

SECADO DE PRODUCTOS A BASE DE
PARENQUIMA MODIFICADO DE BAGAZO DE
CAÑA DESTINADOS A LA INDUSTRIA
DE LA CONSTRUCCION

SERGIO M. ORTEGA PIERRES

MEXICO, D. F., 1965

12288



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

SECADO DE PRODUCTOS A BASE DE PARENQUIMA
MODIFICADO DE BAGAZO DE CAÑA DESTINADOS A LA
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION.

TESIS

que presenta para su examen profesional

de

INGENIERO QUIMICO

SERGIO MANUEL ORTEGA PIERRES

ante la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACIONES
TECNOLOGICAS, A. C.

Sección de Materiales de Construcción

México, D. F.

1965

Deseo expresar mi reconocimiento a la Dirección y Técnicos del Instituto Mexicano de Investigaciones Tecnológicas, A. C., y especialmente a la Sección de Materiales de Construcción por la asistencia y facilidades que me fueron brindadas para la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN.

I. - INTRODUCCION.

II. - TEORIA.

III. - EXPERIMENTACION.

IV. - RESULTADOS Y DISCUSION.

V. - APENDICE.

VI. - BIBLIOGRAFIA.

R E S U M E N

En el presente trabajo, se obtuvieron criterios para el diseño de secadores para gránulos irregulares y cilíndricos a base de parénquima modificado de bagazo de caña. Esos gránulos, tienen propiedades mecánicas, térmicas y acústicas que los hacen interesantes como material de construcción. Se realizaron pruebas experimentales con el fin de seleccionar el secador más apropiado para esos productos. Las condiciones más favorables se reunieron en un secador con circulación transversal de aire, en el cual el producto que se seca presenta una área grande de secado, combinado con una alta velocidad de gas sobre cada partícula, obteniéndose tiempos tan bajos de secado como los obtenidos en secadores de tipo rotatorio, presentando estos últimos la inconveniencia de disgregar y deformar el material cuando el contenido de humedad es todavía alto, perdiendo las características que lo hacen útil como material de construcción.

Para el secado experimental de estos productos se diseñó un secador pequeño con circulación transversal de gas de secado con los datos obtenidos se logró una ecuación empírica que relaciona el contenido de humedad en el sólido con el tiempo, temperatura y humedad del gas de secado.

Los límites de las condiciones experimentales, fueron aquellos entre los cuales se observaron los tiempos

de secado más bajos y donde el material no sufriera ninguna alteración de sus propiedades mecánicas.

I. - INTRODUCCION.

Tradicionalmente el bagazo de caña se ha utilizado como combustible en los ingenios azucareros, aunque se considera que pudiera utilizarse en aplicaciones mucho más útiles y productivas, como la que ya está teniendo en la elaboración de pulpa a la sosa aunque en escala relativamente reducida (cuando mucho el 10% de la producción total de bagazo).

En algunos países como en E. U. A., Australia y Formosa, se ha utilizado para la fabricación de ciertos tipos de materiales de construcción de buena aceptación tales como lámina de fibra comprimida, para revestimientos y aislamientos acústicos que combinan resistencia, fácil manejo y aplicación económica. Estos laminados tienen una conductividad térmica mucho más baja, siendo un mejor material aislante que los materiales que usualmente reemplaza; por ejemplo, madera y morteros.

El bagazo de caña está constituido aproximadamente por dos terceras partes de fibra y el resto de tejido parenquimatoso. Este último es un tejido medular blando cuyas células fueron originalmente depósitos de soluciones de azúcares. El tejido fibroso constituye la estructura de sostén y no contuvo solución de azúcar.

El bagazo de caña se emplea también en la fabricación de pulpa de papel, pero solamente se utiliza la parte

fibrosa, casi libre de parénquima.

Debido a que los usos del parénquima son limitados y ya que es bastante abundante en el país, se considera útil darle alguna aplicación práctica (durante la zafra de 1963 la producción de bagazo seco fue de 2,427,000 toneladas) (8), de las cuales el 25% aproximadamente corresponde a parénquima). Por lo que respecta al precio de esa materia prima podría suponerse bastante bajo, pero como no ha sido industrializado el precio base aún no se ha fijado.

Por vía experimental se ha encontrado que con diversos tratamientos alcalinos es posible obtener una pulpa a base de parénquima de bagazo de caña que es susceptible de formar aglomerados o compactados de diversas formas geométricas que una vez secos poseen características mecánicas, térmicas y acústicas que los hacen muy interesantes como materiales de construcción.

El propósito del presente trabajo es obtener los criterios de secado necesarios para el diseño de secadores para aglomerados de parénquima modificado por digestión alcalina.

II. - TEORIA.

A. GENERALIDADES.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Química, el término secado se refiere a la eliminación de agua de un sólido húmedo por medio de una corriente de gas o sin la ayuda de ésta, para eliminar el vapor producido. La eliminación mecánica de la humedad por expresión o centrifugación no se considera como secado.

En un estudio de secado deben tomarse en cuenta numerosas variables que intervienen en el proceso, entre las que se mencionan, área de flujo del gas, estructura del sólido y velocidad de transferencia de masa y calor.

B. DEFINICIONES.

Los siguientes términos se usan para describir el contenido de humedad de las sustancias (7).

1.- Humedad de equilibrio. - Es la humedad del material, con la que se tiene una presión de vapor igual a la presión parcial del agua en el gas que constituye el ambiente que rodea a dicho material.

2.- Contenido de Humedad. (Base húmeda). - El contenido de humedad de un sólido o solución se expresa como:

$$\% \text{ de humedad (B.H.)} = \frac{\text{masa de agua} \times 100}{\text{masa de s\u00f3lido seco} + \text{masa de agua}}$$

3. Contenido de Humedad (Base seca). - Se expresa como:

$$\frac{\text{masa de agua} \times 100}{\text{masa de s\u00f3lido seco}} = \% \text{ de humedad (B. S.)}$$

4. Humedad inherente. - Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presi\u00f3n de vapor en el equilibrio menor que la del agua pura a la misma temperatura.

5. Humedad superficial. - Se refiere al contenido de humedad de una sustancia que ejerce en el equilibrio una presi\u00f3n de vapor igual a la del agua pura a la misma temperatura.

6. Humedad Libre. - Es la humedad contenida por una sustancia en exceso con respecto a la humedad de equilibrio.

C. DESCRIPCION DEL PROCESO DE SECADO EN UN SOLIDO.

Cuando un s\u00f3lido se seca tienen lugar dos procesos fundamentales:

- 1.- Transferencia de calor: la necesaria para evaporar el l\u00edquido.
- 2.- Transferencia de masa: de un l\u00edquido o vapor dentro del s\u00f3lido, y de vapor en la superficie de \u00e9l.

Los factores que gobiernan estos procesos determi-

nan la velocidad del secado.

Si un sólido se seca a una temperatura y humedad constantes, se observa siempre un comportamiento determinado que usualmente se representa gráficamente por la "curva de secado" Fig. 1 en la que se observan diferentes porciones de la curva bien definidas. Así, la sección BC representa "el período de velocidad constante", en el cual el secado tiene lugar por difusión del vapor en la superficie saturada del material a través de una película estacionaria de aire, y la velocidad de secado es controlada por la velocidad de transferencia de calor, estableciéndose un equilibrio dinámico entre ésta y la velocidad de transferencia de masa permaneciendo constante la temperatura de la superficie.

Este equilibrio se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dW}{d\Theta} = \frac{h_t A \Delta T}{\Delta H_{vap}} = K_g A \Delta P$$

en donde:

$\frac{dW}{d\Theta}$ = velocidad de secado en g de agua/hr

h_t = coeficiente total de transmisión de calor
 $\frac{\text{cal}}{\text{hr.} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

A = área de transferencia de calor y masa, en cm^2

ΔH_{vap} = calor latente de vaporización cal/g.

k_g = coeficiente de transferencia de masa

$\Delta T = (t - t'_s)$, donde:

t = temperatura de bulbo seco del gas en $^{\circ}\text{C}$ y

t'_s = temperatura de la superficie de evaporación
 Θ $^{\circ}\text{C}$.

$\Delta P = P_s - P$, donde P_s = presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie t'_s , en atm.

P = presión de vapor del agua en la corriente del gas (5).

Refiriéndose a la Fig. 1, el punto D representa el contenido de humedad crítica en el cual la superficie expuesta está insaturada de humedad y marca el comienzo de la región del proceso de secado en el cual la velocidad de movimiento de la humedad interna es el factor limitante de las velocidades de los demás fenómenos. Este período se denomina "el período de velocidad decreciente", el cual puede tomar tiempos mayores que el período de velocidad constante aún cuando la cantidad de humedad eliminada sea mucho menor. La velocidad de secado se aproxima a cero cuando el contenido de agua se aproxima a la humedad de equilibrio.

El movimiento interno de flujo de líquido puede ocurrir principalmente por dos mecanismos:

- 1.- Difusión en sólidos continuos homogéneos.
- 2.- Flujo capilar en sólidos granulares y porosos

Para obtener la curva de secado en este período a partir de datos experimentales es necesario obtener una

N = Velocidad de secado g de agua evaporada/m in x cm²

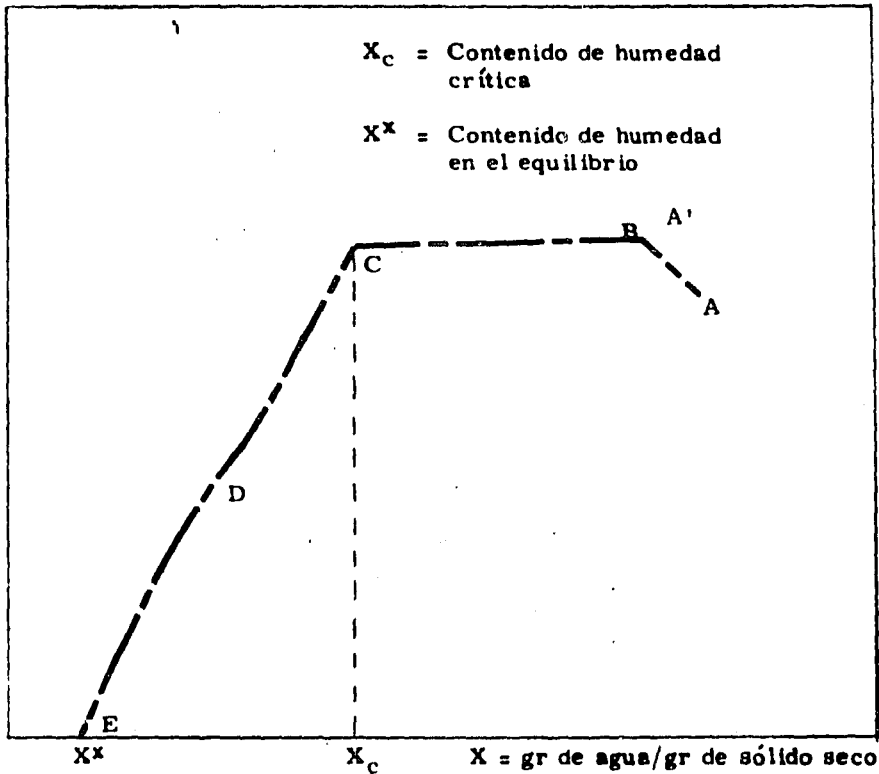


FIG. 1.- CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO A CONDICIONES CONSTANTES.

ecuación que represente el fenómeno.

La porción de la curva designada por AB representa un período de calentamiento previo, el cual puede ser importante en el proceso total.

D. CURVA DE SECADO.

Si se construye una gráfica donde se exprese la humedad de la muestra en función del tiempo con los datos experimentales de una prueba de secado se obtendrá una curva de secado. Tanto las curvas de secado, como aquellas gráficas que expresan la velocidad de secado en función del tiempo son esenciales para los estudios teóricos y prácticos de la operación de secado.

Los experimentos de secado deben llevarse a cabo con ciertos requisitos mínimos para obtener buenos resultados. Se mencionan a continuación los más importantes:

- 1.- La muestra no debe ser muy pequeña.
- 2.- Esta muestra debe estar sujeta a las mismas condiciones de transferencia de calor radiante.
- 3.- El gas de secado deberá tener temperatura, humedad y velocidad constantes.

Si es posible, es conveniente hacer pruebas sobre muestras de diferentes espesores.

E. CONSIDERACIONES TEORICAS DEL EQUIPO DE SECADO.

Clasificación de secadores.

Las dos clasificaciones más útiles en equipo de se-

cado, están basadas en:

1. - El método de transferencia de calor al sólido húmedo.
2. - Las características de manejo y propiedades físicas del sólido húmedo.

Desde el primer punto de vista, estos equipos se pueden clasificar en secadores directos e indirectos. En los primeros los gases calientes están en contacto directo con el sólido húmedo; el principal mecanismo de transferencia de calor es por convección, excepto a altas temperaturas cuando la radiación es importante. En secadores indirectos, el calor necesario para llevar a cabo la evaporación de la humedad se transfiere por convección a través de una pared. Los secadores directos e indirectos pueden ser a su vez continuos e intermitentes.

Selección del Equipo de secado.

Es necesaria una consideración especial de numerosos factores en la selección de un secador. Se recomienda el siguiente procedimiento para una selección adecuada de un secador que reuniendo los requisitos técnicos permita obtener un bajo costo de operación.

1. - Selección inicial.

Seleccionar aquellos secadores que parezcan ser los más apropiados para manejar el material húmedo y producto seco.

2. - Pruebas de secado.

Estas pruebas se llevan a cabo para cada uno de los

diferentes secadores seleccionados a fin de determinar las mejores condiciones de operación y sobre esta base se hace la selección final.

A continuación se mencionan los factores más importantes en la selección del equipo de secado:

- 1.- Propiedades del material que va a ser manejado.
- 2.- Características de secado del material.
- 3.- Flujo de material.
- 4.- Cualidades del producto.
- 5.- Problemas de manejo y recolección del material secado.

F. SECADO CON FLUJO TRANSVERSAL DE AIRE.

Generalidades.

Este tipo de secado está caracterizado por un flujo de gas caliente a través de una cama permeable de material. El secado tiene lugar rápidamente debido a que el área expuesta al gas es muy grande, combinado con una velocidad alta de flujo de gas sobre cada partícula.

En muchas ocasiones el material que se requiere secar se somete a un proceso que consiste en darle la forma geométrica apropiada para manejarlo en un equipo de secado dado; a este proceso se le ha designado como "preformado".

Los métodos de preformado se pueden agrupar en dos tipos. El primero en el cual el material húmedo es formado por medios mecánicos directamente, y el segundo en el cual hace uso de ambos medios, mecánicos y térmicos, para preformar el material.

Es obvio que la operación de preformado requiere un conocimiento del comportamiento de materiales sólidos húmedos. El principal problema encontrado en el preformado es hacer que el material húmedo adquiera y retenga la forma deseada. Las piezas de preformado tienen una densidad aparente que dependen del método usado, por lo tanto, la densidad y el preformado influyen en la velocidad de secado.

III. - EXPERIMENTACION.

A. DESCRIPCION Y CALCULO DEL EQUIPO EMPLEADO EN ESTE TRABAJO.

El equipo consta de:

- 1) Cámara de Combustión
- 2) Cámara de acondicionamiento de gas de secado
- 3) Cámara de secado experimental con circulación transversal
- 4) Controles
- 5) Instrumentos de Medición

El diseño del equipo se hizo sobre la siguiente base:

Para este tipo de secadores se recomienda trabajar el gas de secado entre 127.08 cm/seg. y 405.83 cm/seg. (7). Se fijó una área de 223.2 cm² en la sección de secado, con el objeto de no manejar volúmenes de aire muy grandes. El espesor de lecho no fue mayor de 1.5 cm.

El volumen máximo de aire manejado sería:

$$223.2 \text{ cm}^2 \times 405.83 \text{ cm/seg.} = 90,581.2 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

Se dispone de un ventilador Buffalo accionado por un motor General Electric monofásico de $\frac{1}{2}$ H. P. La velocidad máxima del aire que puede obtenerse con este Ventilador se midió con un Anemómetro de resistencia marca "Anemotherm". Esta velocidad fue de 1 625 cm/seg.

La temperatura de diseño para el gas de secado fue de 250°C, ya que el gas de secado estuvo constituido principalmente de aire con un pequeño porcentaje de productos de combustión, (los compactados de parénquima empiezan a pirolizarse a los 200°C), la humedad de este gas se tomó de 0.1% (0.034 g/H₂O/g aire seco). Se utilizaron los datos para aire de una carta psicrométrica construida especialmente para la presión atmosférica de la Ciudad de México (586 mm Hg). Las condiciones promedio de entrada de aire fueron: t = 20° y 30% de humedad relativa (0.005 g. de agua/g aire seco).

Si el diámetro de la salida del ventilador es de 11.5 cm el gasto de aire es:

$$\frac{3.1416}{4} \times (11 - 5)^2 \text{ cm}^2 \times 1\,625 \text{ cm/seg} =$$

$$168,787.1 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

Como el volumen que es necesario manejar fue de 90 500 cm³/seg, este ventilador fue suficiente para el servicio requerido.

El volumen molar de gas a la salida del ventilador es:

$$\frac{22\,400 \text{ cm}^3}{\text{g - mol}} \times \frac{760 \text{ mm Hg}}{580 \text{ mm Hg}} \times \frac{523^{\circ}\text{K}}{273^{\circ}\text{K}} = 55,750 \text{ cm}^3/\text{g mol}$$

Si el peso molecular aparente del aire es 28.97 g/g mol, por lo que las moles de agua por mol de aire seco son:

$$0.034 \text{ g. de H}_2\text{O/g. de gas seco} \times \frac{28.97 \text{ g. de gas}}{\text{mol. de aire}^2} \times \frac{1 \text{ mol. de H}_2\text{O}}{18.016 \text{ g. de H}_2\text{O}} = \frac{0.05467 \text{ g mol. de H}_2\text{O}}{\text{g mol. de gas seco}}$$

$$\text{g mol. de gas húmedo/mol. de aire seco} = \frac{1 + 0.05467}{1}$$

$$\text{Volumen a la salida/mol. de gas seco} = 1.05467 \times$$

$$55,750 \text{ cm}^3/\text{g mol} = 58,797.8 \frac{\text{cm}^3}{\text{g mol. de gas seco}}$$

El número de moles de gas seco que pasan por el equipo son:

$$168787.1 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{\text{g. mol gas seco}}{58797.8 \text{ cm}^3} = 2.87056 \text{ g mol/seg.}$$

En la entrada el número de moles de gas seco es el mismo, pero con la humedad es diferente. Por lo tanto el gasto resulta:

$$2.8706 \frac{\text{g. mol gas seco}}{\text{seg}} \times 28.97 \frac{\text{g. gas}}{\text{g. mol de gas}} \times$$

$$1.05467 \frac{\text{g. de agua}}{\text{g. de gas}} = 83.5771 \text{ g. de gas húmedo/seg.}$$

El calor húmedo del gas tomado de la tabla psicrométrica es de 0.25 cal/g°C.

En la Fig. (2) se muestra la línea de operación que debe seguir el gas en el acondicionador por lo tanto el gas debe calentarse hasta una temp. de 300°C para que al humidificarse adiabáticamente llegue a las condiciones de salida fijadas.

El calor necesario es:

$$83.5771 \text{ g/seg} \times 0.25 \frac{\text{cal}}{\text{g mol}} \times (300 - 20) = 5850.4 \text{ cal/seg.}$$

Para el calentamiento se dispone de quemadores de gas modelo 60F, con una capacidad de 1 083.7 cal/seg. cuando queman gas natural a una presión de 0.07 Kg/cm² en la línea (4).

El número de quemadores es:

$$\frac{5850.4}{1083.7} = 5.308 \text{ ó sea } 6 \text{ quemadores}$$

Estos quemadores se pueden colocar en serie para un solo tubo vénturi mezclador de gas y aire de tipo atmosférico. (4). Sin embargo, para poder operar a bajas temperaturas los quemadores se dispusieron en arreglo de 2 series de quemadores o sea 3 quemadores en cada vénturi operados independientemente uno del otro.

La literatura (2) indica que la cámara de combustión debe tener un mínimo de 1000 cm³ por cada 89.752 cal/seg. que se produzcan, para tener el funcionamiento de los quemadores en condiciones de seguridad.

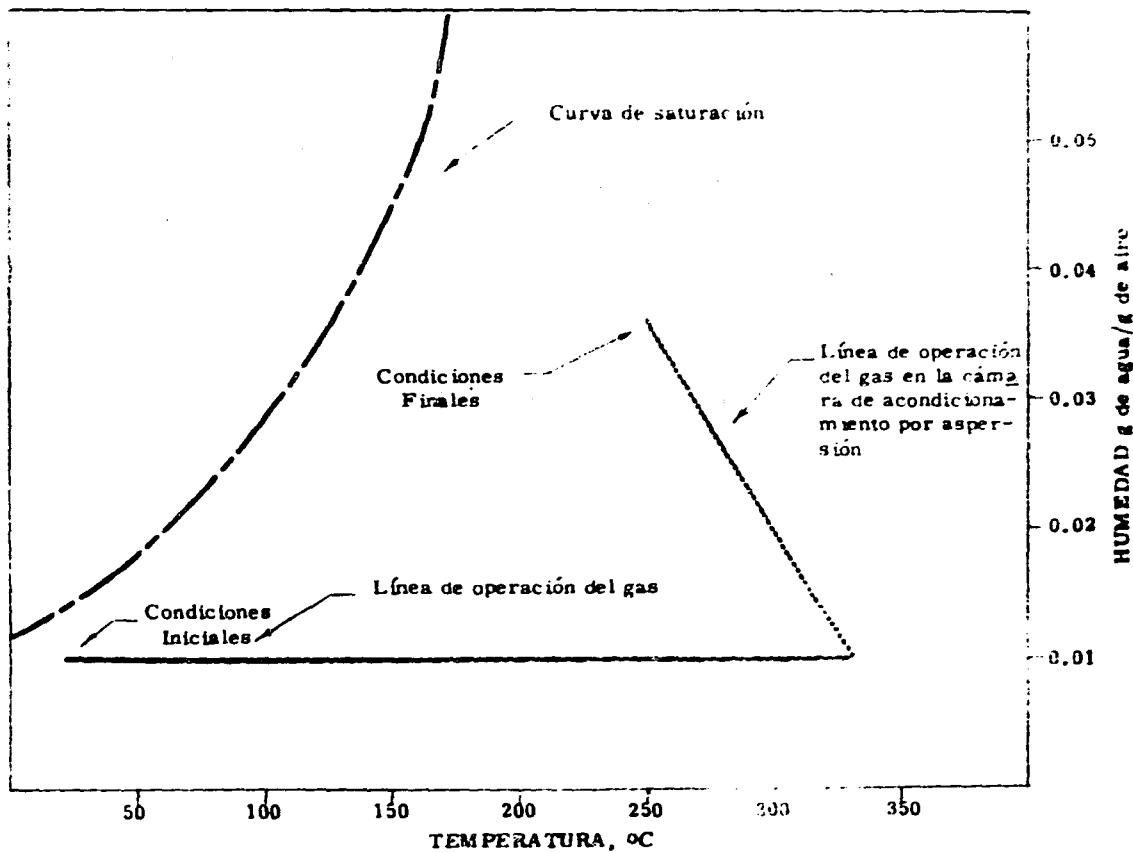


FIG. 2. - LINEA DE OPERACION DEL GAS EN EL EQUIPO DE ACONDICIONAMIENTO.

El volumen mínimo de la cámara de combustión sería:

$$\frac{5840.4}{89.752} = 65,184 \text{ cm}^3$$

La longitud de cada serie de 3 quemadores es de 50 cm., la altura de 50 cm. y el ancho de 20 cm. Como se desea mantener la flama alejada de las paredes de la cámara, para evitar que se dañe el recubrimiento aislante, los quemadores se colocaron a una distancia mínima de 7.5 cm. de la pared y de 5 cm. entre cada serie de quemadores. Por lo tanto, la longitud de la cámara resulta de 70 cm. de largo y 60 de ancho. Fig. (3).

La altura mínima de la cámara resulta:

$$65184 = 70 \times 60 \times h = 2 (50 \times 10 \times 20)$$

$$h = 10.76 \text{ cm.}$$

Sin embargo, como para esta altura los quemadores quedaban muy cerca de la parte superior, y a fin de tener una cámara de combustión eficiente a temperaturas más altas, se decidió construir la cámara con una altura de 40 cm. Para evitar corrientes estratificadas de aire se colocó una mampara antes de la salida para tener una zona de turbulencia en donde se mezcle bien el gas.

La entrada del gas secundario se efectúa a través de 56 orificios de 2.5 cm. de diámetro colocados en la parte interior de la cámara. Además, se puso una puerta corrediza, perforada en la misma forma, para regular el aire cuando se trabaja a bajas velocidades.

Para facilitar la instalación y mantenimiento del equipo, la cámara de combustión, la de aspersión y la cámara de secado se construyeron como unidades independientes. Las uniones entre las diferentes partes son de forma cónica truncada de 25 cm. de diámetro mayor y 13 cm. de diámetro menor y 12 cm. de largo.

La cámara de acondicionamiento se diseñó en base al gasto de agua, la cual requiere de cierto espacio de aspersión. En las condiciones de entrada, el aire lleva 0.005 g. de agua/g. de aire seco; en las condiciones de salida 0.034 g. de H₂O/g de aire seco. Por lo tanto deben suministrarse.

$$0.034 - 0.005 = 0.029 \text{ g. de H}_2\text{O/g. de aire seco,}$$

o sea:

$$0.029 \text{ g. de agua/g. de aire seco} \times 83.1613 \text{ g. de aire seco/seg} = 2.41 \text{ g. de H}_2\text{O/seg.}$$

Para la aspersión del agua, se dispuso de una esprea Bowen, tipo Ns-2 con un cono de 25°, de gasto variable que funciona con inyección de agua y aire teniendo un gasto máximo de 8.333 g/seg. Al probar la esprea se observó que la aspersión del agua tiene lugar a una distancia entre 60 y 20 cm. de la boquilla; con este dato se diseñó la cámara de acuerdo a la Fig. 4. La parte inferior de esta cámara está constituida por dos planos inclinados convergentes para drenar el agua no evaporada. A la salida se colocaron 3 mamparas para evitar arrastre.

SECADOR.

El secador se diseñó en base a dos velocidades de aire recomendadas y al volumen de aire manejado, ya que

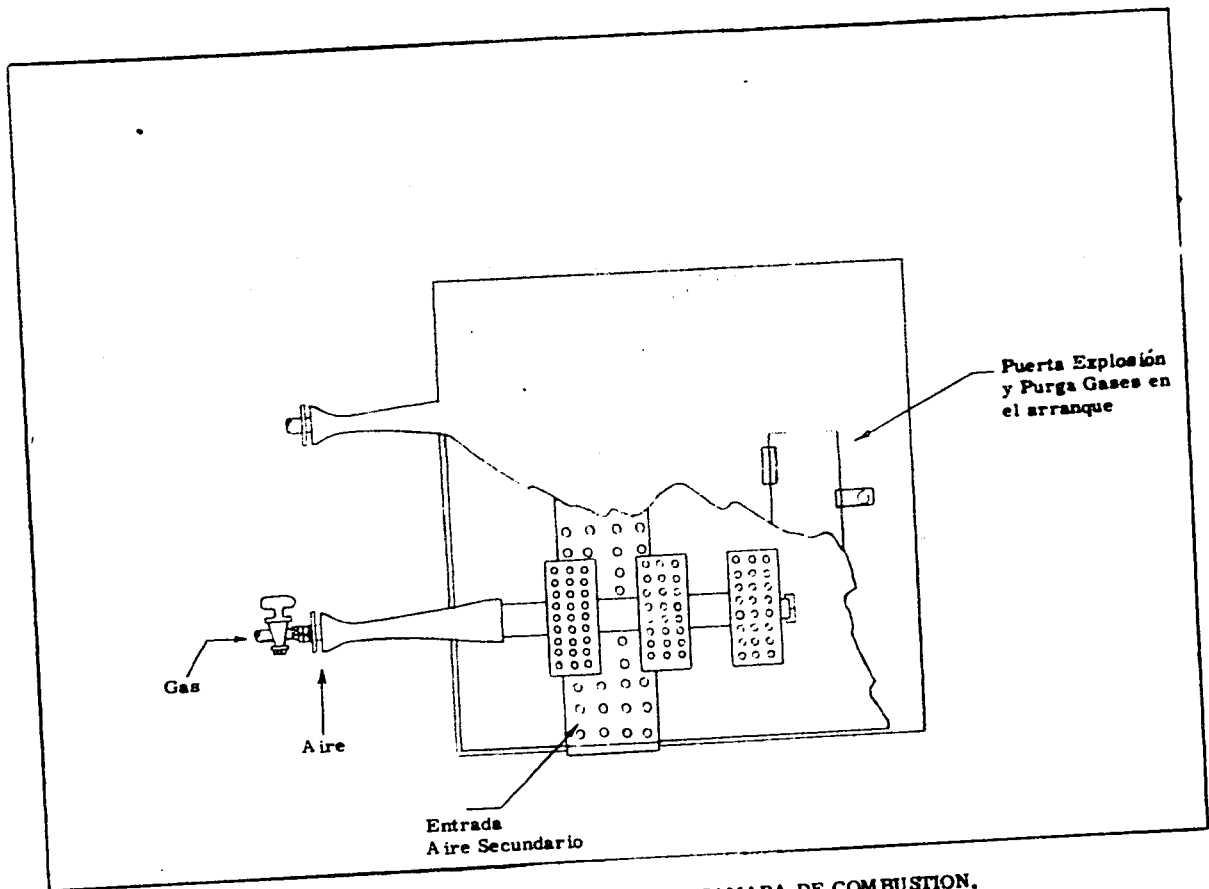


FIG. 3. VISTA SUPERIOR DE LA CAMARA DE COMBUSTION.

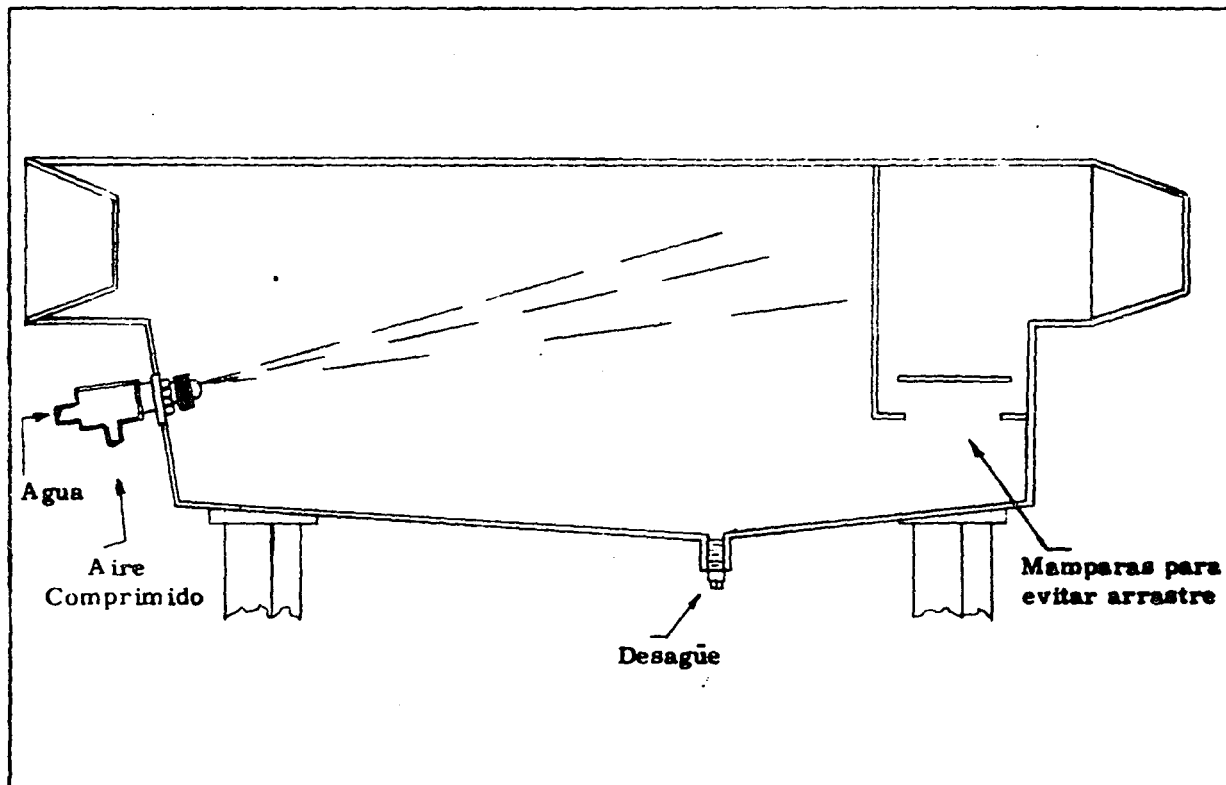


FIG. 4. VISTA LATERAL DE LA CAMARA DE ACONDICIONAMIENTO.

si se fijaba una área grande el volumen de gas aumenta considerablemente y, por lo tanto, también aumenta el tamaño y el costo del equipo adicional para operar el secador.

Como se muestra en la Fig. 5, este secador consta de una zona anterior después de la cual se encuentra la zona de prueba, en donde se localiza una charola hecha de criba No. 8 de 18.6 x 12 x 2.5 cm para colocar la muestra. Esta charola va montada en un marco corredizo de fierro que permite sacar y meter la charola para hacer las pesadas, además, este marco tiene un cierre hermético y una posición fija para evitar variaciones en el área y en las condiciones del gas de secado. El aire entra a la zona de prueba en dirección perpendicular a la charola.

En la salida del túnel se colocó una reducción, en la cual va el termómetro de bulbo húmedo. Un canal lateral alimenta el agua a una mecha de algodón en la cual se coloca un termopar. Para tener lecturas correctas la velocidad debe ser mayor a 300 m/min. (10), y la temperatura del agua no diferir más de 10°C con respecto a la temperatura de bulbo húmedo. Con la reducción se asegura tener siempre una velocidad alta y el canal lateral hace que el agua se caliente hasta una temperatura cercana a la de bulbo húmedo.

El secador lleva además en la parte superior dos tomas de 4.76 mm. de diámetro para conectar un Manómetro diferencial Marca MERIAM que usa un aceite rojo de gravedad específica 0.827. La escala abarca 2.5 cm. de agua con divisiones hasta de $\frac{1}{4}$ de milímetro, con el objeto de conocer la caída de presión en la zona de prueba. También lleva orificios para introducir termopares y medir la temperatura de bulbo seco y otro orificio para intro

ducir el elemento sensible del Anemotherm y medir la velocidad del aire.

Finalmente, al ventilador se le acopló una chimenea con una válvula de mariposa para poder regular la velocidad del aire.

ACCESORIOS.

Para medir las temperaturas se usaron termopares de cobre-constantán calibre 30 B & S (0.254 mm). Los cables de extensión de los termopares fueron de cobre. Cada punta de referencia se colocó en un pozo de vidrio de 4.76 mm. de diámetro, que a su vez se sumergió en un vaso Dewar con hielo. Las terminales de los cables de extensión se unieron a los polos de un potenciómetro marca LEEDS & NORTHROP para poder hacer las lecturas de potencial.

La temperatura se reguló mediante un elemento sensible de bulbo, el cual va colocado en la sección anterior de la cámara de secado el cual actúa mecánicamente una válvula Partlow modelo 60½ que regula el paso de gas combustible a los quemadores. La válvula debe trabajar a una presión menor o igual a 0.07 Kg/cm², por lo que se acopló a la línea de gas un regulador de presión Toledo. La presión en la línea del gas se midió con un manómetro Fischer tipo Bourdon. La válvula puede regular temperaturas desde 40°C hasta 540°C.

Las determinaciones de peso se hicieron mediante una balanza granataria OHAUS de 2 platos con sensibilidad de ± 0.1 gr.

B. DESCRIPCION DE LA EXPERIMENTACION.

Por digestión alcalina de parénquima de bagazo de

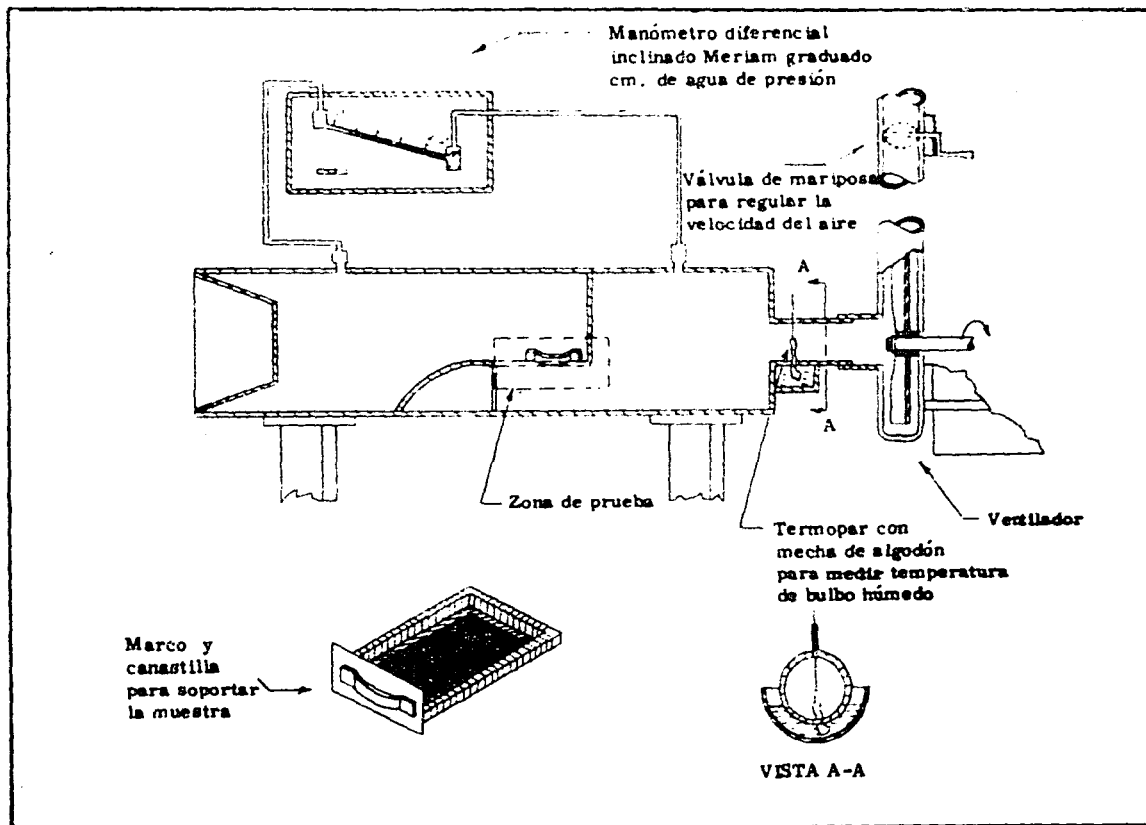


FIG. 5. VISTA LATERAL DE LA CAMARA DE SECADO Y VENTILADOR.

caña, se preparó una pulpa de parénquima modificado, a partir de la cual se obtuvieron por expresión aglomerados de forma irregular retenidos en malla con aberturas de 0.942 cm. y con una humedad entre 75 y 81% (base húmeda). También se obtuvieron compactados de forma cilíndrica con un diámetro de 4.76 mm, una longitud promedio de 9.52 mm, y una humedad entre 41.5 y 43.5% (base húmeda).

Se hicieron pruebas preliminares de secado en secadores directos como el instantáneo y rotatorio para tener un contacto directo entre gases de combustión y el material que se está secando; además, se escogió ese tipo de secadores porque el material por secar presenta una área grande al secado, lo que permite que el tiempo de secado sea considerablemente más bajo que el obtenido con otros secadores, tales como el de charolas.

Durante estas pruebas se encontró que cuando el contenido de humedad del material es todavía alto su manejo en estos secadores se dificulta pues se disgrega fácilmente, lo cual es un inconveniente, ya que se desea que conserve su forma geométrica original. Por esta razón se escogió un "secador con circulación transversal de aire, ya que en éste se eliminan las desventajas de deformación y disgregación del material, manteniéndose casi la misma área de exposición al secado".

Procedimiento Experimental.

El procedimiento seguido para las pruebas de secado experimental fue el siguiente:

Se calentó el secador a la temperatura deseada y se ajustó la humedad del gas de secado y su velocidad a valo-

res predeterminados. Después de mantener el equipo en condiciones constantes de operación, por espacio de 7 a 10 min, se colocó el material por secar en una charola (previamente tarada) de malla No. 8 de 18.6 x 12 x 1.5, para el caso de cilindros y una charola de malla No. 28 de 11.3 x 16.8 x 1.7 para aglomerados. En todos los casos, se empleó la misma cantidad de muestra (100 g), manteniéndose un espesor de lecho de 0.6 cm para los primeros y de 1 cm. para los últimos.

Una vez hecho lo anterior, se introdujo la charola con el material en la sección de prueba del secador. Al final de un intervalo de tiempo determinado, se sacó la charola del secador y se pesó. Durante las pesadas se cerró la sección de prueba del secador y el ventilador permaneció en operación para mantener las condiciones de gas de secado constantes. Para cada pesada, el tiempo de interrupción de secado fue de 20 seg. aproximadamente.

Desde luego, este procedimiento no es del todo satisfactorio, sin embargo, los errores introducidos al sacar la charola con el material y pesarla no alteran en forma considerable las relaciones fundamentales de secado. En general, el secado se continuó hasta que no se notó cambio en el peso de la muestra. La humedad de la muestra fue determinada por pérdida de peso al cabo de una hora, en una estufa a 110°C.

IV. - RESULTADOS Y DISCUSION.

Los resultados obtenidos durante el secado de aglomerados de parénquima modificado empleando una velocidad del gas de secado igual a 241.3 cm/seg., con caídas de presión en la zona de secado entre 0.4 y 0.6 cm. de agua, se muestran en la tabla No. 1.

Aunque las variaciones de peso de la muestra en función del tiempo se determinaron experimentalmente, en la Tabla No. 1 se reportan los datos como porcentaje de contenido de humedad en el sólido (base seca). Asimismo, se reportan los datos de velocidad de secado para cada temperatura y humedad del gas de secado. Cada una de estas pruebas está identificada por un número y una letra.

De los datos mostrados en esta Tabla No. 1, se deduce que en las pruebas números 1 y 2 el tiempo de secado es grande y la humedad del gas de secado tiene una influencia considerable en la velocidad de evaporación de agua.

Analizando el efecto de la temperatura en la velocidad de secado, se observa que en los primeros 5 minutos a medida que se eleva la temperatura aumenta la velocidad de evaporación de agua, pero en los siguientes minutos se observa que este valor decrece, lo cual parece indicar la formación de una costra que impide que el seca-

do sea más rápido.

Por otra parte, la diferencia de valores de velocidad de secado para las diferentes pruebas indica que a medida que aumenta el contenido de humedad en el gas de secado, la velocidad de evaporación de agua disminuye, pero a medida que aumenta la temperatura este efecto es menos apreciable. El cambio más notorio se observa al pasar de 75° a 100°C . Entre esos límites se encuentra el punto de ebullición del agua, este hecho parece indicar que a temperaturas inferiores a este valor, la humedad del gas de secado tiene un efecto retardador más acentuado que a temperaturas superiores a este valor.

Por lo expuesto, no se consideró necesario experimentar a diferentes humedades del gas de secado, a temperaturas inferiores a 75°C , puesto que el tiempo de secado ya es demasiado grande. Comparando las velocidades de secado para las pruebas números 5 y 6 (125°C y 2%, 150°C y 0.2% H) no se aprecia una ventaja apreciable en los tiempos de secado debido a la formación de la costra. También se encontró que a temperaturas mayores de 150°C el material empieza a pirolizarse, por consiguiente, tampoco resulta útil experimentar a temperaturas superiores a dicho valor.

Por lo tanto, para obtener la ecuación que represente el contenido de humedad en el sólido como una función del tiempo de secado y de la temperatura y humedad del gas de secado, se emplearon los datos obtenidos para 75 , 100 y 125°C a 6, 4 y 2% de humedad en el gas de secado para cada temperatura considerada.

La ecuación que representa el proceso se obtuvo mediante un análisis gráfico de los resultados experimentales.

TABLA No. 1

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE EL SECADO DE AGLOMERADOS DE PARENQUIMA MODIFICADO DE BAGAZO DE CARA EMPLEANDO UN SECADOR CON

Temperatura Prueba No.	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO (POR CIENTO DE HUMEDAD BASE SECA)																VELOCIDAD DE SECA							
	50°C		75°C				100°C				125°C			150°C		50°C		75°C						
	1	2	3a	3b	3c	3d	4a	4b	4c	4d	4e	4f	5a	5b	5c	6	1	2	3a	3b	3c	3d		
Humedad del sol. de secado	20%	25%	35%	35%	45%	25%	10%	10%	15%	15%	15%	25%	15%	45%	45%	0.2%	10%	2%	8%	8%	4%	2%		
366.87	337.6	437.37	403.53	311.09	166.24	368.28	284.9	284.8	284.9	361.73	331.6	350.44	350.44	350.44	338.5									
306.54	390.3	370.63	288.04	190.6	318.04	257.03	242.1	234.8	278.9	268.0	283.77	288.72	289.18	258.8			7.1	7.1						
378.81	366.87	390.35	332.56	262.95	275.0	311.07	194.07	185.9	218.9	199.57	210.32	217.01	238.35	183.9			8.1	8.7	8.1	7.9	10.7			
257.90	307.28	283.8	195.44	202.70	236.1	175.2	154.0	145.5	177.3	155.5	160.81	166.5	176.31	130.8			5.0	7.3	7.3	9.3				
333.4	271.77	258.9	169.68	161.60	190.47	143.8	120.5	112.3	139.2	118.4	131.07	118.4	130.58	82.9			5.6	8.8	8.8	1.0	9.3			
303.82	212.4	240.44	198.82	148.82	158.0	151.82	118.7	82.4	81.87	107.1	94.2	97.25	94.24	96.38	30.25	1.82	4.8	8.0	6.15	5.8	6.0			
		176.55	153.78	106.31	103.6	120.3	85.35	88.70	74.3	52.8	48.5	81.6	37.54	54.40	48.93	50.89			2.85	4.6			6.7	
		128.70	118.26	74.29	67.90	67.6	67.90	67.6	65.11	28.71	24.71	32.4	23.8	27.01	22.51	24.76			4.85	3.5			4.5	
384.90	190.58				61.27	70.88	32.4	21.63	17.7	23.81	18.28				3.44	2.22	3.74						3.1	
		82.13	85.44	57.8	26.0	16.54	16.4	11.74	6.44	12.63			12.153	9.00	8.54				3.5	3.3			3.8	
		93.83	61.52	34.82		4.452	8.92	8.27	1.81			7.04												
							0.416	2.77	1.41			4.44												
810.87	78.11	44.83	45.47	22.89	121.89								0.441	0.441	0.441	1.028	1.90	2.40	1.85	1.85			2.8	
		38.82	33.81																	1.15	1.3			
174.88	37.41	22.18	24.58		0.416												1.68	1.88		1.0	0.95		1.175	
		14.58	17.63	9.887																0.65	0.65			
		11.73																						
164.33	18.47	9.44		0.2877													1.58	0.82	0.2				0.04	
		6.405																						
111.80	7.82	7.84	4.187														1.46	0.54	0.1					
		0.51																						
88.58	3.715	3.472															0.84							
																	0.58	0.8						

TABLA No. 1

TIEMPO DURANTE EL SECAJO DE AGLOMERADOS DE PARENQUIMA MODIFICADO DE RABAZO DE CARA EM PLENERO UN SECAJO CON CIRCULACION TRANSVERSAL DE AIRE.

CANTO DE HUMEDAD BASE SECA					VELOCIDAD DEL SECAJO DE AGUA EVAPORADA / MIN.																	Tiempo (min)				
125°C					150°C																					
4a	4f	5a	5b	5c	6	7	8	9a	9b	9c	9d	9e	9f	9g	9h	9i	9j	9k	9l	9m	9n		9o	9p	9q	
301.73	331.6	350.44	350.44	350.44	358.9																					0
316.3	346.0	365.77	366.73	366.73	369.18																					1
318.9	349.57	370.22	377.01	377.01	378.22																					2
377.8	388.6	389.81	388.5	374.31	370.8																					3
330.7	318.4	321.07	326.4	330.58	32.8																					4
101.1	84.3	85.22	84.33	85.22	80.25	1.82	6.8	8.0	9.15	1.8	8.0	8.8	7.0	7.3	8.0	7.3	8.8	7.7	7.0	9.7	9.7	7.5				5
	73.31				80.85																					6
81.8	87.54	84.69	88.83	80.89	10.40																					7
	37.25				9.73																					8
35.4	33.8	27.01	32.91	24.78	5.83																					9
22.81	18.28				3.44	2.22	3.74																			10
12.83		13.183	8.66	8.54																						11
	7.04																									12
		4.489	3.58	4.615																						13
	4.44																									14
		0.431	0.431	0.431	1.025	1.90	2.40	1.85	1.85	2.8	0.3	0.32	0.04													15
																										16
																										17
																										18
																										19
																										20
																										21
																										22
																										23
																										24
																										25
																										26
																										27
																										28
																										29
																										30
																										31
																										32
																										33
																										34
																										40

tales, encontrándose una relación exponencial entre el contenido de humedad en el sólido y el tiempo. Las constantes correspondientes se evaluaron por el método de los mínimos cuadrados y relacionando éstas con la humedad y la temperatura. La ecuación obtenida es:

$$\log W = (-3.784 \times 10^{-4}T + 2.768 \times 10^{-2})H + 4.068 \times 10^{-3}T + 2.2030 - [(1.256 \times 10^{-4}T - 1.402 \times 10^{-2})H + 1.2022 \times 10^{-2}T + 6.85 \times 10^{-3}]X \quad (1)$$

donde:

W = porciento de contenido de humedad en el sólido (base seca)

T = temperatura del gas de secado

X = tiempo de secado

H = porciento de humedad del gas de secado

La ecuación anterior es válida dentro de los siguientes límites:

Temperatura: entre 75 y 125°C

Porciento de humedad: entre 2 y 6%

Velocidad del gas de secado: entre 127.00 cm/seg y 405.83 cm/seg.

Contenido de humedad en el sólido: entre 10% y 420% (base seca)

En el apéndice No. 1 se muestra el procedimiento

de cálculo para obtener esta ecuación.

En la tabla No. 2 se muestran los valores de $\log W$ obtenidos con los datos experimentales ($\log W_e$) y los calculados por medio de la ecuación anterior ($\log W_c$) (1), para las pruebas con cuyos datos se calculó dicha ecuación, así como la desviación que presentan los datos experimentales con respecto a los calculados.

La desviación promedio para esta ecuación es 3.6% si no se consideran los tres últimos puntos de la prueba 5a, que aparentemente contienen errores experimentales, el error máximo en el resto de las pruebas es de 15%.

También es interesante hacer notar que cuando esta ecuación se aplica a valores de humedad del gas de secado fuera de los límites considerados, como en el caso de las pruebas 4a y 4b (100°C y 15% H, 100°C y 10% H), el error promedio que se tiene es de 5.1%, lo que indica que esta ecuación aparentemente también es válida para valores de humedad hasta de 15% para temperaturas no mayores de 100°C.

La ecuación 1 no incluye el secado de muestras con contenidos de humedad abajo de 10%. Sin embargo, es necesario hacer notar que normalmente no se requiere secar los compactados considerados abajo de dicho contenido de humedad.

Es pertinente aclarar también que a bajas humedades la determinación experimental puede conducir a errores relativamente altos, particularmente por cuanto al cálculo del contenido de humedad en el sólido base seca.

TABLA No. 2

COMPARACION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y CALCULADOS
 POR MEDIO DE LA ECUACION (1) PARA EL SECADO DE
 AGLOMERADOS A BASE DE PARENQUIMA MODIFICADO DE
 BAGAZO DE CAÑA, EMPLEANDO UN SECADOR CON CIRCULACION
 TRANSVERSAL DE AIRE.

Tiempo min.	W_e^1	W_c^2	$W_c - W_e$	% de error
----------------	---------	---------	-------------	------------

Prueba No. 3b

Para temperatura = 75°C

Porcentaje de humedad del
gas de secado = 2.0

0.00000	2.53686	2.50848	-.02837	-1.11840
1.00000	2.46300	2.42067	-.04232	-1.71852
2.00000	2.38550	2.33285	-.05264	-2.20676
3.00000	2.30685	2.24504	-.06180	-2.67929
4.00000	2.20884	2.15722	-.05161	-2.33662
5.00000	2.13033	2.06941	-.06091	-2.85952
6.00000	2.02208	1.98159	-.04048	-2.00201
7.00000	1.93069	1.89378	-.03690	-1.91161
8.00000	1.83187	1.80596	-.02590	-1.41307
9.00000	1.73640	1.71815	-.01824	-1.05086
10.00000	1.61563	1.63033	.01470	.01034
12.00000	1.46030	1.45170	-.00859	-.08205
15.00000	1.00035	1.19126	.19091	9.25607

Prueba No. 3c

Para temperatura = 75°C

Porcentaje de humedad del
gas de secado = 4.0

0.00000	2.40429	2.50700	.10277	5.1218
1.00000	2.42331	2.42045	-.00286	-.12122
2.00000	2.36652	2.34983	-.01668	-.070502
3.00000	2.29762	2.27122	-.02630	-1.14899
4.00000	2.22958	2.19260	-.03697	-1.65836

##

TABLA No. 2 (Cont.)

5.00000	2.16382	2.11399	-.04982	- 2.30285
7.00000	2.02673	1.95676	-.06996	- 3.45233
9.00000	1.87087	1.79953	-.07133	- 3.81317
11.00000	1.71667	1.64230	-.07436	- 4.33219
13.00000	1.54183	1.48507	-.05675	- 3.68131
15.00000	1.35965	1.32784	-.03180	- 2.33954

Prueba No. 3d

Para temperatura = 75°C

Por ciento de humedad del
gas de secado = 6.0

.00000	2.60587	2.50564	-.10022	- 3.84619
1.00000	2.56891	2.43622	-.13268	- 5.16491
2.00000	2.51883	2.36681	-.15201	- 6.03521
3.00000	2.46805	2.29739	-.17065	- 6.91444
4.00000	2.41397	2.22798	-.18598	- 7.70460
5.00000	2.39802	2.15856	-.13945	- 6.06834
7.00000	2.18542	2.01973	-.16568	- 7.58123
9.00000	2.07919	1.88090	-.19228	- 9.27468
11.00000	1.99173	1.74207	-.18965	- 9.81772
13.00000	1.78902	1.60324	-.18577	-10.38400
15.00000	1.60868	1.46441	-.19426	-11.71183

Prueba No. 4f

Para temperatura = 100°C

Por ciento de humedad del
gas de secado = 2.0

0.00000	2.30134	2.30013	0.01120	0.4010
1.00000	2.15400	2.40000	0.01119	0.65100
2.00000	2.06000	2.30347	0.03347	2.5000
3.00000	2.11173	2.17036	0.02147	0.07070
4.00000	2.07333	2.04970	0.02065	2.203
5.00000	1.97403	1.95474	0.01981	1.0035
6.00000	1.88633	1.88974	0.0200	1.543
7.00000	1.82997	1.74819	0.01120	0.400
8.00000	1.77113	1.66276	0.09163	5.8321
9.00000	1.67658	1.54831	0.11993	-10.165
10.00000	1.56150	1.41716	0.14500	-14.737
15.00000	1.09442	0.71642	0.0000	0.1000

TABLA No. 2 (Cont.)

Prueba No. 4c

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad del gas de secado = 4.0	
.00000	2.53240	2.57073	0.03833	1.51358
1.00000	2.44138	2.44951	0.00813	0.33320
2.00000	2.33826	2.32828	-0.00998	-0.4268
3.00000	2.24748	2.20705	-0.04043	-1.7980
4.00000	2.13364	2.08583	-0.04781	-2.2407
5.00000	2.02979	1.96460	-0.06509	-3.2067
6.00000	1.91803	1.84338	-0.06475	-3.8920
7.00000	1.65992	1.72215	-0.06743	-3.7620
8.00000	1.65992	1.60092	-0.05900	-3.5543
9.00000	1.52375	1.47970	0.04405	2.8908
10.00000	1.37420	1.35847	0.1573	-1.446
12.00000	1.10140	1.11602	0.01462	1.3274

Prueba No. 4d

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad del gas de secado = 6.00000	
.00000	2.45469	2.55038	0.09569	3.8980
1.00000	2.37037	2.43208	0.06171	2.6033
2.00000	2.26928	2.31378	0.4450	1.9609
3.00000	2.16286	2.19547	0.03261	1.5077
4.00000	2.05037	2.07717	0.0268	1.3070
5.00000	1.91206	1.95886	0.0468	2.4476
6.00000	1.81624	1.84056	0.02432	2.3780
7.00000	1.68674	1.72226	0.03552	2.1058
8.00000	1.55931	1.60395	0.04464	2.8628
9.00000	1.39287	1.48565	0.09228	6.6610
10.00000	1.24797	1.36734	0.11877	9.5170

Prueba No. 4e

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad del gas de secado = 10.0	
.00000	2.45459	2.50969	0.05500	2.2406
1.00000	2.39970	-2.39723	0.00247	0.10292

##

TABLA No. 2 (Cont.)

2.00000	2.32428	2.28477	0.08951	3.8510
3.00000	2.24353	2.17231	0.07122	5.7272
4.00000	2.15685	2.05985	0.08700	4.4970
5.00000	2.06707	1.94739	0.11968	5.7890
6.00000	1.97081	1.83493	0.13588	6.8940
7.00000	1.87099	1.72247	- .14851	- 7.93772
8.00000	1.76485	1.61001	- .15483	- 8.77320
9.00000	1.65427	1.49755	- .15671	- 9.47330
10.00000	1.51055	1.38509	- .12545	- 8.30518
12.00000	1.26951	1.16017	- .10933	- 8.61229
15.00000	.95036	.82279	- .12756	-13.42269

Prueba No. 4a

Para temperatura = 100°C

Porcentaje de humedad del
gas de secado = 15.0

.00000	2.54192	2.45882	-.08309	- 3.26882
1.00000	2.50082	2.35367	-.14714	- 5.88390
2.00000	2.43933	2.24851	- .19081	- 7.82227
3.00000	2.27980	2.14336	- .13643	- 5.98455
4.00000	2.18128	2.03820	- .14307	- 6.55903
5.00000	2.08170	1.93305	- .14864	- 7.14060
6.00000	1.95279	1.82789	- .12489	- 6.39551
7.00000	1.82955	1.72274	- .10680	- 5.83782
8.00000	1.71181	1.61758	- .09422	- 5.50417
9.00000	1.48968	1.51243	.02275	1.52744
10.00000	1.21854	1.40727	.18873	15.48894

Prueba No. 5c

Para temperatura = 125°C

Porcentaje de humedad del
gas de secado = 2.0

.00000	2.54461	2.67367	.12906	5.07223
1.00000	2.46117	2.51319	.05202	2.11394
2.00000	2.35856	2.35271	-.00584	- .24774
3.00000	2.24132	2.19223	-.04908	- 2.18997
4.00000	2.11587	2.03175	-.08411	- 3.97544
5.00000	1.98399	1.87127	-.11271	- 5.68129
7.00000	1.70663	1.55031	-.15631	- 9.15946
9.00000	1.39375	1.22934	-.16440	-11.79553
11.00000	.93146	.90838	-.02307	- 2.47699

##

TABLA No. 3 (Cont.)

Prueba No. 5b

Para temperatura = 125°C

Porcentaje de humedad del gas de secado = 4.0

.00000	2.54461	2.63440	.08070	3.52892
1.00000	2.46047	2.47057	.01010	.41050
2.00000	2.35603	2.30673	-.04929	- 2.09235
3.00000	2.22181	2.14289	-.07891	- 3.55176
4.00000	2.10075	1.97905	-.12169	- 5.79272
5.00000	1.99562	1.81522	-.18039	- 9.03967
7.00000	1.68690	1.48754	-.19935	-11.81762
9.00000	1.35238	1.15987	-.19250	-14.23457
11.00000	.95424	.83220	-.12203	-12.78918

Prueba No. 5a

Para temperatura = 125°C

Porcentaje de humedad del gas de secado = 6.0

.00000	2.54461	2.59513	.05052	1.98561
1.00000	2.45296	2.42794	-.02501	- 1.01986
2.00000	2.34108	2.26075	-.08032	- 3.43131
3.00000	2.22994	2.09355	-.13638	- 6.11598
5.00000	1.98385	1.75917	-.22467	-11.32539
7.00000	1.73632	1.42478	-.31153	-17.94224
9.00000	1.43152	1.09039	-.34112	-23.82927
11.00000	1.08458	.75601	-.32856	-30.29438

1. W_e = Contenido de humedad en el sólido (Base seca). Valor experimental. Expresado en términos de su logaritmo.
2. W_c = Contenido de humedad en el sólido (Base seca). Valor calculado con la ecuación(1). Expresado en términos de su logaritmo.

También se muestra en las Figuras 6 a 11 las gráficas correspondientes a los datos de la Tabla No. 2 para los valores extremos de humedad del gas de secado a cada temperatura considerada; en ellas se observa mejor la diferencia entre los datos calculados por la ecuación y los datos experimentales.

El secado de compactados de forma cilíndrica se llevó a cabo siguiendo el mismo criterio que para el secado de aglomerados. Se hicieron pruebas experimentales a temperaturas de 75^o, 100^o y 125^oC, a 6, 4 y 2 por ciento de humedad del gas de secado para cada temperatura considerada, empleándose los datos obtenidos en cada una de estas pruebas para obtener una ecuación que relaciona el contenido de humedad en este tipo de sólido (expresado en porcentaje de humedad base seca), en función del tiempo de secado, temperatura y humedad del gas de secado. Esta nueva ecuación se obtuvo haciendo un análisis gráfico de los datos experimentales obtenidos durante el secado, (W_e , Tabla No. 3), encontrándose que la ecuación que mejor representa la relación entre el contenido de humedad en el sólido en función del tiempo de secado corresponde a la ecuación de una parábola.

$$Y = AX^2 + bX + C$$

donde:

Y = contenido de humedad en el sólido (% Base seca)

X = tiempo de secado

Las constantes de esta ecuación se evaluaron por el método de los mínimos cuadrados y a su vez se relacionaron con la humedad del gas de secado y la temperatura. La ecuación final es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 Y = & \left[-0.1931 + 1.4 \times 10^{-2}T + (-0.161 + 0.875 \times 10^{-3}T)H \right] X^2 \\
 & + \left[1.555 - 0.195T + (0.4448 + 0.1288 \times 10^{-2})H \right] X + \\
 & 66.1149 + 0.08452T \qquad (2)
 \end{aligned}$$

donde:

Y = contenido de humedad en el sólido (% de humedad Base Seca)

X = tiempo de secado

T = temperatura del gas de secado

H = porcentaje de humedad en el gas de secado.

Esta ecuación es aplicable dentro de los siguientes límites:

Temperatura entre 75 y 125°C

Humedad del gas de secado entre 2 y 6%

Velocidad del gas de secado entre 127.08 cm/seg y 405.83 cm/seg.

Contenido de humedad en el sólido mayor del 10%.

En el apéndice 2 se muestra el procedimiento de cálculo seguido para la obtención de esta ecuación.

En la tabla No. 3 se muestran los resultados experimentales (W_e) y los calculados (W_c) por medio de esta ecuación, así como las desviaciones que presentan los datos ex

TABLA No. 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CALCULADOS POR LA ECUACION (2) PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA A BASE DE PARENQUIMA MODIFICADO DE BAGAZO DE CAÑA. DURANTE EL SECADO.

Tiempo min.	W_e	W_c^2	$W_c - W_e$	% de error
-------------	-------	---------	-------------	------------

Prueba No. 7a

Para temperatura = 75°C. Porciento de humedad en el gas de secado = 6.0

.00000	72.36100	72.45390	.09290	.12838
1.00000	63.22000	62.91725	-.30275	.47888
2.00000	61.54200	53.94990	-7.59210	12.33645
4.00000	38.06100	37.72310	-.33790	.88778
6.00000	28.23600	23.77350	-4.46250	15.80429
8.00000	20.30800	12.10110	-8.20690	40.41215

Prueba No. 7b

Para temperatura = 75°C Porciento de humedad en el gas de secado = 4.0

.00000	72.36100	72.45390	.09290	.12838
1.00000	60.12300	62.02520	1.90220	3.16384
2.00000	48.57500	52.54730	3.97230	8.17766
4.00000	36.51000	36.44390	-.06609	.18104
6.00000	26.51300	24.14370	-2.36930	8.93637
9.00000	15.65400	12.82440	-2.82959	18.07588

Prueba No. 7c

Para temperatura = 75°C Porciento de humedad en el gas de secado = 2.0

.00000	72.36100	72.45390	.09290	.12838
1.00000	58.22700	61.13315	2.90615	4.99107
2.00000	49.09000	51.14470	2.05470	4.18557
4.00000	34.44100	35.16470	.72369	2.10127
6.00000	23.58200	24.51390	.93190	3.95174
9.00000	14.10300	18.52995	4.42695	31.39013

##

TABLA No. 3 (Cont.)

Prueba No. 8a

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad en el gas de secado = 6.0	
.00000	75.82400	74.56690	-1.25710	1.65791
1.00000	61.74900	60.82970	-.91930	1.48876
2.00000	48.30500	48.62430	.31930	.66100
4.00000	27.81500	28.80890	.99390	3.57325
6.00000	13.39700	15.12069	1.72369	12.86630

Prueba No. 8b

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad en el gas de secado = 4.0	
.00000	75.82400	74.56690	-1.25710	1.65791
1.00000	60.87900	59.82950	-1.04949	1.72391
2.00000	46.63700	46.91790	.28090	.60231
4.00000	26.94500	26.57210	-.37289	1.38392
6.00000	13.40600	13.52950	.12350	.92123

Prueba No. 8c

Para temperatura = 100°C			Por ciento de humedad en el gas de secado = 2.0	
.00000	75.82400	74.56690	-1.257.10	1.65791
1.00000	59.29600	58.82930	-.46669	.78706
2.00000	42.94500	45.21150	2.26650	5.27768
4.00000	23.78000	24.33530	.55529	2.33515
6.00000	11.47200	11.93830	.46630	4.06468

Prueba No. 9a

Para temperatura = 125°C			Por ciento de humedad en el gas de secado = 6.0	
.00000	75.82400	76.67990	.85589	1.12879
1.00000	59.82400	58.74215	-1.08184	1.80838

##

TABLA No. 3 (Cont.)

2.00000	43.64800	43.29870	- .34930	.80026
4.00000	17.80200	19.89470	2.09270	11.75542

Prueba No. 9b

Para temperatura = 125°C		Por ciento de humedad en el gas de secado = 4.0		
.00000	75.82400	76.67990	.85589	1.12879
1.00000	57.01000	57.63380	.62379	1.09419
2.00000	39.95600	41.28850	1.33250	3.33491
3.00000	28.59300	27.64400	1.05100	3.95216
4.00000	15.34000	16.70030	1.36029	8.86766

Prueba No. 9c

Para temperatura = 125°C		Por ciento de humedad en el gas de secado = 2.0		
.00000	75.82400	76.67990	.85589	1.12879
1.00000	55.95600	56.52545	.56944	1.01767
2.00000	38.54900	39.27830	.72929	1.89187
3.00000	25.71400	24.93844	-.77555	3.01606
4.00000	12.40600	13.50589	1.09989	8.86586

-
1. W_e = Por ciento de contenido de humedad en el sólido (Base seca).
Valor experimental.
 2. W_c = Por ciento de contenido de humedad en el sólido (Base seca)
Valor calculado por la ecuación (2)

perimentales con respecto a los calculados expresados en porcentaje de error.

Analizando los datos obtenidos para la prueba 7a (75°C, 6% H) se observa una desviación del 40%, pero este hecho no es significativo desde el punto de vista de la aplicación de esa ecuación, ya que se trata de temperaturas más bajas de los límites considerados, condiciones a las cuales se observa mayor tiempo de secado. La desviación máxima que presentan los valores calculados con respecto a los experimentales es del 12% a 100°C y 6% de humedad del gas de secado y las pruebas 18 y 31% para 7a y 7c (75°C y 6%, 75°C y 2%) respectivamente.

En general, haciendo un análisis completo de los datos de la tabla No. 3 se observa que a medida que aumenta la temperatura y disminuye la humedad del gas de secado las desviaciones de los datos calculados por medio de la ecuación 2 son menores. Este hecho es importante desde el punto de vista de la aplicación práctica de esta ecuación, puesto que a estos valores de temperatura y humedad se tienen los tiempos de secado más bajos.

También se muestran en las Figuras 12 a 17, las gráficas correspondientes a los datos experimentales y los calculados mediante la ecuación 2 para los valores extremos de humedad del gas de secado para cada temperatura (Tabla No. 3).

Aunque el contenido de humedad inicial en el sólido para el caso de aglomerados es mayor que para el caso de compactados cilíndricos (Tablas Nos. 1, 3 y 4) se observa que la velocidad de secado en estos últimos es mayor que para el caso de aglomerados. Este hecho puede ser debido a las siguientes causas:

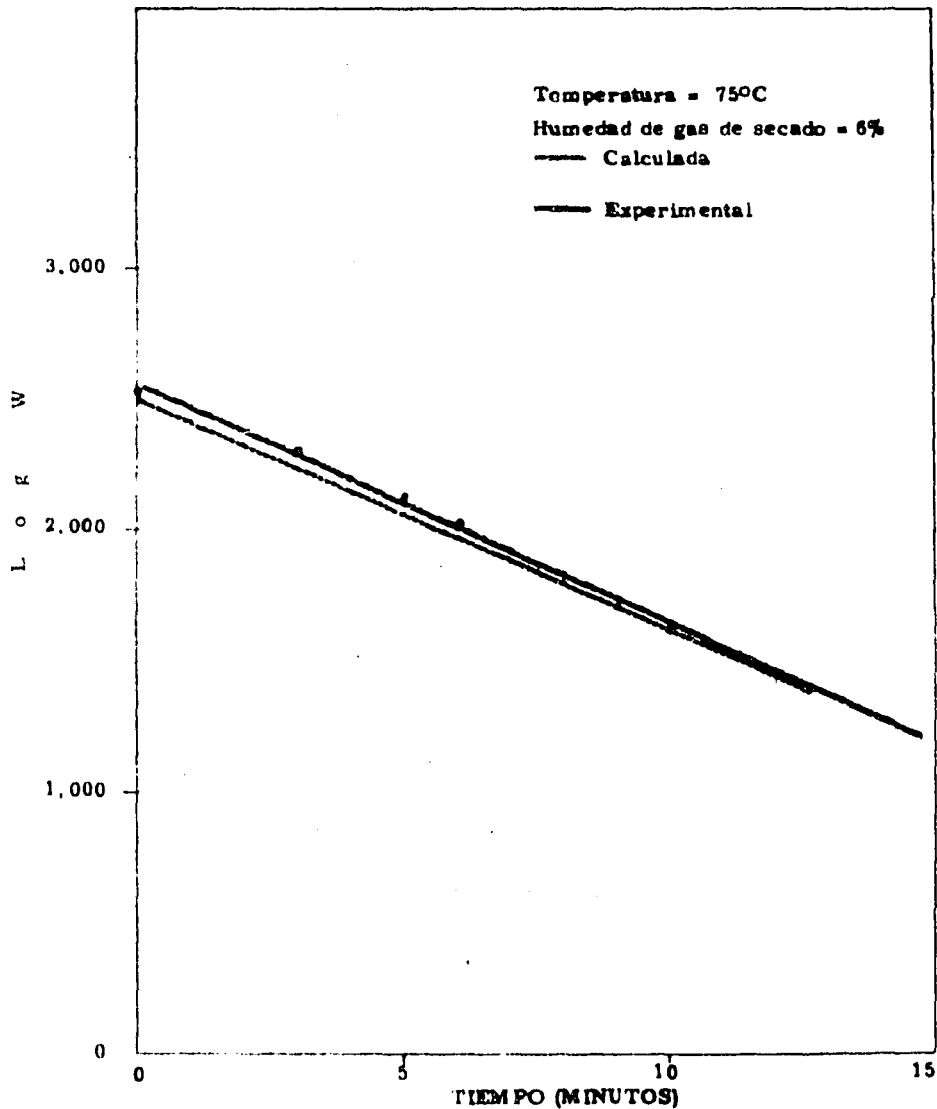


FIG. No. 6. - GRAFICA QUE MUESTRA LA RELACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO A LAS CONDICIONES INDICADAS.

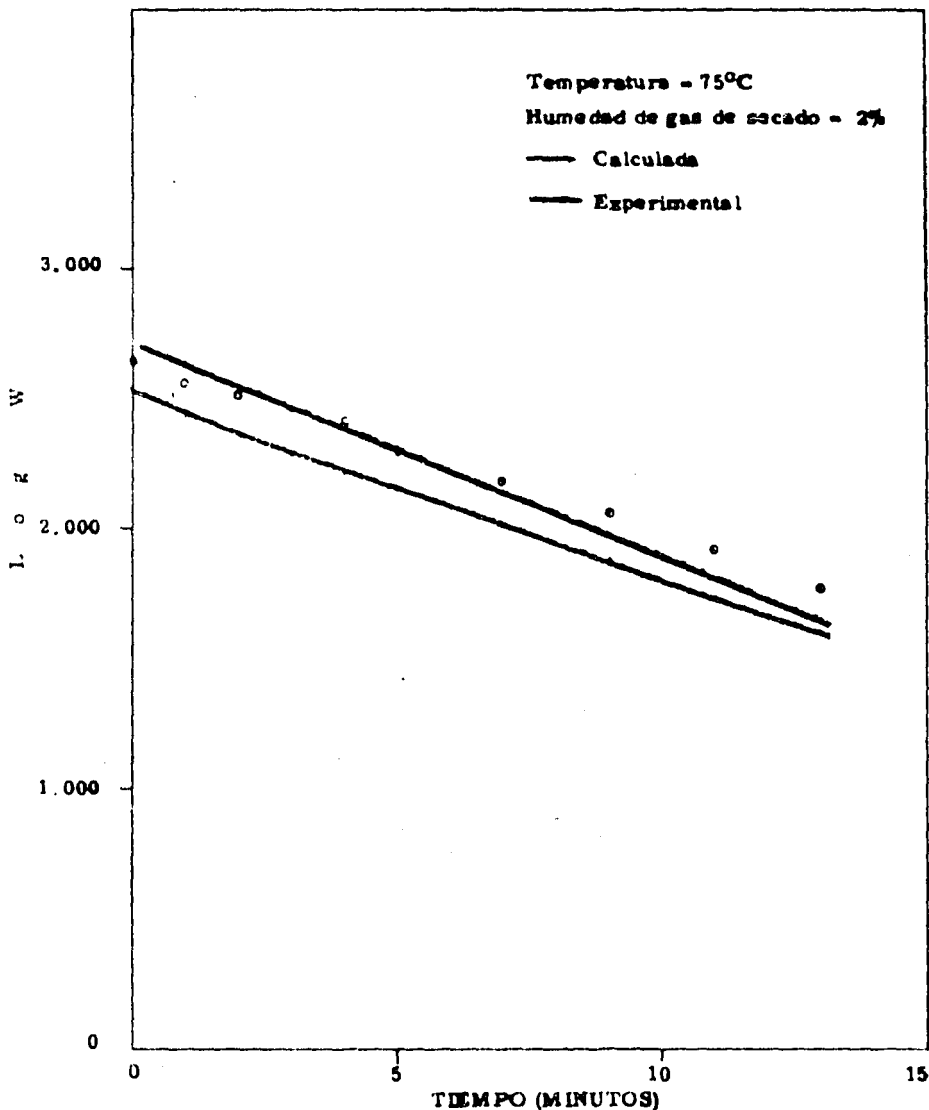


FIG. No. 7. - GRAFICA QUE MUESTRA LA RELACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO A LAS CONDICIONES INDICADAS.

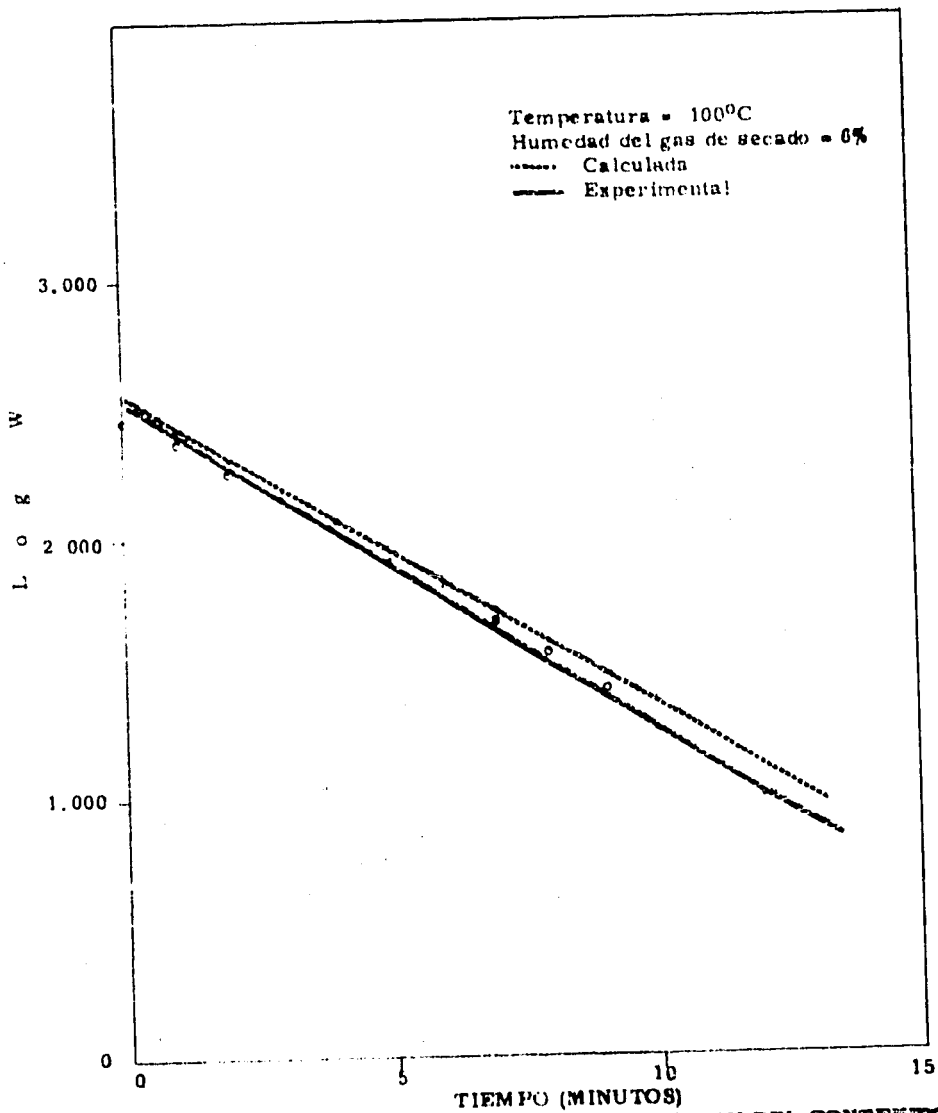


FIG. No. 8. - GRAFICA QUE MUESTRA LA RELACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO A LAS CONDICIONES INDICADAS.

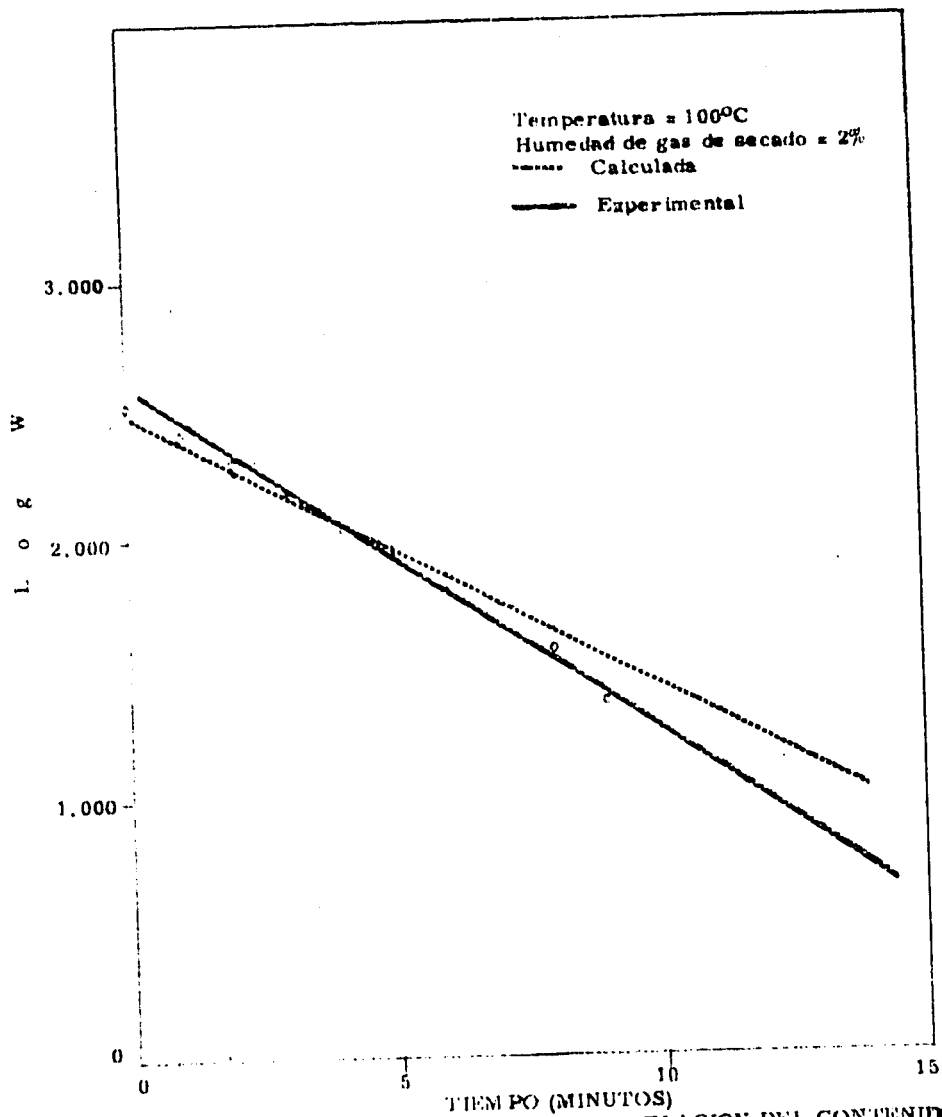


FIG. No. 0. - GRAFICA QUE MUESTRA LA RELACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO A LAS CONIDIONES INDICADAS.

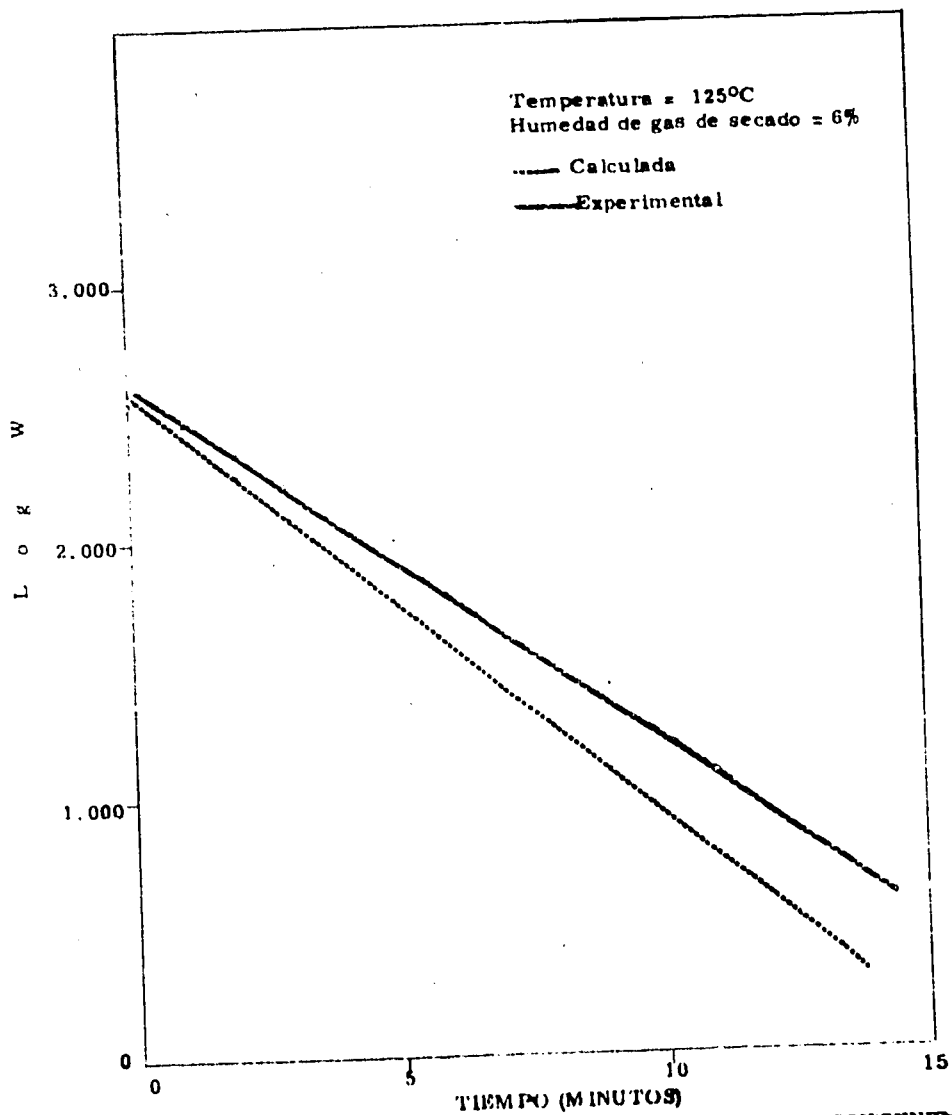


FIG. No. 10.- GRAFICA QUE MUESTRA LA REALCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO A LAS CONDICIONES INDICADAS.

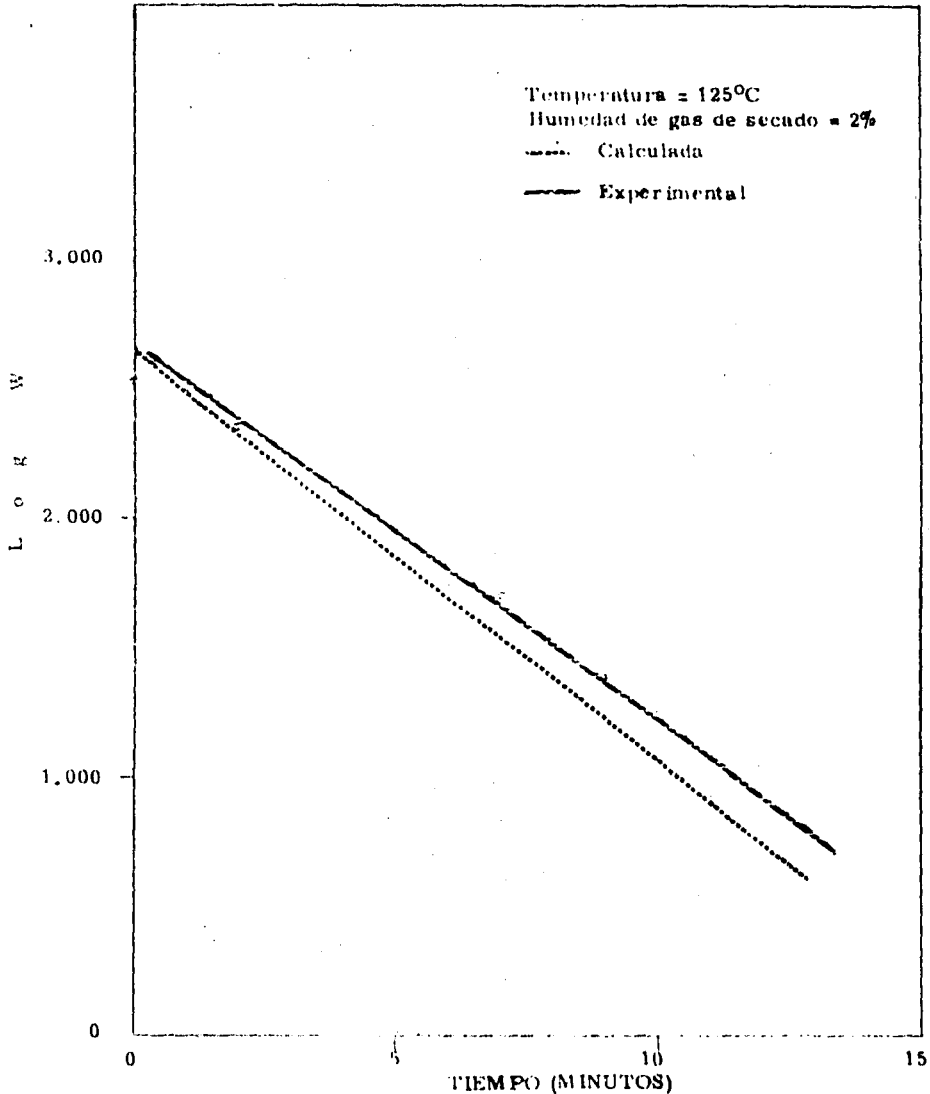


FIG. No. 11. - GRAFICA QUE MUESTRA LA RELACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SOLIDO BASE SECA (w) EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECAJO A LAS CONDICIONES INDICADAS.

TABLA No. 4

VALORES DE VELOCIDAD DE SECADO OBTENIDOS DURANTE EL SECADO DE COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA A BASE DE PARENQUIMA MODIFICADO DE BAGAZO DE CAÑA USANDO UN SECADOR EXPERIMENTAL CON CIRCULACION TRANSVERSAL DE AIRE.

Temperatura Prueba No. Humedad del gas de secado	75°C			100°C			125°C			Tiempo min.
	7a	7b	7c	8a	8b	8c	9a	9b	9c	
	6%	4%	2%	6%	4%	2%	6%	4%	2%	
										0
	5.5	5.7	5.3	7.8	8.1	9.3	9.2	9.7	10.9	1
	4.35	4.0	4.75	3.9	5.1	5.45	7.3	7.6	7.3	2
	2.35	2.6	3.3	4.1	3.6	3.5	4.25	3.65	3.3	4
	2.30	3.15	2.65	1.8	1.53	1.6	0.5	0.43	0.3	6
	1.7									8
		2.1	1.85	0.43	0.63	0.33				9
	1.7									10
	0.95	0.86	0.46	0.066	0.03					12
	0.7									14
		0.65	0.3							15
	0.45									16
	0.2	0.4	0.13							18
										20

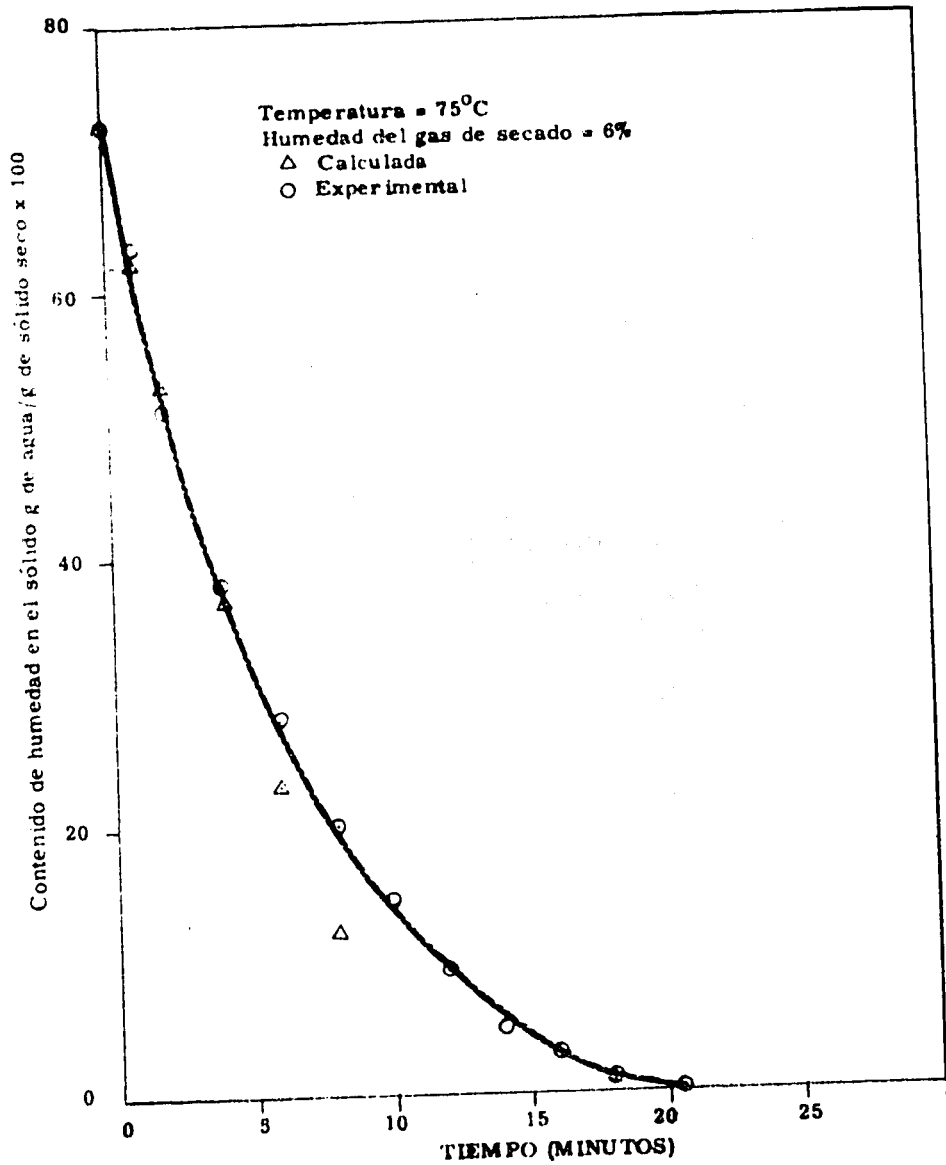


FIG. 12. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

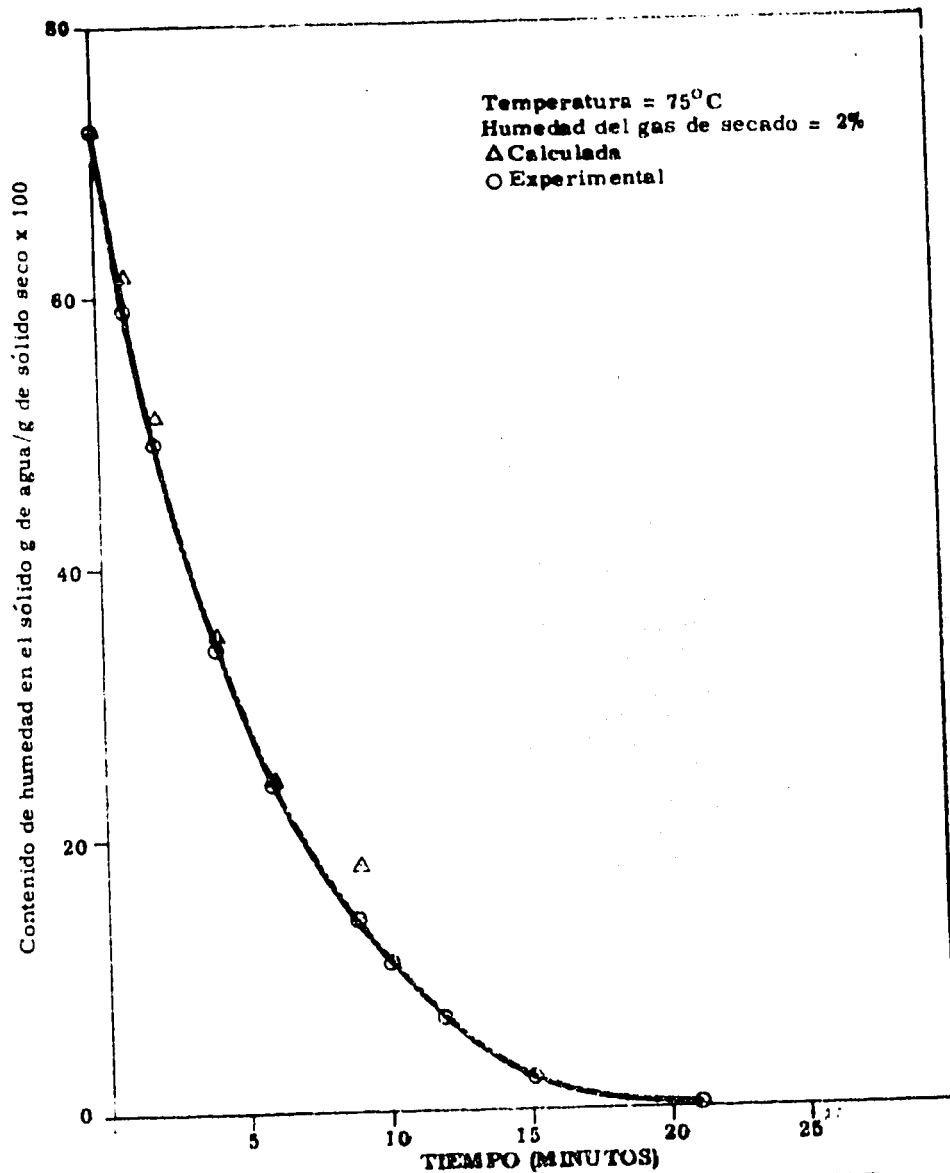


FIG.13. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

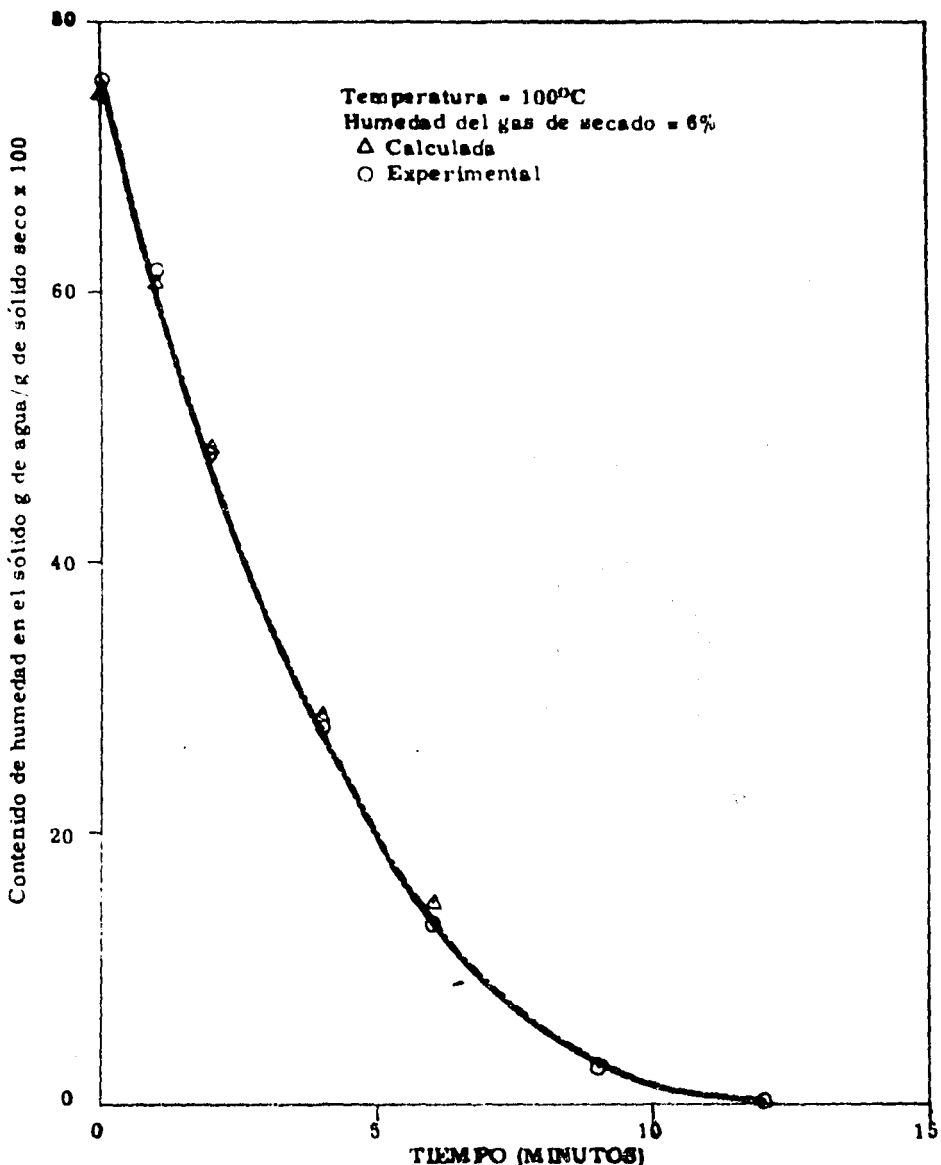


FIG. 14. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

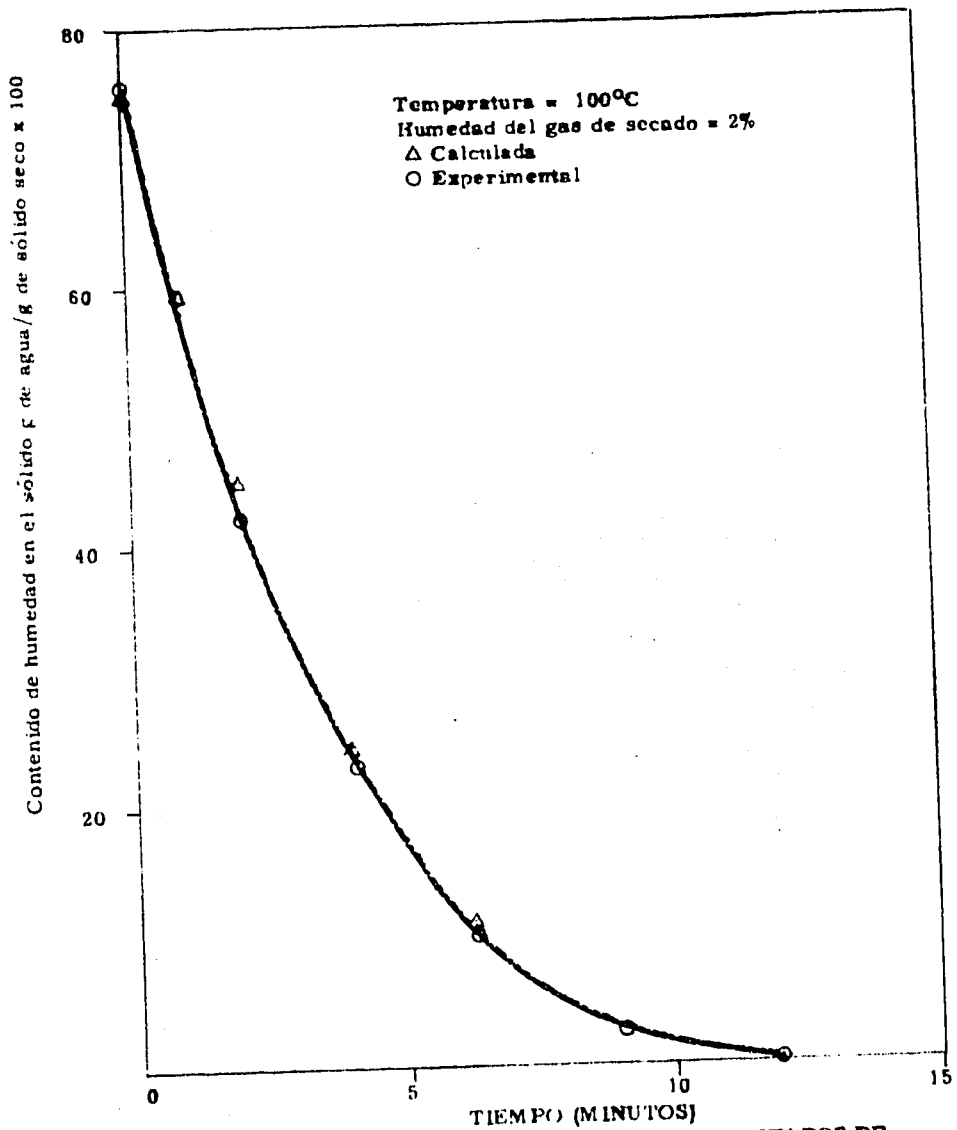


FIG. 15. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

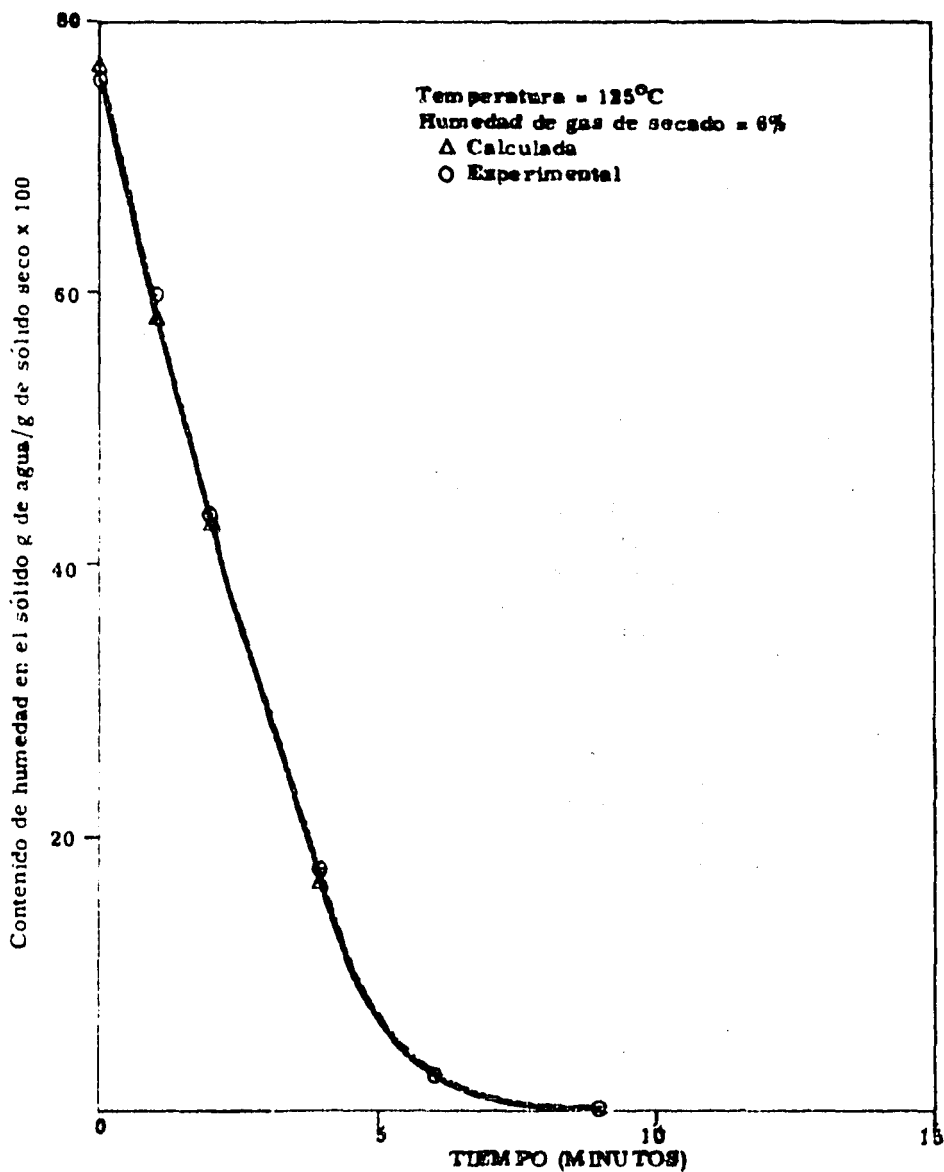


FIG. 16. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

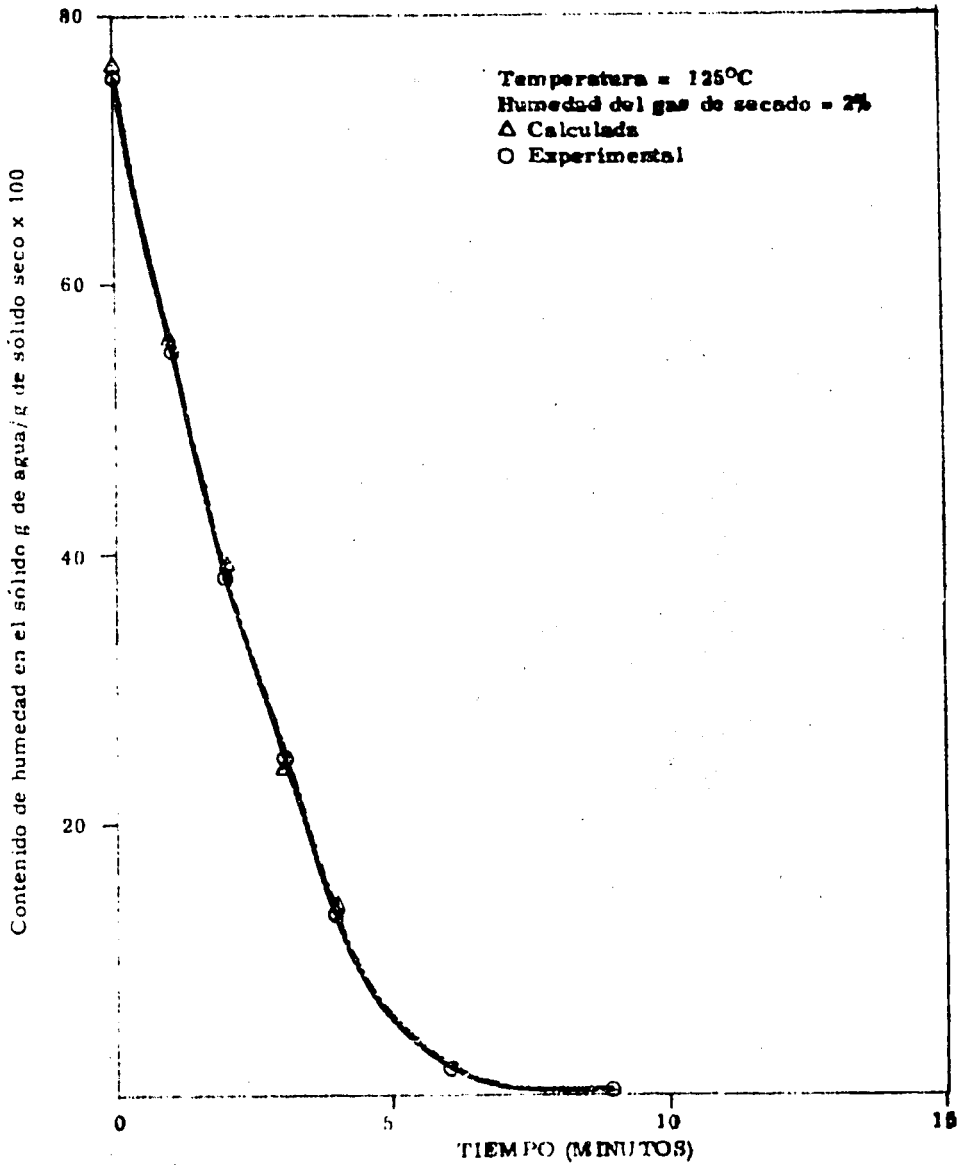


FIG. 17. - CURVA DE SECADO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

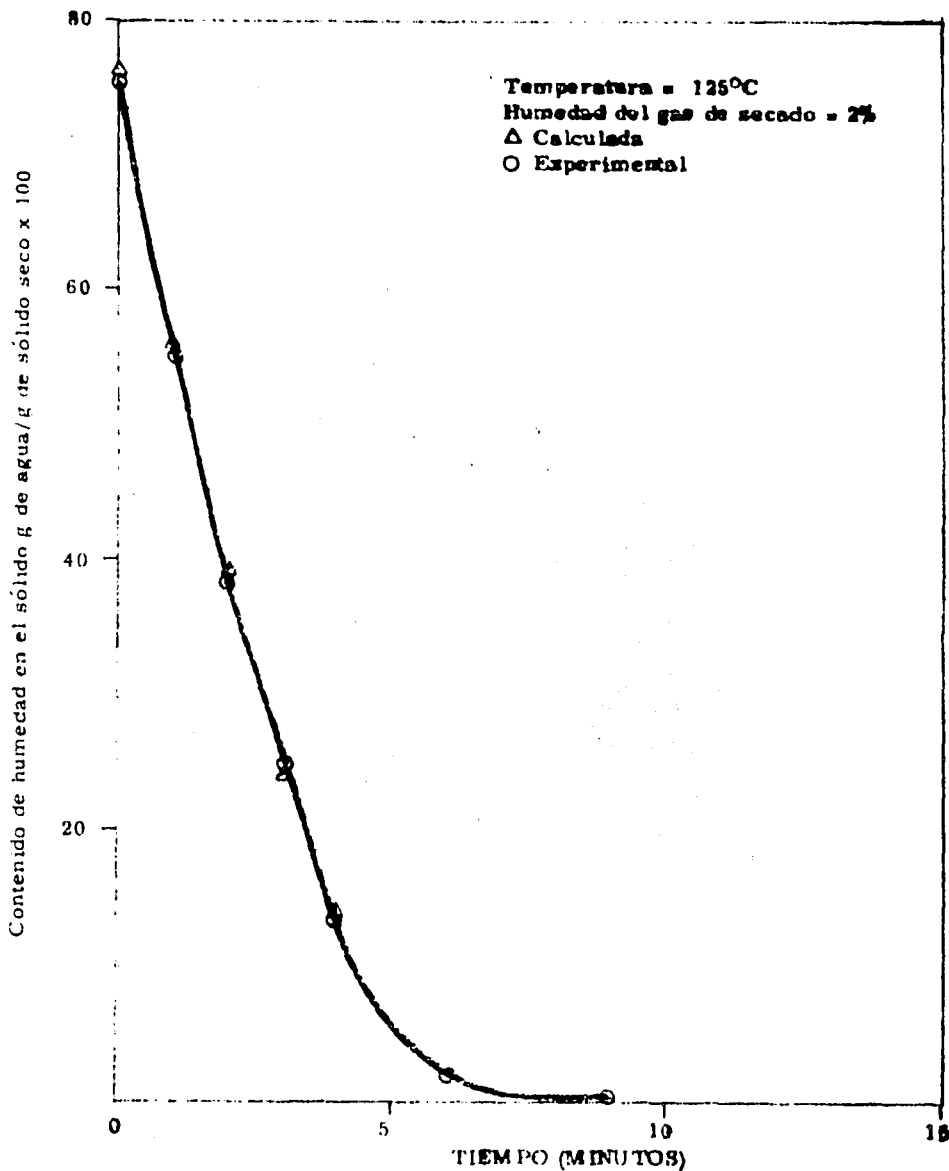


FIG. 17. - CURVA DE SECAIDO PARA COMPACTADOS DE FORMA CILINDRICA.

V. - APENDICE.

APENDICE No. 1

Obtención de la ecuación empírica que representa el contenido de humedad en el sólido en función del tiempo de secado, temperatura y humedad del gas de secado.

$$W = f(X_1 T_1 H)$$

donde:

- W = contenido de humedad en el sólido
- X = tiempo de secado
- T = temperatura del gas de secado
- H = porcentaje de humedad en el gas de secado

Para esto se escogió la prueba No. 4f y se representaron gráficamente estos datos en papel semilogarítmico, recíproco y logarítmico, obteniéndose una recta en el primer tipo de papel, con desviaciones considerables en los últimos puntos.

Una gráfica de este tipo en papel semilogarítmico corresponde al siguiente modelo matemático.

$$W = a e^{-bx} \quad (1)$$

La cual corresponde a la recta:

$$\log W = \log a - bx \quad (2)$$

A esta ecuación se aplicó el método de los mínimos cuadrados para evaluar los constantes, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} na + b \sum x & - \sum y = 0 \\ a \sum x + b \sum x^2 & - \sum xy = 0 \end{aligned}$$

donde: $y = \log W$

El valor de los constantes a y b para cada una de las pruebas consideradas se da en la siguiente tabla:

T H%	75°C		100°C		125°C	
	a	b	a	b	a	b
2	2.58094	0.09553	2.52574	0.11562	2.75771	0.17637
4	2.51938	0.07460	2.37698	0.11550	2.62863	0.14346
6	2.64042	0.06475	2.37040	0.13450	2.73700	0.17072

El siguiente paso fue encontrar una ecuación que relacionara el valor de estos constantes en función del porcentaje de humedad. Para ello, se graficó el valor de las constantes a en función de la humedad, observándose una tendencia parabólica, pero siendo los límites de variación tan pequeños se propuso una relación lineal entre a y H; la ecuación es la siguiente:

$$a = qH + t \quad (4)$$

lo mismo para la constante b

$$b = cH + d \quad (5)$$

Aplicando el método de mínimos cuadrados se obtuvieron los valores de los constantes de las ecuaciones que correlacionan a y b con % de H.

Los valores de estos constantes se expresan a continuación:

T°C	q	t	c	d
75	1.362×10^{-2}	2.52576	-7.69×10^{-3}	0.109053
100	-3.886×10^{-2}	2.579806	4.72×10^{-3}	0.102993
125	5.285×10^{-2}	2.72892	1.415×10^{-3}	0.169120

Por último se buscó una relación entre estos constantes y la temperatura proponiéndose las siguientes ecuaciones:

$$q = P'T + Q' \quad (6) \quad c = ZT + \mu \quad (8)$$

$$t = PT + Q \quad (7) \quad d = ZT + \mu \quad (9)$$

y evaluando los constantes por el mismo procedimiento se encontró:

$$P' = -3.7849 \times 10^{-4} \quad P = 4.068 \times 10^{-3}$$

$$Z = 1.2556 \times 10^{-4}$$

$$\mu = 1.4017 \times 10^{-2}$$

$$Q' = 2.7675 \times 10^{-2}$$

$$Q = 2.20535$$

$$Z' = 1.2022 \times 10^{-2}$$

$$\mu = 6.852 \times 10^{-3}$$

Sustituyendo (6) y (7) en (4) y (8) y (9) en (5) y estos a su vez en (2), teniendo en cuenta (3) se obtiene la ecuación final que es la siguiente:

$$\log W = (P'T + Q')H + P'T + Q - [(ZT + \mu)H + Z'T + \mu']X$$

y sustituyendo el valor de los constantes queda finalmente:

$$\log W = (-3.7849 \times 10^{-4}T + 2.7675 \times 10^{-2})H +$$

$$4.068 \times 10^{-3}T + 2.202035 - [(1.2556 \times 10^{-4}T - 1.4017 \times 10^{-2})H + (1.2022 \times 10^{-2}T + 6.85 \times 10^{-3})]X$$

W = % de contenido de humedad en el sólido (Base Seca)

T = temperatura del gas de secado

X = tiempo de secado

APENDICE No. 2

Ecuación que representa el contenido de humedad en el sólido con una función del tiempo y de la temperatura y humedad del gas de secado.

La forma general de esta ecuación es:

$$y = f(T, X, H)$$

- y = contenido de humedad en el sólido
T = temperatura del gas de secado
X = tiempo de secado
H = humedad del gas de secado

Se hizo un análisis gráfico de los datos experimentales obtenidos (Tabla No. 3), obteniéndose una curva cuyas características son similares a las de una parábola cónica cuya ecuación es la siguiente:

$$y = AX^2 + BX + C$$

Se aplicó el método de mínimos cuadrados para evaluar las constantes. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Analizando el valor de estas constantes se observa

que existe una relación lineal entre los valores de estas constantes y la temperatura, mientras que con la humedad no hay una variación considerable para las constantes C_1 , C_2 y C_3 .

Tomando el valor medio de estas constantes el error máximo es de 2.6%, por lo tanto se puede despreciar la variación de C , con la humedad.

Se calculó la variación de A y B con la Humedad para cada valor de temperatura, considerando una relación lineal y los parámetros resultantes se relacionaron con la temperatura, evaluando las constantes en cada caso por el método de los mínimos cuadrados: los valores promedio de C_1 , C_2 , C_3 se relacionaron con la temperatura solamente.

A continuación se muestra el desarrollo matemático para obtener el valor de y en función de H , X y T .

$$y = AX^2 + BX + C \quad (1) \quad \text{a } T \text{ y } H \text{ constantes}$$

Como A y B dependen de la H y la Temperatura

$$A = W - ZH \quad (2) \quad \text{a } T = \text{constante}$$

La variación de Z y W con la temperatura es:

donde:

$$W = p + QT \quad (3) \quad p = -0.1931 \quad Q = 1.4 \times 10^{-2}$$

$$Z = p' + Q'T \quad (4) \quad p' = -0.161 \quad Q' = 0.875 \times 10^{-3}$$

VALOR DE LAS CONSTANTES CORRESPONDIENTES A LA ECUACION (1) PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS MOSTRADAS EN LA TABLA No. 3

H %	T	E	M	P	E	R	A	T	U	R	A
	75°C			100°C			125°C				
	A ₁	B ₁	C ₁	A ₂	B ₂	C ₂	A ₃	B ₃	C ₃		
2	0.5902	-11.5624	70.7866	1.2765	-18.328	75.7653	1.2637	-20.7626	75.838		
4	0.5330	-10.8488	70.8077	0.9731	-16.2172	75.3097	1.3437	-20.5136	75.9091		
6	0.3790	-9.7636	73.8657	0.8139	-15.3033	75.9297	1.0620	-18.7099	76.5180		

Por otra parte:

$$B = u + tH \quad (5) \text{ a temperatura constante}$$

$$v = v + wT \quad (6) \quad v = 1.555 \quad w = -0.195$$

$$t = v' + w'T \quad v' = 0.4448 \quad w' = 0.1288 \times 10^{-2}$$

Como C es función de la temperatura solamente:

$$C = d + qT \quad (8) \quad d = 66.1149 \quad q = 0.08452$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en (2) y (5) y (6) en (5):

$$A = p + QT + (p' + Q'T) H \quad (9)$$

$$B = v + wT + (v' + w'T) H \quad (10)$$

y sustituyendo (8), (9) y (10) en la ecuación (1) se obtiene la ecuación final teniendo en cuenta el valor de las constantes.

$$y = [-0.1931 + 1.4 \times 10^{-2}T + (-0.161 + 0.875 \times 10^{-3}T)H]X^2 + [1.555 - 0.195T + (0.4448 + 0.1288 \times 10^{-2}T)H]X + 66.1149 + 0.084452T$$

VI. - BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Baker D., Ryder E. and Baker N. H.
Temperature Measurement in Engineering
John Wiley and Sons Inc.
New York, 1953.
- 2.- Griswold John E.
Fuels Combustion and Furnaces
McGraw Hill Book Co. Inc.
1946.
- 3.- Heating ventilating air conditioning Guide. -
36th Edition. Published by American Society of
Heating and Air Conditioning Engineers, 1958.
- 4.- Hojel, S. A.
Consulta Personal.
- 5.- Perry, J. H.
Chemical Engineer's Handbook
Cuarta Edición
McGraw Hill Book Co. Inc.
New York 1963, págs. 15-36, 15-45, 15-47.
- 6.- Shoop C. F. and Tuve G. L.
Mechanical Engineering Practice
McGraw Hill Book Co. Inc.
New York, 1956, pág. 221

- 7.- Treybal
Mass Transfer Operations
McGraw Hill Book Co. Inc.
New York, 1955, pág. 524

- 8.- Unión Nacional de Productores de
Azúcar, S. A. de C. V.
Estadísticas Azucareras
México, D. F., 1963.

- 9.- W. R. Marschall Jr. and O. A. Hougen
Drying of Solids by Through Circulation
Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. 38 (1):91, 1942

- 10.- W. B. Van Arsdel
Principles of the Drying Process with special
reference to vegetable dehydration
Western Regional Research Laboratory.-
January, 1951.

- 11.- Lipka Joseph. PH. D.
Graphical and Mechanical Computation
John Wiley & Sons, Inc. 1958.