.660

$$\begin{aligned} 0,134 &= 0,056 m + 0,590 b \\ 1,652 &= 0,590 m + 9 b \end{aligned}$$

$$m = 1,48 \quad b = 0,086.5$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 1,48 T + 0,086.5$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,086.5$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,058$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,308$$

TABLA IX c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T.(dT/dθ)	T ²
16	0,124	0,356	0,044.144	0,015.376
17	0,096	0,324	0,031.104	0,009.216
18	0,075	0,288	0,021.600	0,005.625
19	0,058	0,232	0,013.456	0,003.364
20	0,033	0,188	0,006.204	0,001.089
21	0,017	0,148	0,002.516	0,000.289
22	0,008	0,112	0,000.896	0,000.064
23	0,000	0,072	0,000.000	0,000.000
Σ	0,411	1,720	0,119.914	0,035.023

$$\begin{aligned} 0,119 &= 0,035 m + 0,411 b \\ 1,720 &= 0,411 m + 8 b \end{aligned}$$

$$m = 2,19 \quad b = 0,102$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 2,19 T + 0,102$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,102$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,046.8$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,376$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA X c.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

Lect.	T	dT/dθ	T·(dT/dθ)	T ²
14	0,120	0,396	0,046.520	0,014.400
15	0,087	0,356	0,030.972	0,007.569
16	0,062	0,288	0,017.856	0,003.844
17	0,042	0,244	0,010.248	0,001.764
18	0,025	0,184	0,004.600	0,000.625
19	0,012	0,136	0,001.632	0,000.144
20	0,000	0,096	0,000.000	0,000.000
Σ	0,348	1,700	0,111.828	0,028.346

$$\begin{array}{l} 0,111 = 0,028 m + 0,348 b \\ 1,700 = 0,348 m + \quad \quad 7 b \end{array}$$

$$m = 2,48 \quad b = 0,119$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 2,48 T + 0,119$$

$$\text{para } T = 0 ; \frac{dT}{d\theta} = 0,119$$

$$\text{para } \frac{dT}{d\theta} = 0 ; T = - 0,048$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,444$$

TABLA XI c(1).- Alerce

Lect.	T	dT/dθ	T·(dT/dθ)	T ²
5	0,064.3	0,023.6	0,001.517.48	0,004.134.49
6	0,046.9	0,014.8	0,000.694.12	0,002.199.61
7	0,028.5	0,009.6	0,000.273.60	0,000.812.25
8	0,013.9	0,006.8	0,000.094.52	0,000.193.21
10	0,006.9	0,003.2	0,000.022.08	0,000.047.61
13	0,005.2	0,000.8	0,000.004.16	0,000.027.04
14	0,003.4	0,000.8	0,000.002.72	0,000.011.56
20	0,001.7	0,000.8	0,000.001.36	0,000.003.24
Σ	0,170.8	0,060.4	0,002.610.04	0,007.429.01

$$\begin{array}{l} 0,002.61 = 0,007.42 m + 0,170.8 b \\ 0,060.4 = 0,170.8 m + \quad \quad 8 b \end{array}$$

$$m = 0,347 \quad b = 0,000.15$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 0,347 T + 0,000.15$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,026.8$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de las ecuaciones de la curva $\frac{dT}{d\theta}$ vs T.

a) C.R.P.

b) F.R.P.

TABLA XI c(2).- Olivillo

Lect.	T	dT/d θ	T.(dT/d θ)	T ²
15	0,036.2	0,016.4	0,001.310.44	0,000.593.68
16	0,022.5	0,012.0	0,000.506.25	0,000.270.00
17	0,020.0	0,008.0	0,000.400.00	0,000.160.00
18	0,012.5	0,005.6	0,000.156.25	0,000.070.00
19	0,007.5	0,004.4	0,000.056.25	0,000.033.00
20	0,006.2	0,003.2	0,000.038.44	0,000.019.84
21	0,001.2	0,002.0	0,000.001.44	0,000.002.40
Σ	0,106.1	0,051.6	0,002.469.07	0,001.148.92

$$\begin{aligned} 0,001.14 &= 0,002.46 m + 0,106.1 b \\ 0,051.6 &= 0,106.1 m + 7 b \end{aligned}$$

$$m = 0,419 \qquad b = 0,001.03$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 0,419 T + 0,001.03$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,028.8$$

TABLA XI c(3).- Pino Araucaria

Lect.	T	dT/d θ	T.(dT/d θ)	T ²
7	0,142	0,020.8	0,020.164	0,002.953.6
8	0,120	0,019.2	0,014.400	0,002.330.4
9	0,102	0,018.0	0,010.404	0,001.836.0
10	0,088.7	0,016.4	0,007.867.69	0,001.454.6
11	0,071.6	0,013.2	0,005.126.56	0,000.945.1
12	0,054.4	0,010.4	0,002.959.36	0,000.565.7
13	0,044.4	0,009.2	0,001.971.36	0,000.408.4
14	0,032.9	0,008.4	0,001.082.41	0,000.276.3
15	0,025.8	0,007.6	0,000.665.64	0,000.196.0
16	0,018.6	0,007.2	0,000.345.96	0,000.133.9
17	0,011.4	0,006.8	0,000.129.96	0,000.077.5
18	0,005.7	0,006.4	0,000.032.49	0,000.036.4
Σ	0,717.5	0,143.6	0,065.169.43	0,011.213.9

$$\begin{aligned} 0,011.21 &= 0,065.16 m + 0,717.5 b \\ 0,143.6 &= 0,717.5 m + 12 b \end{aligned}$$

$$m = 117.5 \qquad b = 0,004.94$$

$$b) \frac{dT}{d\theta} = 0,117.5 T + 0,004.94$$

$$a) \frac{dT}{d\theta} = 0,023.6$$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS.

Determinación de la ecuación de la curva t vs T_c .TABLA XVI d.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

t	T_c	$T_c \cdot t$	$(T_c)^2$
70	0,156	10,920	0,024.336
80	0,114	9,120	0,012.996
90	0,093	8,370	0,008.649
100	0,100	10,000	0,010.000
110	0,074	8,140	0,005.476
450	0,537	46,550	0,061.457

$$\begin{array}{l} 46,55 = 0,061 m + 0,537 b \\ 450,00 = 0,537 m + 5 b \end{array}$$

$$m = - 523,53 ; b = 146,227$$

$$t = - 523,53 T_c + 146,227$$

para $T_c = 0 ; t = 146,227$
para $t = 0 ; T_c = 0,279$

Determinación de la ecuación de la curva t vs K TABLA XVII d.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,32 cm)

t	K	$K \cdot t$	K^2
70	2,07	144,9	4,284.9
80	3,41	272,8	11,628.1
90	4,89	440,1	23,912.1
100	4,68	468,0	21,902.4
110	4,75	522,5	22,562.5
450	19,80	1.848,3	84,290.0

$$\begin{array}{l} 1.848,3 = 84,29 m + 19,8 b \\ 450,0 = 19,8 m + 5 b \end{array}$$

$$m = 11,28 \quad b = 45,25$$

$$t = 11,28 K + 45,25$$

para $K = 0 ; t = 45,25$
para $t = 0 ; K = - 4,01$

DESECACION EN SECADOR DE BANDEJAS

Determinación de la ecuación de la curva t vs K .TABLA XVIII d.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesor 0,62 cm)

t	K	K·t	K ²
70	1,26	88,20	1,587.6
80	1,52	121,60	2,310.4
90	1,48	133,20	2,190.4
100	2,19	219,00	4,796.1
110	2,48	272,80	6,150.4
450	8,93	834,80	17,034.9

$$\begin{array}{l} 834,8 = 17,034 m + 8,93 b \\ 450,0 = 8,93 m + 5 b \end{array}$$

$$m = 28,65 \quad b = 38,85$$

$$t = 28,65 K + 38,85$$

para $K = 0$; $t = 38,85$

para $t = 0$; $K = - 1,357$

Determinación de la ecuación de la curva t vs α .TABLA XIX d.- Placa de asbesto (Superficie 100 cm²; Espesores (a) 0,32 cm y (b) 0,62 cm, simultaneamente).

	t	α	$\alpha \cdot t$	α^2
(a)	70	0,127.4	8,918.0	0,016.129
(b)	70	0,124.3	8,701.0	0,015.376
(a)	80	0,148.3	11,864.0	0,021.904
(b)	80	0,145.7	11,656.0	0,021.025
(a)	90	0,177.0	15,930.0	0,031.329
(b)	90	0,185.5	16,695.0	0,034.225
(a)	100	0,213.3	21,330.0	0,045.369
(b)	100	0,226.5	22,650.0	0,051.076
(a)	110	0,279.5	30,745.0	0,077.841
(b)	110	0,267.6	29,436.0	0,071.289
Σ	900	1,895.1	177,925.0	0,385.563

$$\begin{array}{l} 177,925 = 0,385 m + 1,895 b \\ 900,000 = 1,895 m + 10 b \end{array}$$

$$m = 265,3 \quad ; \quad b = 39,725$$

$$t = 265,3 \alpha + 39,725$$

para $\alpha = 0$; $t = 39,725$

para $t = 0$; $\alpha = - 0,150$

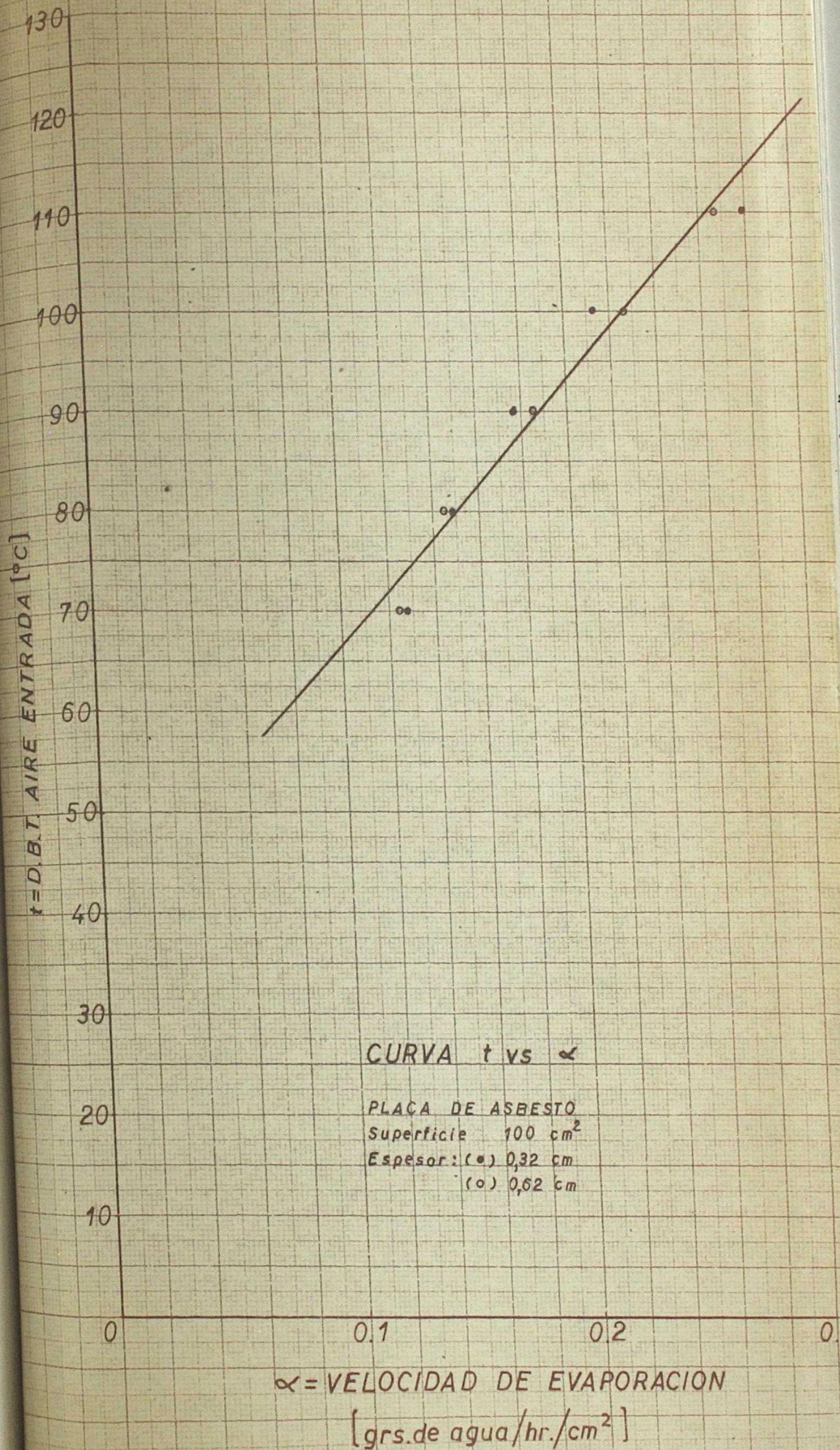
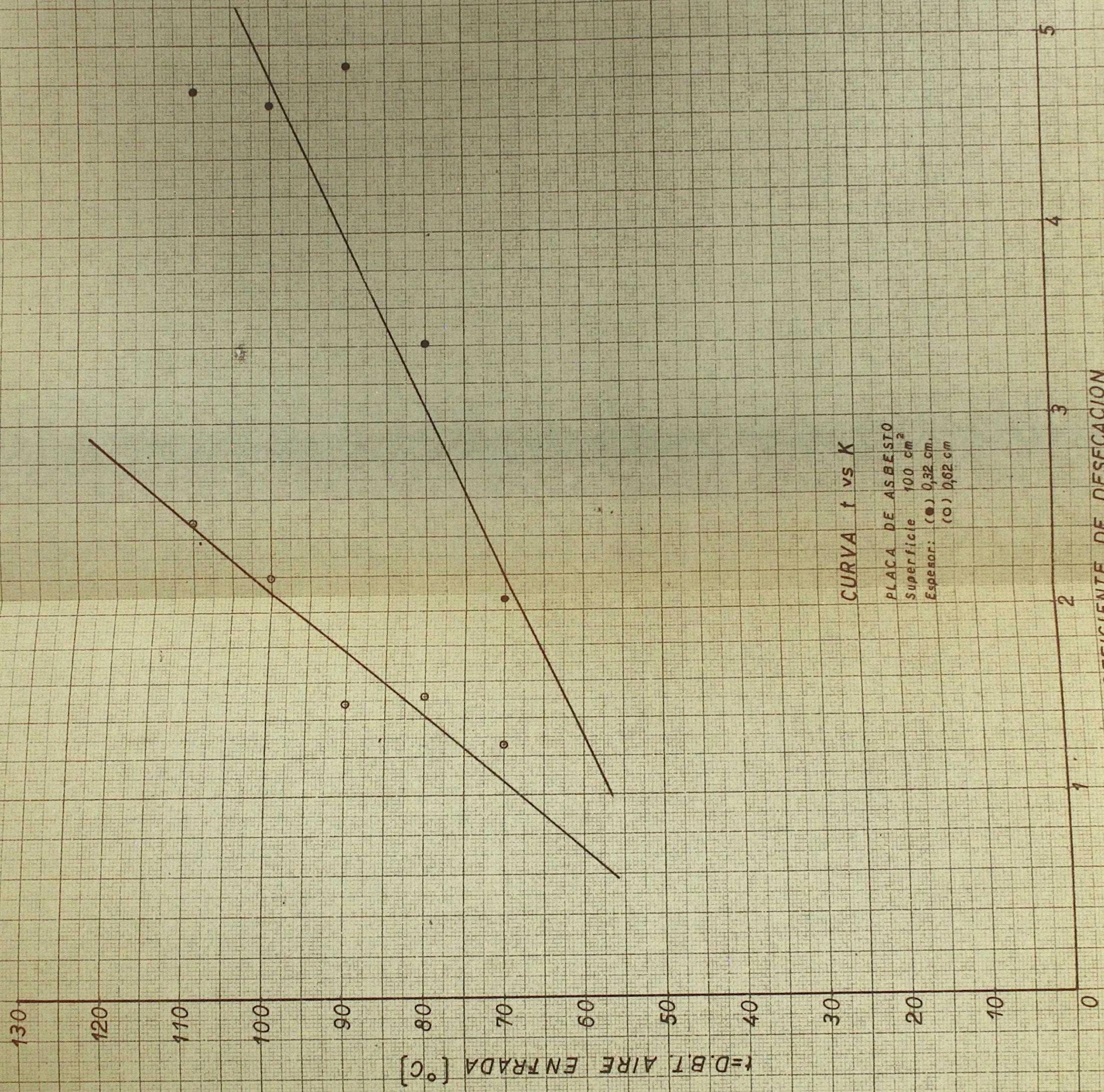


FIG. 6.11



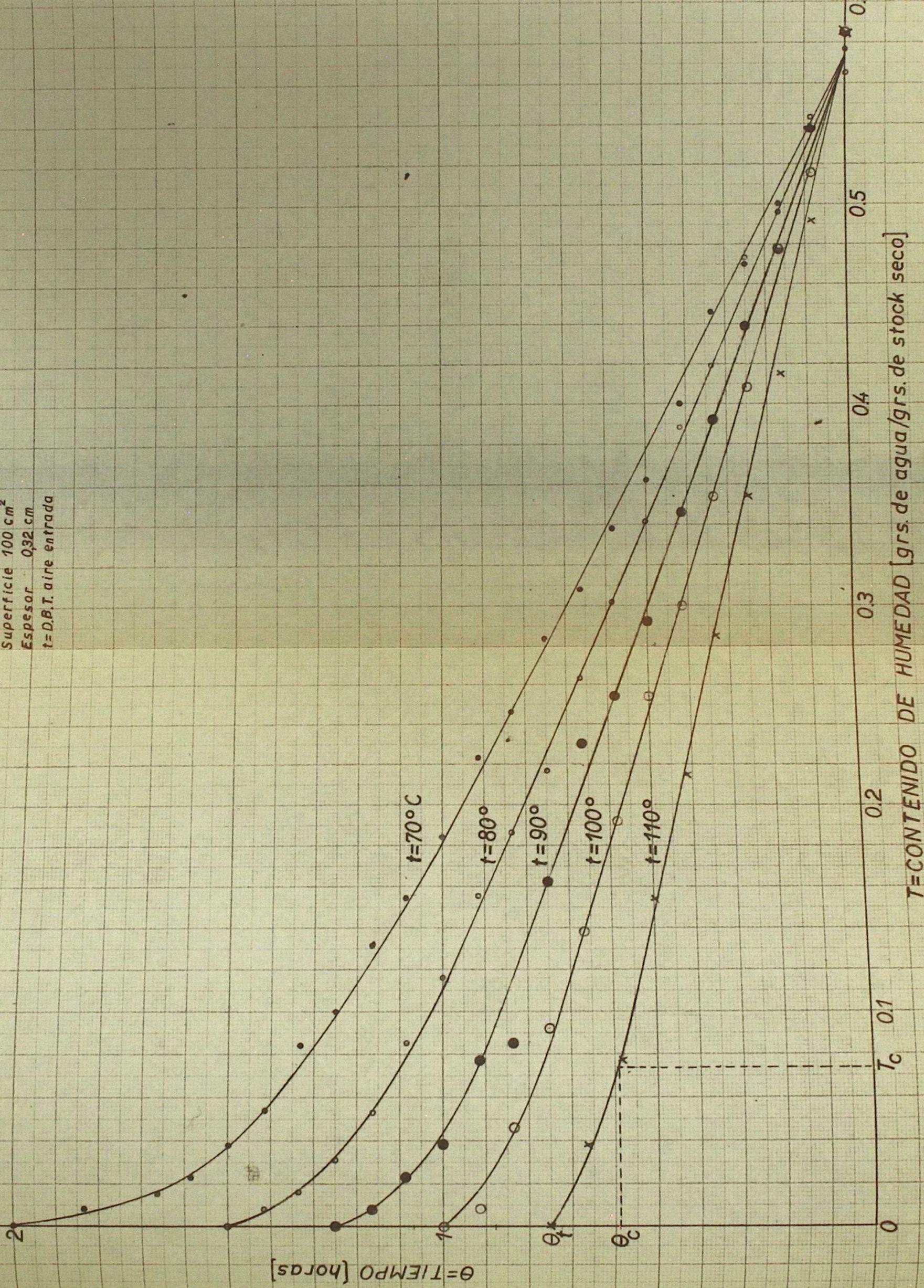
CURVA t vs K

PLACA DE ASBESTO
 Superficie 100 cm²
 Espesor: (●) 0,32 cm.
 (○) 0,62 cm

K=COEFICIENTE DE DESECCACION
 [1/hr.]

CURVA T vs. θ

PLACA DE ASBESTO
Superficie 100 cm²
Espesor 0,32 cm
 $t = D.B.T.$ aire entrada



$\theta = \text{TIEMPO}$ [horas]

$T = \text{CONTENIDO DE HUMEDAD}$ [grs. de agua/grs. de stock seco]

T_c

C.R.P. obtenido graficamente

$t = 110^{\circ}\text{C}$

0.6

F.R.P.

0.7

C.R.P. efectivo

$t = 100^{\circ}\text{C}$

0.6

$\frac{dT}{d\theta}$ [grs. de agua/grs. de stock seco/hr.]

0.5

$t = 90^{\circ}\text{C}$

0.4

$t = 80^{\circ}\text{C}$

0.3

$t = 70^{\circ}\text{C}$

0.2

0.1

τ_c

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

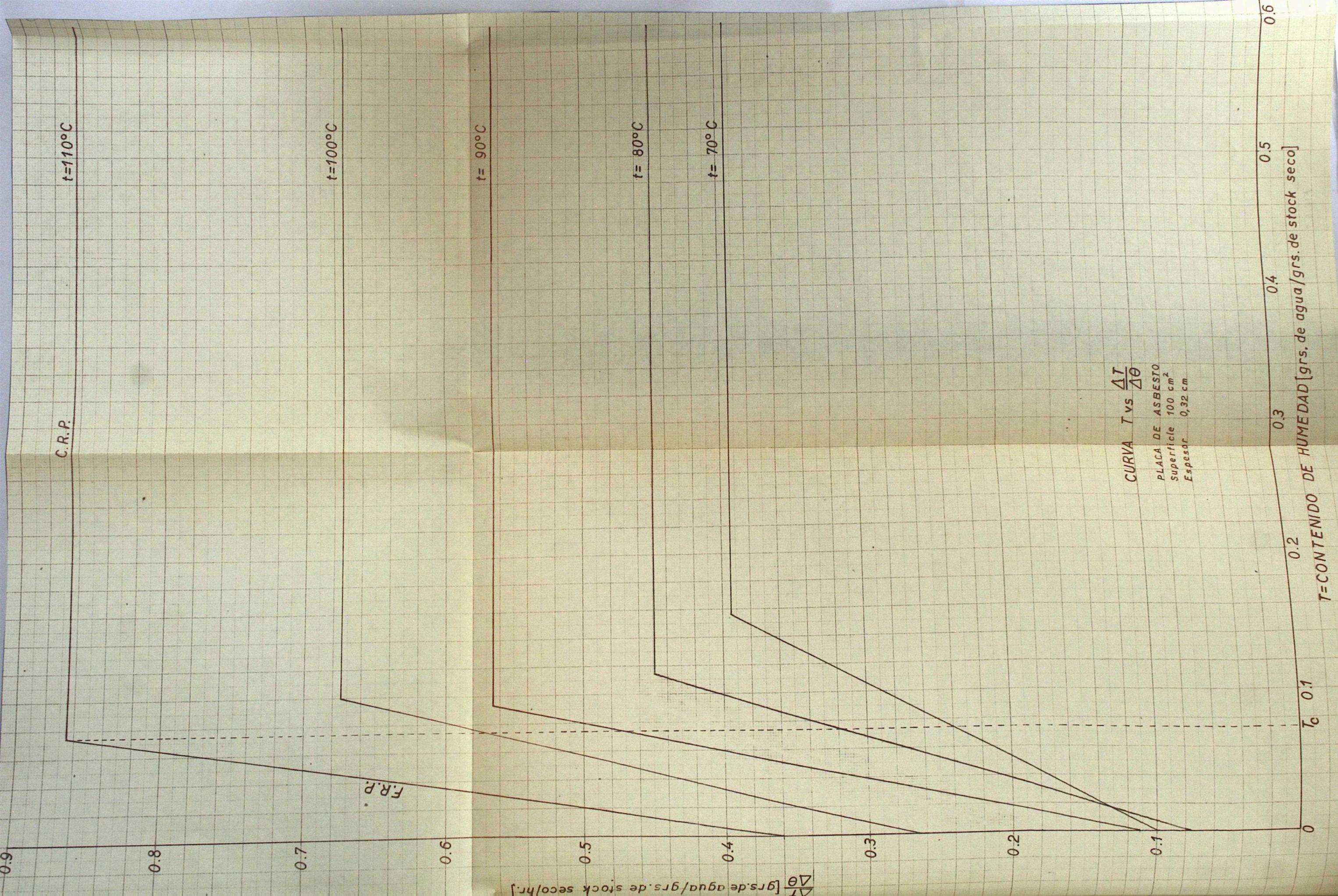
T=CONTENIDO DE HUMEDAD [grs. de agua/grs. de stock seco]

CURVA T vs $\frac{dT}{d\theta}$

PLACA DE ASBESTO

Superficie 100 cm^2

Espesor $0,32 \text{ cm}$



$t = 110^{\circ}\text{C}$

$t = 100^{\circ}\text{C}$

$t = 90^{\circ}\text{C}$

$t = 80^{\circ}\text{C}$

$t = 70^{\circ}\text{C}$

C.R.P.

F.R.P.

CURVA T vs $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$

PLACA DE ASBESTO
Superficie 100 cm^2
Espesor $0,32 \text{ cm}$

$\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$ [grs. de agua/grs. de stock seco/hr.]

$T = \text{CONTENIDO DE HUMEDAD [grs. de agua/grs. de stock seco]}$

T_c

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

0

0.6

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

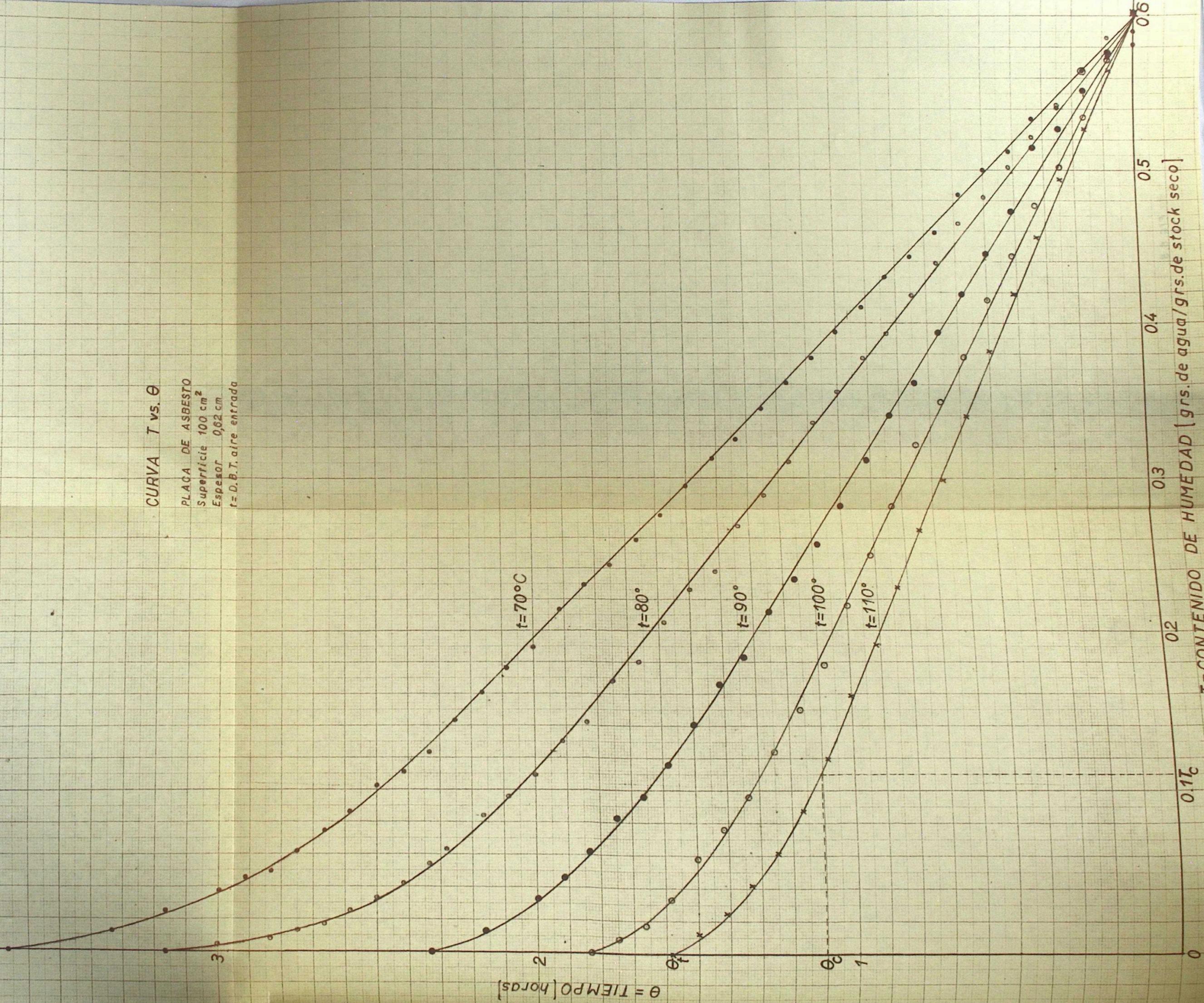
0.2

0.1

0

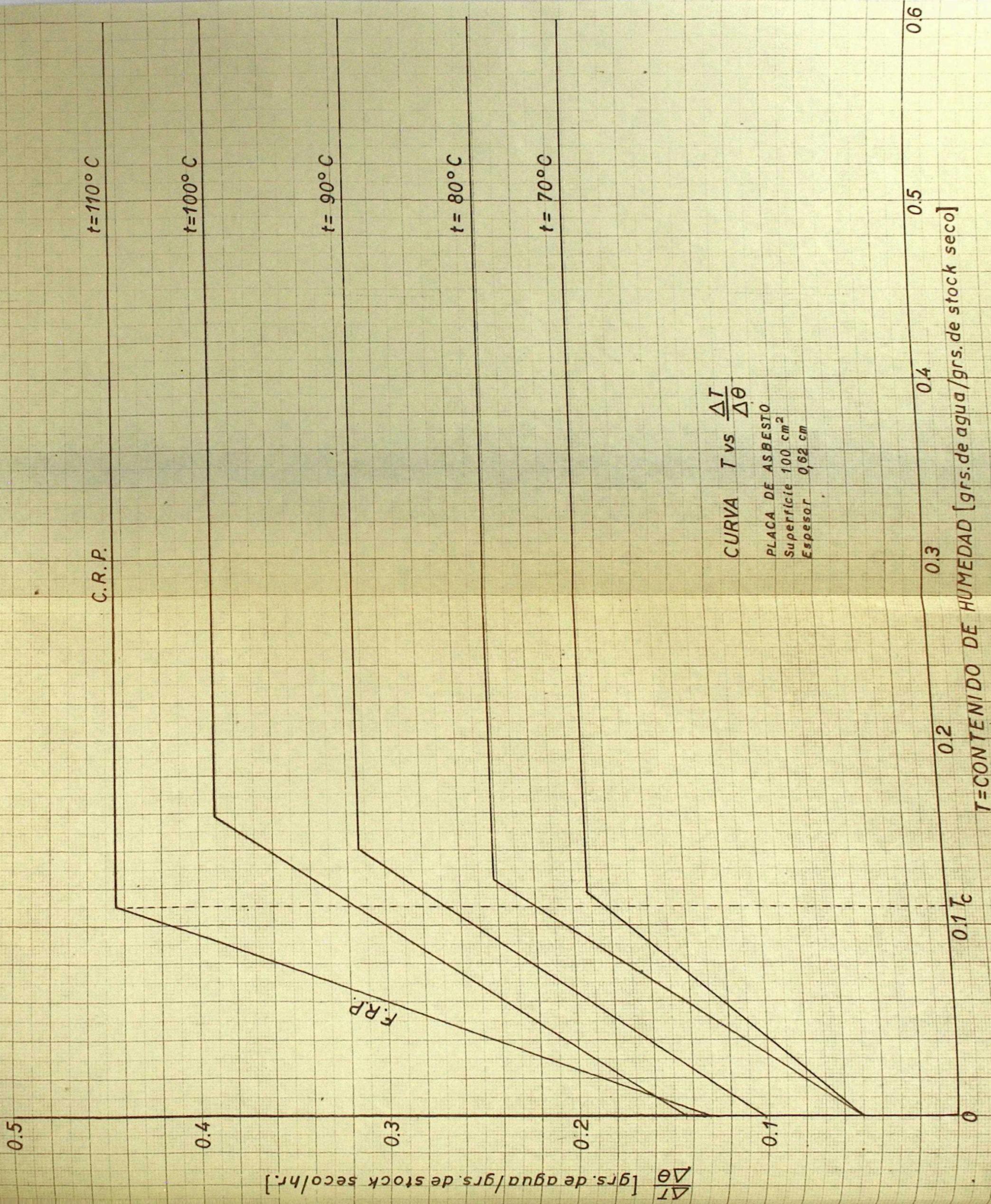
CURVA T vs. θ

PLACA DE ASBESTO
Superficie 100 cm²
Espesor 0,62 cm
t = D.D.T. aire entrada



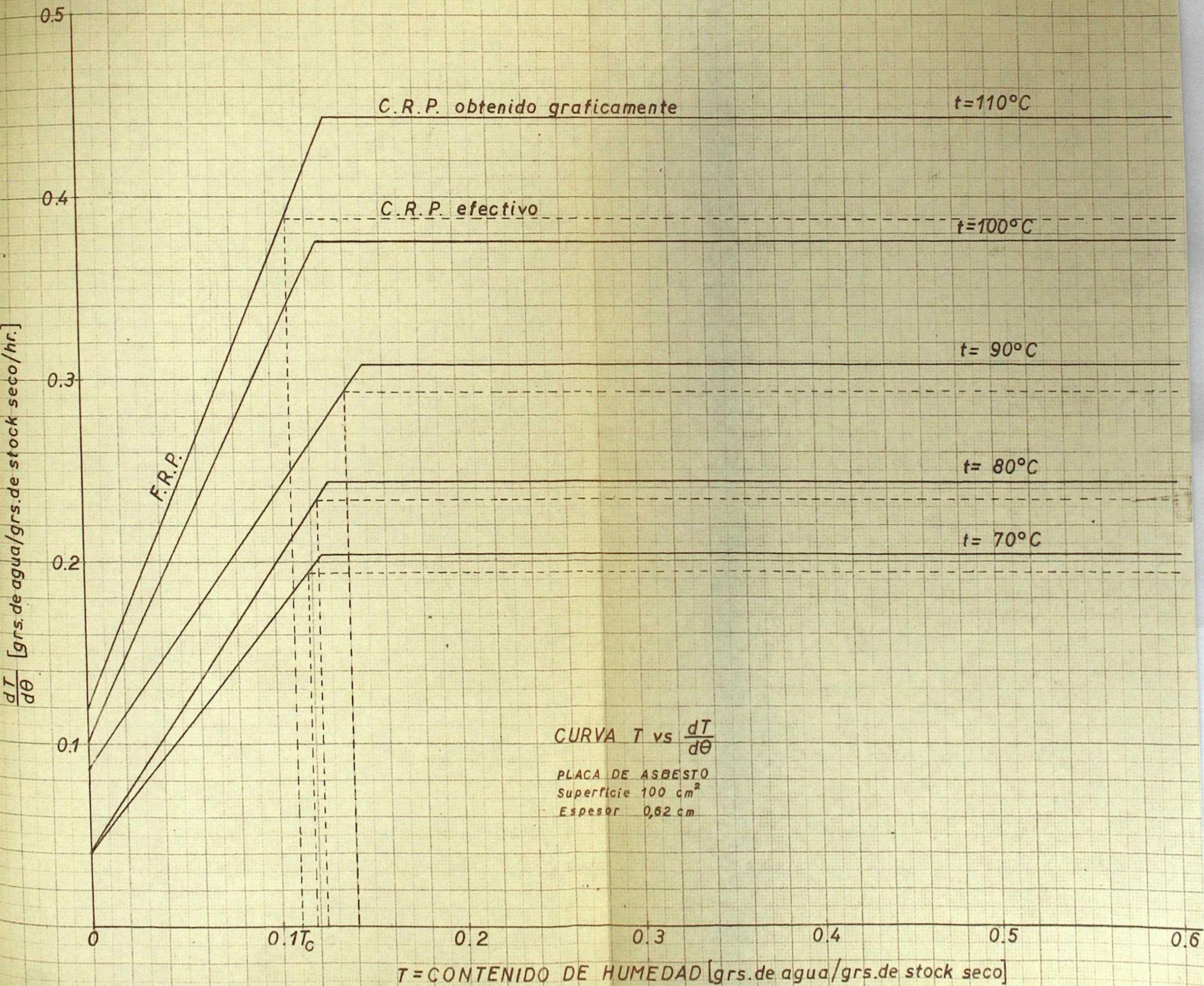
θ = TIEMPO [horas]

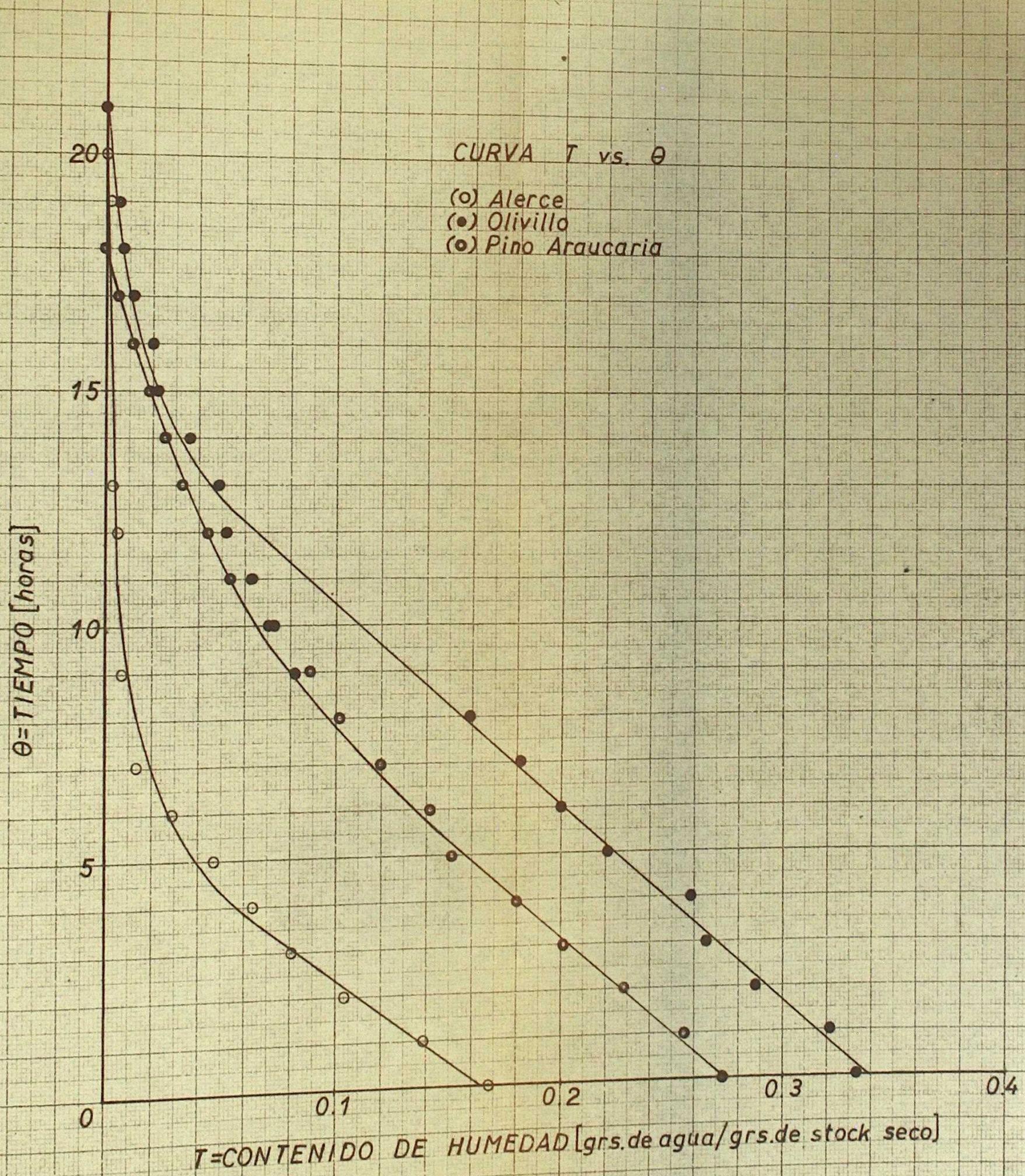
T = CONTENIDO DE HUMEDAD [grs. de agua/grs. de stock seco]



CURVA T vs $\frac{\Delta T}{\Delta \theta}$

PLACA DE ASBESTO
 Superficie 100 cm²
 Espesor 0.62 cm





Superficie [cm ²]	(○) 109,25	(●) 111,68	(◐) 83,40
Espesor [cm]	(○) 1,48	(●) 1,47	(◐) 1,46
H.R. = 70%	D.B.T. = 80 °C		W.B.T. = 71,7 °C
Presión del vapor (Humidificador)	= 15 lbs.		

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta memoria y como deber de gratitud y reconocimiento, destaco los nombres de las siguientes personas, que en una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

Isolde Amaño Q, Eliana Araya, Julio Benavides D, Ivonne Clere, Hernán Cortés T, Ximena Cuevas, Armando Echenique R, Héctor Garcia, Arnoldo Leppe, Isaac Levi R, Norma Mansilla, Sylvia Prieto N, Lautaro Retamales, Julio Sanchez A, Alejandro Vera, Aminta Zavala, Srs. Muñoz, Rivera y Urbina personal del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

