



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

47
Res.

FACULTAD DE QUIMICA

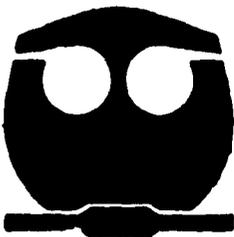
EVALUACION DE UN PROCESO DE SECADO
POR LOTES PARA PIGMENTOS
INORGANICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A:

MIGUEL FLORES SANDOVAL



MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA

PRESIDENTE: Prof. **ALEJANDRO ANAYA DURAND.**
VOCAL: Prof **TOMÁS VIVEROS GARCÍA**
SECRETARIO: Prof. **MARTHA IMELDA MORENO BRAVO.**
1er. SUPLENTE: Prof. **JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA**
2do. SUPLENTE: Prof: **RICARDO PÉREZ CAMACHO.**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

BASF Mexicana S.A. de C.V.
Ex-Hacienda El Hospital, El Hospital.
Cuautla, Mor.

ASESOR:



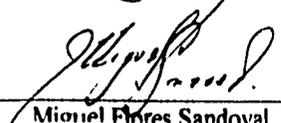
M.C. Martha I. Moreno Bravo.

SUPERVISOR TÉCNICO:



I.M.E. Miguel A. Olmedo Brito.

SUSTENTANTE:



Miguel Flores Sandoval.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fué posible desarrollarlo bajo la dirección y el asesoramiento de la M.C. Martha I. Moreno Bravo; a quién agradezco profundamente el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Agradezco las facilidades proporcionadas por BASF para la realización del presente trabajo, en especial al I.Q. Manuel Sanchez Granillo y al I.M.E. Miguel A. Olmedo Brito por haber permitido la realización del mismo, así como a todo el personal de la planta Cuautla que de alguna u otra manera colaboró en el desarrollo del trabajo.

*A mis Padres:
a quienes todo lo debo.*

*A mis hermanos:
por su apoyo incondicional.*

*A ti Quira:
por todos los buenos momentos compartidos
y por los que vendrán.*

LISTA DE SÍMBOLOS

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Fundamentos de secado	1
1.2 Periodos de secado	6
1.2.1 Periodo de velocidad constante	
1.2.2 Periodo de velocidad decreciente	
1.3 Movimiento de la humedad dentro del sólido	9
1.4 Métodos para determinar el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante	10
1.4.1 Método que usa la curva de secado	
1.4.2 Método que usa la curva de velocidad de secado	
1.4.3 Método que emplea los coeficientes de transferencia	
1.5 Métodos para determinar el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente	12
1.5.1 Método que emplea la integración gráfica	
1.5.2 Método para casos especiales en la región de velocidad decreciente	

CAPÍTULO 2 PRUEBAS DE SECADO

2.1 Descripción del secador	14
2.2 Mediciones y cálculos preliminares	17
2.2.1 Velocidad de secado	
2.2.2 Análisis del gas de secado	
2.2.3 Carta psicrométrica	
2.2.4 Costo del proceso de secado	
2.3 Pruebas de secado	23
2.3.1 Condiciones de una prueba de secado	
2.3.2 Acondicionamiento del secador	

2.3.3 Pruebas iniciales	
2.3.4 Pruebas posteriores	
2.4 Análisis de las pruebas de secado	46
CAPÍTULO 3 TRATAMIENTO DE RESULTADOS	
3.1 Predicción del tiempo de secado	47
3.2 Curva de velocidad de secado	51
3.3 Obtención de coeficientes de transferencia	56
3.4 Balance de materia	59
3.5 Balance de energía	63
3.6 Resumen de datos de operación del secador	69
CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	72
APÉNDICE A	74
APÉNDICE B	76
APÉNDICE C	79
APÉNDICE D	83

Lista de Símbolos

A	Área de secado, m^2 ; a, de transferencia de calor
a, b	Constantes en la ec. (1.28)
Cp	Capacidad calorífica a presión constante, $kJ/kg K$
Cs	Capacidad calorífica del aire húmedo, $kJ/kg K$
G	Velocidad másica, $kg/hr m^2$; g, $kgmol/hr$
h	Coefficiente de transferencia de calor, $J/s m^2$
H	Entalpía, kJ/kg
HR%	Humedad relativa
k	Conductividad térmica, $kJ/hr m^2 K$
k _y	Coefficiente de transferencia de masa, $kg /s m^2 (kg A/kg B)$; k _y , $kg mol/s m^2$ fracción molar
L	espesor, m
M	Peso molecular
m	Velocidad de transferencia de masa, kg/hr
N	Flux de transferencia de masa, $kg mol/s m^2$
n	moles del componente
P	Presión absoluta, atm
p°	Presión de vapor, atm
p	Presión parcial del vapor, atm
Q	Velocidad de transferencia de calor del medio de calentamiento, kJ/hr ; q, velocidad de transferencia de calor
R	Velocidad de secado, $kg H_2O/hr m^2$; R _c , en el periodo de velocidad constante; R', en el segundo punto crítico
T	Temperatura, °C o K; T _{int.} , del interior de la pared; T _{ext.} , del exterior de la pared
t	Tiempo, hr; t _s , tiempo total de secado; t _c , en el periodo constante de secado; t _d , en el periodo decreciente de secado
V _H	Volumen del aire húmedo, m^3/kg aire
W	Peso del sólido húmedo, kg; W _s , del sólido seco; W _T , de la muestra (charola y material húmedo)
X	Humedad del sólido, $kg H_2O/kg S.S.$; X*, en el equilibrio; X _c , en el primer punto crítico; X', en el segundo punto crítico
y	Fracción mol del vapor en la fase gas
Y	Humedad del aire, $kg H_2O/kg$ aire

SÍMBOLOS GRIEGOS

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Constantes en la ec. (3.1) y ec. (3.2)
ϵ	Avance de la reacción
λ	Calor latente, kJ/kg
ν	Coefficiente estequiométrico

SUBÍNDICES

A	Componente vapor
B	Componente gaseoso
c	Convección
f	Final
g	Gas de secado
g-s	Desde el gas de secado hacia el sólido
h	Medio de calentamiento
h-g	Desde el medio de calentamiento hacia el gas de secado
i	Inicial
L	Líquido
m	Valor medio
p	Pérdidas de calor en las paredes
s	Sólido
sat	Saturación
t	En el tiempo t
v	Vapor
vap	Vaporización
w	Bulbo húmedo

Introducción

El proceso de secado es una operación unitaria que implica la separación del agua (o de cualquier otro líquido volátil) de los materiales sólidos. A diferencia de la evaporación donde el agua se separa en forma de vapor a su punto de ebullición, en la operación de secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. Los métodos mecánicos que utilizan prensas filtros o centrifugas (así como otros métodos que se emplean para separar un líquido de un sólido) no se consideran como una operación de secado. Sin embargo, aunque resultan más económicos y más fáciles de utilizar que los métodos térmicos, no se logra mediante éstos eliminar totalmente la humedad del material y es por ello que a menudo proceden a la operación del secado. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que los materiales sean más adecuados para su manejo.

La operación de secado incluye dos procesos fundamentales de transporte: la transferencia de masa y la transferencia de calor. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la velocidad de secado del material. La humedad se puede transferir en forma de líquido o de vapor desde el interior del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas al secado. Así mismo, la estructura del sólido determina el mecanismo por el cual puede ocurrir el flujo interno del líquido. Estos mecanismos son generalmente: 1) la difusión en los sólidos homogéneos continuos, y 2) el flujo capilar en los sólidos granulados y porosos.

Los secadores industriales se pueden clasificar de muy distintas maneras; sin embargo, una clasificación general es en base a las condiciones de transferencia del calor o bien por el método de operación. Otras clasificaciones menos fundamentales puede ser por el tipo de contacto gas-sólido o bien, de acuerdo a la condición del movimiento del sólido en el secado. La forma física de la sustancia a secar y los diferentes métodos de manejo necesarios influyen sobre el secador que se va a utilizar; de esta manera es como se tienen distintos tipos de secadores como el secador de charolas, el secador continuo de túnel, el secador rotatorio, el secador de tambor, el secador por pulverización, etc.

En el presente trabajo de tesis, se evalúa el funcionamiento actual de un secador industrial para pigmentos inorgánicos. Entendiéndose por evaluación en éste trabajo, el verificar las condiciones de operación en el secador; es decir, tal como constatar que el tiempo actual de secado sea el adecuado, que no halla pérdidas de calor considerables en el equipo y que la cantidad de aire recirculado es la recomendada para este tipo de secador.

El diseño del secador en análisis es rudimentario y se ha operado por largo tiempo. De su diseño inicial ha sufrido como modificación fundamental, la implementación de quemadores industriales de gas L.P. en sustitución de los serpentines de radiación como sistema de transferencia del calor y que operaban mediante la combustión de diesel. Con la modificación anterior que incrementó el poder calorífico y que además fué una medida anticontaminante, se disminuyó el tiempo de secado hasta dos días. Sin embargo, este tiempo de secado se ha obtenido de manera

totalmente empírica y no ha habido un estudio formal que indique que las condiciones actuales de operación sean las adecuadas.

El proceso de secado opera de manera discontinua y el material húmedo se coloca en contenedores con charolas que se introducen y se descargan del secador. El calor necesario para eliminar la humedad del material se obtiene por contacto directo con el gas producido por la combustión del gas L.P.. El secador evaluado en este trabajo, puede denominarse como un secador de túnel o de charolas. De acuerdo al modo de operación, el equipo se clasifica como un secador que opera de manera intermitente. En función de las condiciones físicas para adicionar el calor y eliminar la humedad, el secador se clasifica como de contacto directo. Por la manera por la cual el gas entra en contacto con el lecho de sólidos, la dirección del flujo de gas se da de manera paralela a la superficie de la fase sólida.

Por lo anterior expuesto, se han definido como objetivos de este trabajo los siguientes:

- Realizar pruebas de secado en el equipo con el fin de verificar si el tiempo actual de operación es el adecuado.
- Comparar el comportamiento de las curvas de velocidad de secado obtenidas experimentalmente con el comportamiento predicho en la bibliografía.
- Obtener una función que represente adecuadamente el comportamiento experimental del secado con la finalidad de predecir tiempos de secado del pigmento húmedo.
- Calcular los coeficientes de transferencia de masa y de calor del proceso de secado.
- Precisar las pérdidas de calor a través del secador a partir del calor liberado por el quemador.
- Con base en los resultados obtenidos, se sugerirá una alternativa que mejore el proceso de secado.

El presente trabajo de tesis se constituye de tres capítulos. En el capítulo 1, se presentan los fundamentos del proceso de secado y se describen los periodos que se pueden presentar durante el secado de los sólidos húmedos. Se indica a continuación los métodos analíticos para determinar el tiempo de secado durante los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente que se utilizan cuando no se dispone de datos experimentales.

En el capítulo 2 se expone la situación actual del proceso de secado en la planta industrial y su importancia dentro de la producción de los pigmentos inorgánicos. Se describe en este capítulo las partes que constituyen el secador y el modo de operación del equipo. Se presenta a continuación las mediciones y los cálculos de los parámetros preliminares a las pruebas de secado como son la evaluación de las velocidades y el análisis realizado al gas de secado, la construcción de la carta psicrométrica para el sistema; así como también se presenta la evaluación del costo del proceso de

totalmente empírica y no ha habido un estudio formal que indique que las condiciones actuales de operación sean las adecuadas.

El proceso de secado opera de manera discontinua y el material húmedo se coloca en contenedores con charolas que se introducen y se descargan del secador. El calor necesario para eliminar la humedad del material se obtiene por contacto directo con el gas producido por la combustión del gas L.P.. El secador evaluado en este trabajo, puede denominarse como un secador de túnel o de charolas. De acuerdo al modo de operación, el equipo se clasifica como un secador que opera de manera intermitente. En función de las condiciones físicas para adicionar el calor y eliminar la humedad, el secador se clasifica como de contacto directo. Por la manera por la cual el gas entra en contacto con el lecho de sólidos, la dirección del flujo de gas se da de manera paralela a la superficie de la fase sólida.

Por lo anterior expuesto, se han definido como objetivos de este trabajo los siguientes:

- Realizar pruebas de secado en el equipo con el fin de verificar si el tiempo actual de operación es el adecuado.
- Comparar el comportamiento de las curvas de velocidad de secado obtenidas experimentalmente con el comportamiento predicho en la bibliografía.
- Obtener una función que represente adecuadamente el comportamiento experimental del secado con la finalidad de predecir tiempos de secado del pigmento húmedo.
- Calcular los coeficientes de transferencia de masa y de calor del proceso de secado.
- Precisar las pérdidas de calor a través del secador a partir del calor liberado por el quemador.
- Con base en los resultados obtenidos, se sugerirá una alternativa que mejore el proceso de secado.

El presente trabajo de tesis se constituye de tres capítulos. En el capítulo 1, se presentan los fundamentos del proceso de secado y se describen los periodos que se pueden presentar durante el secado de los sólidos húmedos. Se indica a continuación los métodos analíticos para determinar el tiempo de secado durante los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente que se utilizan cuando no se dispone de datos experimentales.

En el capítulo 2 se expone la situación actual del proceso de secado en la planta industrial y su importancia dentro de la producción de los pigmentos inorgánicos. Se describe en este capítulo las partes que constituyen el secador y el modo de operación del equipo. Se presenta a continuación las mediciones y los cálculos de los parámetros preliminares a las pruebas de secado como son la evaluación de las velocidades y el análisis realizado al gas de secado, la construcción de la carta psicrométrica para el sistema, así como también se presenta la evaluación del costo del proceso de

secado del lote de pigmento. A continuación se expone de manera general la importancia de las pruebas de secado y los factores que deben considerarse para obtener datos confiables. Se explica en seguida la forma de realización de las pruebas de secado y las modificaciones hechas al secador con el fin de efectuarlas. Posteriormente se indican los datos experimentales y las curvas de secado que se obtienen al representar estos datos como contenido de humedad en función del tiempo de secado. Para cada prueba se describe la variante que se presentó a lo largo de la medición experimental. Finalmente se expone el análisis de las curvas obtenidas con los datos de las pruebas de secado.

En el capítulo 3 se incluye el tratamiento analítico de los datos obtenidos en las pruebas de secado. En primer lugar se indica la función matemática que se obtuvo para predecir el tiempo de secado del pigmento húmedo. A continuación se describe el procedimiento para obtener la curva de velocidad de secado, la cual se compara con el comportamiento predicho por la teoría. Se indica también, el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y de calor en el proceso de secado y la relación de éstos con el comportamiento del proceso de secado. Se incluye a continuación, el balance de materia y el balance de energía en el secador y por último se presenta un resumen de los principales datos de operación del secador.

Se exponen por último las conclusiones del trabajo desarrollado y se presenta una propuesta de mejora del proceso de secado que radica en el método de operación del secador.

Se incluyen las referencias empleadas en el presente trabajo y los apéndices; en el apéndice A se aprecian los esquemas que muestran las partes principales del secador, en el apéndice B se desglosa el cálculo para la obtención de las curvas de secado; en el apéndice C se incluyen las funciones para predecir los tiempos de secado de las pruebas no. 7, 9 y 10; y finalmente en el apéndice D, se indica el análisis económico del método de operación que se sugiere.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 FUNDAMENTOS SOBRE EL SECADO.

La característica fundamental del proceso de secado es la transferencia de un líquido en forma de vapor desde un sólido húmedo hasta una fase gaseosa no saturada.

El secado de sólidos incluye dos procesos simultáneos: 1) la transferencia de calor para evaporar el líquido; y 2) la transferencia de masa en forma de líquido o de vapor dentro del sólido y como vapor cuando se desprende de la superficie expuesta al secado.

Los métodos de secado se pueden clasificar básicamente de dos maneras: a) por la naturaleza del proceso de secado^(1,2); y b) por el método de operación^(3,4). Por las condiciones usadas para suministrar el calor para eliminar la humedad (naturaleza del proceso de secado) el proceso puede ser adiabático, si el calor se obtiene por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. El mecanismo de transferencia de calor que predomina es entonces la convección. En el proceso no adiabático, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para eliminar la humedad evaporada y los mecanismos de transferencia de calor que predominan son la conducción o la radiación. Por el método de operación, los secadores pueden ser discontinuos o continuos. En el método discontinuo, una vez cargado el secador, se hace circular el aire de secado y se supone que sus condiciones permanecen constantes con el tiempo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. En el método continuo tanto la alimentación del sólido a secar como el aire entran continuamente en el secador variando a través del mismo las condiciones del aire y del sólido a secar.

Se puede realizar el estudio de la forma como se seca un sólido por el mecanismo interno del flujo del líquido, o bien, por el efecto de las condiciones externas (temperatura, humedad, flujo de aire, etc.) en la velocidad de secado del sólido. El primer procedimiento requiere un estudio básico de las condiciones internas. El segundo procedimiento, tiene mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de equipos. En los secadores discontinuos, las pruebas de secado se llevan a cabo con éste fin, además de que pueden servir desde corroborar el correcto funcionamiento de un secador en uso hasta el de determinar las condiciones óptimas de operación del equipo.

Transferencia de calor en secadores. La variación de la temperatura en un secador depende de la naturaleza y del contenido del líquido del material a secar, de la temperatura del medio de calentamiento y del tiempo de secado. El perfil típico de las temperaturas en un secador adiabático que opera de manera discontinua se indica en la figura 1a. Con un medio de calentamiento donde la temperatura es constante, la temperatura del sólido húmedo se incrementa desde un valor inicial T_{S1}

hasta llegar a la temperatura de vaporización T_{vap} . En los procesos adiabáticos la temperatura de vaporización sucede a la temperatura de bulbo húmedo del gas. Si el proceso de secado no es adiabático T_{vap} es superior a la temperatura de bulbo húmedo⁽⁵⁾. La temperatura de vaporización es siempre inferior a la temperatura de calentamiento y puede prolongarse por un periodo de tiempo considerable. Hacia la etapa final del ciclo de secado, la temperatura del sólido se incrementa hasta una temperatura T_{sf} , la cual puede exceder ligeramente a T_{vap} o ser significativamente superior.

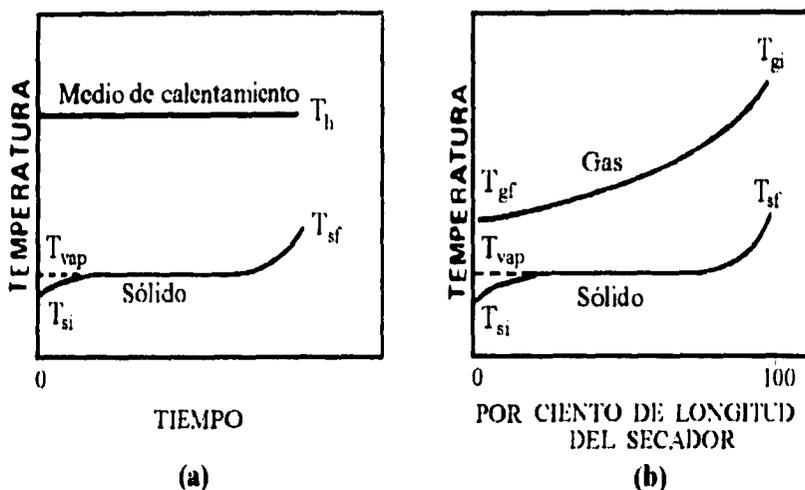


Fig. 1 Perfil de temperaturas en secadores: (a) secador discontinuo; (b) secador continuo a contracorriente.

El perfil de temperaturas para la operación continua a contracorriente se aprecia en la figura 1b. Cada partícula o elemento del sólido pasa a través del ciclo mostrado en la figura 1a. El gas más caliente está en contacto con el sólido más seco. Nuevamente el sólido húmedo inicia su calentamiento desde su temperatura inicial hasta la temperatura de vaporización. El gas entra el secador a T_{gi} y con una humedad que se incrementa como resultado de la vaporización del líquido. Su enfriamiento, inicialmente más rápido, disminuye lentamente como consecuencia de la diferencia de las temperaturas hasta un valor de T_{gf} .

El calor necesario para secar un material húmedo debe incluir el calentamiento de las etapas siguientes:

1. Calentamiento del sólido y del líquido a la temperatura de vaporización.
2. Vaporización del líquido.
3. Calentamiento del sólido y del vapor a su temperatura final.

La cantidad de calor requerida en las etapas 1 y 3 es despreciable comparada con la cantidad de calor necesaria para vaporizar el líquido (etapa 2). La transferencia de calor se puede entonces calcular de la siguiente manera⁽⁵⁾. Si m_s es la masa de sólido seco por unidad de tiempo; X_i y X_f son los contenidos inicial y final de la masa del líquido por unidad de masa del sólido seco, respectivamente; entonces la cantidad total de calor transferida por unidad de masa del sólido q_{g-s}/m_s , estará dada por

$$\frac{q_{g-s}}{m_s} = C_{p_s} (T_{sf} - T_{si}) + X_i C_{p_l} (T_{vap} - T_{si}) + (X_i - X_f) \lambda_{vap} + X_f C_{p_l} (T_{sf} - T_{vap}) + (X_i - X_f) C_{p_v} (T_{vf} - T_{vap}) \quad (1.1)$$

donde T_{vf} es la temperatura final del vapor; y C_{p_s} , C_{p_l} , y C_{p_v} son el calor específico del sólido, del líquido y del vapor, respectivamente.

La ec. (1.1) considera que el calor específico y el calor de vaporización son constantes y que toda la vaporización ocurre a T_{vap} . Estas condiciones suceden rara vez, sin embargo la ec. (1.1) resulta ser una buena aproximación para predecir la transferencia de calor desde el gas hacia el sólido.

En un secador adiabático T_{vf} es la temperatura del gas a la salida del secador. El calor transferido al sólido, al líquido y al vapor se establece con la ec. (1.1); el gas entonces perderá calor sensible y se enfriará mientras la humedad evaporada absorbe el calor latente de vaporización. Por lo tanto, el calor transferido al gas de secado por el medio de calentamiento estará dado por

$$q_{h-g} = m_g (1 + y) C_{s_i} (T_{gi} - T_{gf}) \quad (1.2)$$

donde m_g es la velocidad másica del gas seco; y C_{s_i} es la capacidad calorífica del gas húmedo a la entrada del secador. La fracción mol del vapor en el gas y está definida como

$$y = \frac{Y_i/M_A}{1/M_B + Y_i/M_A} \quad (1.3)$$

donde Y_i es la humedad del gas al inicio del secador; M_A es el peso molecular del vapor; y M_B es el peso molecular del gas seco.

Transferencia de masa en secadores. En todos los secadores en los cuales el flujo del gas es paralelo o transversal a la superficie de secado, la vaporización del líquido tiene lugar en la superficie del sólido o en el interior del material. La velocidad de vaporización m_v , puede calcularse con la siguiente relación^(6,5)

$$m_v = m_s (X_i - X_f) \quad (1.4)$$

Si el gas de secado entra a la humedad Y_i , la humedad de salida Y_f estará dada por

$$Y_f = Y_i + \frac{m_s (X_i - X_f)}{m_g}$$

$$Y_f = Y_i + \frac{m_v}{m_g}$$

(1.5)

El cálculo de la velocidad de vaporización mediante la ec. (1.4) no resulta ser confiable. Un cálculo exacto requiere del conocimiento del mecanismo de movimiento del líquido y del vapor a través del sólido, y además se debe considerar el equilibrio dinámico que se establece entre la velocidad de suministro de calor desde el gas y la velocidad de eliminación de la humedad desde el sólido.

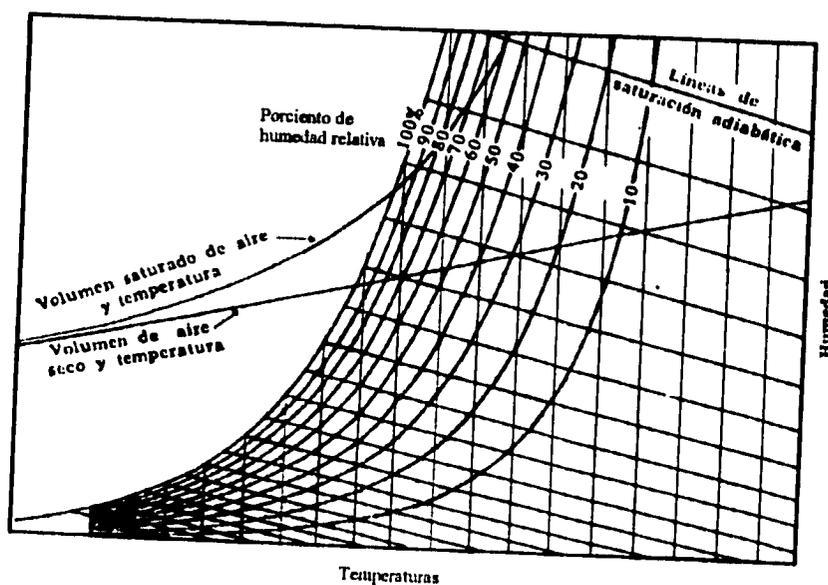


Fig. 2 Carta psicrométrica para el sistema aire-vapor de agua⁽²⁾.

Aplicación de la Psicrometría al secado. En el proceso de secado, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración del vapor en la atmósfera circundante. Es por ello que el uso de la carta psicrométrica (ver figura 2) en la operación de secado, resulta de utilidad en el conocimiento de los cambios que se verifican cuando el aire se pone en contacto con los sólidos húmedos para secarse. En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas que se emplea comúnmente para eliminar la humedad. Una carta de humedad generalmente incluye los siguientes parámetros:

1. La línea de temperatura de bulbo húmedo o de saturación, indica la cantidad de vapor de agua que puede llevar un kilogramo de aire seco en la intersección con la temperatura de bulbo seco mostrada en la abscisa a la humedad de saturación. En la mezcla de aire-agua, la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión del vapor de agua a la temperatura establecida. La humedad de saturación Y_{sat} se define por la siguiente expresión:

$$Y_{sat} = \frac{p^{\circ} \cdot 18}{P - p^{\circ} \cdot 29} \quad (1.6)$$

donde p° es la presión de vapor del agua a T_{sat} ; P es la presión absoluta en el secador, y $18/29$ es la relación de los pesos moleculares del agua respecto al del aire. Del mismo modo, la humedad en cualquier condición menor que el nivel de saturación se obtiene con

$$Y = \frac{p \cdot 18}{P - p \cdot 29} \quad (1.7)$$

donde p es la presión parcial del vapor de agua en el aire.

2. Las líneas de porcentaje de humedad relativa $HR\%$ indican la cantidad de saturación de la mezcla de aire-vapor de agua a través de presiones parciales:

$$HR\% = 100 \frac{p}{p^{\circ}} \quad (1.8)$$

3. La capacidad calorífica del aire húmedo C_s es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado la temperatura de la mezcla de aire-vapor de agua. En unidades del S.I. C_s está definido como:

$$C_s = 1.005 + 1.884 (Y) \quad (1.9)$$

4. El volumen húmedo V_H de la mezcla aire-vapor de agua en unidades del S.I. es:

$$V_H = [0.00283 + 0.00456 (Y)] T \quad (1.10)$$

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo representan también las líneas de saturación adiabática para el aire y el vapor de agua, y se basan en la siguiente relación:

$$Y_{sat} - Y = \frac{C_s}{\lambda_{sat}} (T - T_{sat}) \quad (1.11)$$

donde la pendiente de la curva de saturación adiabática es la relación C_s/λ_{sat} .

La temperatura de bulbo húmedo se establece por el equilibrio dinámico entre la transferencia de calor y la transferencia de masa cuando el líquido se evapora desde una masa pequeña (por ejemplo el bulbo húmedo de un termómetro) hacia una masa de gas muy grande, de tal manera que

1. La línea de temperatura de bulbo húmedo o de saturación, indica la cantidad de vapor de agua que puede llevar un kilogramo de aire seco en la intersección con la temperatura de bulbo seco mostrada en la abscisa a la humedad de saturación. En la mezcla de aire-agua, la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión del vapor de agua a la temperatura establecida. La humedad de saturación Y_{sat} se define por la siguiente expresión:

$$Y_{sat} = \frac{p^{\circ} \cdot 18}{P - p^{\circ} \cdot 29} \quad (1.6)$$

donde p° es la presión de vapor del agua a T_{sat} ; P es la presión absoluta en el secador, y $18/29$ es la relación de los pesos moleculares del agua respecto al del aire. Del mismo modo, la humedad en cualquier condición menor que el nivel de saturación se obtiene con

$$Y = \frac{p \cdot 18}{P - p \cdot 29} \quad (1.7)$$

donde p es la presión parcial del vapor de agua en el aire.

2. Las líneas de porcentaje de humedad relativa $HR\%$ indican la cantidad de saturación de la mezcla de aire-vapor de agua a través de presiones parciales:

$$HR\% = 100 \cdot \frac{p}{p^{\circ}} \quad (1.8)$$

3. La capacidad calorífica del aire húmedo C_s es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado la temperatura de la mezcla de aire-vapor de agua. En unidades del S.I. C_s está definido como:

$$C_s = 1.005 + 1.884 (Y) \quad (1.9)$$

4. El volumen húmedo V_{Hl} de la mezcla aire-vapor de agua en unidades del S.I. es:

$$V_{Hl} = [0.00283 + 0.00456 (Y)] T \quad (1.10)$$

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo representan también las líneas de saturación adiabática para el aire y el vapor de agua, y se basan en la siguiente relación:

$$Y_{sat} - Y = \frac{C_s}{\lambda_{sat}} (T - T_{sat}) \quad (1.11)$$

donde la pendiente de la curva de saturación adiabática es la relación C_s/λ_{sat} .

La temperatura de bulbo húmedo se establece por el equilibrio dinámico entre la transferencia de calor y la transferencia de masa cuando el líquido se evapora desde una masa pequeña (por ejemplo el bulbo húmedo de un termómetro) hacia una masa de gas muy grande, de tal manera que

ésta última no sufre ningún cambio de temperatura o de humedad. Este equilibrio se expresa por medio de la relación siguiente

$$h_c (T - T_w) = k_Y \lambda_w (Y_w - Y) \quad (1.12)$$

en donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección; T_w es la temperatura de bulbo húmedo del aire; y k_Y es el coeficiente de transferencia de masa.

Para la mezcla de aire-vapor de agua, la relación h_c/k_Y es igual que C_s . Por lo tanto, en vista de que la razón $(Y_w - Y)/(T_w - T)$ es igual que $(h_c/k_Y)/\lambda_w$ que representa la pendiente de las líneas de temperatura de bulbo húmedo, también es igual que C_s/λ_{sat} la pendiente de las líneas de saturación adiabática.

1.2 PERIODOS DE SECADO.

Al secar un sólido húmedo con un gas a temperatura y humedad fijas en un secador por lotes, siempre aparece un patrón de comportamiento. Los datos que se obtienen generalmente se expresan como peso total (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos del periodo de secado. Estos datos pueden convertirse a valores de humedad X con los siguientes procedimientos. Si W es el peso del sólido húmedo y W_s es el peso del sólido seco, la expresión para determinar la humedad en base seca es

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (1.13)$$

A continuación se determina el contenido de humedad de equilibrio X^* y se procede a calcular el valor del contenido de humedad X para cada valor de X_t de la siguiente manera

$$X = X_t - X^* \quad (1.14)$$

Usando los datos calculados con la ec. (1.14) se traza una gráfica del contenido de humedad X en función del tiempo t como se ilustra en la figura 3a.

La figura 3a indica que la velocidad de secado está sujeta a variación en función del tiempo o del contenido de humedad. Esta variación se aprecia diferenciando gráfica o numéricamente la curva para obtener una curva de velocidad de secado (figura 3b). Gráficamente, la curva de velocidad de secado se obtiene al medir las pendientes de las tangentes de la curva de humedad, lo cual proporciona valores de dX/dt para valores de t . Se calcula entonces la velocidad de secado R para cada punto con la siguiente ecuación

$$R = - \frac{W_s dX}{A dt} \quad (1.15)$$

donde A es el área expuesta al secado. Entonces, la curva se obtiene graficando valores de velocidad de secado R en función del contenido de humedad X tal como se aprecia en la figura 3b.

Analíticamente⁽⁷⁾, la curva de velocidad de secado se obtiene calculando la pérdida de peso ΔX para un tiempo Δt , donde ΔX es una diferencia de humedades entre X_2 al tiempo t_2 y X_1 al tiempo t_1 , entonces la ecuación de velocidad de secado resulta

$$R = - \frac{W_s \Delta X}{A \Delta t} \quad (1.16)$$

Esta velocidad R es el promedio en el periodo t_1 a t_2 y debe graficarse a la humedad promedio $X_m = (X_2 + X_1)/2$.

Otro tipo de curva que se obtiene de los datos experimentales resulta al graficar la velocidad de secado R en función del tiempo de secado t (figura 3c). En este tipo de gráfica se aprecia lo que dura exactamente cada periodo en el ciclo de secado.

La sección AB de cada curva representa un periodo de calentamiento del sólido. La sección BC se denomina periodo de velocidad constante. El punto C, en donde concluye la velocidad constante y comienza a descender el índice de secado, se conoce como contenido crítico de humedad. La porción curvada CD de la figura 3b y 3c, se caracteriza por una velocidad variable a lo largo del resto del ciclo de secado. La porción CD y DE de la figuras 3b y 3c, se definen usualmente como primer y segundo periodo de velocidad decreciente, respectivamente.

1.2.1 Periodo de velocidad constante.

Inmediatamente después del contacto entre el sólido húmedo y el medio de secado, la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar un estado estable e inicia entonces el periodo de velocidad constante. Durante este periodo (sección BC) la evaporación tiene lugar en la superficie del sólido y la velocidad de secado está controlada por la velocidad de difusión del vapor desde la película de aire sobre la superficie hacia la masa principal de aire de secado⁽⁸⁾. La superficie total expuesta está saturada de agua y el secado procede sin que el sólido influya en forma directa sobre la velocidad de secado. La masa que se transfiere desde la superficie se reemplaza continuamente por el movimiento del líquido desde el interior del sólido. El mecanismo de movimiento del líquido y la velocidad de este movimiento varían con la estructura del sólido⁽⁹⁾. Con los sólidos que tienen espacios vacíos relativamente grandes, el movimiento está controlado por la tensión superficial y las fuerzas gravitacionales dentro del sólido. Con estructuras no porosas, el movimiento del líquido se da por difusión a través del sólido.

Si el calor se transfiere por convección exclusivamente y en ausencia de otros efectos caloríficos, la temperatura de la superficie se acerca a la de bulbo húmedo. No obstante, cuando el

calor se transmite por radiación y conducción, o bien por una combinación de ambas, la temperatura de la superficie saturada se ubica entre la del bulbo húmedo y la del punto de ebullición del agua. En tales condiciones, la velocidad de transferencia de calor se incrementa y se obtiene mayor velocidad de secado.

1.2.2 Periodo de velocidad decreciente.

El periodo de velocidad decreciente inicia en el contenido crítico de humedad al concluir el periodo de velocidad constante. Este periodo se divide en dos zonas⁽²⁾: 1) secado de la superficie no saturada (primer periodo de velocidad decreciente); y 2) aquella en la que el movimiento interno de la humedad es la que ejerce el control (segundo periodo de velocidad decreciente). En la primera zona (sección CD), no toda la superficie de evaporación se mantiene saturada por el movimiento de la humedad dentro del sólido. La velocidad de secado disminuye en la porción no saturada y por lo tanto la velocidad en la superficie total se reduce.

Conforme continúa el secado se llega a un punto en que la superficie de evaporación es insaturada (punto D), entonces, la evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de secado entra al segundo periodo de velocidad decreciente (sección DE). La velocidad de secado está regida ahora por la velocidad del movimiento interno de la humedad y la influencia de las variables externas va en disminución.

En algunos casos no hay una discontinuidad definida en el punto D, y el cambio de condiciones de secado de una superficie con humedad parcial a una superficie completamente seca es tan gradual que no se detecta un punto de inflexión⁽¹⁰⁾.

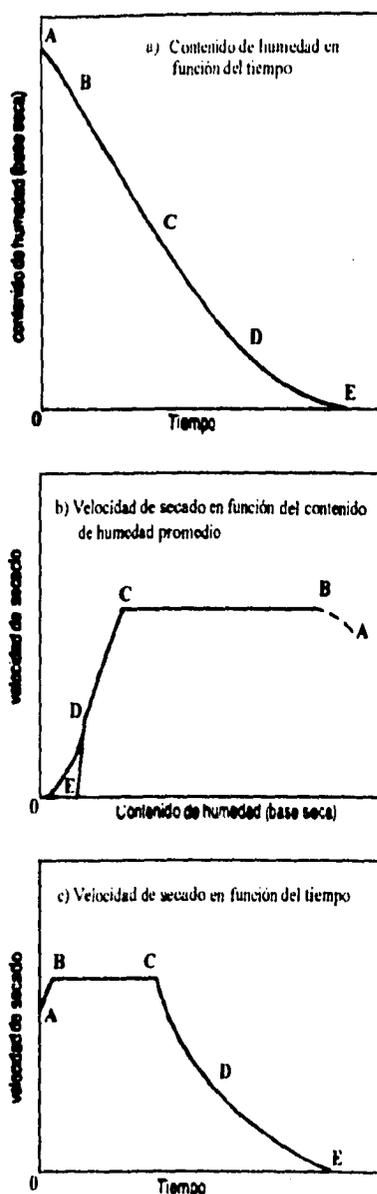


Fig. 3 Curvas de secado.

1.3 MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL SÓLIDO

Cuando el secado se verifica por evaporación de la humedad del área expuesta del sólido, la humedad debe desplazarse desde el interior del sólido hasta la superficie. Los mecanismos de este movimiento afectan al secado durante los periodos de velocidad constante y decreciente. Las teorías que explican el movimiento de la humedad y la relación de éstas con el periodo de velocidad decreciente son la teoría de la difusión del líquido y la teoría del movimiento capilar en los sólidos porosos.

Teoría de la difusión del líquido. De acuerdo con esta teoría, la difusión de la humedad se verifica cuando existe una diferencia de concentración entre el interior del sólido y la superficie. Este método de transporte de humedad generalmente se presenta con los sólidos no porosos. Durante el periodo de velocidad constante de secado de estos sólidos, la concentración de la humedad superficial se reduce, pero la concentración en el interior permanece elevada. Las altas difusividades resultantes permiten que la humedad se mueva hasta la superficie tan rápido como se evapora y la velocidad de secado permanece constante. Cuando aparecen manchas secas debido a la proyección de partes del sólido en la película gaseosa, se tiene un periodo de evaporación superficial no saturada. En este periodo la resistencia a la difusión interna del líquido es menor comparada con la resistencia de la difusión del vapor en la película de aire sobre la superficie. Cuando se alcanza el segundo periodo de velocidad decreciente toda la evaporación ocurre desde el interior del sólido y la resistencia a la difusión interna del líquido es mayor comparada con la resistencia a la difusión del vapor en el aire de secado^(11,12). Al final, la superficie se seca hasta el contenido de humedad en el equilibrio.

La forma de una curva controlada por difusión puede ser de la siguiente manera: si el secado inicial de velocidad constante es considerable, es posible que no exista el primer periodo de velocidad decreciente y el periodo de la velocidad controlado por difusión empieza inmediatamente después de que termina el periodo de velocidad constante⁽¹⁰⁾. Si el secado a velocidad constante es bajo el periodo de evaporación superficial no saturado suele presentarse en la región CD de la figura 3b, y la curva controlada por difusión corresponde a la región DE resultando ésta cóncava hacia arriba^(8,10).

Movimiento capilar en los sólidos porosos. La teoría capilar⁽¹³⁾ considera que un lecho empacado de esferas no porosas contienen espacios vacíos entre dichas esferas que se llaman poros. A medida que se evapora el agua, las fuerzas capilares se ponen en acción debido a la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas proporcionan el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie.

Durante el periodo de velocidad constante, la humedad se mueve por capilaridad hasta la superficie con suficiente velocidad para mantener una superficie uniformemente húmeda. Al suceder esto penetra aire para llenar los espacios vacíos. En el primer periodo de velocidad decreciente la interfase comienza a retraerse de la superficie. El líquido que se encuentra en los poros grandes es atraído hacia el interior de la muestra para formar los meniscos de los poros más pequeños. A medida que el secado avanza, el líquido que se encuentra en los poros grandes continúa

retrayéndose hasta que llega a una cintura estrecha en el poro y entonces toma una curvatura que se ajusta a la del poro lleno. A medida que se agota la humedad, más y más poros superficiales pierden su humedad, de manera que entre el punto C y D la porción de la superficie total saturada es cada vez menor. La velocidad total de secado se reduce debido a que tanto el calor como la masa deben difundirse a través de las capas superiores del sólido. Cuando se alcanza el punto D, la humedad se ha retraído de todos los poros superficiales. Hacia el final del proceso de secado, la humedad presente existe en pequeñas bolsas en las esquinas de los poros dispersos a través del sólido y el mecanismo que controla la velocidad de secado es el de difusión de calor y de masa a través del sólido. Sin embargo, para sólidos muy porosos la difusión no es el mecanismo controlante y la curva de velocidad de secado en el segundo periodo de velocidad decreciente suele ser recta⁽¹⁰⁾, ver sección DE de la figura 3b.

1.4 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE SECADO DURANTE EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

1.4.1 Método que usa la curva de secado.

El método más directo para estimar el tiempo de secado de un determinado lote de material durante el periodo de velocidad constante, es mediante la curva de secado obtenida a las mismas condiciones de secado. Se requiere únicamente leer la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad del sólido en la curva de secado.

1.4.2 Método que usa la curva de velocidad de secado.

El tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante se determina también a partir de la curva de velocidad de secado de la manera siguiente.

La velocidad de secado R se define en la ec. (1.15) como

$$R = - \frac{W_s dX}{A dt} \quad (1.15)$$

Esta expresión puede ordenarse e integrarse con respecto al intervalo para secar, desde X_1 a $t_1 = 0$ hasta X_2 a $t_2 = t$, de tal manera que tanto X_1 como X_2 sean mayores que el contenido de humedad en el punto crítico X_c , entonces $R = \text{constante} = R_c$:

$$\int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{W_s}{A R_c} \int_{X_2}^{X_1} dX \quad (1.17)$$

por lo tanto, al integrar la ec. (1.17) el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante t_c resulta

$$t_c = \frac{W_s (X_1 - X_2)}{A R_c} \quad (1.18)$$

1.4.3 Método que emplea los coeficientes de transferencia.

Para predecir el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante a partir de los coeficientes de transferencia, se considera que la transferencia de calor sólo se verifica desde el gas caliente hasta la superficie del sólido por convección y desde la superficie hacia el gas caliente por transferencia de masa. Así, en un instante dado puede formularse un equilibrio dinámico entre la velocidad de transferencia de calor y la velocidad de eliminación del líquido de la manera siguiente.

La velocidad de transferencia de calor por convección q_c , desde el gas a la temperatura T hasta la temperatura de la superficie del sólido T_w es

$$q_c = h_c (T - T_w) A \quad (1.19)$$

La ecuación del flux de transferencia del vapor de agua desde la superficie se establece como

$$N_A = k_y (y_w - y) \quad (1.20)$$

donde y_w es la fracción mol del vapor de agua en el gas en la superficie. La relación entre la humedad del aire y la fracción mol esta dada por la ec. (1.3)

$$y = \frac{Y/M_A}{1/M_B + Y/M_A} \quad (1.3)$$

Puesto que la humedad del aire es pequeña, se puede establecer como una aproximación que

$$y \cong \frac{Y M_B}{M_A} \quad (1.21)$$

sustituyendo la ec. (1.21) en la ec. (1.20) resulta

$$N_A = k_y \frac{M_B}{M_A} (Y_w - Y) \quad (1.22)$$

La cantidad de calor necesario para vaporizar N_A moles de agua, despreciando los pequeños cambios de calor sensible es

$$q_c = M_A N_A \lambda_w A \quad (1.23)$$

Entonces, igualando las ecs. (1.19) y (1.23) y sustituyendo N_A según la ec. (1.22) se tiene

$$R_c = \frac{q_c}{A \lambda_w} = \frac{h_c(T - T_w)}{\lambda_w} = k_y M_B (Y_w - Y) \quad (1.24)$$

En ausencia de la transferencia de calor por conducción y por radiación, la temperatura del sólido está a la temperatura de bulbo húmedo del aire durante el periodo de secado de velocidad constante.

Al sustituir la ec.(1.24) en la ec. (1.18), el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante resulta

$$t_c = \frac{W_s \lambda_w (X_1 - X_2)}{A h_c (T - T_w)} = \frac{W_s (X_1 - X_2)}{A k_y M_B (Y_w - Y)} \quad (1.25)$$

1.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE SECADO EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE.

1.5.1 Método que emplea la integración gráfica.

El tiempo de secado para cualquier región entre X_1 y X_2 está dado por

$$t = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \quad (1.26)$$

Durante el periodo de velocidad decreciente, R varía y por lo tanto la ec. (1.26) sólo puede integrarse gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente, trazando valores de $1/R$ en función de X y determinando el área bajo la curva.

1.5.2 Método de cálculo para casos especiales en la región de velocidad decreciente.

La ecuación para predecir el tiempo de secado, ec. (1.26), puede integrarse analíticamente en los siguientes casos:

1. *La velocidad es una función lineal de X .* Si R es lineal con respecto a X , como sucede con los sólidos porosos, durante el periodo de velocidad decreciente se tiene

$$R = aX + b \quad (1.27)$$

donde a y b son constantes. Diferenciando R con respecto a X resulta $dR = a dX$. Entonces, el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente t_d resulta al sustituir el valor de dX en la ec. (1.26)

$$t_d = \frac{W_s}{a A} \int_{R_f}^{R_i} \frac{dR}{R} = \frac{W_s}{a A} \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (1.28)$$

donde R_i y R_f son las velocidades de secado inicial y final del periodo decreciente, respectivamente; y la constante a es la pendiente de la curva de velocidad de secado y ésta puede escribirse como

$$a = \frac{R_c - R'}{X_c - X'} \quad (1.29)$$

donde R_c y X_c son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el primer punto crítico, respectivamente (punto C de la figura 3b y 3c); en tanto que R' y X' son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el segundo punto crítico (punto D de la figura 3a y 3b), respectivamente.

Sustituyendo la ec. (1.29) en la ec. (1.28) resulta:

$$t_d = \frac{W_s (X_c - X')}{A (R_c - R')} \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (1.30)$$

Si el proceso de secado incluye tanto el periodo de velocidad constante como el periodo de velocidad decreciente, el valor de X_2 en la ec. (1.18) es igual a X_c , y el valor de R_i de la ec. (1.29) resulta ser R_c . Entonces el tiempo total de secado t_s es

$$t_s = t_c + t_d = \frac{W_s}{A} \left\{ \frac{X_1 - X_c}{R_c} + \frac{X_c - X'}{R_c - R'} \ln \frac{R_c}{R_f} \right\} \quad (1.31)$$

2. *La velocidad es una función lineal que pasa a través del origen.* En algunas situaciones, una recta proyectada desde el contenido crítico de humedad pasando a través del origen, representa la totalidad del periodo de velocidad decreciente. Entonces, se tienen las siguientes consideraciones: $a = R_c/X_c$ y $R_c/R_f = X_c/X_f$ y por lo tanto la ec. (1.31) resulta

$$t_s = \frac{W_s}{A R_c} \left[(X_1 - X_2) + X_c \ln \frac{X_c}{X_2} \right] \quad (1.32)$$

donde a y b son constantes. Diferenciando R con respecto a X resulta $dR = a dX$. Entonces, el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente t_d resulta al sustituir el valor de dX en la ec. (1.26)

$$t_d = \frac{W_s}{a A} \int_{R_f}^{R_i} \frac{dR}{R} = \frac{W_s}{a A} \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (1.28)$$

donde R_i y R_f son las velocidades de secado inicial y final del periodo decreciente, respectivamente; y la constante a es la pendiente de la curva de velocidad de secado y ésta puede escribirse como

$$a = \frac{R_c - R'}{X_c - X'} \quad (1.29)$$

donde R_c y X_c son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el primer punto crítico, respectivamente (punto C de la figura 3b y 3c); en tanto que R' y X' son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el segundo punto crítico (punto D de la figura 3a y 3b), respectivamente.

Sustituyendo la ec. (1.29) en la ec. (1.28) resulta:

$$t_d = \frac{W_s (X_c - X')}{A (R_c - R')} \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (1.30)$$

Si el proceso de secado incluye tanto el periodo de velocidad constante como el periodo de velocidad decreciente, el valor de X_2 en la ec (1.18) es igual a X_c , y el valor de R_i de la ec. (1.29) resulta ser R_c . Entonces el tiempo total de secado t_s es

$$t_s = t_c + t_d = \frac{W_s}{A} \left[\frac{X_1 - X_c}{R_c} + \frac{X_c - X'}{R_c - R'} \ln \frac{R_c}{R_f} \right] \quad (1.31)$$

2. *La velocidad es una función lineal que pasa a través del origen.* En algunas situaciones, una recta proyectada desde el contenido crítico de humedad pasando a través del origen, representa la totalidad del periodo de velocidad decreciente. Entonces, se tienen las siguientes consideraciones: $a = R_c/X_c$ y $R_c/R_f = X_c/X_f$ y por lo tanto la ec. (1.31) resulta

$$t_s = \frac{W_s}{A R_c} \left[(X_1 - X_2) + X_c \ln \frac{X_c}{X_2} \right] \quad (1.32)$$

Capítulo 2 Pruebas de Secado

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR.

El proceso de elaboración de pigmentos inorgánicos se indica de manera general en el diagrama de flujo de la figura 4. La operación de secado desempeña un papel importante dentro del proceso global, fundamentalmente por las siguientes razones: 1) las características del producto final están condicionadas por una correcta operación del secado; 2) la cantidad del producto final que se obtiene es en cierta medida función de la cantidad del material que se pueda secar, y 3) el mayor tiempo de residencia del producto en proceso se da en la operación de secado; puesto que a diferencia de los demás procesos, en donde el tiempo de residencia no excede más de un día, en la operación de secado el producto en proceso permanece dos días.

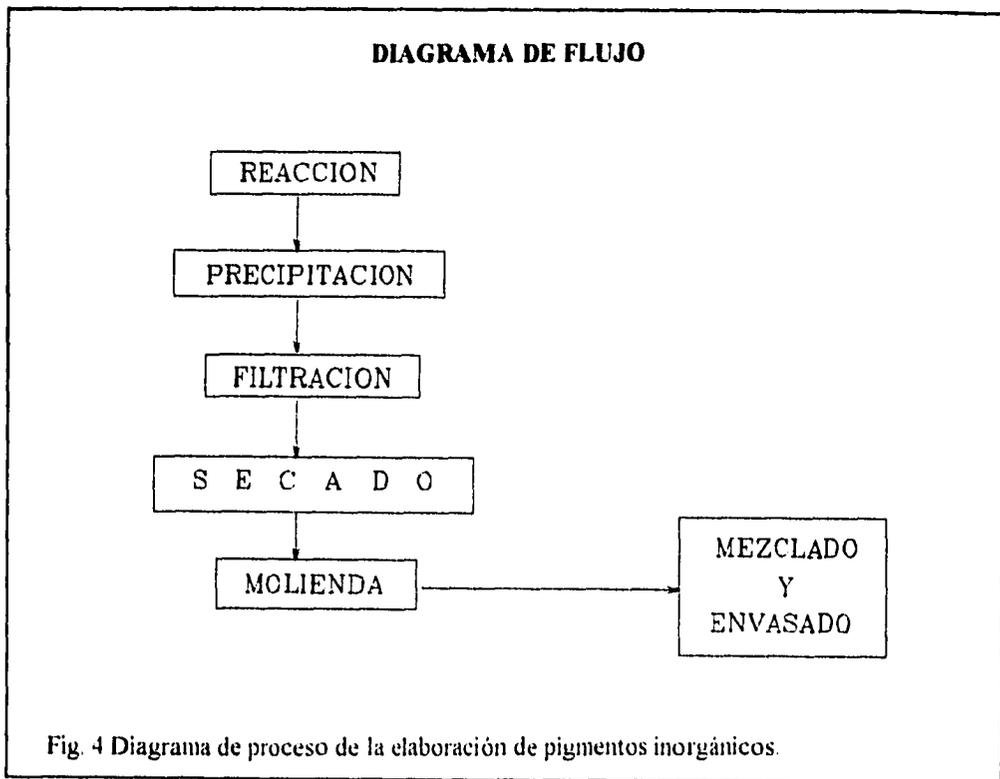


Fig. 4 Diagrama de proceso de la elaboración de pigmentos inorgánicos.

Inicialmente la sección de secado de la planta industrial, en donde se desarrolló el presente estudio, estaba constituida por un secador. Con el incremento de la producción se requirió construir dos equipos más de características semejantes al primero, de manera que actualmente la sección de secado se constituye de tres secadores. En estos dos últimos equipos (secadores 2 y 3) es donde se seca la mayor parte del pigmento elaborado en la planta y el cual corresponde básicamente a dos tipos de pigmento (A. 1522 y A. 1922) que representan aproximadamente el 70 % de la producción total. El secador construido inicialmente es utilizado para secar los lodos residuales de pigmento de la planta y algunos tipos de material que se producen en menor cantidad y que por sus características requieren menor temperatura de secado.

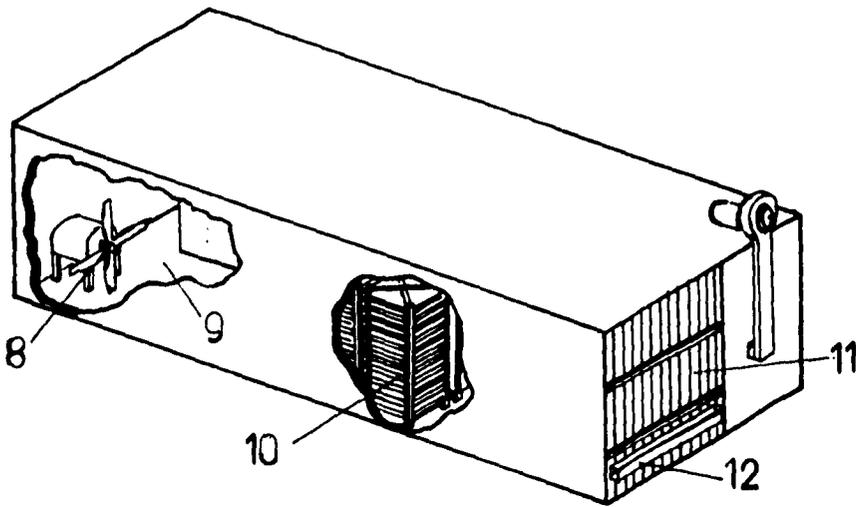
Los tres secadores tienen paredes construidas de ladrillo con un acabado exterior e interior de cemento y las zonas de acceso son puertas de acero. Los dos secadores principales tienen una pared de aislante de poliuretano que actualmente está deteriorada en su totalidad.

Las partes del secador se indican en la tabla 1 y éstas se aprecian en la figura 5. Otras vistas del equipo son mostradas en el apéndice A.

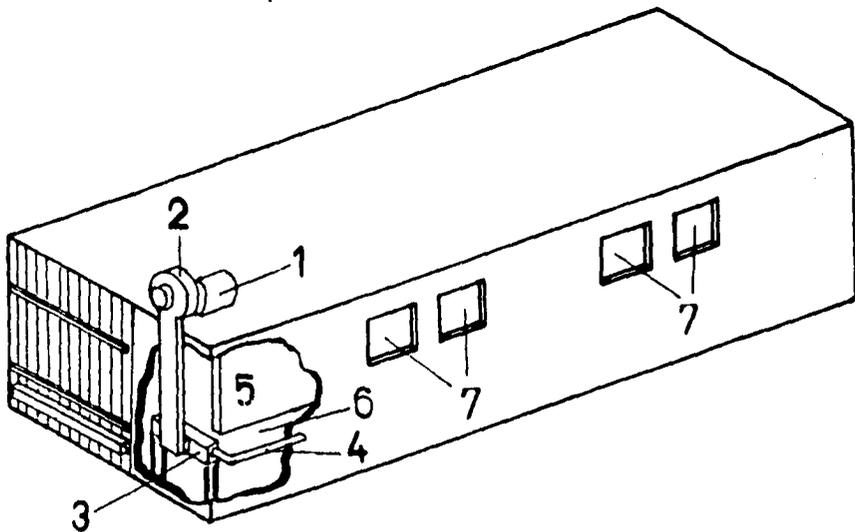
TABLA 1
Partes del secador

1	Motor del ventilador centrifugo (1 HP)
2	Ventilador centrifugo
3	Quemador
4	Línea de gas L.P.
5	Pared central
6	Túnel del quemador
7	Ventanillas de aire fresco
8	Ventilador de proceso
9	Túnel de secado
10	Carros con pigmento
11	Puerta principal
12	Rendija de la puerta principal

El secador se divide en dos túneles por una pared central de ladrillo (5) y en uno de los cuales se introducen los carros con pigmento. Originalmente el sistema de calentamiento del aire de secado se hacía a través de serpentines de radiación mediante la combustión de diesel. Sin embargo, por ser éste un combustible de bajo poder calorífico y además de ser contaminante, se sustituyó el sistema por quemadores industriales de gas L.P. con lo que el tiempo de secado disminuyó a dos días. El quemador está localizado al inicio del primer túnel (6), en tanto que en el fondo del otro túnel (9), donde se sitúan los carros con pigmento, se halla un ventilador de hélice impulsado por un motor de 20 HP (14.95 kW). El gas caliente circula impulsado por el ventilador (8) desde el fondo del túnel, pasando directamente sobre las charolas de los carros hasta la puerta principal de acceso.



Vista desde la pared lateral izquierda



Vista desde la pared lateral derecha

Fig. 5 Partes del secador.

Parte del aire se recircula al primer túnel, mezclándose con los gases de combustión y calentándose nuevamente. El resto del aire sale al exterior a través de una rendija que se halla en la puerta principal de acceso (12). En la pared exterior del túnel donde se sitúa el quemador se hallan ventanillas que permiten la entrada de aire fresco. El quemador funciona mediante la combustión del gas L.P. y aire que se hace llegar por medio de un ventilador centrífugo que opera con un motor de 1 HP (0.75 kW) y que se sitúa fuera del secador. La temperatura de secado del lote se programa y se controla desde un tablero colocado a un lado de cada secador. Las condiciones de secado se controlan en base a la temperatura del gas caliente en el túnel de secado por medio de un termopar que opera la válvula de suministro de gas L.P al quemador. Este elemento de control se halla situado en la parte media del túnel de secado.

Un carro completamente cargado de pigmento húmedo pesa aproximadamente 500 kg; para moverlo y colocarlo en el secador, se usan montacargas eléctricos o manuales. La mayor cantidad de carros que pueden ser colocados en el túnel de secador son 24 carros, dispuestos en dos hileras de doce carros cada una. Cada carro contiene 20 charolas de 0.70 m x 0.70 m x 0.03 m y están hechas de placas de aluminio. Las charolas son cargadas manualmente con las tortas de los filtros-prensa y tienen un peso total de 25 kg con pigmento húmedo. La carga y descarga de los carros se realiza fuera del secador. El tiempo de secado actual oscila de 44 hr a 48 hr independientemente del tipo de pigmento y número de carros que se hallen en el secador.

2.2 MEDICIONES Y CÁLCULOS PRELIMINARES.

. Las mediciones y los cálculos que se realizaron son los siguientes: medición de velocidades del gas de secado, análisis cualitativo y cuantitativo del gas de secado, construcción de la carta psicrométrica y el cálculo del costo del secado de un lote de pigmento.

2.2.1 Velocidad del gas de secado.

La medición de la velocidad del gas de secado en diversos lugares de los secadores, se efectuó con un anemómetro digital antes de iniciar el secado del lote en turno. Esta medida de seguridad se realizó para no dañar el equipo de medición, debido a que el rango de temperaturas de trabajo del anemómetro no debía exceder la temperatura de 40 °C. Los valores obtenidos tienen un rango de fluctuación de 0.5 m/s debido al régimen turbulento que predomina en el túnel de secado.

En las tablas 2 y 3 se indican los valores de velocidad del gas de secado obtenidos en los secadores 2 y 3, respectivamente.

TABLA 2
Velocidad del gas en el secador 2

Lugar del secador	Velocidad (m/s)
Ventanilla de aire fresco	0.5
Túnel del quemador	2.8
Túnel de secado	2.4
Zona superior del carro	3.4
Espacio entre charolas	1.8
Zona inferior del carro	2.0
Rendija de la puerta principal	1.5
Puerta de recirculación del aire de secado	1.8

TABLA 3
Velocidad del gas en el secador 3

Lugar del secador	Velocidad (m/s)
Ventanilla de aire fresco	0.5
Túnel del quemador	3.0
Túnel de secado	2.2
Zona superior del carro	3.0
Espacio entre charolas	1.9
Zona inferior del carro	2.8
Rendija de la puerta principal	1.7
Puerta de recirculación del aire de secado	2.0

2.2.2 Análisis del gas de secado.

El análisis cualitativo y cuantitativo del gas de secado se realizó fundamentalmente para definir el sistema de componentes para la construcción de la carta psicrométrica. Las mediciones se efectuaron únicamente en el secador donde se realizaron las pruebas de secado mediante un equipo digital Orsat y los datos de temperaturas se determinaron con termopares diseñados para altas temperaturas. En el momento de la evaluación, la temperatura fijada para el secado del lote en turno fué de 100 °C.

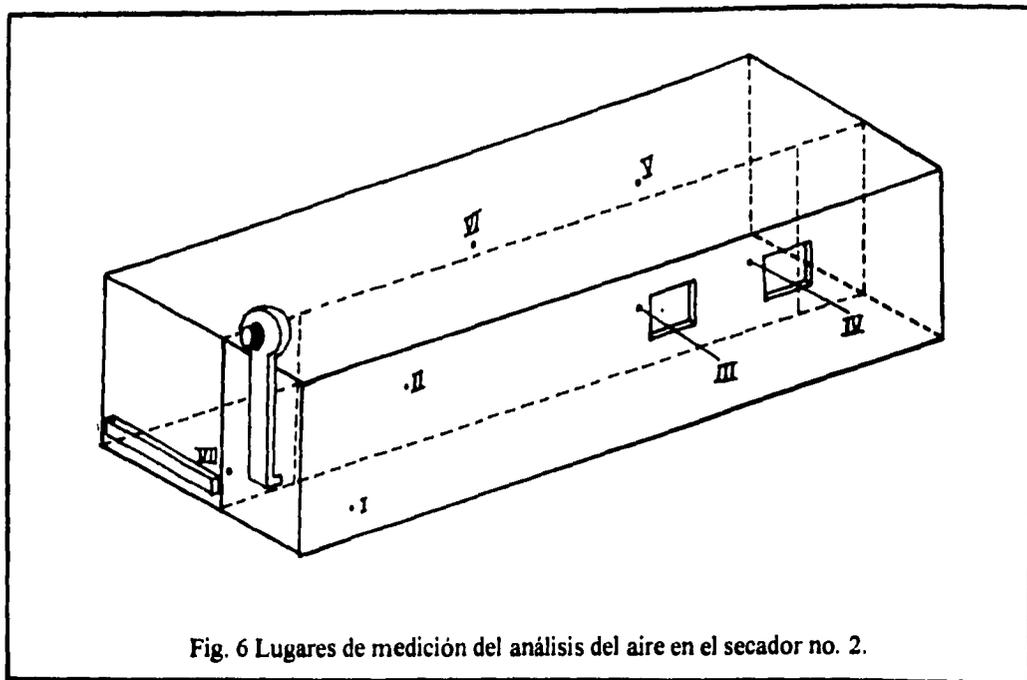


Fig. 6 Lugares de medición del análisis del aire en el secador no. 2.

Los valores obtenidos y los sitios de medición se indican en la tabla 4 y en la figura 6, respectivamente.

TABLA 4
Análisis del gas de secado en el secador 2

Parámetro	Lugar del secador						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
CO (ppm)	0.00	2.00	11.00	8.00	9.00	12.00	11.00
O ₂ (%)	18.74	18.20	18.60	18.94	18.94	19.10	11.00
CO ₂ (%)	1.20	1.10	1.20	0.50	0.70	1.10	0.60
N ₂ (%)	80.06	80.70	80.20	80.56	80.36	79.80	19.95
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Temperatura (°C)	129.40	298.50	162.60	148.20	115.40	99.80	92.20

CARTA PSICROMETRICA

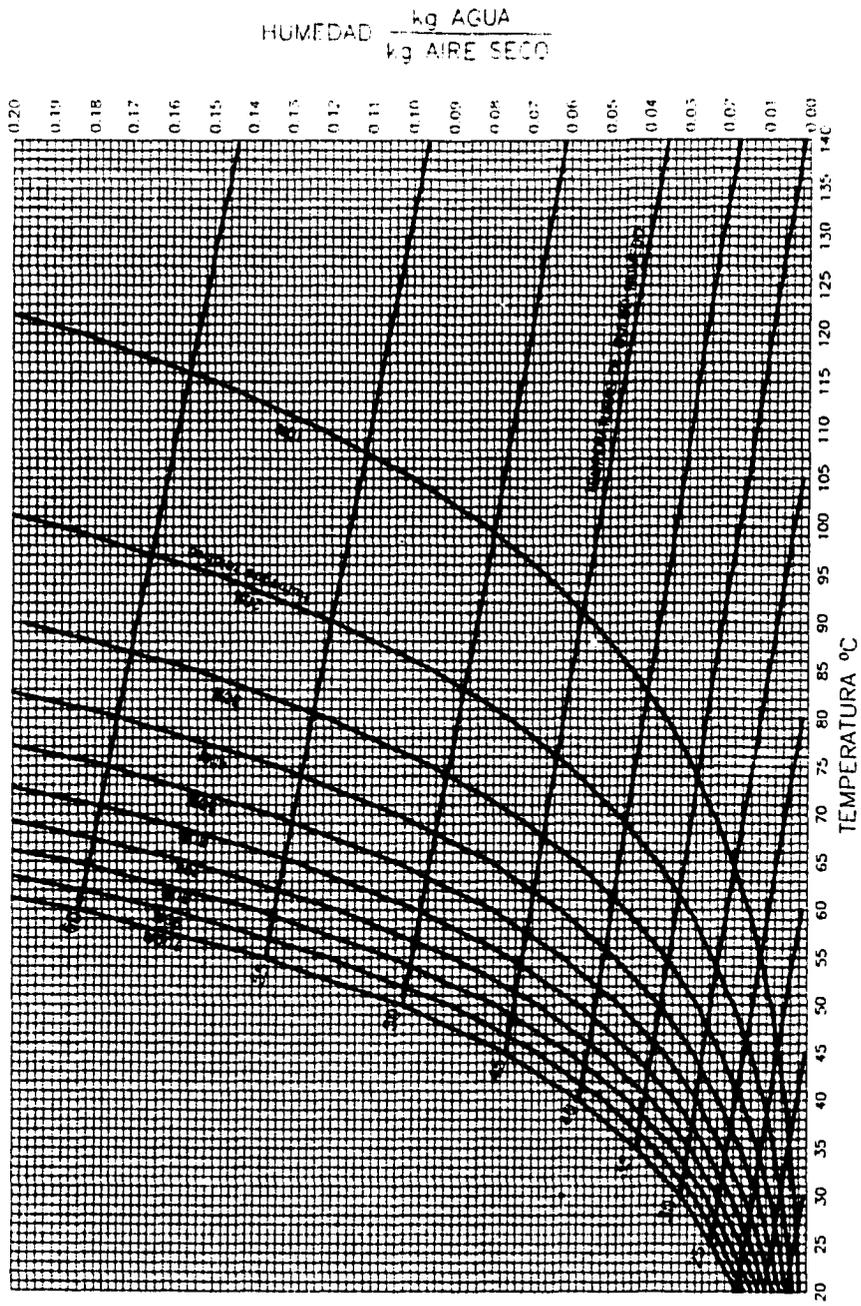


Fig. 7 Carta de humedad para el sistema aire-vapor de agua. Presión barométrica de 655 mmHg (Cautla, Mor.).

2.2.3 Carta psicrométrica.

Con el resultado del análisis del gas de combustión (ver tabla 4) se consideró al aire como el gas de secado y como consecuencia se utilizó el sistema aire-vapor de agua para la construcción de la carta de humedad. La gráfica de humedad se evaluó a la presión absoluta de 655 mmHg y con un rango de temperaturas desde 20°C hasta 140 °C; las cuales son las que predominan en el túnel de secado.

Las líneas de humedad relativa se obtuvieron de la siguiente manera. Al despejar la presión parcial de la ec. (1.8) y al sustituirla en la ec. (1.7) resulta

$$Y = \frac{(HR\% \cdot p^{\circ})}{P - (HR\% \cdot p^{\circ})} \cdot \frac{18}{29} \quad (2.1)$$

entonces, al asignar valores para la humedad relativa HR% y evaluando la presión de vapor del agua p° para el rango de temperaturas establecido, se obtienen valores de Y en función de HR%.

Las líneas de bulbo húmedo se calculan mediante la ec. (1.11).

$$Y_{sat} - Y = \frac{C_s}{\lambda_{sat}} (T - T_{sat}) \quad (1.11)$$

Al fijar un valor de T_{sat} , se obtiene tanto el valor de la presión de vapor a esta temperatura como el calor latente de vaporización; entonces, se calcula el valor de Y_{sat} mediante la ec. (1.6). A continuación, se supone un valor de Y y se calcula la capacidad calorífica del aire húmedo mediante la ec. (1.9). Se resuelve entonces la ec. (1.11) para T y con este valor se verifica el valor de Y supuesto.

La carta psicrométrica se aprecia en la figura 7.

2.2.4 Costo del proceso de secado.

La evaluación económica que se presenta en la tabla 5, se realizó en base al costo de secado de un lote de pigmento de 24 carros y se consideró como el tiempo promedio de secado el de 46 horas. El peso del pigmento seco para un lote con las características anteriores es en promedio de 6 500 kg. Se consideró en la evaluación, el costo de operación por concepto de los servicios y por concepto de la mano de obra; en los servicios se incluyó el costo del consumo de gas L.P. y el costo del consumo de la electricidad. En los costos de mano de obra se consideraron los costos erogados por la carga y descarga de los carros del secador (2 hr-hombre), los costos del llenado y del vaciado de charolas (24 hr-hombre) y el costo de supervisión del proceso de secado (1 hr-supervisor).

Para el cálculo se consideró un consumo de gas L.P. de 26.5 lt/hr; valor que resulta al dividir la cantidad de gas consumida semanalmente entre el tiempo de operación de los secadores en dicho periodo. El consumo de electricidad se estableció a partir de la potencia instalada en el secador que

es de 15.7 kW (21 HP). El costo unitario del combustible y de 1 kW-hr de electricidad es respectivamente, 0.5 N\$/lt gas L.P. y 0.25 N\$/kW-hr. El costo de 1 hr-hombre es de 4 N\$ y el de 1 hr-supervisor de 6.5 N\$.

Producción

Producción = 24 carros/lote x 270 kg S.S./carro = 6 500 kg S.S.

Costos de operación

Combustible

Consumo de combustible = 26.5 lt gas L.P./hr
 Costo del combustible = 26.5 lt gas L.P./hr x 46 hr x 0.5 N\$/lt gas L.P. = 610 N\$

Electricidad

Potencia instalada = 15.7 kW
 Consumo de electricidad = 15.7 kW x 46 hr = 722.20 kW-hr
 Costo de electricidad = 722.20 kW-hr x 0.25 N\$/kW-hr = 180 N\$

Mano de obra

Carga y descarga del secador = 2 hr-hombre
 Llenado y vaciado de charolas = 24 hr-hombre
 Supervisión del secado = 1 hr-supervisor
 Costo de mano de obra = 26 hr-hombre x 4 N\$/hr-hombre +
 1 hr-supervisor x 6.5 N\$/hr-supervisor = 110 N\$

TABLA 5
Costo del secado de un lote de pigmento

Lote de secado	24 carros	
Peso del producto seco	6 500 kg	
Ciclo de secado	46 hr	
Combustible		610 N\$
Electricidad		180 N\$
Mano de obra		110 N\$
Total		900 N\$/lote

2.3 PRUEBAS DE SECADO.

Las pruebas de secado tienen diversas aplicaciones, desde la obtención de datos de diseño para seleccionar un tipo de secador adecuado para un material específico, hasta verificar si el funcionamiento actual de un secador es correcto. En el presente trabajo, las pruebas de secado se efectuaron con esta última finalidad.

2.3.1 Condiciones de una prueba de secado.

Con el fin de que los datos obtenidos de una prueba de secado sean útiles, ésta debe realizarse en condiciones lo más parecidas posible a las condiciones reales del proceso. Debe tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones^(4,10): 1) la pérdida en peso de humedad del sólido debe determinarse a intervalos de tiempo sin interrupción de la operación de secado; 2) la muestra no debe ser demasiado pequeña y debe introducirse en una charola similar a la que se usa en la producción; 3) la relación de superficie de secado a superficie de no secado, así como el espesor de la muestra deben ser idénticas; 4) la muestra debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor por radiación; 5) la velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser las mismas que en el proceso real de secado.

Se trató de que las pruebas de secado cumplieran con las recomendaciones anteriores. La muestra se retiró del interior del secador para determinar su peso, introduciéndola nuevamente. En esta forma de evaluación se interrumpía el proceso de secado de la muestra, sin embargo, el tiempo invertido en realizar la secuencia de lectura era de escasos minutos y debido a ello se consideró que el retirar la muestra del interior del secador no afectaba el proceso de secado de ésta. Se usó un peso de muestra húmeda en proporción de uno a cuatro con respecto al peso de pigmento húmedo de una charola normal; la muestra se soportó en una charola de dimensiones menores pero del mismo material a la utilizada a gran escala. El espesor de la muestra de pigmento fue el mismo al que se tiene en una torta de filtración (6 cm de espesor en promedio); se cuidó además, que la porción a evaluar no estuviere fragmentada. Las pruebas de secado se efectuaron también al frente de la sección del túnel de secado.

2.3.2 Acondicionamiento del secador.

Se acondicionó uno de los dos secadores principales (secador 2) para efectuar en él las pruebas de secado, adoptando el procedimiento que fuese más factible de realizar y que tuviera condiciones de proceso muy semejantes a las que se tienen en la operación normal de secado.

De esta manera, las pruebas de secado se efectuaron a través de ventanillas realizadas en la pared lateral del túnel de secado. Se usó una charola de muestreo, de dimensiones menores a la de una charola normal, con el fin de retirarla con facilidad del interior del secador a través de estas ventanillas. La charola se colocó dentro del secador sobre el mismo carro que soporta las charolas en las que se deposita la torta de pigmento húmedo. El carro que se usaba en la evaluación generalmente se encontraba lleno de charolas normales con material a secar, a excepción del lugar

en el se que apoyaba la charola de muestreo. Con el fin de obtener lecturas de temperaturas del interior del túnel de secado, se hicieron orificios en la pared lateral del túnel de secado. Se indica a continuación las modificaciones efectuadas en los equipos con el fin de facilitar la realización de las pruebas de secado.

1) Abertura de dos ventanillas (0.15 m x 0.30 m) en la pared lateral del túnel de secado. Ambas ventanillas situadas a 1.10 m del nivel de piso.

2) Reducción del tamaño de dos charolas normales a las siguientes dimensiones: 0.70 m x 0.16 m x 0.03 m.

3) Adaptación de soportes en el sitio del carro donde se apoyaron las charolas de prueba. La modificación se efectuó en el sitio correspondiente a la charola numerada como posición diez (situada a 1.10 m del nivel de piso). La numeración de charolas se designó de abajo hacia arriba en la posición de éstas en el carro.

4) Realización de nueve orificios, distribuidos uniformemente en la pared lateral del túnel de secado. Con el fin de diferenciarlos se asignó una letra a cada orificio.

En las figuras A3 y A4 del apéndice A, se aprecian las modificaciones anteriores y la posición del carro dentro del secador al efectuar las pruebas de secado.

2.3.3 Pruebas iniciales.

Las dos primeras pruebas tuvieron como objetivos dominar la técnica de muestreo, así como determinar el intervalo de tiempo de lectura y precisar el tiempo total de secado.

Prueba No. 1. Esta prueba se verificó en el fondo del túnel de secado y su evaluación se inició junto con el secado del lote. La obtención de los tres primeros datos se realizó por la tarde y los demás valores se obtuvieron por la mañana del día siguiente. El peso inicial del pigmento húmedo A. 1522 y de la charola fué de 5.80 kg y la temperatura del secado fué de 100 °C. Se efectuaron también, lecturas de temperatura de bulbo seco del aire a través de los orificios de la pared exterior del túnel de secado. El objetivo primordial de esta prueba fué obtener una estimación del tiempo total de secado en está sección del túnel con la finalidad de establecer un horario de evaluación.

Los datos obtenidos durante esta prueba se indican en la tabla 6. En la tabla se aprecia el peso de la muestra y los tiempos en las que éstos se evaluaron. El peso se determinó usando una báscula digital; la cual no permitió detectar claramente las variaciones de peso por dar dos cifras de precisión. Se indica en la tabla las lecturas de temperatura efectuadas a través de los orificios. Los datos de peso se transformaron a contenidos de humedad usando la ec. (1.13); el procedimiento de cálculo se indica detalladamente en el apéndice B. A continuación, estos datos se representaron gráficamente como el contenido de humedad en función del tiempo, ver figura 8. Independientemente de los errores que se hayan combinado en la toma de datos, la forma de la curva de la figura 8 indica que el tiempo de secado en esta sección del túnel es inferior a las 15 horas.

Prueba No. 1

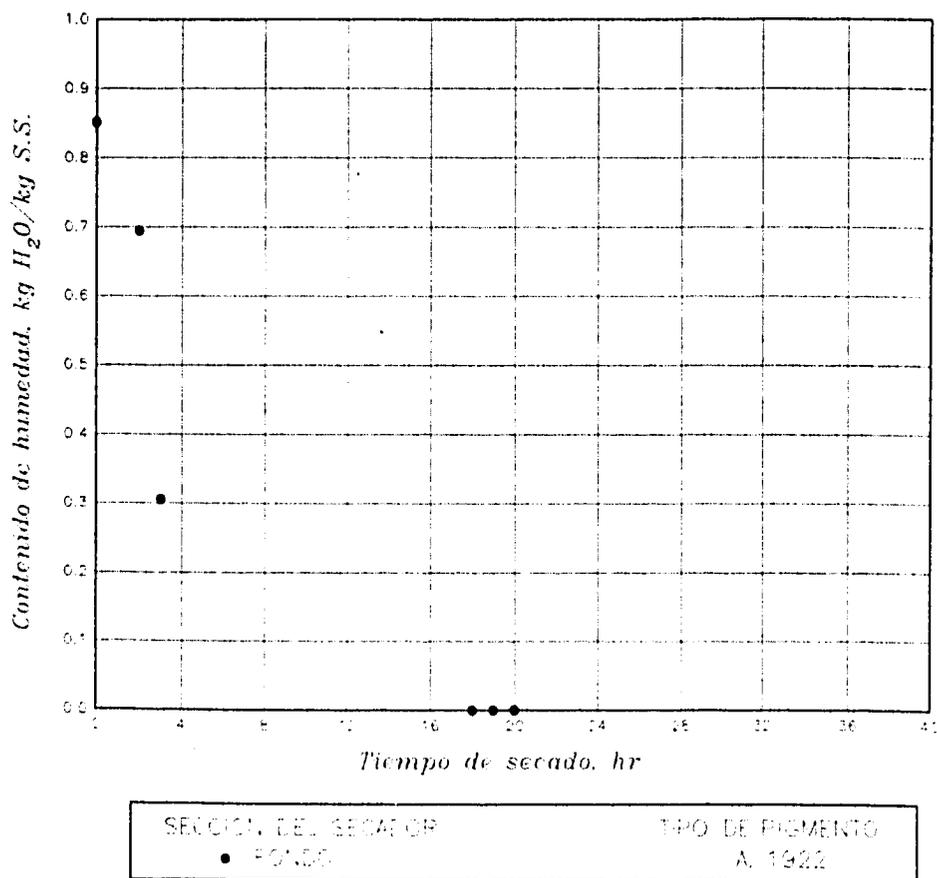


Fig. 8 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

TABLA 6
Prueba No. 1 efectuada en el fondo del túnel de secado
empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total WT (kg)	Temperaturas de bulbo seco (°C)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
0	14:50	5.80									
1	16:50	5.40									
2	17:50	4.95									
3	8:10	3.30	127	123	127	130	113	110	121	115	110
4	9:10	3.30	139	132	133	133	118	115	130	115	113
5	10:10	3.30	137	134	133	135	124	124	130	120	117

Prueba No 2. Con el conocimiento del tiempo aproximado de secado en esta sección del túnel, esta prueba se efectuó por la mañana del día siguiente de iniciado el secado del lote y se concluyó por la tarde del mismo día. Los objetivos a cumplir fueron el dominio de la técnica de muestreo y el establecer intervalos de tiempo de medición para las pruebas posteriores. El peso inicial del pigmento húmedo y de la charola fué de 4.844 kg y se usó pigmento A. 1522 (al igual que la mayor parte del lote secado). La temperatura de secado fué de 100 °C. Se efectuaron únicamente dos lecturas de temperaturas de bulbo seco a través de los orificios, por la razón de que las temperaturas en el secador ya eran estables por que el secado de lote se inició el día anterior a la evaluación. Se usó una balanza con capacidad de 5 kg para detectar la variación de peso (con tres cifras de precisión). Debido a lo anterior, la cantidad de pigmento en la charola se vió reducida de peso para no exceder el límite de la balanza tratando de mantener compactada la porción de pigmento en la charola. El área de pigmento expuesta al secado disminuyó a 0.073 m² (0.46 m x 0.16 m).

En la tabla 7 y en la figura 9 se indican los datos obtenidos en esta prueba y la gráfica de humedad en función del tiempo de secado, respectivamente. Los valores de temperaturas que no se reportan se debe a que los orificios se encontraban obstruidos por la estructura de los carros de pigmento. En la gráfica 9 se aprecia claramente la tendencia de la curva y el tiempo exacto de secado en esta región del secador. Así mismo, se aprecia que la pérdida de humedad es mayor durante las tres primeras horas de secado, por lo que durante este tiempo de secado el intervalo del tiempo de medición se disminuyó.

2.3.4 Pruebas posteriores.

Prueba No. 3. Esta prueba se inició el día posterior del comienzo del secado del lote. Se utilizó pigmento A. 1922 y la temperatura de secado fué de 100 °C. El intervalo del tiempo de muestreo fué de 15 minutos en las primeras cuatro horas y de 30 minutos en el resto del proceso de secado de la muestra, tal como se aprecia en la tabla 8 y en la figura 10. No se efectuaron mediciones de temperaturas por carecer de termómetros.

TABLA 7
Prueba no. 2 efectuada en el fondo del secador
empleando pimento A. 1522

#	Hora	Peso total WT (kg)	Temperaturas de bulbo seco (°C)							H	I
			A	B	C	D	E	F	G		
0	8:00	4.848	138	133	131	125	105	86	125		
1	8:15	4.604									
2	8:30	4.418									
3	8:45	4.206									
4	9:00	4.040									
5	9:15	3.811									
6	9:30	3.672									
7	9:45	3.534	140	138	134	128	103	95	130		
8	10:00	3.388									
9	10:15	3.270									
10	10:45	3.136									
11	11:15	2.984									
12	12:15	2.883									
13	13:45	2.824									
14	15:15	2.811									
15	17:00	2.810									

TABLA 8
Prueba no. 3 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	8:15	4.845	14	11:45	3.124
1	8:30	4.733	15	12:00	3.082
2	8:45	4.588	16	12:30	3.013
3	9:00	4.435	17	13:00	2.972
4	9:15	4.276	18	13:30	2.953
5	9:30	4.115	19	14:00	2.943
6	9:45	3.944	20	14:30	2.934
7	10:00	3.786	21	15:00	2.928
8	10:15	3.648	22	15:30	2.927
9	10:30	3.532	23	16:00	2.923
10	10:45	3.418	24	16:30	2.922
11	11:00	3.323	25	17:00	2.921
12	11:15	3.243	26	18:00	2.921
13	11:30	3.171			

Prueba No. 2

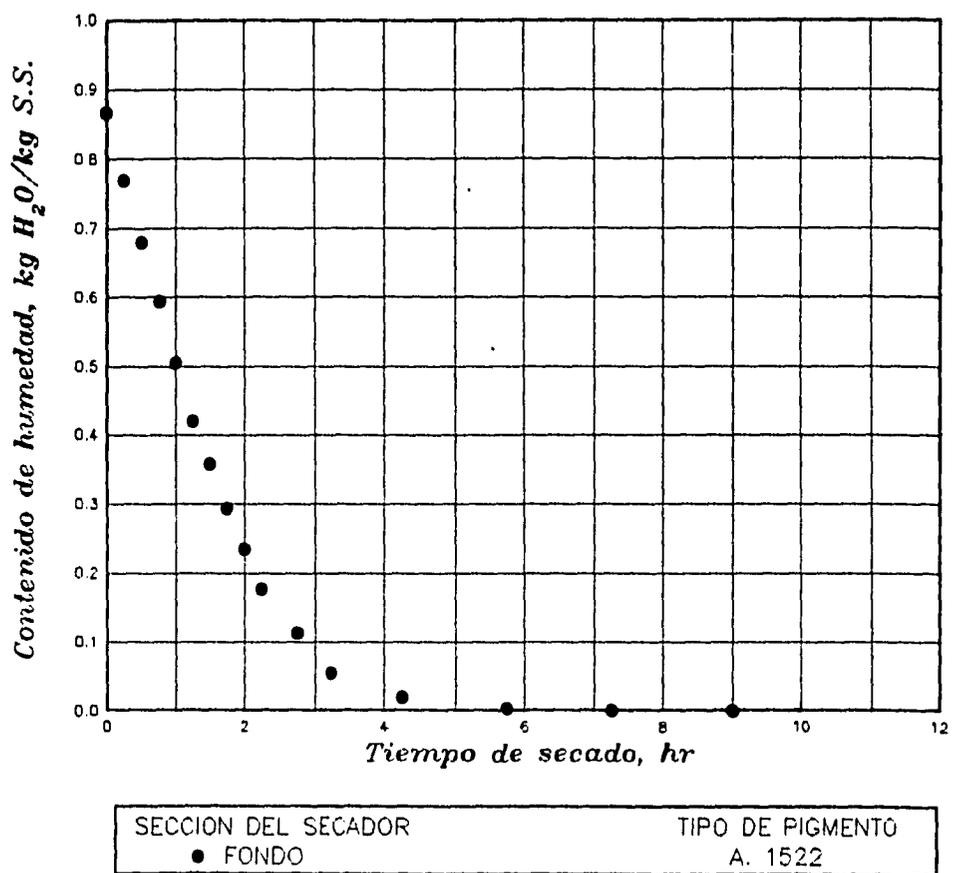


Fig. 9 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 2

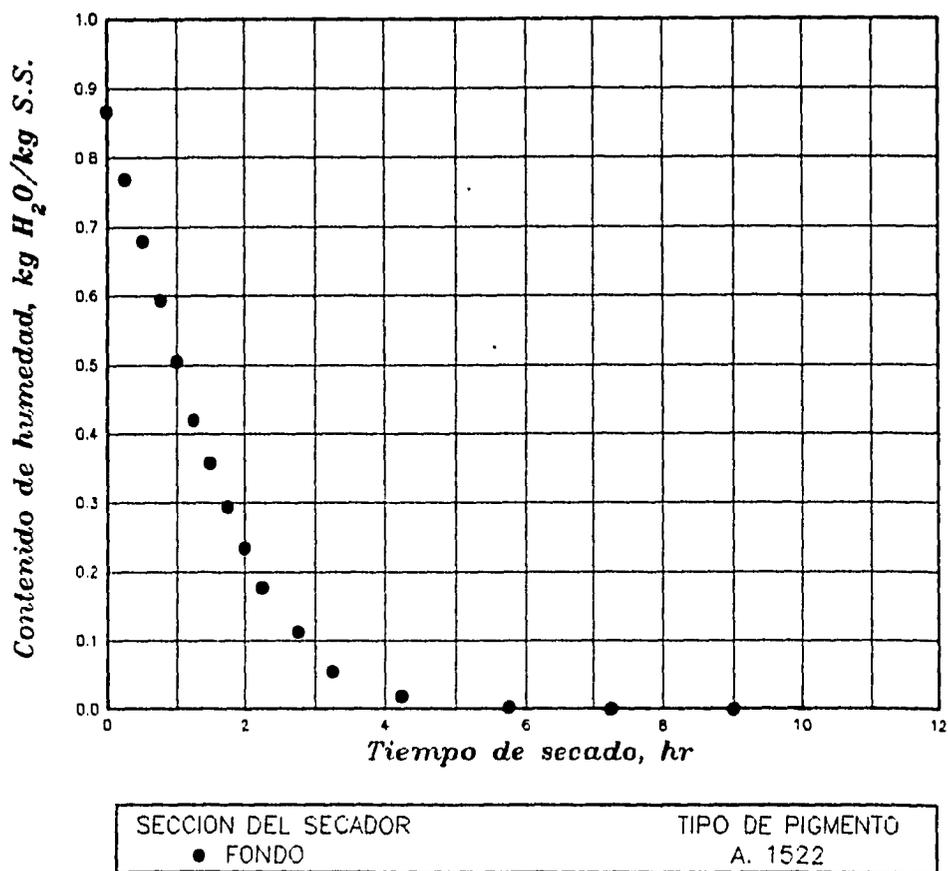


Fig. 9 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 3

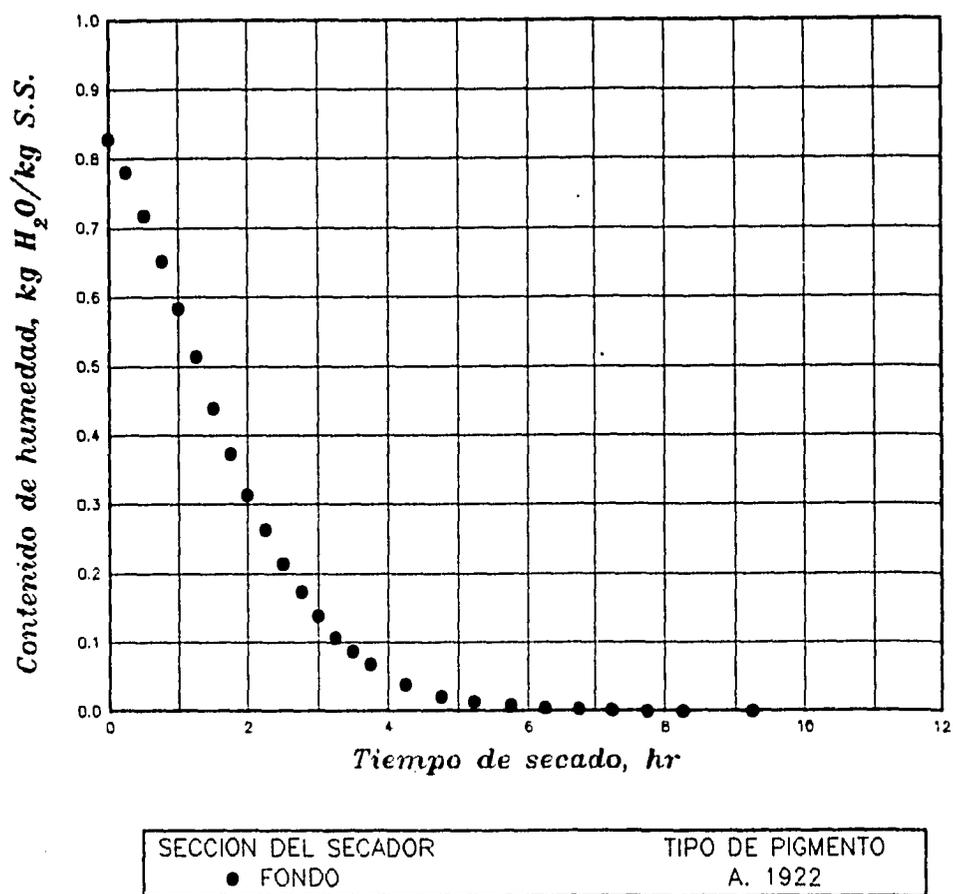


Fig. 10 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 4. En la tabla 9 se indican los datos de peso obtenidos durante esta prueba. Se usaron intervalos del tiempo de medición de 15 minutos en las primeras cinco horas y en el tiempo restante el intervalo fué de una hora, tal como se aprecia en la figura 11. Se aprecia una similitud muy grande en la curva de secado y el contenido de humedad inicial de la prueba anterior. Al igual que en la prueba 3, el peso inicial de la muestra fué de 4.845 kg. La temperatura del secador fué de 100 °C y se usó pigmento A. 1922.

TABLA 9
Prueba no. 4 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	7:55	4.845	15	11:40	3.136
1	8:10	4.745	16	11:55	3.085
2	8:25	4.626	17	12:10	3.038
3	8:40	4.476	18	12:25	3.004
4	8:55	4.332	19	12:40	2.979
5	9:10	4.179	20	12:55	2.958
6	9:25	4.035	21	13:25	2.928
7	9:40	3.890	22	13:55	2.908
8	9:55	3.764	23	14:35	2.897
9	10:10	3.648	24	14:55	2.889
10	10:25	3.544	25	15:25	2.885
11	10:40	3.434	26	15:55	2.882
12	10:55	3.363	27	16:25	2.881
13	11:10	3.281	28	16:55	2.881
14	11:25	3.198			

Prueba No. 5. Aún cuando las condiciones de esta prueba son semejantes a las pruebas anteriores, el contenido de humedad inicial fué diferente, tal como se aprecia en la figura 12. Los datos obtenidos se indican en la tabla 10.

Prueba No. 6. Al igual que las pruebas anteriores, el tiempo de secado de la muestra de esta prueba finaliza siete horas después de iniciada la evaluación, teniendo en cuenta que ésta comienza un día después de comenzar el secado del lote y a una temperatura de secado de 100 °C. En la figura 13 se aprecia también que la humedad inicial de la muestra tiene un valor muy distinto a las humedades iniciales en las pruebas anteriores. En la tabla 11 se indican los valores de ésta prueba.

Prueba No. 4

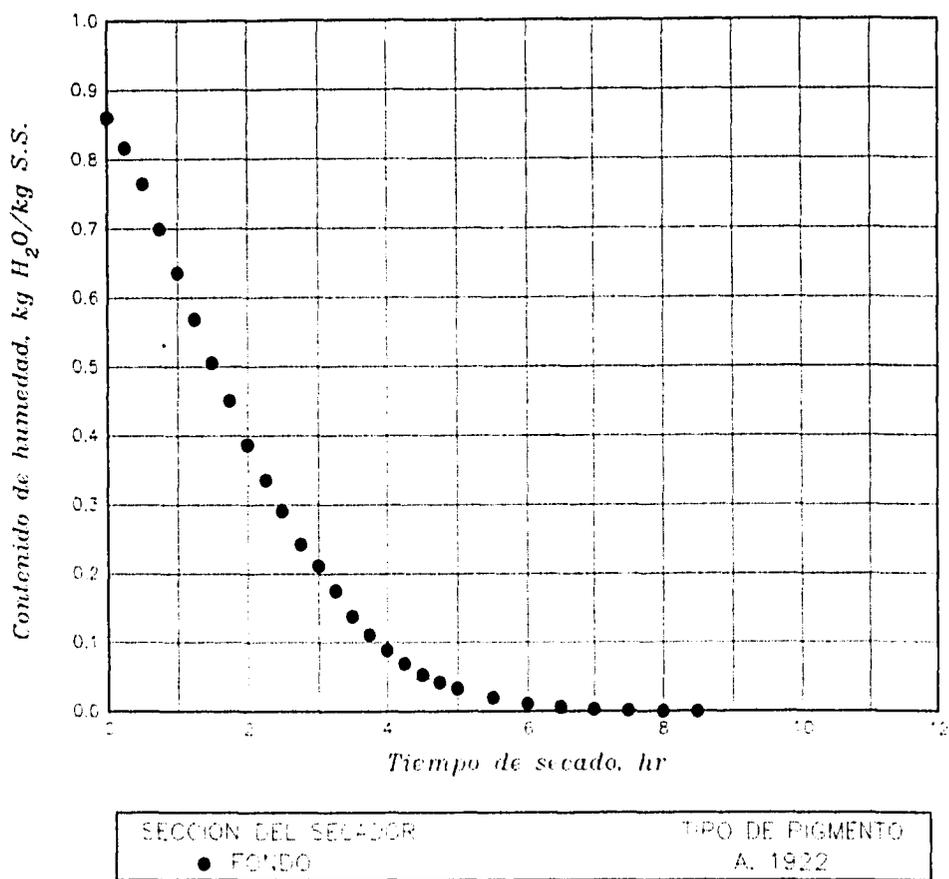


Fig. 11 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

TABLA 10
Prueba no. 5 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	8:20	4.845	13	11:35	3.252
1	8:35	4.764	14	11:50	3.185
2	8:50	4.642	15	12:05	3.130
3	9:05	4.492	16	12:20	3.094
4	9:20	4.337	17	12:35	3.068
5	9:35	4.181	18	12:50	3.044
6	9:50	4.046	19	13:20	3.010
7	10:05	3.906	20	13:50	2.991
8	10:20	3.762	21	14:20	2.984
9	10:35	3.637	22	15:20	2.977
10	10:50	3.532	23	16:20	2.974
11	11:05	3.421	24	17:20	2.974
12	11:20	3.322			

TABLA 11
Prueba no. 6 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	8:10	4.845	12	11:10	3.542
1	8:25	4.745	13	11:25	3.286
2	8:40	4.623	14	11:40	3.335
3	8:55	4.479	15	11:55	3.290
4	9:10	4.337	16	12:10	3.254
5	9:25	4.205	17	12:40	3.204
6	9:40	4.086	18	13:10	3.172
7	9:55	4.962	19	13:40	3.156
8	10:10	3.831	20	14:10	3.145
9	10:25	3.720	21	14:40	3.138
10	10:40	3.626	22	15:40	3.131
11	10:55	3.536	23	16:40	3.130

TABLA 10
Prueba no. 5 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	8:20	4.845	13	11:35	3.252
1	8:35	4.764	14	11:50	3.185
2	8:50	4.642	15	12:05	3.130
3	9:05	4.492	16	12:20	3.094
4	9:20	4.337	17	12:35	3.068
5	9:35	4.181	18	12:50	3.044
6	9:50	4.046	19	13:20	3.010
7	10:05	3.906	20	13:50	2.991
8	10:20	3.762	21	14:20	2.984
9	10:35	3.637	22	15:20	2.977
10	10:50	3.532	23	16:20	2.974
11	11:05	3.421	24	17:20	2.974
12	11:20	3.322			

TABLA 11
Prueba no. 6 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	8:10	4.845	12	11:10	3.542
1	8:25	4.745	13	11:25	3.286
2	8:40	4.623	14	11:40	3.335
3	8:55	4.479	15	11:55	3.290
4	9:10	4.337	16	12:10	3.254
5	9:25	4.205	17	12:40	3.204
6	9:40	4.086	18	13:10	3.172
7	9:55	4.962	19	13:40	3.156
8	10:10	3.831	20	14:10	3.145
9	10:25	3.720	21	14:40	3.138
10	10:40	3.626	22	15:40	3.131
11	10:55	3.536	23	16:40	3.130

Prueba No. 5

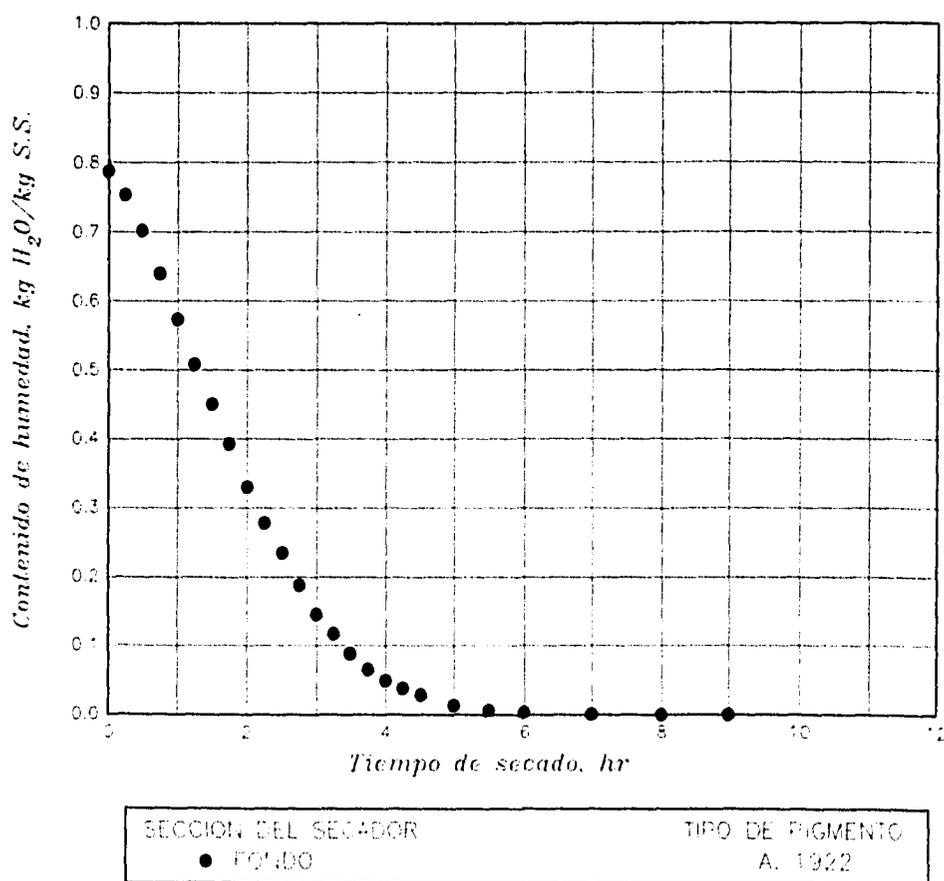


Fig. 12 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 6

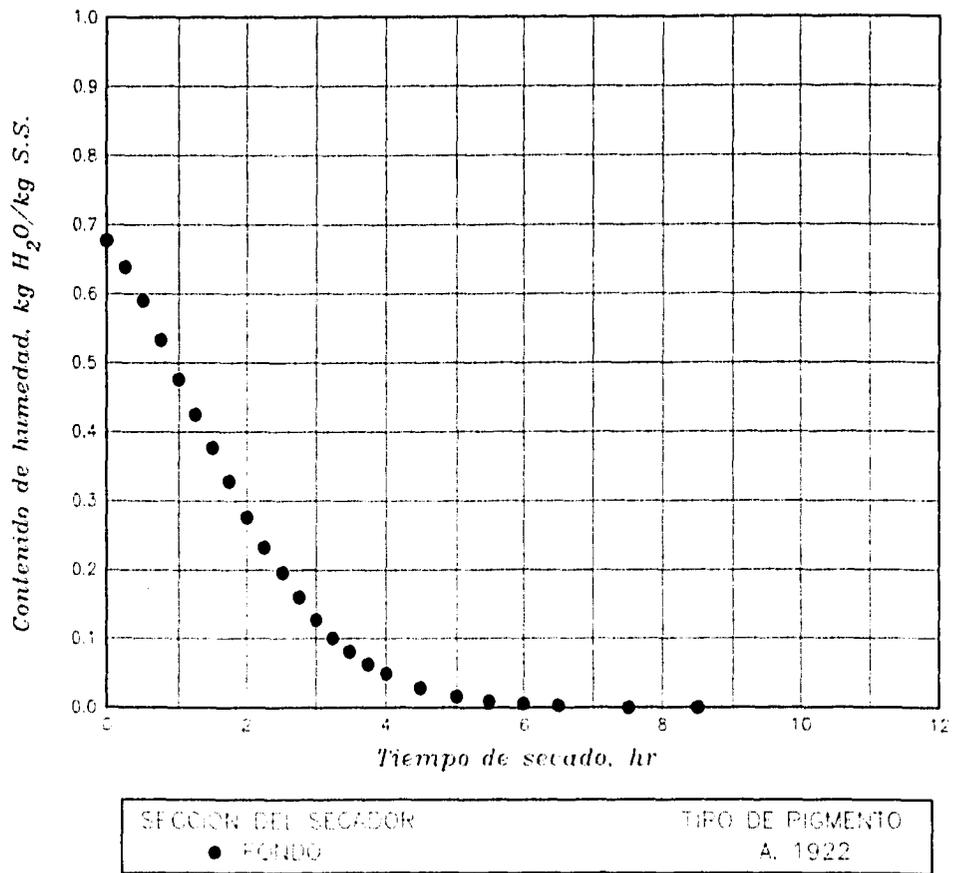


Fig. 13 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 7. La variante de esta prueba fué que se realizó simultaneamente en las dos secciones del túnel de secado y además su evaluación se inició junto con el secado del lote. Debido a lo anterior, la cantidad de número de carros dentro del secador pasó a ser un factor importante. La temperatura del secador fué de 100 °C y en ambas muestras se usó pigmento A. 1522. El lote a secar fué de 24 carros y el peso total de la muestra se ajustó a 5 kg.

En la tabla 12a se aprecian los datos obtenidos en el frente del túnel de secado, así como los valores de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo evaluados en las ventanillas de prueba. En la tercera columna de la tabla se indican los valores de las temperaturas obtenidas en una de las ventanilla de aire fresco. Las gráficas de humedad en función del tiempo de ambas secciones se aprecian en la figura 14. Se observa que durante las diez primeras horas de secado en esta sección del secador no hay un cambio notable en la pérdida de humedad y el tiempo total de secado concluye hasta las 36 horas de iniciado el proceso.

Los datos en el fondo del secador se indican en la tabla 12b. En ella se indican también las temperaturas de bulbo seco del aire de secado evaluadas a través de los orificios de la pared exterior del túnel. La curva de secado de esta sección del túnel se incrementa hasta las once horas de iniciado el proceso, tal como se aprecia en la figura 14.

Prueba No. 8. Al igual que la prueba anterior, las evaluaciones se hicieron simultaneamente en las dos secciones del túnel de secado. Se empleó pigmento A. 1522 en ambas secciones y la temperatura de secado del lote fué de 100 °C. El muestreo inició el día posterior al comienzo del secado del lote. La cantidad de carros en el secador fué de 17, incluyendo los dos carros en los que se soportaron las charolas de prueba.

En la tabla 13a se indican los valores para el frente del secador, se incluyen las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco tanto de las ventanillas de prueba como la de una de las ventanillas de aire fresco. Los datos de la sección de fondo y las temperaturas de bulbo seco del aire de secado se incluyen en la tabla 13b.

Las curvas de secado de las dos secciones de prueba se aprecian en la figura 15; se nota un sólo tiempo de secado a lo largo del túnel de secador.

Prueba no. 9. Esta prueba se efectuó únicamente en el frente del secador y se inició junto con el secado del lote. El lote constó de 24 carros incluyendo el carro de prueba. Se usó pigmento A. 1922 y la temperatura de secado del lote fué de 100 °C. Se efectuaron lecturas de las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco.

Los datos obtenidos se indican en la tabla 14. La curva de humedad en función del tiempo de secado de esta prueba se aprecia en la figura 16. En la gráfica se aprecia que el tiempo total de secado es superior a las 40 horas.

TABLA 12a

Prueba no. 7 efectuada en el frente del secador
empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total Wt (kg)	Temperaturas (°C)					
			frente		fondo		ventanilla	
			T	T _w	T	T _w	T	T _w
0	15:00	5.000						
1	16:00	5.000	78	52	110	53	30	25
2	16:30	4.997						
3	17:00	4.992						
4	17:30	4.981						
5	18:00	4.973	72	54	122	56	31	24
6	18:30	4.964						
7	19:00	4.952						
8	19:30	4.940						
9	20:00	4.926	70	56	117	56	31	24
10	20:30	4.904						
11	21:00	4.892						
12	21:30	4.877						
13	22:00	4.860	84	56	122	58	31	24
14	22:30	4.846						
15	23:00	4.829						
16	24:00	4.797						
17	1:00	4.759	88	56	125	58	31	24
18	2:00	4.717						
19	3:00	4.670						
20	4:00	4.618						
21	5:00	4.549						
22	6:00	4.488						
23	7:00	4.424						
24	8:00	4.349						
25	9:00	4.277	96	54	146	56	32	23
26	10:00	4.193						
27	11:00	4.115						
28	12:00	4.014						
29	13:00	3.927						
30	14:00	3.832						
31	15:00	3.755						
32	16:00	3.657						
33	17:00	3.563						
34	18:00	3.480						
35	19:00	3.400						
36	20:00	3.327						
37	21:00	3.275						
38	22:00	3.228						
39	23:00	3.197						
40	24:00	3.172						
41	1:00	3.256						
42	2:00	3.150						
43	3:00	3.149						

TABLA 12b
Prueba no. 7 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total Wt (kg)	Temperaturas de bulbo seco (°C)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
0	15:05	5.000	111	96	65	96		64	80		58
1	15:20	4.953									
2	15:35	4.897									
3	15:50	4.829									
4	16:05	4.752									
5	16:20	4.672	122	100	80	90		64	84		64
6	16:35	4.594									
7	16:50	4.513									
8	17:05	4.432									
9	17:20	4.347									
10	17:35	3.460									
11	17:50	4.176	130	100	80	98		68	90		64
12	18:05	4.093									
13	18:20	4.006									
14	18:35	3.919									
15	19:50	3.838									
16	19:05	3.758									
17	19:20	3.690									
18	19:35	3.616									
19	19:50	3.550	136	120	101	106		75	96		70
20	20:05	3.492									
21	20:20	3.433									
22	20:35	3.376									
23	20:50	3.336									
24	21:05	3.301	138	124	106	110		83	100		70
25	21:20	3.268									
26	21:35	3.245									
27	21:50	3.220									
28	22:05	3.203									
29	22:20	3.187									
30	22:35	3.173									
31	24:05	3.161									
32	23:05	3.151									
33	24:05	3.120									
34	1:05	3.103									
35	2:05	3.099									
36	7:05	3.096	142	142	138	130		116	110		70

Prueba No. 7

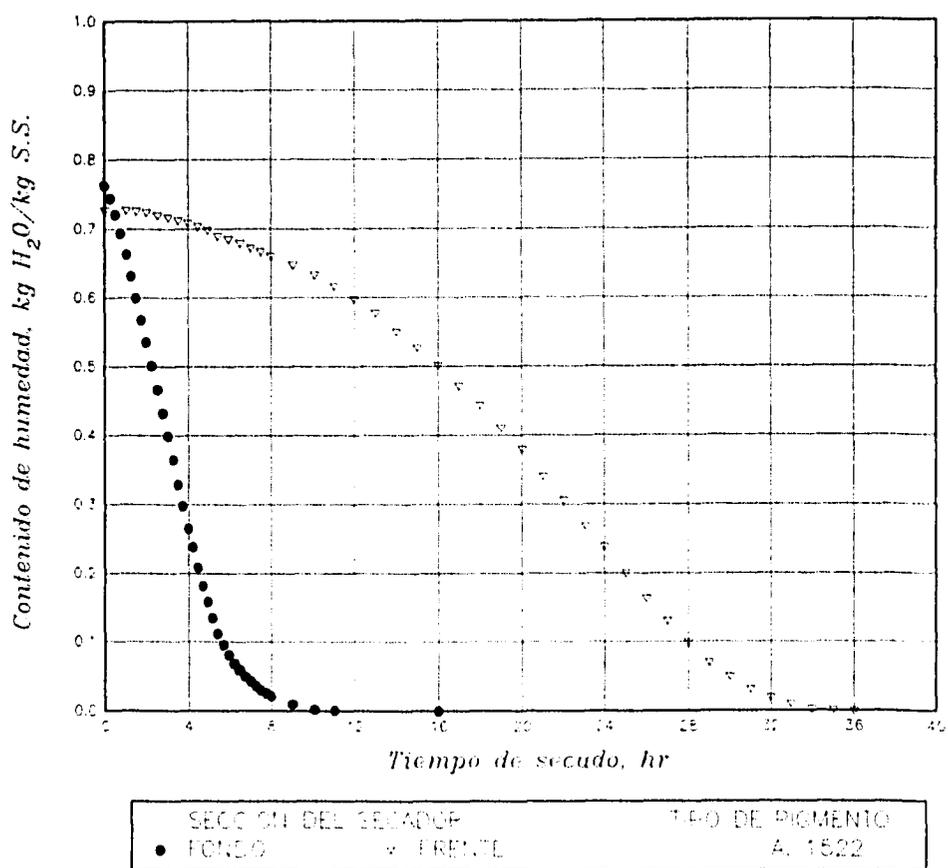
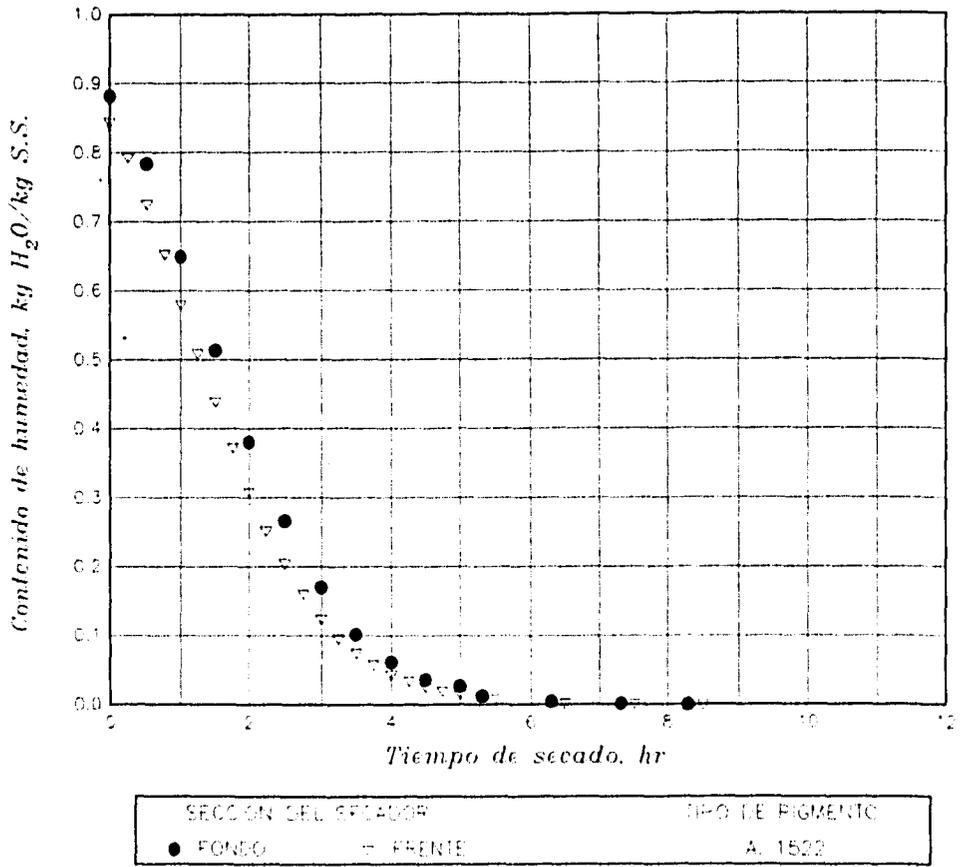


Fig. 14 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

TABLA 13a
Prueba no. 8 efectuada en el frente del secador
empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total Wt (kg)	Temperaturas (°C)					
			frente		fondo		ventanilla	
			T	T _w	T	T _w	T	T _w
0	9:05	5.000						
1	9:20	4.879	124	49	138	51	31	24
2	9:35	4.715						
3	9:50	4.544						
4	10:05	4.369						
5	10:20	4.199						
6	10:35	4.034						
7	10:50	3.875						
8	11:05	3.720						
9	11:20	3.588						
10	11:35	3.475						
11	11:50	3.368						
12	12:05	3.282						
13	12:20	3.214						
14	12:35	3.165	124	48	138	50	30	23
15	12:50	3.124						
16	13:05	3.091						
17	13:20	3.068						
18	13:35	3.048						
19	13:50	3.033						
20	14:05	3.023						
21	14:35	3.006						
22	15:35	2.992						
23	16:35	2.989	126	50	140	52	21	24
24	17:35	2.985						

Prueba No. 8



Número de curvas en el secador: 17

Fig. 15 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

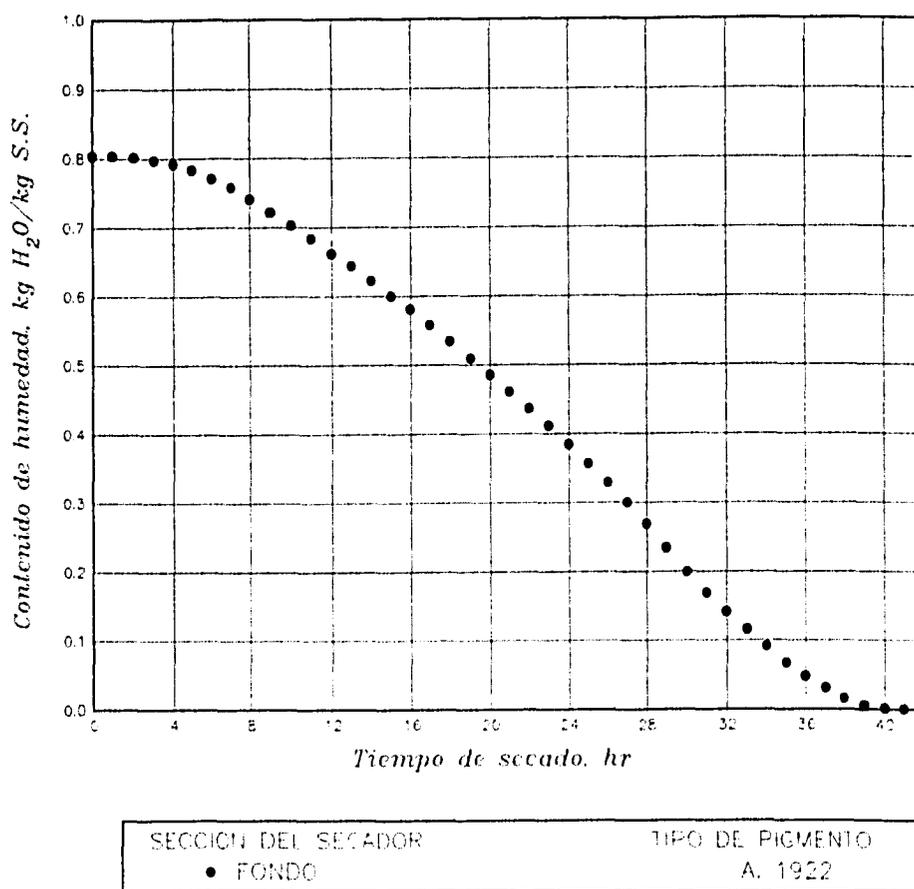
TABLA 13b
Prueba no. 8 efectuada en el fondo del secador
empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total Wt (kg)	Temperaturas de bulbo seco (°C)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I
0	9:00	5.000									
1	9:30	4.770	140	136		124		90	120	128	118
2	10:00	4.456									
3	10:30	4.139									
4	11:00	3.827									
5	11:30	3.558									
6	12:00	3.335									
7	12:30	3.176	141	138		124		110	113	133	124
8	13:00	3.082									
9	13:30	3.022									
10	14:00	3.000									
11	14:30	2.968									
12	15:30	2.948									
13	16:30	2.942	138	140		134		124	123	122	122
14	17:30	2.937									

Prueba No. 10. En esta prueba la evaluación se llevó a cabo simultáneamente en las dos secciones del túnel de secado. Se usó pigmento A. 1522 en las dos muestras y la temperatura del secador fué de 100 °C. No se efectuaron mediciones de temperaturas.

La prueba en el fondo del secador se llevó a cabo con el fin de comprobar una vez más el tiempo total de secado en este lugar del secador, por ello los intervalos de tiempo de medición fueron más grandes que los normalmente usados, tal como se aprecia en la figura 17. Se aprecia también que el tiempo de secado al frente del túnel es inferior a las 40 horas. Los datos de las pruebas al frente y al fondo del secador se indican en las tablas 15a y 15b, respectivamente.

Prueba No. 9



Número de correos en el secador: 24

Fig. 16 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

TABLA 14
Prueba no. 9 efectuada en el frente del secador
empleando pigmento A. 1922

#	Hora	Peso total WT (kg)	Temperaturas (°C)					
			frente		fondo		ventanilla	
			T	T _w	T	T _w	T	T _w
0	17:00	5.000						
1	18:00	5.000						
2	19:00	4.994						
3	20:00	4.983						
4	21:00	4.966						
5	22:00	4.940						
6	23:00	4.919						
7	24:00	4.888						
8	1:00	4.846						
9	2:00	4.798						
10	3:00	4.753						
11	4:00	4.706						
12	5:00	4.652	66	54	133	56	30	23
13	6:00	4.609						
14	7:00	4.556						
15	8:00	4.503						
16	9:00	4.455						
17	10:00	4.390						
18	11:00	4.342	73	55	135	56	31	24
19	12:00	4.280						
20	13:00	4.222						
21	14:00	4.164						
22	15:00	4.104						
23	16:00	4.041						
24	17:00	3.976	72	53	140	55	31	23
25	18:00	3.909						
26	19:00	3.842						
27	21:00	3.771						
28	23:00	3.581						
29	1:00	3.450						
30	3:00	3.321						
31	5:00	3.204						
32	7:00	3.115	113	53	141	55	31	24
33	8:00	3.078						
34	9:00	3.052						
35	10:00	3.043						
36	11:00	3.040						

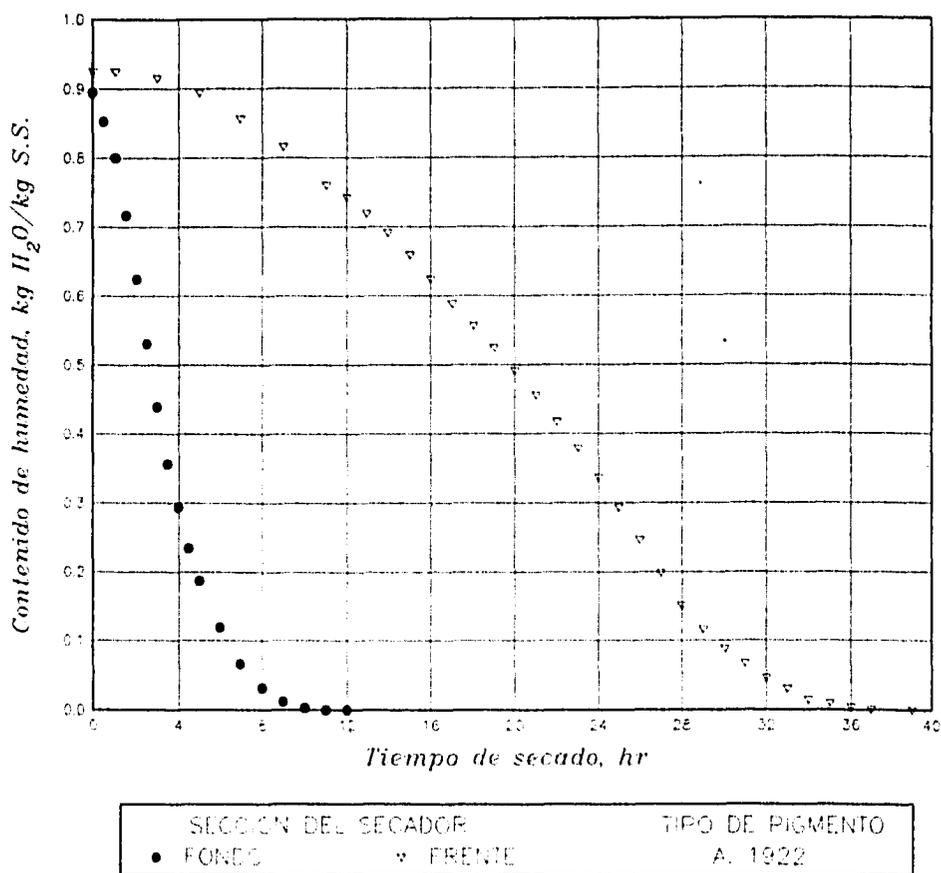
TABLA 15a
 Prueba no. 10 efectuada en el frente del secador
 empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total WT (kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	17:00	5.000	10	22:00	3.358
1	17:30	4.904	11	23:00	3.200
2	18:00	4.781	12	24:00	2.078
3	18:30	4.586	13	1:00	2.997
4	19:00	4.371	14	2:00	2.950
5	19:30	4.154	15	3:00	2.929
6	20:00	3.942	16	4:00	2.922
7	20:30	3.751	17	6:00	2.922
8	21:00	3.604	18	9:00	2.921
9	21:30	3.466			

TABLA 15b
 Prueba no. 10 efectuada en el fondo del secador
 empleando pigmento A. 1522

#	Hora	Peso total WT(kg)	#	Hora	Peso total WT (kg)
0	17:05	5.000	17	15:05	3.839
1	18:05	5.000	18	16:05	3.751
2	20:05	4.978	19	17:05	3.654
3	22:05	4.950	20	18:05	3.556
4	24:05	4.844	21	19:05	3.448
5	2:05	4.730	22	20:05	3.339
6	4:05	4.624	23	21:05	3.231
7	5:05	4.583	24	22:05	3.152
8	6:05	4.528	25	23:05	3.089
9	7:05	4.466	26	24:05	3.040
10	8:05	4.392	27	1:05	2.992
11	9:05	4.312	28	2:05	2.957
12	10:05	4.230	29	3:05	2.919
13	11:05	4.158	30	4:05	2.908
14	12:05	4.085	31	5:05	2.895
15	13:05	4.009	32	6:05	2.888
16	14:05	3.928	33	8:05	2.885

Prueba No. 10



Número de celtas en el secador: 24

Fig. 17 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

2.4 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE SECADO.

Al analizar las las curvas de secado de las pruebas efectuadas, se puede concluir que el tipo de pigmento (A. 1522 o A. 1922) no es una variable que afectó el tiempo requerido para el secado cuando se tuvieron las mismas condiciones de operación en el secador. Esto se aprecia en las figuras de las pruebas no. 3,4,5 y 6 (en las que se utilizó el pigmento A. 1922) y la figura de la prueba no. 8 (en donde se empleó el pigmento A. 1522); en las cuales el secado del lote se inició un día anterior al inicio de la prueba experimental. Similarmente, esto se aprecia en la figura de la prueba 9 (en la que se utilizó el pigmento A. 1922) y las figuras de las pruebas no. 7 y 10 (en las que se empleó el pigmento A. 1522); en donde la evaluación experimental se inició paralelamente al secado del lote.

En las figuras de las pruebas 7 y 10 (evaluadas al fondo del túnel del secador y en las que el comienzo de la prueba experimental se inició junto con el secado del lote) se puede apreciar que los tiempos de secado no cambiaron substancialmente con respecto a los tiempos obtenidos en las pruebas no. 3,4,5 y 6 (las cuales fueron evaluadas al fondo del secador y al día siguiente de iniciarse el secado del lote). En aquellas pruebas que se iniciaron junto con el secado del lote, el tiempo promedio de secado fué de 12 horas; en tanto que para las pruebas que se iniciaron el día posterior al comienzo del secado del lote, el tiempo resulto ser de 9 horas.

Cuando el secador operó a su máxima capacidad (24 carros) se presentaron tiempos distintos de secado entre las dos secciones (fondo y frente) en las que se efectuó la medición experimental. Esto se puede apreciar en las figuras de las pruebas no. 7 y 10. Por otro lado, cuando en el equipo se secaron un poco más de la mitad de carros (17 carros) que los que secan cuando está a su máxima capacidad, el tiempo de secado fué prácticamente el mismo en ambas secciones en donde se realizó la medición. Lo anterior se aprecia en la figura de la prueba no. 8.

Del análisis de las pruebas efectuadas en la sección del frente del túnel de secado, se concluye que el tiempo actual de secado es el tiempo correcto de operación cuando el secador opera a su máxima capacidad. Esto se puede verificar con los tiempos de secado obtenidos en las pruebas no. 7, 9 y 10; pruebas que fueron realizadas al frente del túnel de secado.

Capítulo 3

Tratamiento de Resultados

3.1 PREDICCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO.

La predicción del tiempo de secado resulta importante para cuando se desea secar el sólido húmedo hasta un cierto contenido de humedad final. Otro método para predecir el tiempo de secado distinto a los expuestos en la sección 1.4 y el cuál es el que se aplicó en este trabajo, resulta cuando se obtiene una función aproximada que ajuste adecuadamente el comportamiento o la tendencia general de los datos experimentales de humedad en función del tiempo de secado⁽¹⁵⁾. Es importante señalar la practicidad que se tiene con un método de predicción de este tipo; ya que al disponer de una función que represente adecuadamente los datos experimentales, se puede calcular en forma simple el tiempo necesario para secar determinado lote de pigmento húmedo antes de cada operación de secado.

Por lo anterior expuesto, la función que mejor se ajustó a los datos experimentales de humedad contra tiempo de secado se obtuvo mediante una regresión de tipo polinomial, resultando ésta ser del tipo:

$$X = \alpha + \beta t + \gamma t^2 \quad (3.1)$$

para la sección del fondo del secador, y para la sección del frente del tipo

$$X = \alpha + \beta t + \gamma t^2 + \delta t^3 \quad (3.2)$$

en donde X está en kg H₂O/kg S.S. y t está en horas.

TABLA 16

Valores de las constantes de las ecuaciones polinomiales

Sección del secador	α	β	γ	δ	Tiempo (hr) rango
Fondo	0.8869	- 0.1893	0.0101		0 - 9.5
Frente	0.8064	0.0096	- 0.0016	2.3E-05	0 - 40.0

Los valores para las constantes α , β , γ y δ que se indican en la tabla 16, son valores promediados de los valores obtenidos al ajustar los datos experimentales de las pruebas 7, 9 y 10 (ver apéndice C). Es necesario señalar la utilidad de tener una sola función que represente en forma aproximada el comportamiento observado en todas las pruebas realizadas, evitando así tener una función para cada una de las pruebas experimentales efectuadas.

En la figuras 18 y 19 se muestran las curvas ajustadas para los datos experimentales del contenido de humedad en función del tiempo de secado, obtenidas mediante las ecs. (3.1) y (3.2).

Como muestra del cálculo de la predicción del tiempo de secado se considerarán los siguientes ejemplos:

Ejemplo 1

Se desea conocer el tiempo que deberá permanecer en el secador el pigmento húmedo para que reduzca su humedad hasta un contenido de 0.15 kg H₂O/kg S.S. en la sección del frente del secador. Comparar el tiempo resultante con el tiempo de secado obtenido en la prueba no. 10.

Solución

El contenido de humedad final es $X = 0.15$ kg H₂O/kg S.S., por lo que sustituyendo este valor en la ec. (3.2) y resolviendo ésta se obtiene el tiempo de permanencia del pigmento en el secador.

$$0.1500 = 0.8053 + 0.0063t - 0.0017t^2 + 2.6E-05t^3$$

$$t \cong 31 \text{ hr}$$

El tiempo de secado obtenido en la prueba no. 10 es de 28 hr (ver fig 19); la predicción resulta en un 10 % más del valor del tiempo experimental de secado, lo cual se considera una buena estimación.

Ejemplo 2

Se desea conocer el tiempo que deberá transcurrir para que el pigmento colocado en la sección del fondo del secador tenga un contenido de humedad de 0.15 kg H₂O/kg S.S.. Comparar el tiempo con el valor experimental de 5 hr, obtenido en la prueba no. 7 (fig. 18).

Solución

Resolviendo la ec. (3.1) con el valor de $X = 0.15$ kg H₂O/kg S.S. se obtiene el tiempo de permanencia del pigmento

$$0.1500 = 0.8869 - 0.1893t + 0.0101t^2$$

$$t = 5.5 \text{ hr}$$

Prueba No. 7

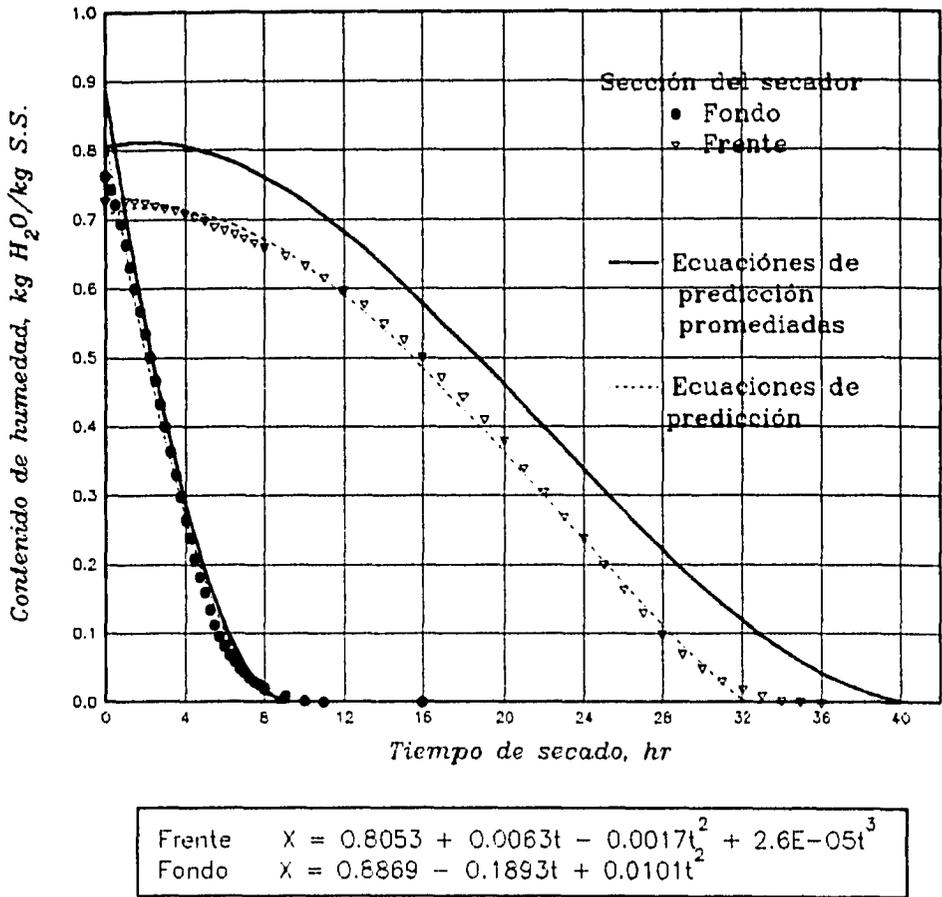
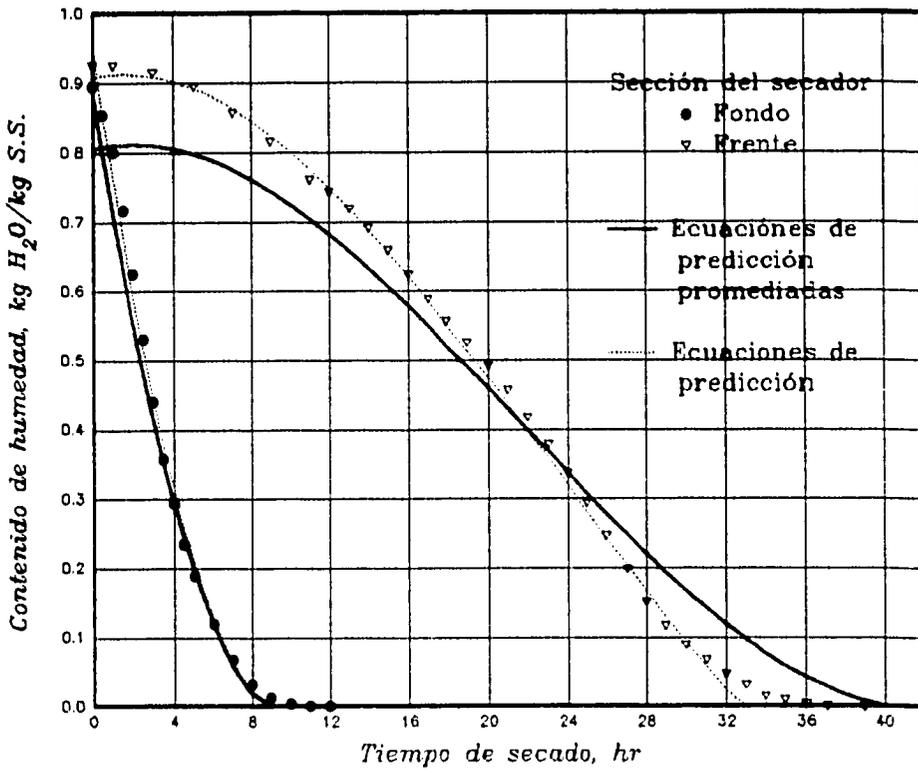


Fig. 18 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 10



Frente	$X = 0.8053 + 0.0063t - 0.0017t^2 + 2.6E-05t^3$
Fondo	$X = 0.8869 - 0.1893t + 0.0101t^2$

Fig. 19 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

La predicción resulta en un 10 % más del valor del tiempo de secado, por lo que también se considera una buena estimación.

Como se observa en los ejemplos anteriores, las funciones obtenidas predicen tiempos de secado superiores a los tiempos obtenidos experimentalmente en un orden aproximado del 10 %. Esta variación, sin embargo, resulta factible por que es más apropiado tener tiempos de predicción de secado superiores a los encontrados experimentalmente, en vez de obtener tiempos inferiores o tiempos justos y por lo tanto, de esta manera se aseguraría que el lote de secado esté completamente séco.

3.2 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO.

La curva de secado indica que la velocidad de secado es una variable dependiente del tiempo o del contenido de la humedad; esta variación sin embargo, sólo se puede observar con claridad al diferenciar gráfica o analíticamente la curva de secado. En este trabajo se han obtenido las curvas de velocidad de secado con la finalidad de establecer similitudes entre el comportamiento experimental y el comportamiento expuesto en la bibliografía. En base a los resultados obtenidos se tratará de explicar el tipo de movimiento que sigue el líquido al evaporarse del pigmento húmedo. Cabe señalar que no se pretende mediante este tipo de gráficas predecir tiempos de secado.

Se expondrá a manera de ejemplo el procedimiento para obtener una curva de velocidad de secado a partir de los datos de humedad en función del tiempo de secado, para ello se trabajará con los datos correspondientes a la prueba no. 7. La curva de velocidad de secado se obtendrá analíticamente calculando el valor medio de la velocidad correspondiente a cada intervalo de tiempo y graficándolo éste en función del contenido de humedad promedio. Para el cálculo se emplean los datos de la sección del fondo de la prueba no. 7 (ver tabla 12b).

En el instante $t = 0$ horas, el contenido de humedad es de $0.7628 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$ (ver en el apéndice B la tabla B1). Después de 15 min (0.25 hr) la humedad es de $0.7440 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$ y el valor medio de la humedad en este intervalo de tiempo es por lo tanto $X_m = 0.7534 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$. Para determinar la velocidad media de secado en este intervalo de tiempo se usa la ec. (1.16):

$$R = \frac{W_s \Delta X}{A \Delta t} \quad (1.16)$$

donde el área de pigmento expuesta al secado es $A = 0.073 \text{ m}^2$ y el peso del pigmento seco es $W_s = 2.496 \text{ kg}$. Sustituyendo los valores anteriores en la ec. (1.16) resulta

$$R = \frac{2.496 \text{ kg S.S.} (0.7628 - 0.7440) \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}}{0.073 \text{ m}^2 \cdot 0.25 \text{ hr}}$$

$$R = 2.57 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ hr}}$$

Por lo tanto en el primer intervalo de tiempo de 0.25 hr, la humedad promedio es de 0.7534 kg H₂O/kg S.S. y la velocidad media de secado es 2.57 kg H₂O/m² hr.

Del mismo modo se obtienen los demás valores de velocidad de secado indicados en la tabla B1 del apéndice B para los diferentes tiempos de secado de la prueba no. 7. De esta manera, al representar gráficamente los datos de velocidad de secado en función de los valores de la humedad promedio, se obtiene la curva de velocidad de secado indicada en la figura 20.

En este tipo de curva se puede apreciar el comportamiento descrito en la sección 2.1 (ver las figuras 3b y 3c). A los valores obtenidos de velocidad de secado en función de la humedad promedio, se les ha trazado la mejor línea mediante regresión con mínimos cuadrados para hacer evidente cada periodo de secado. Se observa en la prueba realizada al fondo del secador el periodo de calentamiento del sólido, sección AB; el periodo de velocidad constante, sección BC; y a continuación el periodo de velocidad decreciente; en éste último aparecen los dos periodos en que puede dividirse, secciones CD y DE. Por la forma de la segunda zona del periodo decreciente (sección DE), se infiere que el tipo de mecanismo seguido por la humedad en el sólido hacia la etapa final de secado es mediante el movimiento capilar, el cual es típico en los sólidos porosos. Para la prueba realizada al frente del secador, los periodos de secado no están muy bien definidos. Sin embargo, se ha tratado de visualizar cada periodo con líneas en forma similar a las pruebas obtenidas en la parte del fondo del secador. Se aprecia en éstas, que el periodo de calentamiento resulta ser muy extenso en contraposición con el periodo de velocidad constante que es breve.

Otro tipo de curva que puede obtenerse de los datos de las pruebas de secado es la indicada en la figura 21, en ésta se representa la velocidad de secado como función del tiempo. En este tipo de curva se puede apreciar con mayor exactitud lo que dura cada periodo de secado (secciones AB, BC, CD y DE).

Finalmente, en las tablas siguientes se presentan los valores de la humedad promedio, así como de la velocidad y del tiempo de secado al inicio del periodo de velocidad constante y del periodo de velocidad decreciente de todas las pruebas efectuadas.

$$R = \frac{2.496 \text{ kg S.S.} (0.7628 - 0.7440) \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}}{0.073 \text{ m}^2 \cdot 0.25 \text{ hr}}$$

$$R = 2.57 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ hr}}$$

Por lo tanto en el primer intervalo de tiempo de 0.25 hr, la humedad promedio es de 0.7534 kg H₂O/kg S.S. y la velocidad media de secado es 2.57 kg H₂O/m² hr.

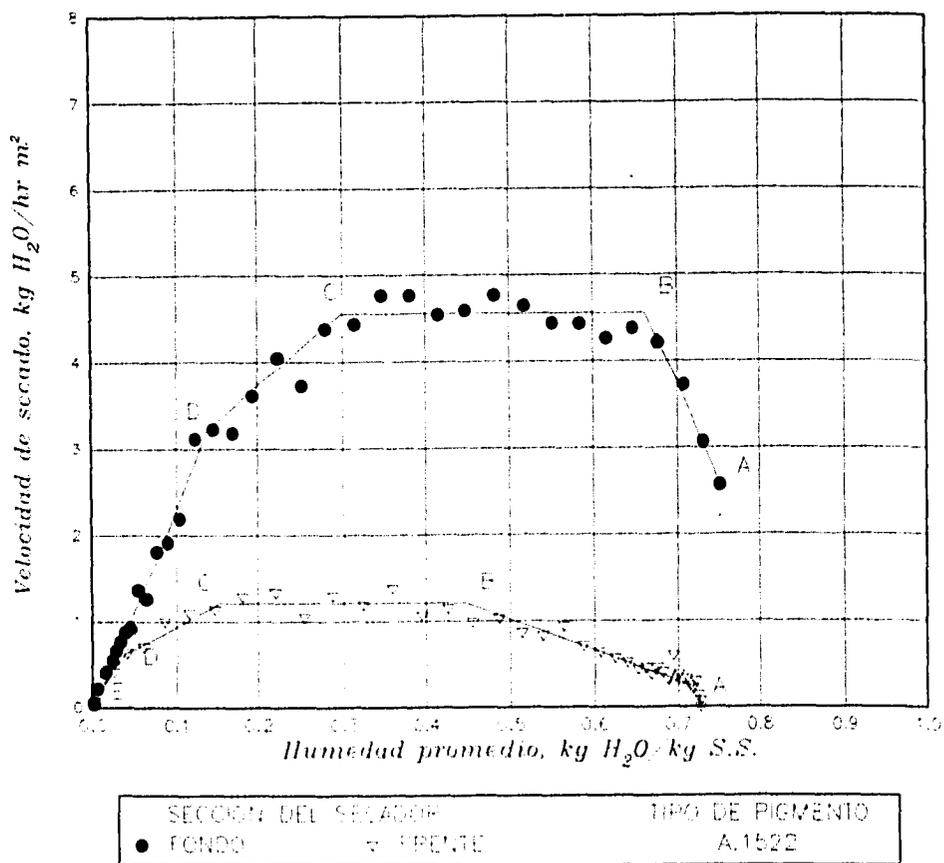
Del mismo modo se obtienen los demás valores de velocidad de secado indicados en la tabla B1 del apéndice B para los diferentes tiempos de secado de la prueba no. 7. De esta manera, al representar gráficamente los datos de velocidad de secado en función de los valores de la humedad promedio, se obtiene la curva de velocidad de secado indicada en la figura 20.

En este tipo de curva se puede apreciar el comportamiento descrito en la sección 2.1 (ver las figuras 3b y 3c). A los valores obtenidos de velocidad de secado en función de la humedad promedio, se les ha trazado la mejor línea mediante regresión con mínimos cuadrados para hacer evidente cada periodo de secado. Se observa en la prueba realizada al fondo del secador el periodo de calentamiento del sólido, sección AB; el periodo de velocidad constante, sección BC; y a continuación el periodo de velocidad decreciente; en éste último aparecen los dos periodos en que puede dividirse, secciones CD y DE. Por la forma de la segunda zona del periodo decreciente (sección DE), se infiere que el tipo de mecanismo seguido por la humedad en el sólido hacia la etapa final de secado es mediante el movimiento capilar, el cual es típico en los sólidos porosos. Para la prueba realizada al frente del secador, los periodos de secado no están muy bien definidos. Sin embargo, se ha tratado de visualizar cada periodo con líneas en forma similar a las pruebas obtenidas en la parte del fondo del secador. Se aprecia en éstas, que el periodo de calentamiento resulta ser muy extenso en contraposición con el periodo de velocidad constante que es breve.

Otro tipo de curva que puede obtenerse de los datos de las pruebas de secado es la indicada en la figura 21, en ésta se representa la velocidad de secado como función del tiempo. En este tipo de curva se puede apreciar con mayor exactitud lo que dura cada periodo de secado (secciones AB, BC, CD y DE).

Finalmente, en las tablas siguientes se presentan los valores de la humedad promedio, así como de la velocidad y del tiempo de secado al inicio del periodo de velocidad constante y del periodo de velocidad decreciente de todas las pruebas efectuadas.

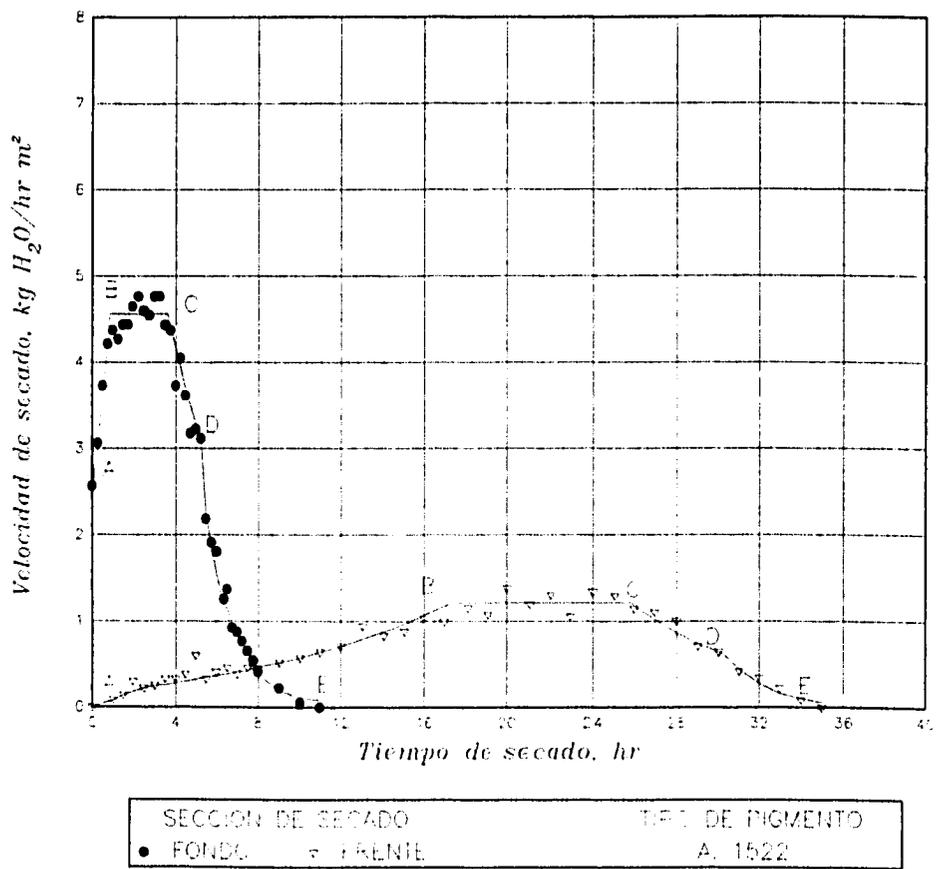
Prueba No. 7



número de revoluciones en el secador: 24

Fig. 20 Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad promedio.

Prueba No. 7



Número de curvas en el secador: 24

Fig. 21 Curva de secado. Velocidad de secado en función de la humedad promedio.

TABLA 17
Valores al inicio del periodo de velocidad constante

Prueba	Sección del secador	Humedad promedio kg H ₂ O/kg S.S.	Velocidad de secado kg H ₂ O/hr m ²	Tiempo de secado hr
3	Fondo	0.7280	8.64	0.33
4	Fondo	0.7321	8.06	0.50
5	Fondo	0.7017	8.07	0.37
6	Fondo	0.5937	7.24	0.35
*7	Fondo	0.6635	4.56	0.87
8	Fondo	0.7597	9.25	0.25
*10	Fondo	0.7586	5.64	1.00
*7	Frente	0.4485	1.21	17.50
8	Frente	0.7171	8.60	0.50
*9	Frente	0.5221	0.90	18.00
*10	Frente	0.3741	1.38	22.60

TABLA 18
Valores al inicio del primer periodo de velocidad decreciente

Prueba	Sección del secador	Humedad promedio kg H ₂ O/kg S.S.	Velocidad de secado kg H ₂ O/hr m ²	Tiempo de secado hr
3	Fondo	0.4023	8.64	1.77
4	Fondo	0.5000	8.06	1.41
5	Fondo	0.3670	8.07	1.73
6	Fondo	0.3159	7.24	1.68
7	Fondo	0.2978	4.56	3.62
8	Fondo	0.4744	9.25	1.25
10	Fondo	0.4307	5.64	2.81
7	Frente	0.1520	1.21	25.85
8	Frente	0.4492	8.60	1.49
9	Frente	0.1367	0.90	31.67
10	Frente	0.1693	1.38	27.10

TABLA 19
Valores al inicio del segundo periodo de velocidad decreciente

Prueba	Sección del secador	Humedad promedio kg H ₂ O/kg S.S.	Velocidad de secado kg H ₂ O/hr m ²	Tiempo de secado hr
3	Fondo	0.1286	4.08	3.21
4	Fondo	0.1211	3.40	3.56
5	Fondo	0.0977	3.50	3.30
6	Fondo	0.1400	4.41	2.78
7	Fondo	0.0772	1.58	5.97
8	Fondo	0.1796	5.83	2.52
10	Fondo	0.0426	0.99	7.26
7	Frente	0.0337	0.63	30.15
8	Frente	0.2064	6.03	2.57
9	Frente	0.0165	0.49	37.59
10	Frente	0.0421	0.49	31.84

3.3 OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA.

Como se expuso en la sección 1.4.3, el secado de un material se lleva a cabo por la transferencia de masa del vapor de agua desde la superficie saturada del material a través del flujo de aire. La velocidad de eliminación del vapor de agua está controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación, la cual suministra el calor latente para el líquido. Sólo cuando la velocidad de transferencia de masa es equivalente a la velocidad de transferencia de calor, es posible calcular la velocidad de secado R_c mediante la ecuación de transferencia de calor $h_c(T-T_w)/\lambda_w$ o la ecuación de transferencia de masa $k_y M_B(Y_w - Y)$. Estas condiciones se obtienen, como se mencionó anteriormente, cuando la temperatura de la superficie húmeda del sólido es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Con esta condición, la velocidad de secado permanecerá constante y por lo tanto los coeficientes de transferencia también permanecerán constantes; de ahí la importancia de calcular éstos en la región de velocidad constante de secado.

Con la información de los valores obtenidos de R_c a partir de las pruebas experimentales, así como las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, registradas en el periodo de velocidad constante, se pueden calcular los coeficientes de transferencia de masa y de calor (h_c y k_y).

Coefficiente de transferencia de calor. Dado el valor de la temperatura de bulbo seco de 120 °C y la temperatura de bulbo húmedo de 56 °C (los cuales son valores representativos en el periodo de velocidad constante) así como el valor de R_c de 5.1 kg H₂O/hr m² (obtenido de un promedio de los valores de las pruebas indicadas en la tabla 17), es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor mediante la siguiente ecuación

$$h_c = \frac{\lambda_w R_c}{(T - T_w)} \quad (3.3)$$

Las tablas de vapor⁽¹⁶⁾ indican que a $T_w = 56$ °C el calor latente de evaporación es 2 368 kJ/kg, por lo que sustituyendo los valores anteriores en la ec. (3.3), el coeficiente de transferencia de calor en la sección de fondo del secador resulta ser

$$h_c = \frac{2\,368 \text{ kJ/kg} \times 5.10 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2}{(393 - 329)\text{K}} = 188.70 \frac{\text{kJ}}{\text{hr m}^2 \text{ K}}$$

Coefficiente de transferencia de masa. Para calcular el coeficiente de transferencia de masa se usará la siguiente expresión:

$$k_y = \frac{R_c}{M_B(Y_w - Y)} \quad (3.4)$$

Para la temperatura de bulbo seco de 56 °C y la temperatura de bulbo húmedo de 120 °C, la carta de humedad (fig. 7) permite determinar un valor de la humedad de 0.1140 kg H₂O/kg aire seco. Al prolongar la línea de bulbo húmedo hasta la línea de humedad saturada en la carta de humedad, se obtiene que la humedad saturada es de 0.1460 kg H₂O/kg aire seco. Entonces, al sustituir los valores anteriores en la ec. (3.4) se obtiene el valor del coeficiente de transferencia de masa.

$$k_y = \frac{5.10 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2}{29 \text{ kg aire/kg mol} (0.1460 - 0.1140) \text{ kg H}_2\text{O/kg aire}} = 5.49 \frac{\text{kg mol}}{\text{hr m}^2}$$

Así mismo se calculan los coeficientes de transferencia para la sección del frente del secador. Al igual que en la sección del fondo del secador, se usó un valor representativo de la velocidad de secado constante de 1.29 kg H₂O/kg aire seco (obtenido de un promedio de los valores de la sección del frente de las pruebas indicadas en la tabla 17). En la tabla 20 se indican los coeficientes de transferencia para ambas secciones del secador junto con los datos necesarios para su cálculo.

TABLA 20
Coeficientes de transferencia

Sección del secador	T (K)	T _w (K)	Y kg H ₂ O/kg aire	Y _w	R _c kg H ₂ O/hr m ²	h _c kJ/hr m ² K	k _y kg mol/hr m ²
Fondo	395	329	0.1140	0.1457	5.10	188.70	5.49
Frente	348	326	0.1280	0.1380	1.29	160.97	4.44

Como se puede apreciar en la tabla anterior, ambos coeficientes de transferencia disminuyen en la sección del frente con respecto a la sección del fondo del secador. Lo anterior justifica que para un instante de tiempo dado del proceso de secado, el aire se encuentra más saturado al frente con respecto al fondo del secador (tal como lo demuestran los valores de humedad indicados en la tabla 20). Al comienzo del túnel, en el que el aire hace contacto inicialmente con el pigmento húmedo, la humedad del aire es baja y su temperatura es alta; sin embargo, a medida que el aire pasa a través de los carros de pigmento húmedo éste incrementa su humedad como resultado de la evaporación del agua del pigmento. Pero al mismo tiempo que esto sucede, el aire cede calor latente para que se lleve a cabo la transferencia de masa, de tal manera que el aire debe sufrir una disminución en su temperatura y por lo tanto éste se enfría. Lo anterior se ve reflejado de alguna manera en el coeficiente de transferencia de calor (la velocidad R_c de secado en la región de velocidad constante es proporcional al coeficiente de transferencia de calor cuando no hay transferencia de calor por conducción y radiación).

El coeficiente de transferencia de masa, como se aprecia en la tabla anterior, disminuyó en un 20 % aproximadamente en el frente del secador con referencia a la sección de fondo. Esta disminución es un indicativo de la relación existente entre la velocidad de secado con la fuerza impulsora (T - T_w) para que se lleve a cabo la transferencia, la cual disminuye en esta misma proporción con el incremento de la humedad del aire.

3.5 BALANCE DE MATERIA.

El balance de materia que se expone a continuación, tiene como finalidad el determinar la cantidad de aire que se recircula en el secador. El balance de materia está realizado en base a la cantidad de aire seco. En la figura siguiente se muestran las corrientes que intervienen en el proceso de secado y las variables desconocidas.

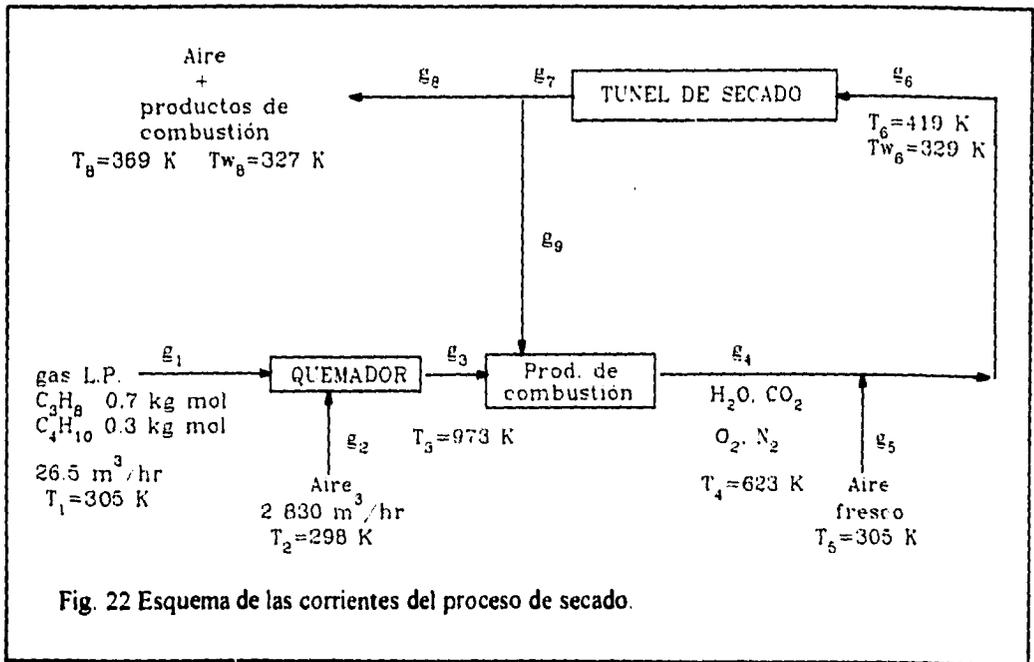


Fig. 22 Esquema de las corrientes del proceso de secado.

En la posición 6, el área libre para el flujo es de 2.6 m² y la velocidad del aire entre las charolas del primer carro es de 1.8 m/s. El flujo volumétrico del aire seco es por lo tanto

$$2.6 \text{ m}^2 \times 1.8 \text{ m/s} \times 3600 \text{ s/hr} = 16\,848 \text{ m}^3/\text{hr}$$

La densidad del aire⁽¹⁷⁾ a 419 K es de 0.82 kg aire/m³, por lo que las moles de aire son

$$g_6 = 16\,848 \text{ m}^3/\text{hr} \times 0.82 \text{ kg aire/m}^3 \times 1 \text{ kg mol aire}/29 \text{ kg aire} = 476.39 \text{ kg mol aire/hr}$$

La cantidad de aire seco en la corriente 7 deberá ser la misma que en la corriente 6:

$$g_6 = g_7$$

En la posición 8, el área de la rendija que permite la salida del aire es de 0.24 m^2 y la velocidad del aire en este punto es de 1.5 m/s . El flujo volumétrico es por consiguiente

$$0.24 \text{ m}^2 \times 1.5 \text{ m/s} \times 3600 \text{ s/hr} = 1296 \text{ m}^3/\text{hr}$$

La densidad del aire a 369 K es de 0.93 kg aire/m^3 y las moles de aire son por lo tanto

$$1296 \text{ m}^3/\text{hr} \times 0.93 \text{ kg aire/m}^3 \times 1 \text{ kg mol aire}/29 \text{ kg aire} = 41.56 \text{ kg mol aire/hr}$$

La cantidad del aire que se recircula se obtendrá entonces por diferencia del flujo del aire entre la corriente 7 y el flujo de aire en la corriente 8:

$$g_7 = g_8 + g_9$$

$$g_9 = g_7 - g_8 = 476.39 - 41.56 = 434.83 \text{ kg mol aire/hr}$$

El porcentaje de aire seco recirculado resulta entonces

$$\% \text{ de aire recirculado} = 100 \frac{g_9}{g_7} = 100 \frac{434.83 \text{ kg mol aire}}{476.39 \text{ kg mol aire}} = 91.3 \%$$

En la corriente 4, la cantidad de aire seco está constituido del aire recirculado y el aire que resulta en exceso de la reacción de combustión:

$$g_4 = g_9 + g_3$$

Por lo tanto, se determinará a continuación la cantidad de aire que no reacciona.

El flujo del combustible es de $26.5 \text{ m}^3/\text{hr}$ y está formado por 70% en peso de C_3H_8 y 30% en peso de C_4H_{10} . La densidad del combustible es de $5.87 \text{ kg gas L.P./m}^3$. Para calcular el peso molecular del combustible se elegirá como base de cálculo 1 kg mol de gas L.P./hr:

Componente	por ciento = kg mol	peso mol.	kg
C_3H_8	0.70	44.0	30.8
C_4H_{10}	<u>0.30</u>	58.0	<u>17.4</u>
Total	1.00		48.2

el peso molecular promedio es entonces $48.2 \text{ kg gas L.P./kg mol}$.

Las moles reales de gas L.P. que entran al proceso son por lo tanto

$$26.5 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 5.87 \frac{\text{kg gas L.P.}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ kg mol gas L.P.}}{48.2 \text{ kg gas L.P.}} = 3.22 \frac{\text{kg mol gas L.P.}}{\text{hr}}$$

Tomando como base de cálculo 3.22 kg mol de gas L.P. se tiene que

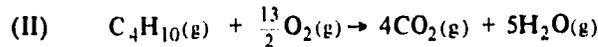
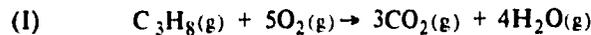
Base de cálculo: 3.22 kg mol de gas L.P./hr

<i>Componente</i>	<i>kg mol/hr</i>
C ₃ H ₈	2.25
C ₄ H ₁₀	<u>0.97</u>
Total	3.22

Las moles de O₂ que entran al quemador (corriente 2) son:

$$3170 \frac{\text{kg aire}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ kg mol aire}}{29 \text{ kg aire}} \times \frac{0.21 \text{ kg mol O}_2}{1 \text{ kg mol aire}} = 22.98 \frac{\text{kg mol O}_2}{\text{hr}}$$

Las reacciones químicas que se verifican en el proceso de combustión son las siguientes



se tienen por lo tanto, cinco balances de materia por componentes (C₃H₈, C₄H₁₀, O₂, CO₂, H₂O).

Para determinar el número de moles finales de cada componente se usa la siguiente expresión

$$n_f = n_i + \nu \epsilon I + \nu \epsilon II \quad (3.5)$$

donde ϵ es el avance de la reacción, ν es el coeficiente estequiométrico y n_f y n_i son el número de moles finales e iniciales, respectivamente. Entonces, de acuerdo a la ec. (3.5), las moles finales de cada componente será

$$\text{moles finales de C}_3\text{H}_8 = \text{moles iniciales de C}_3\text{H}_8 - \epsilon I = 2.25 - \epsilon I$$

$$\text{moles finales de C}_4\text{H}_{10} = \text{moles iniciales de C}_4\text{H}_{10} - \epsilon II = 0.97 - \epsilon II$$

$$\text{moles finales de O}_2 = \text{moles iniciales de O}_2 - 5\epsilon I - (13/2)\epsilon II = 22.98 - 5\epsilon I - (13/2)\epsilon II$$

$$\text{moles finales de CO}_2 = \text{moles iniciales de CO}_2 + 3\epsilon I + 4\epsilon II = 3\epsilon I + 4\epsilon II$$

$$\text{moles finales de H}_2\text{O} = \text{moles iniciales de H}_2\text{O} + 4\epsilon I + 5\epsilon II = 4\epsilon I + 5\epsilon II$$

Considerando que la combustión es completa, se tiene que

$$\begin{aligned} \dot{E}_I &= 2.25 \text{ kg mol C}_3\text{H}_8/\text{hr} \\ \dot{E}_{II} &= 0.97 \text{ kg mol C}_4\text{H}_{10}/\text{hr} \end{aligned}$$

por lo que sustituyendo los valores anteriores en las ecuaciones de los balances por componentes se conocen las moles de O_2 que no reaccionan y las moles de CO_2 y H_2O que se generan.

Las moles de O_2 que no reaccionan resultan ser

$$22.98 \frac{\text{kg mol O}_2}{\text{hr}} - \frac{5 \text{ kg mol O}_2}{\text{kg mol C}_3\text{H}_8} \times 2.25 \frac{\text{kg mol C}_3\text{H}_8}{\text{hr}} - \frac{(13/2) \text{ kg mol O}_2}{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}} \times 0.97 \frac{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}}{\text{hr}} = 5.43 \frac{\text{kg mol O}_2}{\text{hr}}$$

y las moles de CO_2 y H_2O que se generan son

$$\frac{3 \text{ kg mol CO}_2}{\text{kg mol C}_3\text{H}_8} \times 2.25 \frac{\text{kg mol C}_3\text{H}_8}{\text{hr}} + \frac{4 \text{ kg mol CO}_2}{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}} \times 0.97 \frac{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}}{\text{hr}} = 10.63 \frac{\text{kg mol CO}_2}{\text{hr}}$$

$$\frac{4 \text{ kg mol H}_2\text{O}}{\text{kg mol C}_3\text{H}_8} \times 2.25 \frac{\text{kg mol C}_3\text{H}_8}{\text{hr}} + \frac{5 \text{ kg mol H}_2\text{O}}{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}} \times 0.97 \frac{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}}{\text{hr}} = 13.85 \frac{\text{kg mol H}_2\text{O}}{\text{hr}}$$

La cantidad de aire en exceso es por consiguiente

$$5.43 \frac{\text{kg mol O}_2}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ kg mol aire}}{0.21 \text{ kg mol O}_2} = 25.86 \frac{\text{kg mol aire}}{\text{hr}}$$

El porcentaje de exceso de aire se puede determinar usando la siguiente expresión⁽¹⁸⁾

$$\begin{aligned} \% \text{ de exceso de aire} &= 100 \frac{\text{O}_2 \text{ que entra al proceso} - \text{O}_2 \text{ requerido}}{\text{O}_2 \text{ requerido}} \quad (3.6) \\ \% \text{ de exceso de aire} &= 100 \frac{22.98 \text{ kg mol O}_2 - 17.55 \text{ kg mol O}_2}{17.55 \text{ kg mol O}_2} = 30.94 \% \end{aligned}$$

Por lo tanto la cantidad de aire en la posición 4 será

$$g_4 = g_y + g_3 = 434.83 + 25.86 = 460.69 \text{ kg mol aire /hr}$$

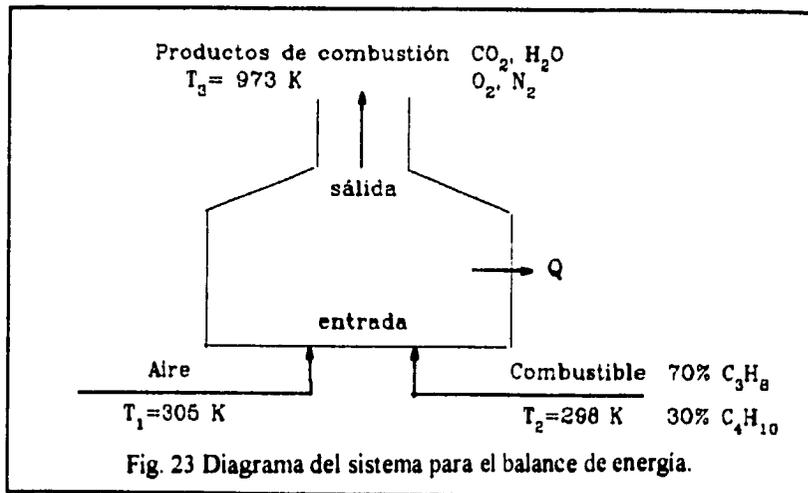
Finalmente la cantidad de aire que entra por las ventanillas se obtiene por diferencia de la corriente 6 y la corriente 4:

$$g_6 = g_4 + g_5$$

$$g_5 = g_6 - g_4 = 476.39 - 460.69 = 15.7 \text{ kg mol aire/hr}$$

3.6 BALANCE DE ENERGÍA.

Calor liberado por el quemador. Una vez resuelto el balance de materia, se está en condiciones de calcular la cantidad de calor liberado por el quemador con la finalidad de obtener la energía disponible para el proceso de secado y precisar las pérdidas de energía que se tienen en el secador. Primeramente se realizará un balance de energía en el quemador; el cual será considerado como un reactor de combustión tal como se indica en el esquema siguiente:

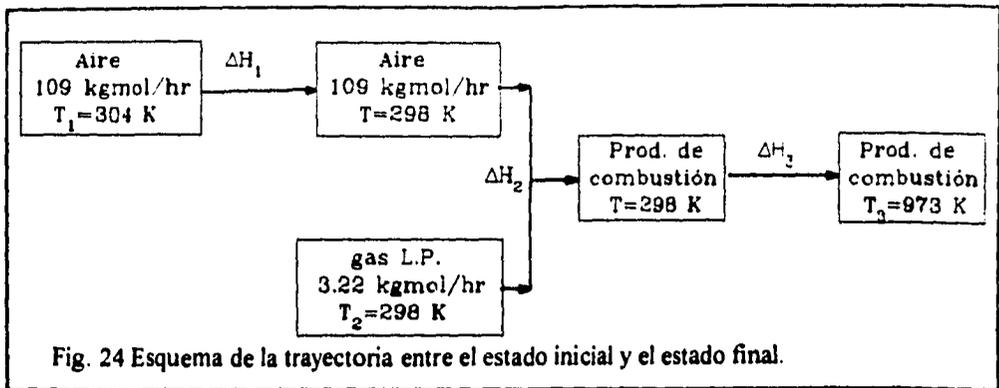


La cantidad de calor que entra al proceso de acuerdo al esquema anterior, estará dado por

$$Q = H_{\text{salida}} - H_{\text{entrada}} \quad (3.7)$$

El problema se traduce a calcular una diferencia de entalpías de acuerdo a la siguiente trayectoria; partiendo desde un estado inicial (corrientes de entrada) y llegando a un estado final (corrientes de salida) se obtiene entonces la siguiente expresión:

$$Q = H_{\text{salida}} - H_{\text{entrada}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad (3.8)$$



El cambio de entalpia en 1 es el cambio de entalpia del aire como reactivo conforme se enfria desde 305 K hasta 298 K. Usando capacidades calorificas medias⁽¹⁹⁾ el cambio de entalpia en 1 es entonces

$$\Delta H_1 = (n_i C_{p_{media}}) \Delta T$$

$$\Delta H_1 = \left[109.31 \frac{\text{kg mol aire}}{\text{hr}} \times 29.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol aire K}} \right] (298 - 305) \text{ K} = -22\,442 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Para calcular el ΔH_2 se debe considerar las reacciones (I) y (II) del balance de materia. Como 2.25 kg mol de C_3H_8 reaccionan siguiendo el mecanismo (I) y 0.97 kg mol de C_4H_{10} reaccionan por el mecanismo (II); y dado que los calores de combustión⁽¹⁹⁾ del propano y del butano a 298 K con agua líquida como producto son $-2\,220\,000$ kJ/kg mol y $-2\,900\,000$ kJ/kg mol, respectivamente; se tiene que

$$\Delta H_2 = 2.25 \frac{\text{kg mol C}_3\text{H}_8}{\text{hr}} \times -2.22 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol C}_3\text{H}_8} + 0.97 \frac{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}}{\text{hr}} \times -2.90 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol C}_4\text{H}_{10}} = -7.76 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Debido a que las reacciones (I) y (II) producen agua gaseosa como producto, el calor latente⁽¹⁶⁾ de 13.85 kg mol H_2O /hr a 298 K debe sumarse a esta cantidad, por lo que el ΔH_2 resulta

$$\Delta H_2 = -7.76 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} + 13.85 \frac{\text{kg mol H}_2\text{O}}{\text{hr}} \times 44\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol H}_2\text{O}} = -7.15 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

El cambio de entalpia en 3 es la entalpia de los productos conforme se calientan desde 298 K hasta 973 K; este cambio de entalpia se calcula de modo similar al cambio de entalpia en 1.

$$\Delta H_3 = \sum_{\text{productos}} (n_i C_{p_{\text{media}}}) \Delta T$$

$$\Delta H_3 = \left[10.63 \frac{\text{kg mol CO}_2}{\text{hr}} \times 46.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol CO}_2 \text{ K}} + 13.85 \frac{\text{kg mol H}_2\text{O}}{\text{hr}} \times 36.40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol H}_2\text{O K}} + 25.86 \frac{\text{kg mol aire}}{\text{hr}} \times 30.54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol aire K}} \right] (973 - 298) \text{ K}$$

$$\Delta H_3 = 1.21 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Por lo tanto, el calor liberado por el quemador según la ec. (3.8) resulta ser:

$$Q = -22\,442 - 7.15 \times 10^6 + 1.21 \times 10^6 = -5.96 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Calor transferido al aire por el quemador. La cantidad de calor transferido al aire de secado por el medio de calentamiento se puede estimar mediante la ec. (1.2)

$$q_{h-g} = m_g (1 + y) C_{s_i} (T_{gi} - T_{gf}) \quad (1.2)$$

Las condiciones del aire al inicio del proceso de secado serán las condiciones de la corriente 6, ver la figura 22.

$$T_6 = 419 \text{ K}$$

$$T_{w6} = 329 \text{ K}$$

$$Y_6 = 0.10 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire}$$

El volumen húmedo se calcula mediante la ec. (1.10)

$$V_H = [0.00283 + 0.00456 (0.10)] (427) = 1.38 \text{ m}^3 / \text{kg aire}$$

por lo que la velocidad másica del aire de secado en la entrada del túnel de secado es

$$m_g = 16\,850 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{\text{kg aire}}{1.38 \text{ m}^3} = 12\,240 \frac{\text{kg aire}}{\text{hr}}$$

La fracción mol del vapor en el aire en la entrada del túnel de secado se determina con la ec. (1.3) con $Y_i = 0.10 \text{ kg H}_2\text{O/kg aire}$, de manera que la fracción mol resulta ser $y = 0.1387$.

La capacidad calorífica del aire húmedo usando la ec (1.9) es

$$C_{s_i} = 1.005 + 1.884 (0.1) = 1.19 \text{ kJ/kg aire K}$$

La temperatura del aire al inicio del proceso de secado T_{gi} se considerará como la temperatura de mezcla entre las corrientes g_3 y g_8 ; y la temperatura del aire al salir del proceso de secado T_{gf} corresponderá a la temperatura de bulbo seco de la corriente g_6 . Por lo tanto $T_{gi} = 623 \text{ K}$ y $T_{gf} = 369 \text{ K}$

Así, la cantidad de calor transferido al aire por el medio de calentamiento de acuerdo a la ec. (1.2) resulta ser:

$$q_{h-g} = 12\,240 \frac{\text{kg aire}}{\text{hr}} \times (1 + 0.1387) \times 1.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire K}} \times (623 - 369) \text{ K} = 4.21 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Calor transferido al sólido por el aire. El calor necesario para secar el material húmedo involucra el calentamiento del sólido y la humedad a la temperatura de vaporización; la vaporización del líquido; y el calentamiento del sólido y el vapor de agua a la temperatura final de secado. Esta cantidad de calor puede estimarse con la ec. (1.1)

$$\frac{q_{g-s}}{m_s} = C_{p_s} (T_{sf} - T_{si}) + X_i C_{p_L} (T_{vap} - T_{si}) + (X_i - X_f) \lambda_{vap} + X_f C_{p_L} (T_{sf} - T_{vap}) + (X_i - X_f) C_{p_v} (T_{vf} - T_{vap}) \quad (1.1)$$

Para efectuar este cálculo, se considerará un lote típico de secado que consta de 18 carros de pigmento A. 1522 (el peso del sólido seco/carro es 250 kg) y 6 carros de pigmento R. 3022 (el peso del sólido seco/carro es de 360 kg). Se usará el tiempo actual promedio de secado de 46 hr; por lo tanto, la masa de sólido seco por unidad de tiempo resulta

$$m_s = \left(\frac{18 \text{ carros A. 1522}}{1 \text{ lote}} \times \frac{250 \text{ kg}}{1 \text{ carro A. 1522}} + \frac{6 \text{ carros R. 3022}}{1 \text{ lote}} \times \frac{360 \text{ kg}}{1 \text{ carro R. 3022}} \right) \frac{1 \text{ lote}}{46 \text{ hr}} = 145 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Los datos referidos al sólido son los siguientes:

$$X_i = 0.8249 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$X_f \cong 0$$

$$C_{p_s} = 0.36 \text{ kJ/kg K}$$

$$T_{si} = 288 \text{ K}$$

$$T_{sf} = 403 \text{ K}$$

La temperatura de vaporización es la temperatura de bulbo húmedo del aire, por lo tanto, $T_{w7} = T_{vap} = 329 \text{ K}$ y el calor latente de vaporización⁽¹⁶⁾ a esta temperatura es de 2370 kJ/kg H_2O . La temperatura final del vapor es la temperatura del aire al final del proceso de secado, por lo tanto $T_7 = T_{7v} = 369 \text{ K}$. La capacidad calorífica del agua líquida se evaluó a la temperatura

promedio de T_{si} y T_{vap} , en tanto que la capacidad calorífica del vapor de agua se calculó a la temperatura promedio de T_{vap} y T_{vf} .

Ya que el valor de la humedad final es despreciable, el cuarto término del lado derecho de la ec. (1.1) se cancela, por lo que la cantidad de calor por unidad de masa del sólido es

$$\frac{q_{g-s}}{m_s} = 0.36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg S.S. K}} \times (403-288) \text{ K} + 0.8249 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg S.S.}} \times 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O K}} \times (329-288) \text{ K} + (0.8249-0.0) \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg S.S.}} \times 2370 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} + (0.8249-0.0) \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg S.S.}} \times 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O K}} \times (369-329) \text{ K}$$

$$\frac{q_{g-s}}{m_s} = (41.40 + 141.37 + 1955.00 + 137.92) = 2276.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg S.S.}}$$

Se observa que en efecto, la mayor cantidad de calor requerido es el calor necesario para vaporizar el líquido. La cantidad de calor transferido al sólido por unidad de tiempo de acuerdo a la ec. (1.1) es por consiguiente

$$q_{g-s} = 2276.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg S.S.}} \times 145 \frac{\text{kg S.S.}}{\text{hr}} = 330\,020 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

Pérdidas de calor a través de las paredes del secador. El cálculo de las pérdidas de calor en las paredes del secador se estableció con la siguiente ecuación

$$q_p = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{L/(a k)} \quad (3.9)$$

donde q_p es el flujo de calor a través de la pared; T_{int} y T_{ext} son las temperaturas del interior y exterior de la pared, respectivamente; L es el espesor del material; y a es el área de transferencia de calor. Los valores de las conductividades de los materiales que constituyen la pared se indican en la tabla siguiente (no se consideró el recubrimiento de poliuretano).

TABLA 22
Conductividades

Material	Conductividad kJ/hr m ² K
Ladrillo para construcción	2.67
Cemento	1.04
Acero	62.16

Finalmente el flujo de calor en las paredes se indicará como un porcentaje establecido con referencia a la cantidad de calor que libera el quemador. En las tabla 21 se indica el porcentaje de las pérdidas de calor en el secador.

TABLA 21
Pérdidas de calor en el secador 2

Sección del secador	T_{ext} (K)	T_{int} (K)	Área (m²)	Espesor (m)	q_p (kJ/hr)	% de las pérdidas de calor
Paredes						
Pared lateral izq.	383	311	25.4	0.15	21 400.0	
Techo	383	313	44.7	0.15	34 300.0	
Pared lateral der. (sección 1)	398	321	6.8	0.15	16 000.0	
Pared lateral der. (sección 2)	383	309	19.8	0.15	8 000.0	
Pared del fondo	378	308	8.3	0.15	6 300.0	
Pared del frente	388	322	3.6	0.15	3 400.0	
Total			95.0		89 500.0	2.0
Puertas metálicas						
Puerta principal	330	327	4.3	0.05	10 500.0	
Puerta lateral	373	371	1.8	0.02	10 000.0	
Total			5.9		20 500.0	0.5

Como se puede observar en la tabla 21, las pérdidas de calor a través de las paredes del secador no son significativas. Se puede concluir entonces que la mayor parte del calor liberado por el quemador se transfiere a la corriente principal de aire.

3.7 RESUMEN DE DATOS DE OPERACIÓN DEL SECADOR.

En la tabla siguiente se indican a manera de resumen los datos de funcionamiento del secador.

TABLA 22
Resumen de datos principales

		<i>Secador construido de ladrillo con circulación de atrás hacia adelante</i>
Capacidad		24 carros
Charolas/carro		20 charolas
Charolas		480 charolas superficie: 235 m ²
Circulación del aire	Modo	<pre> graph LR V[VENTI-LADOR] --> T[TUNEL DE SECADO] T --> M[MEDIO DE CALENTAMIENTO] M --> V T --> S[Salida lateral] </pre>
	Volumen ventilador de proceso	17 000 m ³ /hr 4.72 m ³ /s
Velocidad media sobre las charolas	1.8 m/s	
Distribución uniforme	Regular	
Quemador	Emplazamiento	Interno
	Capacidad calorífica	5 900 000 kJ/hr
	Combustible	Gas L.P.
	Consumo de gas L.P.	26.5 lt/hr
Potencia instalada		21 HP
Velocidad constante de secado a 373 K y 91% de recirculación	Fondo del secador	5.10 kg H ₂ O/hr m ²
	Frente del secador	1.29 kg H ₂ O/hr m ²

Conclusiones

Al realizar el análisis de los gases de combustión en el secador, se observa que el gas que se emplea como medio para eliminar la humedad del pigmento es esencialmente aire (tabla 4).

El porcentaje del aire recirculado que se tiene en el secador y el cual se determinó mediante el balance de materia, se encuentra en el orden que se recomienda en la bibliografía^(2,9) para este tipo de secadores y que es usualmente del rango del 80 al 95% del aire de secado.

El ajuste de los datos experimentales de humedad con respecto al tiempo de secado mediante una función que los represente adecuadamente; en este caso mediante una función de tipo polinomial, resulta útil y práctico cuando se desea estimar el tiempo de secado del lote de pigmento húmedo bajo condiciones de operación similares a las cuales se obtuvo el ajuste.

Si el secador opera a su máxima capacidad de carros, se presentan condiciones distintas durante el proceso de secado para las secciones que fueron denominadas como fondo y frente del secador; tal como se aprecia en las figuras referentes a las pruebas no. 7, 9 y 10. Se concluye por lo tanto, que no existen condiciones constantes de secado en el túnel del secador cuando éste opera a su máxima capacidad de carros.

En la prueba no. 8 se observa que para ambas secciones del secador (fondo y frente) se presentan velocidades de secado similares cuando el secador operó aproximadamente con la mitad de carros de su capacidad. Lo anterior indica que se puede conseguir un tiempo mínimo de secado si se introduce una cantidad de doce carros como mínimo al secador; con lo cual se esperaría obtener un tiempo de secado de quince horas aproximadamente. Esta alternativa resulta factible si se secan seis lotes de pigmento semanalmente, de tal manera que la cantidad de producto seco sea la misma que la que se obtiene actualmente. Si se realiza una comparación económica entre el costo del proceso de secado usando la condición anterior (doce carros) con la que se emplea actualmente (24 carros), se obtiene una reducción del costo del proceso de secado en un 32 % aproximadamente (ver el apéndice D), esto es:

Costo actual/semana (3 lotes de 24 carros/semana) = 2 700 N\$

Costo supuesto/semana (6 lotes de 12 carros/semana) = 1 900 N\$

Con esta modificación en el tiempo de secado que se tiene con un lote de pigmento de doce carros en el secador, se obtendría la misma cantidad de pigmento seco que la que se produce actualmente; sin embargo, el consumo del combustible y de electricidad se vería reducido.

El cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y de calor, ha sido muy importante pues ha permitido soportar con fundamento teórico el comportamiento observado experimentalmente en las secciones de fondo y frente del secador.

Las pérdidas de calor a través de las paredes y las puertas metálicas del secador no son considerables; sin embargo, como medida de seguridad es recomendable aislar las secciones metálicas del secador por las altas temperaturas que éstas alcanzan durante el proceso de secado.

Finalmente, el tiempo actual del proceso resulta ser el adecuado si el secador opera únicamente a su máxima capacidad de carros de pigmento. Sin embargo; como se mencionó anteriormente, se pueden disminuir los costos del proceso si se operara con la mitad de la capacidad de carros del secador; de tal manera que el tiempo de secado que se tenga, corresponda al tiempo mínimo de operación.

Referencias

- 1 Dittman, F.W., *How to Classify a Drying Process*. Chem. Eng., vol. 84, no. 1-3 , pág. 106, (1977).
- 2 Perry, J.H., Green, D.H., y Moloney, J.D., *Manual del Ingeniero Químico, Tomo V*. McGrawHill-Interamericana, México, (1992).
- 3 Sloan, C. E., *Drying Systems and Equipment*. Chem. Eng., vol. 74, no. 12-13, pág. 169, (1967).
- 4 Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*. McGraw-Hill, U. S. A., (1988).
- 5 McCabe, L.W., Smith, J.C., and Harriott, P., *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, Singapore, (1985).
- 6 Sherwood, T.K., *The Drying of Solids I*. Ind. Eng. Chem., vol. 21, no. 1, pág. 12, (1929).
- 7 Ocon, J., y Tojo, G., *Problemas de Ingeniería Química, Tomo II*. Aguilar, Madrid, (1972).
- 8 Sherwood, T.K., *The Drying of Solids II*. Ind. Eng. Chem., vol. 21, no. 10, pág. 976, (1929).
- 9 Foust, A.S., y Wenzel., L.A., *Principios de Operaciones Unitarias*. CECSA, México, (1972).
- 10 Geankoplis, C.J., *Transport Processes and Unit Operations*. Allyn and Bacon, U. S. A., (1991).
- 11 Sherwood, T.K., *The Drying of Solids III*. Ind. Eng. Chem., vol 22, no. 2, pág. 132, (1930).
- 12 Sherwood, T.K., *The Drying of Solids IV*. Ind. Eng. Chem., vol. 24, no. 3, pág. 307, (1932).
- 13 Comings, E.W., and Sherwood, T.K., *The Drying of Solids VII*. Ind. Eng. Chem., vol. 26, no. 10, pág. 1096, (1934).
- 14 Tsao, G.T., and Wheelock, T.D., *Drying Theory and Calculation*. Chem. Eng., vol. 24, no. 12-13, pág. 201, (1967).

- 15 Chapra, S.C., and Canale,R.P., *Numerical Methods for Engineer with Personal Computer Application*. McGraw-Hill, U. S. A., (1985).
- 16 The Electrical Research Association, *Tablas de vapor*. Alfaomega, México, (1988).
- 17 Raznjevic, K., *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*. McGraw-Hill, U.S.A., (1976).
- 18 Himmelblau, D. M., *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*. Prentice-Hall, U.S.A., (1982).
- 19 Smith, J. M., and Van Ness, H.C., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill, U.S.A, (1980).

APENDICE A
SECCIONES Y PARTES DEL SECADOR

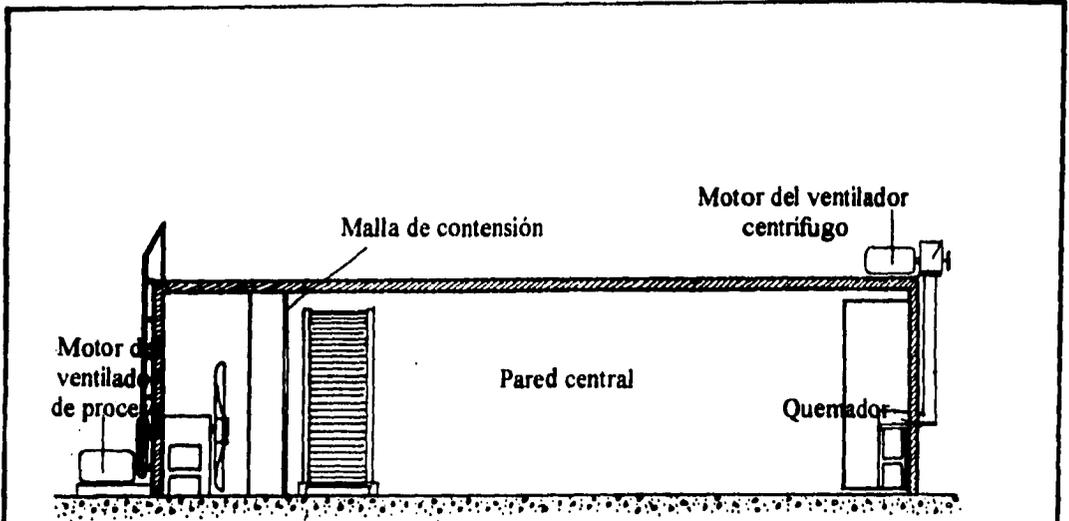


Fig. A1 Corte longitudinal del secador.

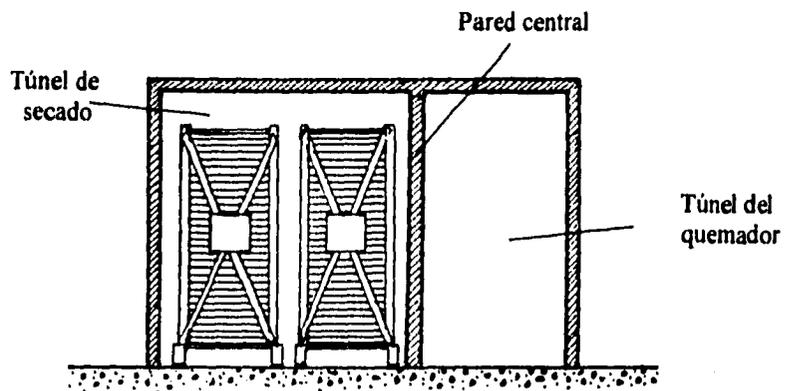


Fig. A2 Corte frontal del secador.

APÉNDICE A

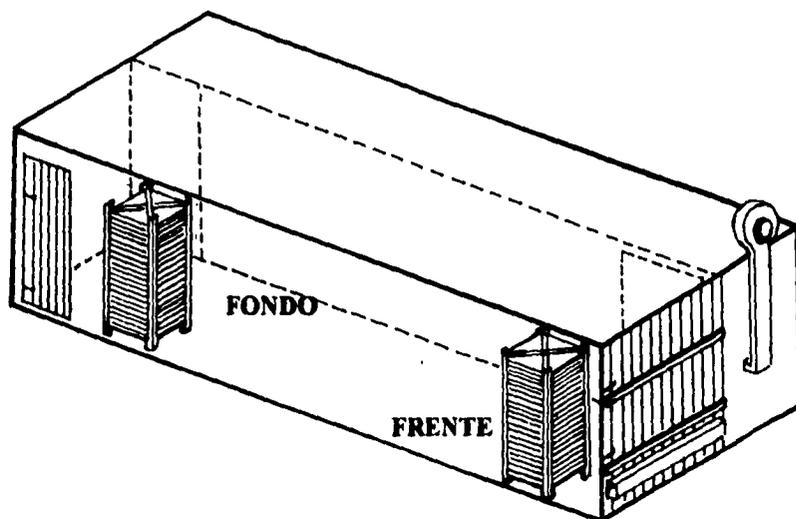


Fig. A3 Posición de los carros de prueba en el secador.

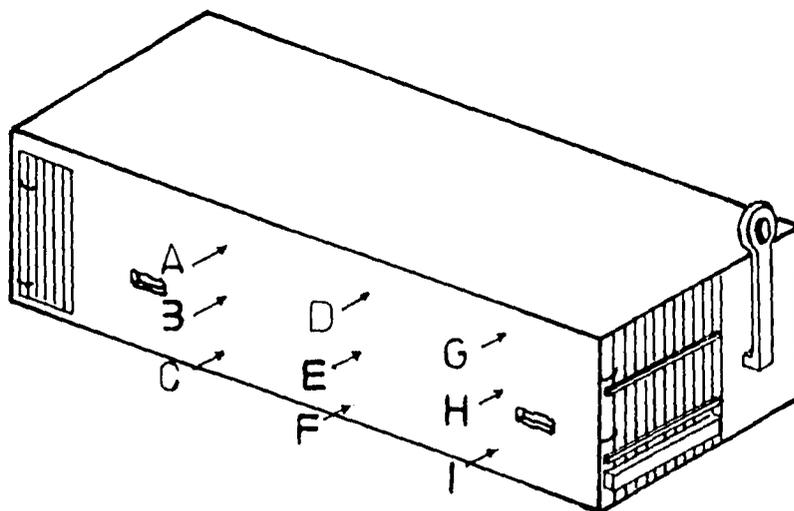


Fig. A4 Orificios para la determinación de temperaturas.

APÉNDICE B OBTENCION DE LAS CURVAS DE SECADO

Las gráficas del contenido de humedad en función del tiempo de secado, indicadas desde las figuras 8 hasta la 17, se determinaron empleando las ecs. (1.13) y (1.14).

Los datos de peso obtenidos en las pruebas de secado, representan el peso del sólido húmedo y el peso de la charola de prueba; por lo tanto, para obtener el contenido de humedad con la ec. (1.13) es necesario restar el peso de la charola de muestra (0.60 kg) a cada dato de peso obtenido.

El valor del contenido de humedad en el equilibrio X^* se consideró despreciable y por lo tanto la ec. (1.14) no se aplicó.

Como ejemplo de cálculo se emplean los datos de la prueba no. 7 realizada en el fondo del secador (ver tabla 12b).

En el instante $t = 0$ horas el peso de la muestra es $W_T = 5.000$ kg, y en el tiempo $t = 16.00$ horas (cuando ya no hay variación de la humedad) el peso es de $W_T = 2.921$ kg. El primer procedimiento es no considerar el peso de la charola en ambos valores

$$W = (5.000 - 0.60) \text{ kg} = 4.400 \text{ kg}$$

y el peso del sólido seco W_s será

$$W_s = (3.096 - 0.60) \text{ kg} = 2.496 \text{ kg}$$

Con la ec. (1.13) se determina entonces el contenido de humedad

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \tag{1.13}$$

Así, en el instante $t = 0$ horas la humedad resulta ser

$$X_{t=0} = \frac{4.400 - 2.496}{2.496} = 0.7628 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg S.S.}}$$

Los valores calculados para los demás datos de humedad se indican en la quinta columna de la tabla siguiente.

TABLA B1
Valores de la velocidad de secado de la prueba no. 7

#	Tiempo t (hr)	Peso total WT (kg)	Peso neto W (kg)	Humedad kg H ₂ O/kg S.S.	Δt (hr)	Humedad promedio kg H ₂ O/kg S.S.	Velocidad de secado kg H ₂ O/hr m ²
0	0.00	5.000	4.400	0.7628	0.25	0.7534	2.57
1	0.25	4.953	4.353	0.7440	0.25	0.7328	3.07
2	0.50	4.897	4.297	0.7215	0.25	0.7079	3.73
3	0.75	4.829	4.229	0.6943	0.25	0.6789	4.22
4	1.00	4.752	4.152	0.6635	0.25	0.6474	4.38
5	1.25	4.672	4.072	0.6314	0.25	0.6158	4.27
6	1.50	4.594	3.994	0.6001	0.25	0.5839	4.44
7	1.75	4.513	3.913	0.5678	0.25	0.5515	4.44
8	2.00	4.632	3.832	0.5352	0.25	0.5182	4.66
9	2.25	4.347	3.747	0.5012	0.25	0.4838	4.77
10	2.50	4.260	3.660	0.4663	0.25	0.4495	4.60
11	2.75	4.176	3.576	0.4327	0.25	0.4191	4.55
12	3.00	4.0093	3.493	0.3994	0.25	0.3820	4.77
13	3.25	4.006	3.406	0.3646	0.25	0.3471	4.77
14	3.50	3.919	3.319	0.3297	0.25	0.3135	4.44
15	3.75	3.838	3.238	0.2973	0.25	0.2812	4.38
16	4.00	3.758	3.158	0.2652	0.25	0.2516	3.73
17	4.25	3.690	3.090	0.2380	0.25	0.2231	4.05
18	4.50	3.616	3.016	0.2083	0.25	0.1951	3.62
19	4.75	3.550	2.950	0.1819	0.25	0.1703	3.18
20	5.00	3.492	2.892	0.1586	0.25	0.1468	3.23
21	5.25	3.433	2.833	0.1350	0.25	0.1236	3.12
22	5.50	3.376	2.776	0.1122	0.25	0.1042	2.19
23	5.75	3.336	2.736	0.0961	0.25	0.0891	1.92
24	6.00	3.301	2.701	0.0821	0.25	0.0755	1.81
25	6.25	3.268	2.6268	0.0689	0.25	0.0643	1.26
26	6.50	3.245	2.645	0.0597	0.25	0.0547	1.37

#	Tiempo t (hr)	Peso total WT (kg)	Peso neto W (kg)	Humedad kg H ₂ O/kg S.S.	Δt (hr)	Humedad promedio kg H ₂ O/kg S.S.	Velocidad de secado kg H ₂ O/hr m ²
26	6.50	3.245	2.645	0.0597	0.25	0.0547	1.37
27	6.75	3.220	2.620	0.0497	0.25	0.0463	0.93
28	7.00	3.203	2.603	0.0429	0.25	0.0397	0.88
29	7.25	3.187	2.587	0.0364	0.25	0.0336	0.77
30	7.50	3.173	2.573	0.0308	0.25	0.0284	0.66
31	7.75	3.161	2.561	0.0260	0.25	0.0240	0.55
32	8.00	3.151	2.551	0.0220	1.00	0.0220	0.42
33	9.00	3.120	2.520	0.0096	1.00	0.0096	0.23
34	10.00	3.103	2.503	0.0028	1.00	0.0020	0.05
35	11.00	3.099	2.499	0.0012	4.00	0.0006	0.01
36	16.00	3.096	2.496	0.0000			

APÉNDICE C
FUNCIONES DE PREDICCIÓN DE TIEMPOS DE SECADO

Las funciones para predecir los tiempos de secado que se indican en el apartado 3.1 y que son funciones promediadas sólo son aplicables en condiciones de operación lo más cercano posibles a las condiciones a las cuales fueron realizadas las pruebas experimentales. Estas funciones fueron obtenidas de un promedio de cada función de las pruebas no. 7, 9 y 10. Se trabajó únicamente con estas pruebas por ser éstas en las que la evaluación experimental se inició paralelamente al secado del lote, además de que estas pruebas fueron las únicas en las que el secador se encontraba a su máxima capacidad de carros de pigmento.

El ajuste de los datos experimentales de humedad en función del tiempo de secado para cada una de estas pruebas se indican en la tablas siguientes.

TABLA C1

Valores de las constantes de las ecuaciones polinomiales en la sección del fondo del secador

Prueba no.	α	β	γ	r
7	0.8185	- 0.1740	0.0091	0.9942
10	0.9554	- 0.1740	0.0110	0.9923
Promedio	0.8869	- 0.1893	0.0101	

TABLA C2

Valores de las constantes de las ecuaciones polinomiales en la sección del frente del secador

Prueba no.	α	β	γ	δ	Tiempo (hr) rango
7	0.7089	0.0079	- 0.0018	2.7E-05	0.9973
9	0.7976	0.0055	- 0.0014	2.4E-05	0.9975
10	0.9094	0.0055	- 0.0019	2.7E-05	0.9977
Promedio	0.8053	0.0063	- 0.0017	2.6E-05	

En las figuras C1, C2 y C3 se muestran las curvas obtenidas mediante estas funciones para cada prueba..

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Prueba No. 7

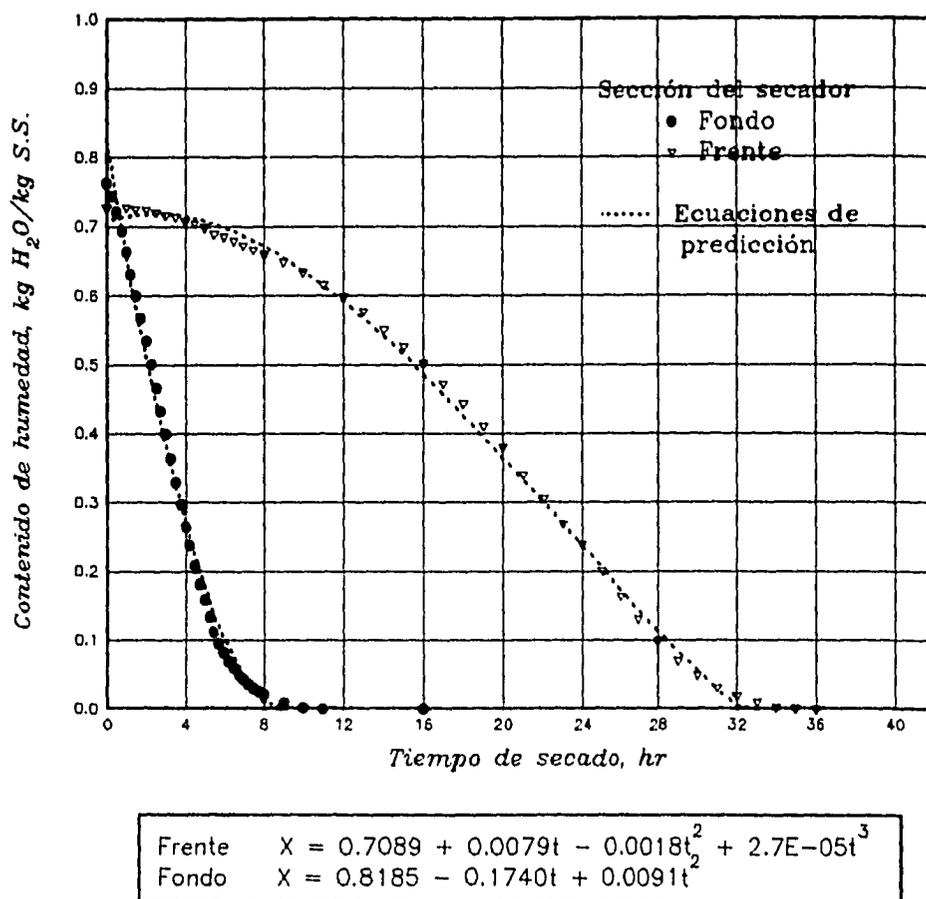
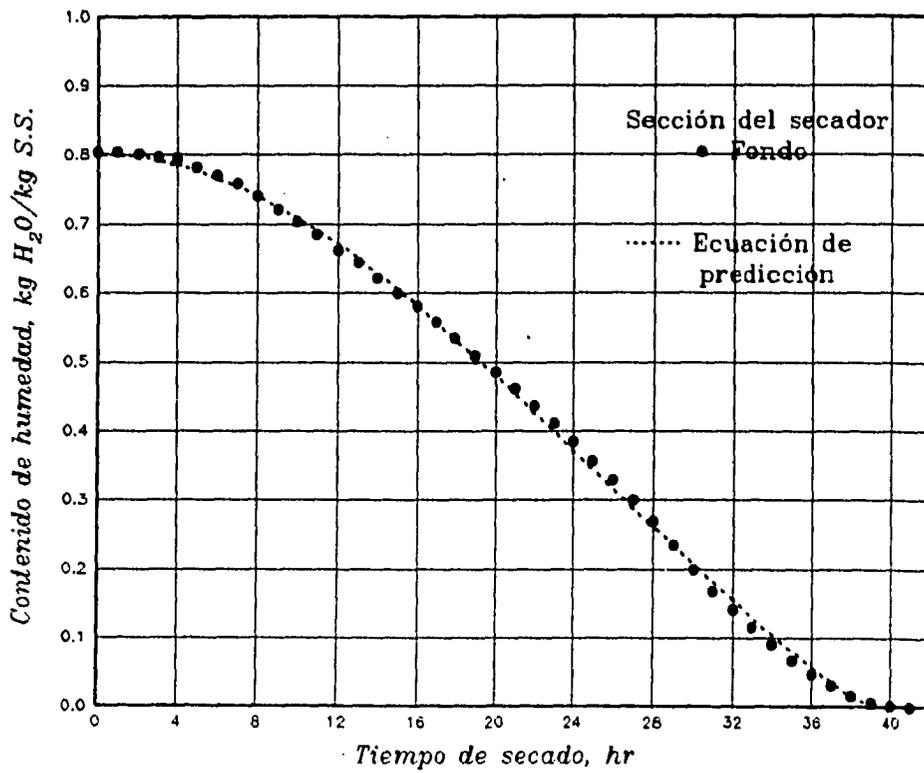


Fig. C1 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

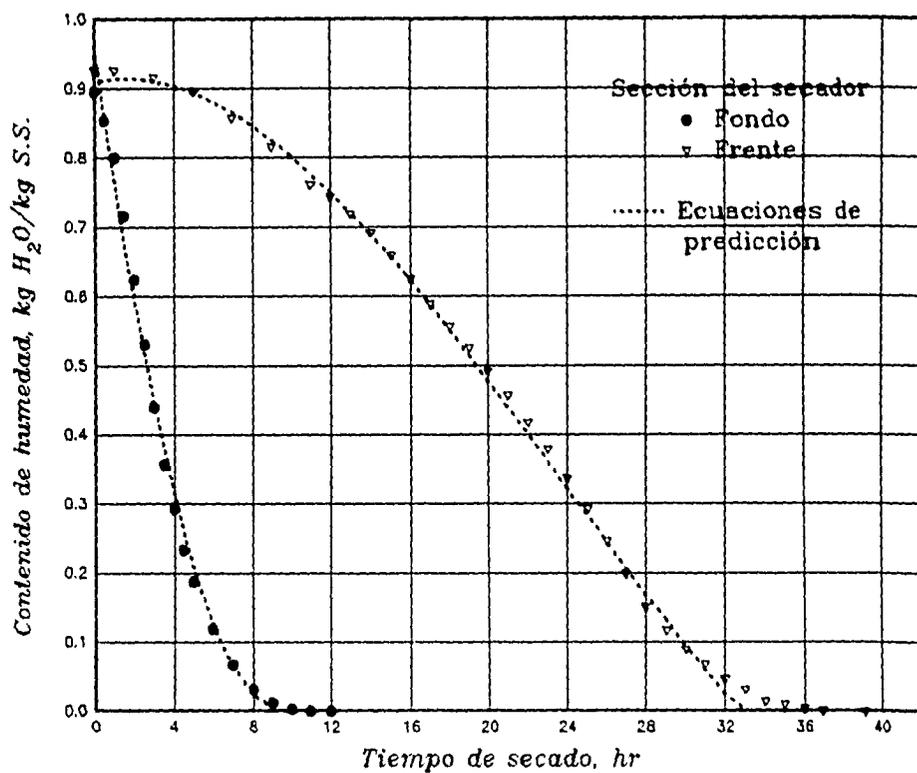
Prueba No. 9



$$\text{Frente } X = 0.7976 + 0.0055t - 0.0014t^2 + 2.4E-05t^3$$

Fig. C2. Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

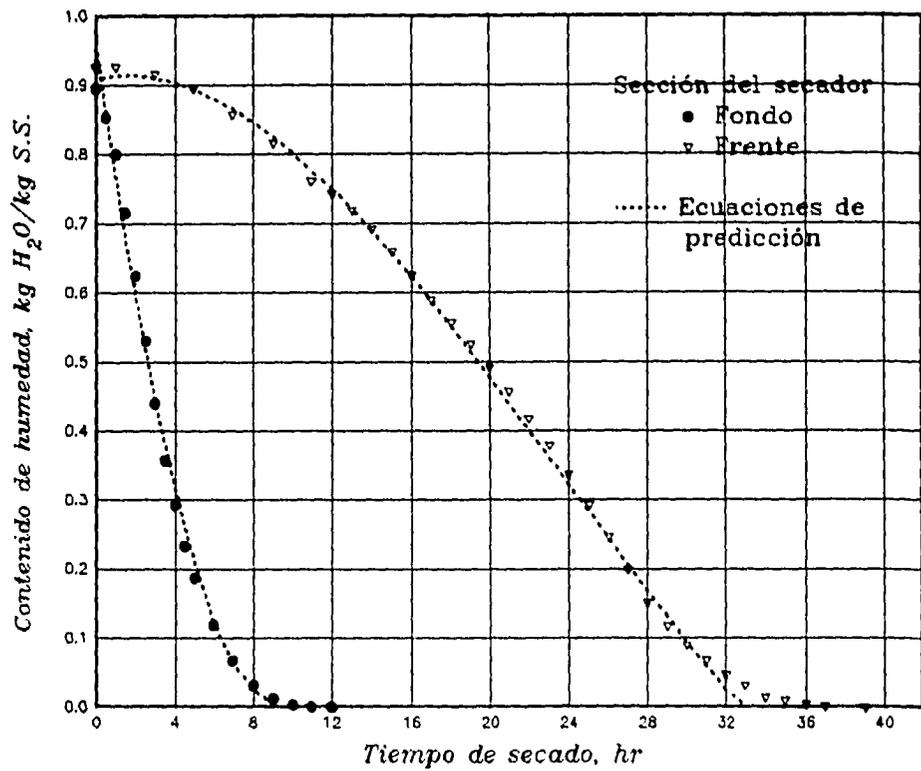
Prueba No. 10



Frente	$X = 0.9094 + 0.0055t - 0.0019t^2 + 2.7E-05t^3$
Fondo	$X = 0.9554 - 0.2046t + 0.0101t^2$

Fig. C3 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

Prueba No. 10



Frente	$X = 0.9094 + 0.0055t - 0.0019t^2 + 2.7E-05t^3$
Fondo	$X = 0.9554 - 0.2046t + 0.0101t^2$

Fig. C3 Curva de secado. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

APÉNDICE D EVALUACIÓN ECONOMICA

El costo actual del proceso de secado para un lote se expuso en la sección 2.2.4; sin embargo, con el fin de facilitar el análisis económico con la propuesta de operación que se recomienda en las conclusiones, éste se presenta nuevamente en la siguiente tabla.

TABLA DI
Condiciones Actuales de Secado

Tiempo promedio de secado de un lote	46 hr	
Lotes secados por semana	3 lotes	
Tiempo de operación de el secador por semana		138 hr
Carros secados por lote	24 carros	
Peso promedio del pigmento seco por carro	270 kg	
Producción de pigmento seco por lote	6 500 kg	
Producción de pigmento seco por semana		18 000 kg
Costo de operación por lote	900 N\$	
Costo de operación por semana		2 700 N\$

La propuesta que se hace radica en modificar el método de operación del secador. La sugerencia consiste en disminuir el número de los carros de pigmento a secar por lote, con la finalidad de obtener un sólo tiempo de secado en el túnel y de esta manera se tendrían condiciones constantes de secado. Esta sugerencia se fundamenta principalmente en base a los resultados observados en la prueba no. 8. El método resulta ser aplicable, siempre y cuando se sequen seis lotes de material por semana; con lo que se lograría secar la misma cantidad de producto que la que se obtiene actualmente con tres lotes. Debido a que el tiempo de operación podría ser inferior a las 15 horas, resulta factible realizar la operación de secado (cargar, secar y descargar el secador) en un sólo día y por lo tanto, se podrían secar seis lotes por semana.

El costo del método de operación que se sugiere se presenta en la tabla siguiente. En la evaluación de los costos por concepto de mano de obra se consideró que el tiempo requerido disminuye proporcionalmente con la cantidad de carros que se manejen.

TABLA D2
Condiciones Propuestas de Secado

Tiempo promedio de secado de un lote	15 hr	
Lotes secados por semana	6 lotes	
Tiempo de operación del secador por semana		90 hr
Número de carros por lote	12 carros	
Peso promedio del pigmento seco por carro	270 kg	
Producción de pigmento seco por lote	3 240 kg	
Producción de pigmento seco por semana		18 000 kg
Costos de operación		
Servicios		
Costo de combustible/lote	200 N\$	
Costo de combustible por semana	1 200 N\$	
Costo de electricidad/lote	58 N\$	
Costo total de electricidad por semana	350 N\$	
Mano de obra		
Costo de mano de obra/lote	60 N\$	
Costo de mano de obra por semana	360 N\$	
Costo de operación por semana		1 900 N\$

Por otro lado si con la modificación anterior se obtienen condiciones constantes de secado en el túnel del secador, entonces se puede utilizar también la ec. (1.31) para predecir el tiempo de secado para un lote de 12 carros:

$$t_s = t_c + t_d = \frac{W_s}{A} \left(\frac{X_1 - X_c}{R_c} + \frac{X_c - X'}{R_c - R'} \ln \frac{R_c}{R'} \right) \quad (1.31)$$

Usando los valores obtenidos en la prueba 7 (ver tablas 17, 18 y 19); la cual se realizó en el fondo del túnel de secado y se inicio junto con el secado del lote, se tiene que

$$X_1 = 0.7628 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$X_c = 0.2978 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$R_c = 4.56 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

$$X' = 0.0337 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$R' = 0.63 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

$$R_2 = 0.01 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

De esta manera, si por ejemplo el lote de secado consiste de 8 carros de pigmento A. 1922 y 4 carros de pigmento R. 3022, la masa del sólido seco W_s resultaría

TABLA D2
Condiciones Propuestas de Secado

Tiempo promedio de secado de un lote	15 hr	
Lotes secados por semana	6 lotes	
Tiempo de operación del secador por semana		90 hr
Número de carros por lote	12 carros	
Peso promedio del pigmento seco por carro	270 kg	
Producción de pigmento seco por lote	3 240 kg	
Producción de pigmento seco por semana		18 000 kg
Costos de operación		
Servicios		
Costo de combustible/lote	200 N\$	
Costo de combustible por semana	1 200 N\$	
Costo de electricidad/lote	58 N\$	
Costo total de electricidad por semana	350 N\$	
Mano de obra		
Costo de mano de obra/lote	60 N\$	
Costo de mano de obra por semana	360 N\$	
Costo de operación por semana		1 900 N\$

Por otro lado si con la modificación anterior se obtienen condiciones constantes de secado en el túnel del secador, entonces se puede utilizar también la ec. (1.31) para predecir el tiempo de secado para un lote de 12 carros:

$$t_s = t_c + t_d = \frac{W_s}{A} \left(\frac{X_1 - X_c}{R_c} + \frac{X_c - X'}{R_c - R'} \ln \frac{R_c}{R'} \right) \quad (1.31)$$

Usando los valores obtenidos en la prueba 7 (ver tablas 17, 18 y 19); la cual se realizó en el fondo del túnel de secado y se inicio junto con el secado del lote, se tiene que

$$X_1 = 0.7628 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$X_c = 0.2978 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$R_c = 4.56 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

$$X' = 0.0337 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$R' = 0.63 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

$$R_2 = 0.01 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2$$

De esta manera, si por ejemplo el lote de secado consiste de 8 carros de pigmento A. 1922 y 4 carros de pigmento R. 3022, la masa del sólido seco W_s resultaría

$$W_s = \frac{8 \text{ carros A. 1922}}{1 \text{ lote}} \times \frac{250 \text{ kg S.S.}}{1 \text{ carro A. 1922}} + \frac{4 \text{ carros R. 3022}}{1 \text{ lote}} \times \frac{360 \text{ kg S.S.}}{1 \text{ carro R. 3022}}$$

$$W_s = 3\,440 \frac{\text{kg S.S.}}{\text{lote}}$$

y el área expuesta al secado A sería

$$A = 12 \text{ carros/lote} \times 20 \text{ charolas/carro} \times 0.49 \text{ m}^2/\text{charola}$$

$$A = 117.6 \text{ m}^2/\text{lote}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ec. (1.31) se obtiene entonces el tiempo total de secado t_s del lote

$$t_s = \frac{3\,440 \text{ kg S.S./lote}}{117.6 \text{ m}^2/\text{lote}} \left[\frac{(0.7628-0.2978) \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}}{4.56 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2} + \frac{(0.2978-0.0337) \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}}{(4.56-0.63) \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2} \times \ln \frac{4.56 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2}{0.01 \text{ kg H}_2\text{O/hr m}^2} \right]$$

$$t_s = 29.25 \frac{\text{kg S.S.}}{\text{m}^2} \times 0.39 \frac{\text{hr m}^2}{\text{kg S.S.}} = 11.41 \text{ hr}$$