

## DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO MEDIANTE UN SECADOR DE BANDEJA, EN EL PROCESO DE BENTONITA ACTIVADA CON $H_2SO_4$ A NIVEL PILOTO

## DETERMINATION OF DRYING CURVES USING BATCH TRAY DRYING FOR ACTIVATED BENTONITE WITH $H_2SO_4$ PROCESS, AT PILOT SCALE

Pedro Romero y Otiniano<sup>1</sup>, Eder Vicuña Galindo<sup>2</sup>

### RESUMEN

*En el proceso de secado de la arcilla activada, existen dos métodos importantes que se pueden usar para secar arcillas activadas: Secador Rotatorio Continuo [1] y Secador por Atomización (6). Pero para determinar las características y mecanismos que intervienen en el secado de la arcilla es fundamental utilizar un secador de bandeja por lote. El objetivo del presente trabajo es obtener la curva de velocidad de secado, fijando ciertas condiciones iniciales de humedad, y definir los mecanismos que intervienen en el secado de las arcillas activadas con ácido sulfúrico, permitiendo utilizar esta información en los procesos de secado continuo, así como encontrar las ecuaciones que gobiernan los diferentes mecanismos de secado. Se utilizó una bandeja de área superficial de  $214 \text{ cm}^2$  en la cual se carga la bentonita húmeda, las muestras tomadas fueron de 48 a 138 g aprox. y 38 a 50% de humedad inicial para llevarla a una humedad final de 8 a 13%. Se representó la Masa Total de Arcilla (MT) vs. Tiempo de Secado ( $\theta$ ), mostrándose dos periodos, uno de tendencia lineal, presentándose luego una desviación, este segundo periodo consta de dos etapas, la primera etapa consiste en la formación de una estructura rígida o semirígida en la superficie del sólido, la segunda es la remoción de la humedad remanente y esto esta frecuentemente acompañado por una vaporización interna, la cual puede causar la expansión del sólido. Estas características de secado están representadas en la Fig. 6, como una curva de velocidad de secado vs. humedad del sólido. Este segundo período puede ser representado por la ecuación:  $Wc = 0.003463 X_m^{(1.6556)}$ .*

*Palabras clave.- Secado de bandeja, Arcilla activada, Bentonita activada.*

### ABSTRACT

*In the drying process of activated clay there are two important methods that can be used to dry this activated clay: Rotator continuous drying and drying atomization. But to determine the characteristics and mechanism which intervene in the drying of clay is fundamental to use a batch tray drying. The objective of the present work is obtain the curve of drying velocity, fixing some initial conditions of humidity, and to define the mechanisms involved in the drying of activated clay with sulphuric acid. Further, this information will be used to scale to continuous drying and find out the equations which govern this process. It was necessary to use a tray of  $214 \text{ cm}^2$  surface area to charge moist bentonite. Samples were taken containing between 48 and 138 g, and initial humidity between 38 and 50%; to achieve a final humidity of between about 8 and 13%. Graph of clay total mass (MT) versus drying time ( $\theta$ ) show two periods: firstly a linear trend, followed by a no-linear trend. This second*

<sup>1</sup>Ing. docente investigador de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería,

<sup>2</sup>Ing. docente investigador de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

*period consist of two stages, the first one consist in the formation of a rigid structure or semi-rigid on the surface of the solid. The second one consists in the removal of the moisture balance and this is frequently accompanied by an internal vaporization which can cause the solid expansion. These drying characteristics are presented in graphic N° 6 as a curve of drying velocity vs. solid humidity. These second period can be represented by the equation:  $Wc = 0.003463 X_m^{(1.6556)}$ .*

*Key words.*- Clay activated, Bentonite activated, Drying clay.

## INTRODUCCIÓN

### PROCESO DE SECADO DE LA ARCILLA ACTIVADA

Existen dos métodos importantes que se pueden usar para secar arcillas activadas: *secador rotatorio continuo* [1] y *secador por atomización*. Pero para determinar la curva de secado y las características y mecanismos que intervienen en el secado de la arcilla, es fundamental utilizar un Secador de Bandeja por Lote.

Los mecanismos que intervienen en el secado pasan por dos etapas bien marcadas [8]: *Evaporación constante* y el *decaimiento* de la evaporación (falling-rate). Además será importante determinar las ecuaciones de las curvas que gobiernan estas etapas.

Es importante determinar las características necesarias del secador de bandeja; en primer lugar la masa a evaluar y con ello el área de la bandeja, el flujo de aire secador, así como calcular la carga calorífica necesaria para calentar el aire disponible. La duración del período constante dependerá de la fuerza directora de la temperatura y del mecanismo interno de transferencia de masa.

#### Mecanismo del secado por atomización

El secador tipo atomizador, transforma la mezcla sólido-líquido en un producto sólido en forma de polvo fino con un diámetro de partícula definido.

El secado por spray involucra las transferencias de calor y masa, siendo ideal el hecho de separar el secado del pulverizado, con el contacto pulverizado-aire, pues, los dos ocurren simultáneamente. Dentro de la secuencia de secado, una gota pasa por dos etapas bien marcadas las cuales son: evaporación constante (constant rate) y el decaimiento de la

evaporación [7]. Una temperatura alta del aire y una concentración de sólido elevada, acortará el período de secado constante, por lo tanto bajo estas condiciones este período puede ser despreciado. Un segundo periodo período es el **decaimiento** de la evaporación (falling-rate); el cual consta de dos etapas [10], la primera etapa consiste en la formación de una estructura rígida o semi-rígida en la superficie de la gota, la segunda es la remoción de la humedad remanente y esto está acompañado por una vaporización interna, la cual puede causar la expansión de la partícula.

La parte recta en la curva, representa el período de secado constante, caracterizado por la alta razón de evaporación, la superficie de la gota esta saturada por la migración de humedad del interior de la gota a la superficie [9]. La parte curva donde la intersección con la parte recta se define como punto crítico, es alcanzada por la gota al mantener su superficie húmeda, y el período de secado declina cada vez más, hasta que la humedad de la gota adquiere la humedad de equilibrio con el medio.

### PROCESO DE SECADO EN BANDEJA POR LOTE DE ARCILLA ACTIVADA

#### Secado por lote en bandeja

Se utilizó el secador de bandeja del laboratorio de operaciones unitarias de la E.A.P. de Ingeniería Química de la UNMSM [5] (el secador propiamente dicho, es un compartimiento de forma rectangular de 5 divisiones), que consiste en un secador por lote de tiro forzado con un ventilador antes de la entrada, con una estación de tubo de Pitot para medir flujos de aire y un calentador eléctrico de aire con termostato para controlar la temperatura del aire antes de entrar al secador.

Para nuestro estudio se utilizó una bandeja de área superficial de **213.64** cm<sup>2</sup> en la cual se carga la

bentonita húmeda, las muestras tomadas fueron de 100g aprox. y 38% de humedad inicial, para llevarla a una humedad final de hasta 13%, pero debido a la características de las bentonitas y a las condiciones de operación de los equipos, el tiempo de secado resultaron muy prolongados; de 5 a 6 horas para llegar a la humedad requerida (de 8 a 13%); para una mejor toma de datos se instaló una balanza con la precisión adecuada para medir céntimos de gramos en la parte superior del secador, conectado directamente a la bandeja con el material a secar. El intervalo de tiempo para la toma de datos fue de cada 10 minutos, adecuado por el tipo de material a secar.

Los datos a tomar por cada intervalo son: masa total de arcilla, humedad de la muestra en función a la unidad de tiempo, temperatura de la cámara de secado (se busca mantenerla constante), temperatura del aire de entrada y de salida de la cámara de secado; en los dos casos se mide temperatura de bulbo seco ( $T_c$ ) y temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ).

### Operación de secado por lote (secador de bandeja)

Antes del secado, la arcilla activada obtenida se somete a una serie de lavados hasta llegar a la acidez mínima requerida ( $pH_r \geq 3.6$ ).

El producto lavado, es filtrado [3] para obtener un queque de humedad apropiada, para que con las condiciones del equipo se logre un tiempo de operación adecuado. Tomando como ejemplo la prueba N° 6 en el secador de bandeja tenemos:

$$M_{T0} = 107.25 \text{ g. de Arcilla Activada Húmeda} = M_{AAH}$$

$$\% H_1 = 39.0 \% \text{ (Humedad Inicial)}$$

$$S_s = 107.25 (1 - 0.39) = 65.423 \text{ g.}$$

$$A_B = \text{Area Bandeja} = 21.8 \times 9.8 = 213.64 \text{ cm}^2$$

$$M_{Tf} = 75.75 \text{ g. de Arcilla Activada Seca} = M_{AAS}$$

$$\% H_f = [(75.75 - 65.423) / 75.75] \times 100 = 13.634\%$$

$$\theta_{\text{opera}} = 320 \text{ minutos y } T_{\text{opera}} = 49^\circ\text{C}$$

### Cálculo de la velocidad de secado (W)

Considerando la velocidad de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad tiempo ( $-dx/d\theta$ ), operando en condiciones constantes de secado [4], es decir, con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad, y velocidad) permanezcan constantes con el tiempo.

Analíticamente, la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación:

$$W = \frac{S_s(-dX)}{A_B(d\theta)} \tag{1}$$

$S_s$  = Peso de sólido seco;

$A_B$  = Área de la superficie expuesta (en la bandeja);

$W$  = velocidad de secado y  $X$  = Humedad del sólido.

$$X_0 = \frac{MT_0 - S_s}{S_s} = \frac{107.25 - 65.423}{65.423} = 0.6393$$

$$X_1 = \frac{MT_1 - S_s}{S_s} = \frac{105.00 - 65.423}{65.423} = 0.6050$$

$$W_1 = \frac{S_s(-\Delta X)}{A_B(\Delta\theta)} = \frac{65.423(0.6393 - 0.6050)}{213.64(10)} = 0.001053$$

Al representar la masa total del sólido ( $M_T$ ) o la humedad del sólido frente al tiempo ( $\theta$ ) operando en condiciones constantes de secado se obtuvo la Fig. 1, en la que puede observarse que al principio, la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado en un tiempo relativamente corto (**50 min**) con respecto al tiempo total de la operación (**320 min**), cuando el sólido alcanza esta humedad crítica a partir del cual la velocidad de secado disminuye alejándose de la tendencia lineal, y acercándose a una curva asintótica a la recta fijada por el calor de la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones constantes de operación.

A partir de los datos de la Fig. 1 se obtienen los datos de la velocidad de Secado ( $W$ ):  $(S_s/A_B)[-dx/d\theta]$  frente a la humedad del sólido ( $X$ ).

Determinación de las curvas de secado mediante un secador de bandeja, en el proceso de bentonita activada con  $H_2SO_4$  a nivel piloto

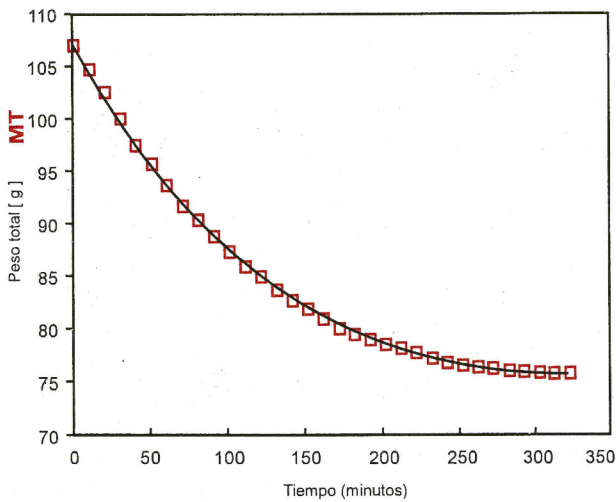


Fig. 1 Secado por lote: arcilla activada Secador de bandeja: prueba N° 3.

Sin embargo como se dispone de datos para intervalos de tiempo relativamente pequeños, podremos efectuar los cálculos analíticamente tomando los valores medios de la velocidad correspondiente a cada intervalo de tiempo.

$$W = \frac{Ss(-\Delta X)}{A_b(\Delta\theta)} \quad (2)$$

Antes fue necesario hacer un tratamiento estadístico de ajuste de los datos de la curva MT vs.  $\theta$ , ver Fig. 1, dividiéndola en dos tramos claramente definidos.

Primer tramo.- Se ajusta una, a una recta y se determina su ecuación mediante un análisis de regresión lineal utilizando para esto el programa Excel:

$$MT_{Rect} = 107.255 - 0.232 \theta \quad (3)$$

Segundo tramo.- Se ajusta a una curva, es necesario probar a que ecuación de curva se ajustan más los datos comprometidos en este tramo.

Pasos:

- Se asume una ecuación.
- Se le da la forma de una recta (aplicando logaritmo).
- Se determina su coeficiente de correlación:  $\gamma_i$ .
- Se repiten los pasos (1-3) para otra ecuación asumida.

- Se determinan entre todos los coeficientes  $\gamma_n$ , el más próximo a la unidad.

Resultado de la siguiente ecuación:

$$MT_{Curva} = 162.9722 \theta^{-0.135834} \quad (4)$$

Con un coeficiente de correlación:

$$\gamma_n = 0.9869$$

El programa utilizado para la determinación de la curva fue el STATGRAPHICS.

Finalmente con estas ecuaciones se realizarán el ajuste o corrección ( $MT_{Correc-1}$ ) de los datos reales:

$$MT_{C-1} = 107.2548 - 0.231857(10) = 104.9362 \text{ g.}$$

$$MT_{C-7} = 162.9722(70)^{-0.135834} = 91.542 \text{ g.}$$

Para luego hallar la humedad corregida:

$$X_{corr-0} = \frac{MT_{co} - Ss}{Ss} = \frac{107.2548 - 65.4225}{65.4225} = \frac{0.6394 \text{ g. } H_2O}{\text{g. } S. \text{ sec } o}$$

$$X_{corr-1} = \frac{104.9362 - 65.4225}{65.4225} = 0.6040$$

$$X_{m-1} = \frac{X_{corr-0} + X_{corr-1}}{2} = 0.6217$$

$$W_{corr-1} = \frac{Ss(-\Delta X_{corr})}{Ab(\Delta\theta)} = \frac{65.4225(0.6394 - 0.6040)}{213.64(10 - 0)}$$

$$W_{corr-1} = 0.001085 \text{ g. } H_2O / \text{cm}^2 \times \text{min.}$$

Determinando la ecuación del período pos-crítico, sacando logaritmos a las columnas  $X_m$  y  $W_{corr}$ . Desde los datos pos-críticos:  $\theta = 60$  minutos en adelante.

Resultando la ecuación:

$$\ln(W_c) = -5.6658 + 1.6556 \ln(X_m)$$

Con un coeficiente de correlación alto:

$$\gamma_c = 0.987$$

De la que se desprende la ecuación:

$$W_c = 0.003463 X_m^{1.6556} \quad (5)$$

En la Fig. 2 (Wc VS. Xm) se define claramente las dos etapas del secado:

Periodo anti-crítico.- Durante este periodo la superficie mojada se comporta como una superficie de agua libre, por lo tanto la velocidad de secado tiende a ser constante, Fig. 2:

$$(W_c)_{cte} = 0.0010853 \frac{g.}{cm^2 \times min.} = 0.6512 \frac{kg.}{m^2 \times h.}$$

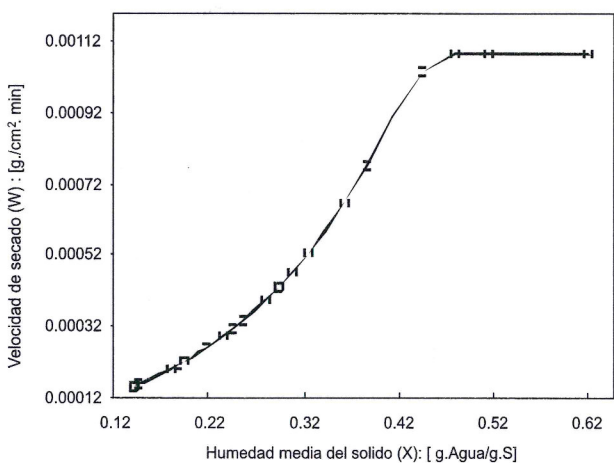


Fig. 2 Secado por lote: arcilla activada Secador de bandeja: prueba N° 3.

Periodo pos-crítico.- La velocidad de secado se torna decreciente hasta alcanzar la humedad del sólido en equilibrio con el aire de secado.

Mediante la ecuación: (5) es posible determinar la humedad crítica:

$$(X_m)_{critica} = [0.0010853 / 0.003463]^{(1/1.6556)}$$

$$(X_m)_{critica} = 0.4962 \text{ g. H}_2\text{O} / \text{g. S. seco}$$

**Cálculo del tiempo de secado teórico**

A partir de la ecuación (1) puede calcularse la duración del secado por integración entre las humedades inicial y final:

$$\theta = \frac{Ss}{Ab} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{W} \quad (6)$$

Para calcular esta integral es necesario conocer W = f(X), distinguiendo dos periodos:

Periodo ante-crítico.- Durante este periodo W = constante, la integración de la ecuación (6) desde la humedad inicial Xo, hasta la humedad crítica Xc nos lleva a:

$$\theta_a = \frac{Ss(X_o - X_c)}{Ab(W)}$$

Donde: Xo = 0.6394 g. agua / g.s. seco

Xc = 0.4962 g. Agua / g.s.seco (Calculado de: Ec. (5))

y Wc = 0.0010853 g. / cm² x mint (Fig. 2).

Reemplazando:

$$\theta_a = (62.4225/213.64) (0.6394 - 0.4962)/0.0010853$$

$$\theta_a = 38.56 \text{ minutos}$$

Periodo pos-crítico.- Conociendo la relación W = f(X) para este periodo de la ecuación (5), es posible realizar la integración de la ecuación (6) desde la humedad crítica Xc hasta la humedad final Xf.

$$\theta_p = \frac{65.4225}{213.64} \int_{0.1379}^{0.4962} \frac{dX}{0.003463(X^{1.6556})}$$

$$\theta_p = 88.4285 \left[ \frac{X^{-0.6556}}{-0.6556} \right]_{0.1379}^{0.4962}$$

$$\theta_p = 280.813 \text{ minutos}$$

$$\text{Finalmente: } \theta_{total} = \theta_a + \theta_p$$

$$\theta_t = 319.373 \text{ minutos}$$

Determinación de las curvas de secado mediante un secador de bandeja, en el proceso de bentonita activada con  $H_2SO_4$  a nivel piloto

*Tabla 1. TSBANPI*

SECADO DE BANDEJA : PRUEBA N°1				
%Hi = 72%		S = 76.86 g. (Sólido Seco)		
%Hf = 53.13		$A_B = 213.64 \text{ cm}^2$ (Area Bandeja)		
Tiempo	Peso Total	Xreal	Xmr	W
(min.)	g.	g.H2O/ g. S.	g.H2O/g.Sólid	g./ mint.cm <sup>2</sup>
0	274,50	2,5714		
10	272,50	2,5454	2,5584	9,3615E-04
20	268,40	2,4921	2,5187	1,9191E-03
30	264,00	2,4348	2,4634	2,0595E-03
40	263,00	2,4218	2,4283	4,6808E-04
50	256,50	2,3372	2,3795	3,0425E-03
60	252,50	2,2852	2,3112	1,8723E-03
70	248,40	2,2319	2,2585	1,9191E-03
80	244,00	2,1746	2,2032	2,0595E-03
90	240,50	2,1291	2,1518	1,6383E-03
100	236,70	2,0796	2,1043	1,7787E-03
110	232,00	2,0185	2,0491	2,2000E-03
120	228,10	1,9677	1,9931	1,8255E-03
130	223,80	1,9118	1,9398	2,0127E-03
140	219,50	1,8558	1,8838	2,0127E-03
150	216,00	1,8103	1,8331	1,6383E-03
160	212,20	1,7609	1,7856	1,7787E-03
170	208,00	1,7062	1,7335	1,9659E-03
180	205,40	1,6724	1,6893	1,2170E-03
190	202,00	1,6282	1,6503	1,5915E-03
200	198,30	1,5800	1,6041	1,7319E-03
210	195,20	1,5397	1,5598	1,4510E-03
220	191,80	1,4954	1,5176	1,5915E-03
230	188,50	1,4525	1,4740	1,5447E-03
240	185,50	1,4135	1,4330	1,4042E-03
250	182,30	1,3718	1,3927	1,4978E-03
260	179,00	1,3289	1,3504	1,5447E-03
270	175,70	1,2860	1,3074	1,5447E-03
280	172,70	1,2469	1,2665	1,4042E-03
290	169,60	1,2066	1,2268	1,4510E-03
300	166,76	1,1697	1,1881	1,3293E-03
310	164,00	1,1337	1,1517	1,2919E-03

Tabla 2. TSBANP2

SECADO POR LOTE: PRUEBA N° 2				
%Hi=50.514		S = 158.2067 g. (S. Seco)		
%Hf=37.591		A=213.64 cm <sup>2</sup> (Area Bandeja)		
Tiempo (min.)	Peso Total (g.)	Xreal g.H2O/ g.S	Xmr g.H2O/ g.S	W g./ mint. cm <sup>2</sup>
0	247,30	0,5631		
19	239,95	0,5167	0,5399	1,8107E-03
35	235,65	0,4895	0,5031	1,2580E-03
45	232,65	0,4705	0,4800	1,4042E-03
58	229,15	0,4484	0,4595	1,2602E-03
65	226,75	0,4333	0,4408	1,6048E-03
79	223,00	0,4095	0,4214	1,2538E-03
90	219,95	0,3903	0,3999	1,2979E-03
100	217,15	0,3726	0,3814	1,3106E-03
110	214,45	0,3555	0,3640	1,2638E-03
120	211,75	0,3384	0,3470	1,2638E-03
130	208,85	0,3201	0,3293	1,3574E-03
140	206,45	0,3049	0,3125	1,1234E-03
150	203,95	0,2891	0,2970	1,1702E-03
160	201,15	0,2714	0,2803	1,3106E-03
170	198,85	0,2569	0,2642	1,0766E-03
180	196,15	0,2398	0,2484	1,2638E-03
190	193,45	0,2228	0,2313	1,2638E-03
200	190,95	0,2070	0,2149	1,1702E-03
210	188,85	0,1937	0,2003	9,8296E-04
220	186,95	0,1817	0,1877	8,8935E-04
230	184,85	0,1684	0,1750	9,8296E-04
240	182,85	0,1558	0,1621	9,3615E-04
250	181,10	0,1447	0,1502	8,1913E-04

Determinación de las curvas de secado mediante un secador de bandeja, en el proceso de bentonita activada con  $H_2SO_4$  a nivel piloto

Tabla 3. TSBANP3

SECADOR DE BANDEJA: PRUEBA N° 3					
%Hi = 39		SS6 = 65.4225 g.[S.S.]			
%Hf = 13.634		A = 213.64 cm <sup>2</sup> [Área de Band.]			
		Peso Bandeja = 218.3 g.			
Tiempo (min)	Masa Total g.	Masa T.C. g.	Xcorr. g.H2O/g.S.S	Xmc g.H2O/g.S.S.	Wcorr. g./cm <sup>2</sup> .min
0	107,25	107,255	0,639		
10	105,00	104,936	0,604	0,622	1,085E-03
20	102,70	102,618	0,569	0,586	1,085E-03
30	100,20	100,299	0,533	0,551	1,085E-03
40	97,70	97,980	0,498	0,515	1,085E-03
50	95,90	95,662	0,462	0,480	1,085E-03
60	93,80	93,343	0,427	0,444	1,085E-03
70	91,90	89,768	0,372	0,399	8,500E-04
80	90,60	88,400	0,351	0,362	6,406E-04
90	89,00	87,210	0,333	0,342	5,570E-04
100	87,60	86,159	0,317	0,325	4,919E-04
110	86,30	85,219	0,303	0,310	4,398E-04
120	85,20	84,370	0,290	0,296	3,974E-04
130	84,00	83,597	0,278	0,284	3,620E-04
140	83,00	82,887	0,267	0,272	3,322E-04
150	82,10	82,232	0,257	0,262	3,068E-04
160	81,20	81,623	0,248	0,252	2,848E-04
170	80,30	81,056	0,239	0,243	2,656E-04
180	79,70	80,525	0,231	0,235	2,487E-04
190	79,20	80,025	0,223	0,227	2,337E-04
200	78,70	79,554	0,216	0,220	2,204E-04
210	78,25	79,109	0,209	0,213	2,085E-04
220	77,80	78,687	0,203	0,206	1,977E-04
230	77,35	78,285	0,197	0,200	1,879E-04
240	76,90	77,903	0,191	0,194	1,790E-04
250	76,70	77,538	0,185	0,188	1,709E-04
260	76,50	77,189	0,180	0,183	1,634E-04
270	76,30	76,854	0,175	0,177	1,565E-04
280	76,15	76,533	0,170	0,172	1,502E-04
290	76,00	76,225	0,165	0,167	1,443E-04
300	75,90	75,928	0,161	0,163	1,389E-04
310	75,80	75,642	0,156	0,158	1,338E-04
320	75,75	75,366	0,152	0,154	1,291E-04



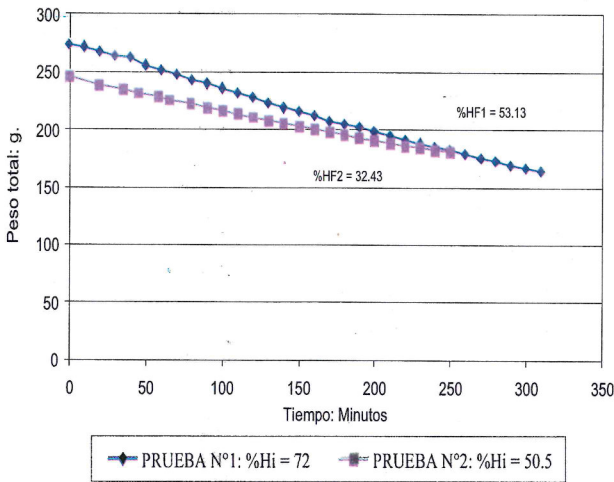


Fig. 3 Secador de Bandeja: arcilla activada.

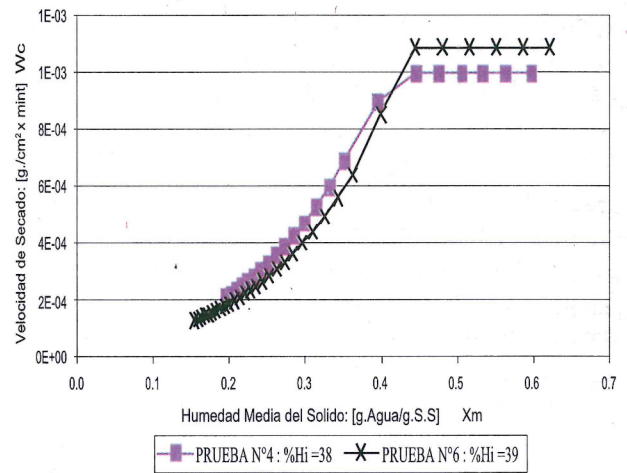


Fig. 6 Secador de Bandeja: arcilla activada.

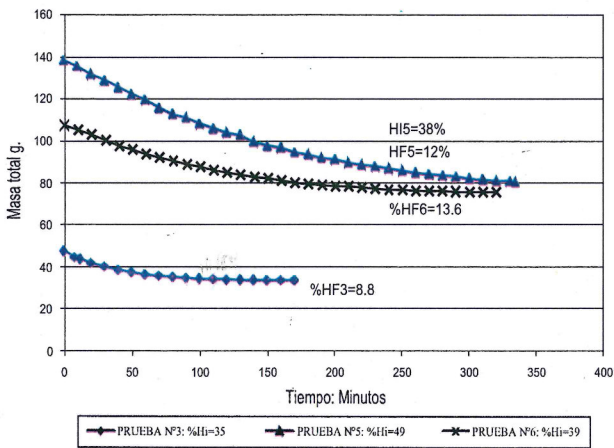


Fig. 4 Secado de Bandeja: arcilla activada.

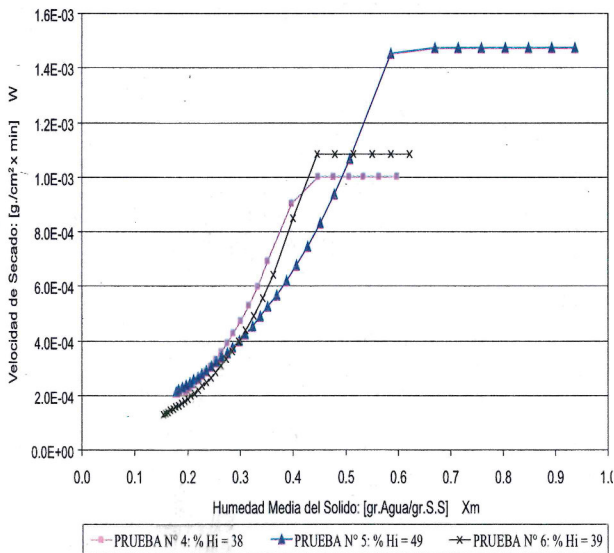


Fig. 5 Secador de bandeja: arcilla activada.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Secado por lote: secador de bandeja

En las Tablas N° 1 y N° 2 se trabajó con humedades extremas de la arcilla activada a secar, para tratar de hacer el seguimiento a la etapa de secado cuando la superficie del sólido esta totalmente cubierta por una capa de líquido, y supuestamente la evaporación dependerá solo de la velocidad de difusión del vapor. Para la Tabla N° 1, el secado se inició con una humedad de 72% hasta una humedad final de 53.13% para una muestra de 274.5 g. en un tiempo de operación de 310 minutos, representados en la Fig. 3: (MT vs.  $\theta$ ), con una clara tendencia lineal, resultado una recta de ecuación:  $MT_1 = 273.665 - 0.367\theta$ , con un alto coeficiente de correlación = 0.9965.

Para la Tabla N° 2, la muestra se inició con una humedad de 50.51% y 247.3 g., llevándolo hasta una humedad final de 32.425% en un tiempo de operación de 250 minutos. Representados los datos en la Tabla 3, mostrando aún una clara tendencia lineal, representados por la ecuación:  $MT_2 = 244.234 - 0.263\theta$ , con un coef. de correlación de 0.9964.

Desde la prueba N° 1 hasta la prueba N° 3 las condiciones de operación estuvieron operados bajo las mismas condiciones para el aire secador:

Temperatura del aire caliente:

$T_G = 46^\circ\text{C}$  y  $T_w = 23^\circ\text{C}$

El sólido húmedo se pone en contacto con el aire de temperatura ( $T_G$ ) y humedad constante; suponiendo que la cantidad de aire es lo suficientemente grande y circula con la velocidad apropiada para que sus condiciones no varíen con el tiempo de contacto; esto supone que las condiciones del aire a la entrada y salida aproximadamente son las mismas; básicamente la temperatura de bulbo seco ( $T_G$ ) de la masa de aire, la temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ) estará variado significativamente en el segundo período pos-crítico, que estaría tomando la temperatura de la superficie del sólido que se estaría secando hasta la humedad de equilibrio.

En la prueba N° 3 para el secador de bandeja cuyos datos representados en la Tabla N° 3, se graficó, Masa Total de Arcilla (MT) vs. Tiempo de Secado ( $\theta$ ), representándose dos periodos, uno de tendencia lineal mediante la ecuación:

$MT_G = 107.2548 - 0.2319\theta$ , con un coeficiente de correlación de 0.9869, aunque el número de puntos fueron solo 6; pero en la prueba N° 2 se corroboró esta tendencia lineal, donde la humedad inicial fue de 50.51% y la final de 32.43%, teniendo esta última recta una pendiente ligeramente mayor (0.263 > 0.232), explicable esto debido a la humedad inicial de la prueba N° 2 (50.51%), mucho mayor a la humedad inicial de la prueba N°3 (39%). Pero con la prueba N° 2 se demuestra claramente la existencia de un período de secado constante, determinándose en el Fig. N° 6, la humedad crítica igual a  $(X_m)_{crit.} = 0.4962$  g./g..Seco, expresado en  $\%H_{crit.} = 33.163\%$ . En este mismo gráfico se determina una velocidad de secado constante igual a  $(Wc) = 0.0010853$  g./cm<sup>2</sup>x min. (0.6512 kg./m<sup>2</sup>xh). Para un tiempo crítico de  $\theta_{crit.} = 38.56$  minutos. A partir de este momento comienza a alejarse de la tendencia lineal, que vendría a ser el segundo período que es el decaimiento de la evaporación (**falling-rate**); la cual consta de dos etapas [2], la primera etapa consiste en la formación de una estructura rígida o semi-rígida en la superficie del sólido, la segunda es la remoción de la humedad remanente y esto esta frecuentemente acompañado por una vaporización interna, la cual puede causar la expansión del sólido. Aunque es bastante probable que en el secado de algunos materiales estas dos etapas ocurran simultáneamente. Estas características de secado están representadas en la Fig. 6; como una curva de razón de secado vs. humedad del sólido. Por lo tanto

este segundo período puede ser representado por la ecuación:  $Wc = 0.003463 X_m^{(1.6556)}$ , la cual en su forma lineal presenta un coeficiente de correlación de 0.987, bastante alto, y por lo tanto representativo de los puntos reales.

La prueba N° 3 en estudio, tuvo un tiempo de secado de 320 minutos para llegar a una humedad final de  $\%H_{F,3} = 13.634$ , y una velocidad de secado final de:

$$(Wc)_{F,3} = 0.0000234 \text{ g./cm}^2 \times \text{min.} = 0.01404 \text{ kg./m}^2 \times \text{h}$$

Aunque para las condiciones del aire, la humedad final para la prueba N° 3 (13.634 %) no fue la humedad de equilibrio, o sea la humedad límite a la que puede llevarse la humedad del sólido, fijada esta por las condiciones del aire secador ( $\%H_R$  y  $T_G$ ).

La humedad final de equilibrio en estas condiciones llegó a ser igual a  $\%H_F = 8.798$ , por lo tanto la velocidad de secado final para esta prueba llegó a ser cero.

## CONCLUSIONES

Para el tipo de material (arcilla activada (1)) el secador de bandeja, operando a máxima capacidad: de flujo de aire (~ 4800 kg. A.S./ h.m<sup>2</sup>) y de temperatura de aire ( $T_G \cong 46$  °C) para un máximo de muestra inicial de 138.1 g. ( $\%H_i = 48.98$ ) se logró secar la arcilla dentro de los rangos de humedad especificados:  $\%H_F = 12\%$ , pero en un tiempo de operación prolongado de 334 minutos (5,57 h).

En las pruebas N° 1 y N° 2 en las que se operó con una alta humedad quedó demostrado que la velocidad de secado esta regida por la evaporación del agua, la que dependerá solamente de la difusión del vapor o de la intensidad de paso de calor, por lo tanto la velocidad de difusión es igual a la velocidad de secado, que a su vez durante todo este período de alta humedad se torna constante; como lo demuestra la Fig. N° 3, de donde se desprende la ecuación de la recta:  $MT_2 = 244.2338 - 0.2631\theta$ .

Con un alto coeficiente de correlación = 0.996, con un rango de humedad: 50.514 a 32.425%; afirmando con esto que el proceso consta de dos etapas claramente definidas, como las que se definen en la prueba N° 3, con una humedad inicial de 39%; llegándose a determinar la humedad crítica

en **33.163%**. En la Fig. N°6, se visualiza una **1ª etapa** de velocidad de secado constante:  $(Wc)c = 1.0853 \times 10^{-3} \text{ g./cm}^2 \times \text{min.} = 0.6512 \text{ kg./m}^2 \times \text{h}$ ; y una **2ª etapa** de secado de velocidad decreciente representado mediante la ecuación:  $Wc = 0.003463 X_m^{(1.6556)}$ .

Al igual que en el secado discontinuo, dentro de la secuencia del secado por atomización, una gota también pasará por las dos etapas determinadas en el secador de bandejas (Fig. 6): evaporación constante (constant rate) y el decaimiento de la evaporación (Falling rate). Si la gota establece un equilibrio dinámico con el aire caliente [2], exhibirá un período de secado constante. La duración de este período constante dependerá de la fuerza directora de la temperatura y del mecanismo interno de transferencia de masa. El segundo período, el de decaimiento de la evaporación; consta generalmente de dos etapas, pero parece bastante probable que en el secado de la bentonita activada estas dos etapas ocurran simultáneamente, tal como ha sido detectado en el secado por lote donde se determinó para este período una sola ecuación con un alto coeficiente de correlación.

#### REFERENCIAS

1. **Hasnuddin Siddiqui, M. K., Bleaching Earths.** Pergamon Press Ltd. - 1968 1ª Edición, pp. 32-35, 40-43. London.
2. **Friedman, S. J., Gluckert., Marshall W. R.,** "Centrifugal Disk Atomization". Chem. Eng. Progr. 1952, pp. 48, 181, EE.UU.
3. **Perry, J. H.,** "Manual del Ingeniero Químico". Unión tipográfica Editorial, Tercera Edición. - 1966, pp. 1915-1924, 1891, 1507, 1303-1316. México.
4. **Perry, C. C.,** "Chemical Engineering" Handbook, Mc Graw Hill, 5 th Edition. 1973, pp. 20, 58, México.
5. **Romero y Otiniano, P.,** Tesis: "Estudio del Secado por Atomización y Bandeja, en el Proceso de Activación de la Bentonita con  $H_2SO_4$  a Nivel Piloto", UNMSM - Facultad de Química e Ing. Química - 2006, Lima, Perú.
6. **Belcher, D.W., Smith D. A., Cook, E. M.,** "Designer and Use of Spray Dryers". Part I and II, Chem. Eng. 1963, pp. 30, 83, 14, 201.
7. **Crosby, E. J., Marshall, W. R.,** "Effects of Drying Conditions on the Properties of Spray - Dried Particles". Chem. Eng. Progr. (1958), pp. 54, 56. EE.UU.
8. **Marshall, W. R.,** "Discussion in the Forty - First Annual Meeting", Chem. Eng. Progr. (1950), pp. 46, 583, New York.
9. **Marshall, W. R., Seltzer, E.,** "Principles of Spray Drying". Chem. Eng. Progr. (1950), pp. 46, 501; 46, 575, EE.UU.
10. **Trommelen, A. M., Crosby, E. J.,** "Evaporation and Drying Of Drops in Superheated Vapors". Aighe. Journal (1970), pp. 16, 857, EE.UU.

Correspondencia: pedroromeroy@yahoo.es

Recepción de documentos: Enero 2008

Aceptación de documentos: Abril 2008