

14 - Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

616-70 BALANCE TERMICO DE UNA INSTALACION DE MOLIENDA, CON SECADO POR CORRIENTE DE AIRE

(Die Wärmerechnung für Luftstrom - Mahltrocknungsanlagen)

G. Bornschein

De: "SILIKATTECHNIK", vol. 7, nº 4, abril 1956, pág. 162

TIPO Y CARACTERISTICAS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION DE MOLIENDA CON SECADO SIMULTANEO

La instalación de molienda, para la cual se han llevado a cabo los cálculos, queda representada esquemáticamente en la figura 1. El producto que se ha de moler, almacenado en una tolva, se introduce en el molino mediante un alimentador de plato giratorio; en el molino, al cual se conducen simultáneamente los gases de escape del hogar, se muele el material, reduciéndolo a un polvo fino, y se seca. Creando un vacío en toda la instalación, el polvo y las partículas de mayor tamaño son conducidas, mediante la corriente formada, al separador; en éste se lleva a cabo la separación de las partículas gruesas y del polvo. Este último se separa del aire en un ciclón, y abandona el circuito. Las partículas gruesas que requieren una nueva molienda, se vuelven a conducir desde el separador hasta el extremo de alimentación del molino. En cuanto al aire que sale del ciclón, parte se vuelve a introducir al principio del molino, parte a la salida del mismo, y el resto se extrae de la conducción.

RENDIMIENTO DE LA MOLIENDA

En los molinos tubulares, el rendimiento depende de la superficie que se ha de crear en el material que se ha de moler; en general, dicho rendimiento es tanto menor cuanto mayor ha de ser dicha superficie.

Si, además, se ha de llevar a cabo el secado simultáneo durante la molienda, la cantidad de agua que se ha de evaporar influye decisivamente sobre el rendimiento, en el sentido de reducirlo cuanto mayor es dicha cantidad de agua.

Cuando la molienda se realiza en circuito cerrado, el aumento de la superficie específica del producto molido se facilita mediante la separación de una mayor cantidad de gruesos.

El calor necesario en una instalación de molienda con secado puede adaptarse, por regulación del hogar, a la cantidad de agua que se ha de evaporar. Las medidas realizadas en una instalación en funcionamiento han puesto de manifiesto, sin embargo, la tendencia a disminuir que presenta el rendimiento de la molienda a medida que crece la cantidad de agua que se ha de evaporar. De acuerdo con estas consideraciones, se ha podido conseguir una representación gráfica, en la cual se relaciona el rendimiento de la molienda con la cantidad de agua evaporada; la línea obtenida es una línea recta, que pasa por el punto definido por G_n y w_n (véase más abajo), y cuya inclinación es -8° , en la zona correspondiente a un contenido normal en agua.

Por lo tanto, se podrá escribir:

$$G = G_n - 140 (w - w_n),$$

siendo

G = rendimiento de la molienda (kg/h)

G_n = rendimiento normal de la molienda, en el caso de un contenido normal de agua (kg/h)

w = cantidad de agua evaporada (%)

w_n = cantidad normal de agua evaporada (%)

La cantidad de vapor de agua que se elimina del sistema se calcula mediante

siendo
$$W = V_A^s \cdot x,$$

W = agua evaporada (kg/h)

V_A^s = aire extraído del sistema (m^3/h): es del orden del 25% de la cantidad del aire que circula por el mismo

x = humedad absoluta del aire saturado (kg/m^3)

Para una determinada cantidad W de agua evaporada, la cantidad de producto húmedo será:

$$N = \frac{W \cdot 100}{w} = \frac{G \cdot 100}{100 - w},$$

siendo

N = producto húmedo (kg/h)

CALOR NECESARIO

El calor necesario total puede descomponerse en las siguientes cantidades parciales:

1. Calentamiento y vaporización del exceso de agua:

$$q_w = i'' - t_w = 639 - t_w$$

$$Q_w = q_w \cdot W,$$

siendo

q_w = calor específico necesario para calentar y evaporar el exceso de agua (Kcal/kg de agua)

i'' = entalpía del vapor a $100^\circ C$ (Kcal/kg)

t_w = temperatura del agua en el producto húmedo ($^\circ C$)

Q_w = calor necesario para calentar y evaporar el exceso de agua (Kcal/h)

2. Calentamiento del producto que se ha de molar:

$$q_k = c_{mG} (t_b - t_a)$$

$$Q_k = q_k \cdot G,$$

siendo

q_k = calor específico necesario para calentar el producto (Kcal/kg de producto)

c_{mG} = calor específico del producto (Kcal/kg °C)

t_a = temperatura inicial del producto (°C)

t_b = temperatura del producto en el molino (°C)

Q_k = calor necesario para calentar el producto (Kcal/h)

3. Pérdidas por radiación, convección y conductividad:

$$Q_{SL} = k \cdot F \cdot \Delta t_m,$$

siendo

Q_{SL} = calor perdido por radiación, convección y conductividad (Kcal/h)

F = superficie (m²)

k = coeficiente total de transmisión de calor (Kcal/m² h °C) =

$$= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_S + \alpha_L} + \sum \frac{\delta}{\lambda}}$$

α_H = coeficiente de convección del gas en el interior del sistema (Kcal/m² h °C) = $2 + 10\sqrt{w}$

α_S = coeficiente de radiación de la pared externa (Kcal/m² h °C) =

$$= \frac{\epsilon \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \epsilon \left(\frac{T_L}{100} \right)^4}{T_M - T_L}$$

α_L = coeficiente de convección del aire externo

δ = espesor de la pared (m)

λ = coeficiente de conductividad de la pared (Kcal/m h °C)

C = coeficiente de radiación (Kcal/m² h (°C)⁴)

w = velocidad de la corriente de aire (m/seg) = $\frac{v}{f}$

v = gasto de aire (m³/seg)

f = sección libre (m²)

T_L = temperatura ambiente (°K)

T_M = temperatura de la superficie externa de la pared (°K)

$$\Delta t_m = t_1 - t_L$$

t₁ = temperatura del aire (°C)

t_L = temperatura ambiente (°C)

A continuación se calcula:

$$q_{SL} = k \cdot \Delta t_m,$$

siendo

q_{SL} = pérdida específica de calor por radiación, convección y conductividad (Kcal/m²h) y mediante la expresión

$$t_M = t_L + \frac{q_{SL}}{\alpha_S + \alpha_L}$$

se controla la exactitud del valor tomado para la temperatura T_M de la superficie externa de la pared.

(a) molino

La sección libre del molino asciende a un 70% de la sección total del mismo. Para α_L , Hinlein encontró los valores

$\alpha_L = 2,20$ Kcal/m²h°C, para una velocidad de 0 m/seg

$\alpha_L = 10,96$ Kcal/m²h°C, para una velocidad de 5 m/seg,

que permiten calcular por interpolación los valores de α_L para la velocidad particular del caso considerado.

En cuanto a la forma en que varía la temperatura en el interior del molino, se ha comprobado que, sea cual sea la carga del molino, la temperatura en su punto medio es siempre la misma.

(b) tuberías.

Los coeficientes de transmisión total de calor k se calculan para cada sección de la conducción. La subdivisión no debe seguirse por debajo de los 10 m, pues la precisión no lo requiere. Como es lógico, se han de calcular con especial atención las partes aisladas.

(c) separador, ciclón y ventilador.

El cálculo se simplifica utilizando los valores k correspondientes a los tubos inmediatos.

(d) pérdida total de calor por radiación, convección y conductividad .

$$Q_{SL} = \sum(k \cdot F \cdot \Delta t_m)$$

(e) determinación gráfica.

En la figura 2 se ha representado la pérdida de calor - por radiación, convección y conductividad, en función de la temperatura de la pared externa. En dicho diagrama se ha trazado, a título de comparación, la curva determinada por Guye para la camisa de los hornos rotatorios dispuestos bajo un techado. Como se puede comprobar, la pérdida de calor de un molino es mayor que la de un horno rotatorio, debido a su mayor velocidad lineal; en cambio, la de las - conducciones es menor.

(f) hogar de calefacción.

La pérdida de calor queda considerada en el rendimiento del hogar de calefacción.

4. Calor en el aire expulsado:

$$q_A = C_{pmA} (t_A - t_L)$$

$$Q_A = q_A \cdot V_A'$$

siendo

q_A = pérdida específica de calor del aire expulsado (Kcal/m³)

Q_A = pérdida de calor del aire expulsado (Kcal/h)

C_{pmA} = calor específico del aire expulsado (Kcal/m³ °C)

t_A = temperatura del aire expulsado (°C)

5. Calor en el polvo extraído del sistema:

$$q_S = C_{mB} (t_S - t_L)$$

$$Q_S = q_S \cdot G,$$

siendo

q_S = pérdida específica de calor del polvo extraído (Kcal/kg)

Q_S = pérdida de calor del polvo extraído (Kcal/h)

C_{mB} = calor específico del polvo extraído (Kcal/kg °C)

t_S = temperatura del polvo (°C)

CALOR SUMINISTRADO

1. Calor en el aire que se vuelve a recircular:

$$Q_R = C_{pmR} \cdot V_R' (t_R - t_L),$$

siendo

Q_R = calor en el aire que se vuelve a recircular (Kcal/h)

V_R' = cantidad de aire que se vuelve a recircular (m³/h)

t_R = temperatura del aire que se vuelve a recircular (°C)

2. Calor desprendido durante la molienda:

$$Q_M = N \cdot 860 \cdot \eta_{\text{mot.}} \cdot \eta_{\text{inst.}} \cdot (1 - \eta_z),$$

siendo

Q_M = cantidad de calor producida en el molino por rozamiento (Kcal/h)

N = potencia del motor del molino (kW)

$\eta_{\text{mot.}}$ = rendimiento del motor (%/100)

$\eta_{\text{inst.}}$ = rendimiento de la instalación (%/100)

η_z = rendimiento de la trituración (%/100)

BALANCE TERMICO

$$Q = Q_{\text{necesario}} - Q_{\text{suministrado}} = (Q_w + Q_k + Q_{SL} + Q_A + Q_S) - (Q_R + Q_M),$$

siendo

Q = calor total consumido por la instalación de molienda (Kcal/h)

Teniendo en cuenta las pérdidas de calor del hogar de calefacción, la cantidad de calor Q' (Kcal/h) que se ha de producir viene dada por:

$$Q' = \frac{Q}{\eta_H},$$

siendo

η_H = rendimiento del hogar de calefacción (%/100)

El consumo específico de calor q (Kcal/kg) (referido a la cantidad de agua que se ha de evaporar) de la instalación de molienda viene dado por:

$$q = \frac{Q}{W}$$

y el del hogar de calefacción q' (Kcal/kg) por:

$$q' = \frac{Q'}{W}$$

En la figura 3 se ha representado gráficamente el consumo de calor en función de la cantidad de agua que se ha de evaporar. El cálculo se llevó a cabo para una instalación de molienda, con secado mediante una corriente de aire, con un molino tubular de $2,2 \times 4,4$ m. Se comprende, evidentemente, que las cantidades de calor Q_{SL} , Q_A y Q_S , Q_R y Q_M , cuando la cantidad de agua que se ha de evaporar es menor, constituirán una proporción mucho mayor de la cantidad total de calor. Esta es la razón de que el consumo específico de calor se reduzca según crece la cantidad de agua que se ha de evaporar.

PROPORCIONES DEL AIRE DE RECIRCULACION

Mediante válvulas de ostrangulación puede regularse, entre ciertos límites, la distribución del aire en cada una de las conducciones. Dicha distribución queda determinada por la extracción del vapor de agua con el aire extraído, y la introducción de la cantidad necesaria de aire en el molino para arrastrar el producto.

El aire de circulación se compone de los gases de escape del hogar de calefacción, de aire fresco y de vapor de agua, y se distribuye en tres corrientes (tal como ya hemos indicado al principio): una que se extrae, otra que se vuelve a hacer pasar por el molino y otra que se vuelve a introducir a la salida de aquél.

En la figura 4 se ha representado la proporción en que se encuentran las diversas corrientes que integran el aire que circula por la instalación de molienda. Los valores se han determinado por cálculo o mediante medidas directas en una instalación de molienda con secado, con un molino tubular de $2,2 \times 4,4$ m, y en el caso de que la producción de material molido ascienda a 7.860 kg/h y

la cantidad de agua evaporada sea del 10%.

1. Introducción de los gases calientes.

El calor necesario para realizar la vaporización del exceso de agua se produce en un hogar de calefacción o se toma de los gases de escape de cualquier instalación. Estos gases, de cualquiera de ambas procedencias, con una temperatura t_G , se mezclan a la entrada del molino con el aire que se vuelve a recircular, cuya temperatura es t_R , con lo cual la temperatura t_m ($^{\circ}\text{C}$) de la mezcla vendrá dada por:

$$t_m = \frac{C_{pmG} \cdot V_G^{\dagger} \cdot t_G + C_{pmR} \cdot V_R^{\dagger} \cdot t_R}{C_{pmG} \cdot V_G^{\dagger} + C_{pmR} \cdot V_R^{\dagger}},$$

siendo

C_{pmG} = calor específico de los gases de escape ($\text{Kcal}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

V_G^{\dagger} = volumen de los gases de escape (m^3/h)

C_{pmR} = calor específico del aire que se vuelve a hacer circular ($\text{Kcal}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

2. Punto de rocío:

Según Faltin, la humedad absoluta de una mezcla de vapor de agua y gas viene dada por:

$$x = \frac{R_g}{R_d} \cdot \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi \cdot P_s};$$

de donde:

$$P_s = \frac{x \cdot P}{\varphi \left(x + \frac{R_g}{R_d} \right)},$$

siendo

x = humedad absoluta (kg/kg)

R_g = constante de los gases, para el gas considerado ($\text{kgm}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$)

- R_d = constante de los gases, para el vapor de agua (kgm/kg °C)
 φ = humedad relativa (0 ... 1)
 P = presión total de la mezcla (kg/cm²)
 P_s = presión de saturación de la mezcla (kg/cm²)

A esta presión de saturación le corresponde una determinada temperatura de saturación t_s , denominada punto de rocío. Esta temperatura puede encontrarse en las tablas de vapor.

En el caso de la instalación de molinondas:

$$x = \frac{W}{(V \cdot \gamma_u) - W},$$

siendo

- V = cantidad de aire que circula por el sistema (m³/h)
 γ_u = peso específico del aire (kg/m³)

Durante el funcionamiento de la instalación, la temperatura del aire que circula a través de la misma ha de encontrarse por encima del punto de rocío.

3. Contenido en oxígeno.

En las instalaciones destinadas a la molinonda de lignito, el contenido en oxígeno del aire no debe ser, en ningún punto, superior a un 13%. Por tal motivo, en tales instalaciones es preciso introducir un gas protector.

(a) el aire contiene 21% de oxígeno, y los gases de escape, junto con el gas protector, hacen descender el contenido en oxígeno a:

$$o_a = \frac{21 (V - V'' - V_G) + (o_G \cdot V_G)}{V},$$

siendo

o_a = contenido en oxígeno hacia el valor límite a (%)

o_G = contenido en oxígeno de los gases de escape y del gas protector (%)

V'' = volumen del vapor de agua (m^3/h)

V_G = volumen de los gases de escape y del gas protector (m^3/sog)

(b) el aire contiene o_G (%) de oxígeno (como los gases de escape y el gas protector) y el aire falso eleva el contenido de oxígeno a:

$$o_b = \frac{o_G (V - V'' - V_F) + (21 \cdot V_F)}{V},$$

siendo

o_b = contenido en oxígeno hacia el valor límite b (%)

V_F = volumen del aire falso (m^3/h)

La cantidad necesaria de gas protector para reducir el contenido de oxígeno en el aire a o_a se determina mediante la expresión:

$$V_G = \frac{21 (V - V'') - (o_a \cdot V)}{21 - o_G}$$

S.F.S.

- - -

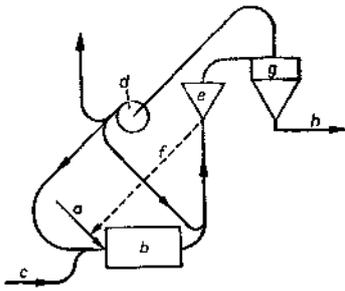


Fig. 1

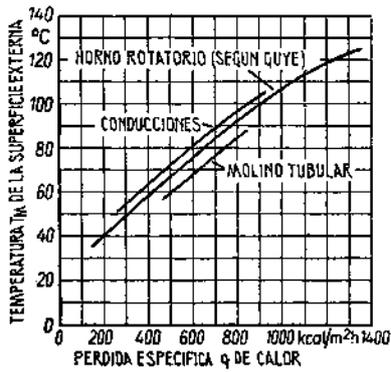


Fig. 2

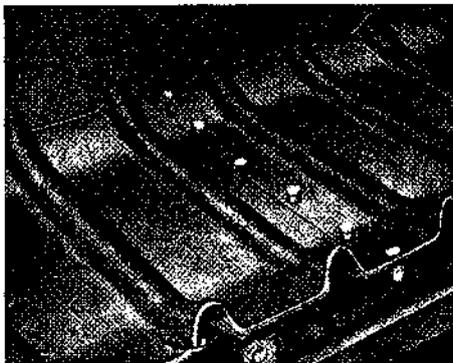


Fig. 5

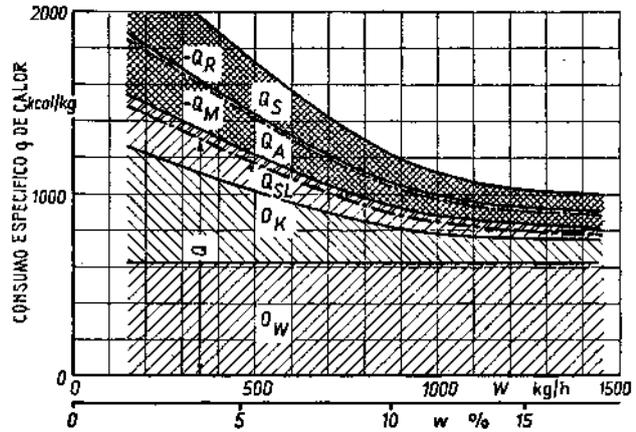


Fig. 3

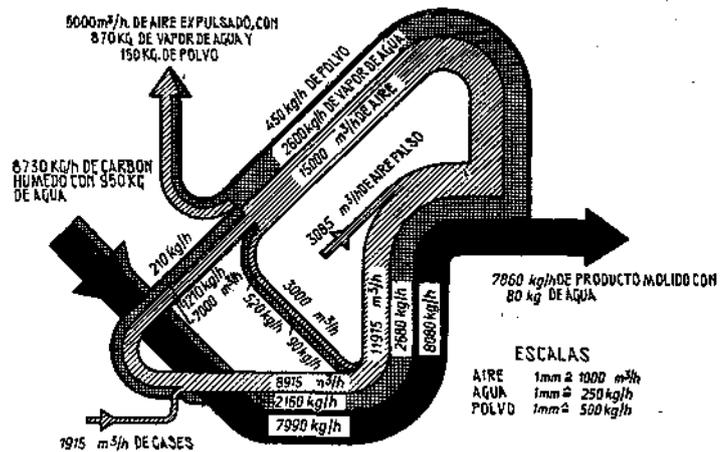


Fig. 4

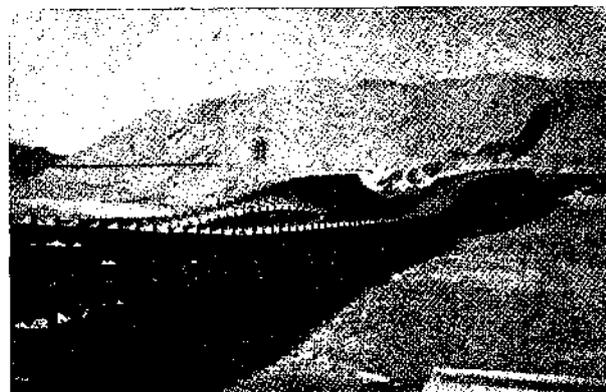


Fig. 6

Fig. 1. —Esquema de la instalación de molinera. *a*, entrada del material; *b*, molino; *c*, entrada de los gases de secado; *d*, ventilador; *e*, separador; *f*, retorno de gruesos; *g*, ciclón; *h*, producto molido.

Fig. 2. —Pérdida de calor por radiación, convección y conductividad.

Fig. 3. —Consumo de calor, en función de la cantidad de agua que se ha de evaporar

Fig. 4. —Representación gráfica de las proporciones de aire, en una instalación de molinera, con secado por corriente de aire, con una evaporación de agua del 10⁰/₀.

Fig. 5. —Detalle de la cinta transportadora acordeón.

Fig. 6. — Forma de realizar la descarga de una cinta transportadora acordeón.