Materiales de Construcción Vol. 19, nº 136
Octubre, noviembre, diciembre de 1969

616-130

nuevo método para el cálculo de hornos rotatorios de cemento

WLADIMIR J. SSATARIN y ARKADI S. KISSELHOFF
Institut «Jushgiprozement», Charkow (URSS)
Silikattechnik, nº 10, octubre 1968, págs. 321-325

El cálculo de hornos rotativos se basa en el establecimiento de balances de materiales y térmicos, y de la fijación de las dimensiones que determinan el perfil óptimo del horno.

El balance térmico se establece de acuerdo con los parámetros precalculados para las diferentes zonas del horno o para la totalidad del mismo. Aquí se incluye también la instalación de enfriamiento del clínker. El balance térmico sirve para determinar el consumo de combustible y el rendimiento del horno. Las mencionadas secciones de cálculo ya se han aclarado lo suficiente metodológicamente para que normalmente no se tengan dificultades.

Para la determinación de las dimensiones óptimas del horno han sido propuestos diversos métodos. Se conocen métodos analíticos que se basan en la teoría del intercambio de calor, métodos simplificados que se aplican empleando fórmulas empíricas y procedimientos de modelo que utilizan la teoría de la semejanza.

Amplia difusión ha encontrado el método de cálculo propuesto por J. I. Hodorow (1). De acuerdo con el mismo, se determina la longitud de las zonas del horno según las leyes del intercambio de calor o según el tiempo de permanencia del material en las diferentes zonas (zonas de sinterización y de enfriamiento). Este autor dio también valores para el coeficiente de transmisión de calor en el cálculo aproximado de las dimensiones de las zonas del horno, los cuales fueron utilizados por H. S. Worobjow y D. J. Masurow (2) en su método simplificado para determinar las dimensiones globales del horno.

G. Gigi (3), G. Bornschein (4) y J. I. Hodorow (5) parten de la semejanza geométrica y térmica. Prevén la aplicación de un coeficiente de modelo, que expresa la relación del rendimiento del horno a proyectar y la del que se encuentra funcionando con diferentes coeficientes de proporcionalidad.

W. Anselm (6), A. N. Iwanow (7) y D. J. Masurow (8), así como otros autores, han propuesto una serie de fórmulas empíricas, según las cuales la longitud total del horno y su diámetro interior han de determinarse en función del rendimiento.

En la siguiente exposición se detallarán más concisamente los métodos de cálculo indicados, discutiéndose también un método analítico-estadístico propuesto por A. S. Kisselhoff (9), el cual fue desarrollado en el Instituto Jushgiprozement. Kisselhoff generaliza sobre la base de características de funcionamiento prácticas en el análisis matemático de varios hornos, y deriva fórmulas que tienen en cuenta las relaciones recíprocas entre las características constructivas y tecnológicas de los hornos.

1. Fórmulas empíricas

Las primeras fórmulas empíricas del cálculo fueron presentadas por A. N. Iwanow (7) y han tenido una amplia difusión. Sirven para determinar el rendimiento térmico del horno:

$$Q = 1{,}1 \cdot D^3 \quad \text{(Mkcal/h)} \quad , \qquad [1]$$

y la longitud de la zona de calcinación:

$$L_z = 4{,}9 \cdot D \quad \text{(m)}. \qquad [2]$$

Para hornos con diámetros pequeños, se lograron resultados útiles de estas fórmulas. Algo más tarde se propusieron fórmulas empíricas para los hornos que trabajan según el procedimiento húmedo, las cuales permiten determinar el diámetro interior D y la longitud L del horno en función del rendimiento diario (24 horas) G_t.

Así, según W. Anselm (6):

$$D = 0{,}396 \cdot G_t^{0,34} \quad \text{(m)} \quad , \qquad [3]$$

y

$$L = 7{,}63 \cdot G_t^{0,45} \quad \text{(m)} \quad , \qquad [4]$$

y según Schwarz-Bergkampf:

$$D = 0{,}55 \cdot G_t^{0,33} \quad \text{(m)} \quad , \qquad [5]$$

y

$$L = 6{,}5 \cdot G_t^{0,5} \quad \text{(m)} \quad . \qquad [6]$$

La estructura de las fórmulas indicadas demuestra que no reflejan la diversidad de los factores determinantes de los parámetros tecnológicos y constructivos del horno. Además, con parámetros iguales no hay resultados coincidentes. Exceptuando la fórmula [1], hoy en día ya no se aplican en la práctica.

2. Método del modelo

El método propuesto por G. Gigi parte de un coeficiente de modelo, según el cual, con igual consumo de calor específico, la longitud y el diámetro medio del horno a proyectar son directamente proporcionales, y el rendimiento específico es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de este coeficiente. La relación de la longitud al diámetro medio de ambos hornos, así como también los ángulos de inclinación y los números de revoluciones, permanecen invariables.

En el modelado de los hornos según el método propuesto por J. I. Hodorow, manteniendo la semejanza geométrica, el rendimiento térmico de los hornos es proporcional al cuadrado del diámetro interior de la zona de clinkerización (D), mientras que la tensión térmica específica de una unidad de volumen de esta zona es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de D.

Según un método de modelos de este tipo, permanecen invariables las tensiones térmicas específicas por unidad de superficie de la sección y de superficie del revestimiento en la zona de cocción con el rendimiento creciente y aumento de las dimensiones de los hornos rotativos. En ambos métodos de modelado se mantiene la relación de la longitud al diámetro medio del horno, lo que, con números de revoluciones y ángulos de inclinación constantes, conduce a un tiempo de permanencia constante del material en el horno.

El método de Bornscheins no se diferencia esencialmente del de Gigi, pero se han modificado algunos coeficientes de proporcionalidad.

En todos los casos se introdujo en el criterio de semejanza la suposición errónea de que en el modelado se admite la constante de la relación $\frac{L}{D}$ y de la tensión térmica específica de la superficie de la sección en la zona de cocción. En realidad, el valor de la primera relación disminuye al aumentar el diámetro del horno, en tanto que el segundo valor aumenta. Como se verá más adelante, puede aceptarse, con $a = 4{,}1 \cdot n \cdot D^{0{,}25}$, la relación $\frac{L}{D}$ —en función de D— con 84 : $D^{0{,}5}$ y la correspondiente tensión térmica específica de la sección transversal de la zona de cocción, siendo n un coeficiente que depende de la verdadera tensión térmica volumétrica $-n \cdot \frac{\varphi}{\varphi_s}$.

3. Determinación de las longitudes de las zonas de trabajo del horno según el método desarrollado por J. I. Hodorow

Según Hodorow, las dimensiones de las zonas tecnológicas (a excepción de las zonas de sinterización y de enfriamiento) se determinan basándose en las leyes de la transmisión térmica de acuerdo con la diferencia dada de las temperaturas de los gases y del material. Las dimensiones de las zonas de sinterización y de enfriamiento se determinan tomando como base los tiempos de permanencia del material: para la zona de sinterización, $\tau = 0{,}3 \ldots 0{,}5$ h; para la zona de enfriamiento, $\tau = 0{,}2 \ldots 0{,}25$ h.

Según esto, la longitud de las zonas mencionadas se obtiene multiplicando la velocidad de traslación del material por el tiempo normal del proceso:

$$\Delta L = W_g \cdot \tau_g, \qquad [1]$$

siendo:

$$W_g = \frac{1{,}88 \cdot D \cdot i \cdot n}{\text{sen } \beta} \quad (\text{m/h}), \qquad [2]$$

donde:

D = diámetro interior del horno (m).

i = inclinación del cuerpo del horno (%).

n = número de revoluciones del horno (r.p.m.).

β = ángulo de talud natural del material en cada una de las zonas;

— para zona de sinterización, $\beta = 50^\circ \ldots 60^\circ$;

— para zona de enfriamiento, $\beta = 45^\circ \ldots 50^\circ$.

Para las otras zonas del horno, la duración del proceso queda determinada esencialmente por las condiciones del intercambio de calor, y la longitud de la zona se obtiene por la relación:

$$\Delta L = \frac{G \cdot Q_g}{\alpha \cdot F \cdot \Delta t} \quad (\text{m}), \qquad [3]$$

donde:

G = rendimiento del horno (kg/h).

Q_g = cantidad de calor que en cada una de las zonas hay que aportar al material (kcal/kg de clínker).

F = superficie total del revestimiento del horno y de las instalaciones intercambiadoras de calor por cada m de longitud de la zona (m^2/m).

Δ_t = diferencia de temperatura logarítmica media gas/material en la zona (°C).

α = coeficiente reducido de la emisión de calor de la corriente de gas al material (kcal/$m^2 \cdot h \cdot$ °C).

Teniendo en cuenta la complicada naturaleza del intercambio de calor en hornos rotatorios, es difícil determinar con exactitud el coeficiente reducido α. Por esta causa, para cada caso individual de la transmisión del calor hay que trabajar con ecuaciones. Para una zona del horno de la longitud ΔL, que forzosamente ha de estar aislada contra influencias de las zonas contiguas, las ecuaciones de los balances de las corrientes térmicas tienen la siguiente forma:

$$Q_{ga} = \overset{s}{Q}_{ga-f} + \overset{k}{Q}_{ga-f} + \overset{s}{Q}_{ga-g} + Q_{ga-st} \qquad [4]$$

$$\overset{s}{Q}_{ga-f} + \overset{k}{Q}_{ga-f} = \overset{s}{Q}_{f-g} + \overset{wl}{Q}_{f-g} + Q^{s,k}. \qquad [5]$$

Las abreviaturas que figuran como exponentes s, k y wl significan el tipo de transmisión del calor (radiación, convección y conducción del calor, respectivamente). Los subíndices dan la dirección de la corriente térmica (ga-f "gas-revestimiento"; ga-g "gas-material"; ga-st "gas-polvo"; f-g "revestimiento-gas").

La longitud de cada zona de trabajo se determina según la fórmula:

$$\Delta L = \frac{GQ_g}{K(\overset{wl}{Q}_{f-g} + \overset{s}{Q}_{f-g} + \overset{s}{Q}_{ga-g} + \overset{k}{Q}_{ga-g})}, \quad \text{(m)} \qquad [6]$$

En esta fórmula K es un coeficiente de absorción de calor, es decir, la relación entre la cantidad de calor realmente aportado al material y la cantidad de calor máximo posible que varía entre 0,9 ... 0,85 desde la zona exotérmica hasta la zona de secado posterior.

El cálculo de la transmisión del calor en el horno y la determinación de las dimensiones de las zonas de trabajo, exige mucho esfuerzo. Hay que manejar un número muy elevado de coeficientes y criterios (unos 70). La metódica está descrita ampliamente en el trabajo de J. I. Hodorow "Hornos para la industria del cemento", partes I y II, publicada en Promstroiisdat, en 1951. Junto a sus ventajas, que consisten principalmente en el tratamiento detallado de todos los tipos de transmisión de calor desde el portador térmico hasta el material, el método de cálculo desarrollado por Hodorow presenta muchas dificultades y, además, no es exacto. De todos modos es evidente su ventaja frente a los métodos que se basan en fórmulas empíricas. Algunas indicaciones referentes a cálculos termotécnicos más exactos de hornos rotatorios, las hizo el mismo autor en la revista "Zement" (1960) n.° 5 y (1961) n.° 6.

METODO SIMPLIFICADO, DESARROLLADO EN EL INSTITUTO ESTATAL DE INVESTIGACION Y PROYECTO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO JUSHGIPROZEMENT (A. S. Kisselhoff)

El proceso de calcinación térmica puede expresarse en forma general por el sistema de ecuaciones:

$$Q = a \cdot f = \varphi \cdot V = B \cdot q \cdot 10^{-3}. \qquad [1]$$

Al considerar una de las ecuaciones de este sistema puede comprobarse, sin dificultad, que son una composición de los parámetros de la conducción del horno (a, φ, q) y de la construcción (f, V), representando los últimos una función del horno.

La influencia mayor la tienen los coeficientes a y φ, ya que q es una variable independiente que resulta del balance térmico.

Las magnitudes contenidas en la fórmula [1] tienen los siguientes significados:

Q = rendimiento térmico del horno (Mkcal/h).

a = coeficiente que caracteriza el proceso de combustión del combustible: Numéricamente es igual a la cantidad de calor que atraviesa 1 m^2 de la sección transversal libre de la zona de cocción en 1 hora.

f = sección transversal libre de la zona de cocción (m^2).

φ = coeficiente del consumo de calor: Es igual a la cantidad de calor (Mkcal) de combustible consumido en 1 h por cada m^3 de espacio útil del horno.

V = espacio útil del horno (m^3).

B = rendimiento del horno (t/h).

q = consumo de calor específico para el proceso de cocción $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg de clínker}}\right)$.

Si se designa por D_b el diámetro interior de la zona de cocción del horno, por D_{ml} el diámetro interior medio y por L longitud del horno, se obtiene:

$$\frac{a}{\varphi} = \frac{V}{f} = \frac{0{,}785 \cdot D_{ml}^2 \cdot L}{0{,}785 \cdot D_b{}^2} = L \left(\frac{D_{ml}}{D_b}\right)^2 . \qquad [2]$$

La ecuación [2] muestra que la relación $\frac{a}{\varphi}$ es constante para cada horno y que depende del perfil del horno.

Puesto que

$$a = \varphi \cdot L \left(\frac{D_{ml}}{D_b}\right)^2 , \qquad [3]$$

a cualquier valor φ, para un horno de dimensiones dadas, corresponde únicamente un valor:

con D = const. ó con $D_{ml} = D_b$, $a = \varphi \cdot L$. [4]

Una vez determinado el valor q, según las fórmulas indicadas más adelante, se necesita sólo averiguar los valores de los coeficientes a y φ con el fin de llegar a una característica del horno completa.

El coeficiente a se determina en función del diámetro interior de la zona de cocción según la ecuación:

$$a = \frac{Q}{f} = \frac{Q}{0{,}785 \cdot D_b^{\,2}}. \qquad [5]$$

Si se analiza la variación de la magnitud a para una serie de hornos con diámetros interiores en la zona de cocción de

$$D_b = 3{,}2; \quad 3{,}6; \quad 4{,}05 \quad \text{y} \quad 4{,}55 \quad \text{(m)},$$

y con rendimientos térmicos específicos Q_s (y, además, con parámetros tecnológicos iguales) de

$$Q_s = 44; \quad 57{,}5; \quad 75 \quad \text{y} \quad 97 \quad \text{(Mkcal/h)}$$

puede demostrarse que la relación entre el coeficiente a y D_b se expresa, en estas condiciones, por la fórmula:

$$a = 4{,}1 \cdot D_b^{0{,}25} \quad (\text{Mkcal/m}^2 \cdot \text{h}). \qquad [6]$$

El valor específico es así:

$$Q_s = a \cdot f = 3{,}22 \cdot D_b^{2{,}25} \quad \text{(Mkcal/h)}. \qquad [7]$$

Los valores específicos para φ_s, que corresponden a los aceptados D_b y Q_s (según fórmula [7]), se hallan cuando se admiten unos espacios útiles de los hornos próximos a las magnitudes reales:

$D_b = 3{,}2; \quad 3{,}6; \quad 4{,}05; \quad 4{,}55.$

$Q_s = 44; \quad 57{,}5; \quad 75{,}0; \quad 97.$

$V_s = 1.200; \quad 1.600; \quad 2.170; \quad 2.900.$

$\varphi_s = \dfrac{Q_s}{V_s} = 0{,}0366; \quad 0{,}0356; \quad 0{,}0345; \quad 0{,}0336.$

Si se designa log Q_s por x y log φ_s por y, la función $y = f\ (x)$, como lo demuestra un análisis, se expresa por una recta, cuya ecuación es

$$y = -\,0{,}113 \cdot x - 1{,}25. \qquad [8]$$

De aquí se deduce:

$$\log \frac{\varphi_s}{Q_s^{-0{,}113}} = -\,2{,}75 \quad ; \quad \frac{\varphi_s}{Q_s^{-0{,}113}} = 0{,}0562,$$

y de aquí:

$$\varphi_s = \frac{0{,}0562}{Q_s^{-0{,}113}}.$$

Si se incluye el valor Q_s de la fórmula [7], se obtiene:

$$\varphi_s{}^* = \frac{0{,}049}{D_b{}^{0{,}25}} \quad (\mathrm{Mkcal/m^3 \cdot h}). \qquad [9]$$

Considerando el hecho de que, según las fórmulas [3] y [4], para cada horno la relación

$$\frac{a}{\varphi} = \text{const.},$$

los valores reales para a y Q son:

$$a = 4{,}1 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_s} \cdot D_b^{0{,}25} \qquad [10]$$

y

$$Q = 3{,}22 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_s} \cdot D_b^{2{,}25} . \qquad [11]$$

Para el perfil que se desee a lo largo de un horno, resulta:

$$\frac{a}{\varphi} = L = 84 \cdot D_b^{0{,}5} \left(\frac{D_b}{D_{ml}}\right)^2 \quad (\mathrm{m}). \qquad [12]$$

Queda por determinar aún qué valor efectivo tiene φ para una forma de trabajar variable.

De la fórmula básica [1] se deduce que:

$$\varphi \cdot \frac{V}{B} = \varphi \cdot v = q \cdot 10^{-3},$$

y de aquí:

$$\varphi = \frac{q \cdot 10^{-3}}{v} \quad (\mathrm{Mkcal/m^3 \cdot h}). \qquad [13]$$

El volumen específico v que se detalla en la ecuación [13] se compone del volumen V_f necesario para la total eliminación de la humedad de la pasta y del volumen V_e necesa-

* Un cálculo detallado de las magnitudes a y φ se encuentran en la referencia bibliográfica (9).

rio para el calentamiento del material deshidratado y precalentado (hasta t_k) hasta la máxima temperatura de cocción:

$$v = V_e + V_f \quad (\text{m}^3/\text{t de clínker} \cdot \text{h}). \qquad [14]$$

La magnitud V_f se obtiene como relación entre la cantidad de humedad eliminada G_f y la humedad media extraída en la zona de la eliminación de la humedad W_m:

$$V_f = \frac{G_f}{W_m} \quad (\text{m}^3/\text{t de clínker} \cdot \text{h}). \qquad [15]$$

El valor W_m depende de la densidad de suspensión de las cadenas, μ, expresado en m^2/m^3. Se le determina por la ecuación:

$$W_m = \mu \cdot \delta \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{h}), \qquad [16]$$

donde δ es la humedad extraída por m^2 de superficie de cadenas .

A base de un análisis del trabajo de la cortina de cadenas, se elaboró una representación gráfica de la dependencia de los valores δ_T de la tabla de la densidad de suspensión de las cadenas μ y $\dfrac{W_a + W_e}{2}$ para $\Delta t = 475°C$. En esta fórmula:

W_a = humedad inicial de la pasta.

W_e = humedad final de la pasta.

Para cualquier diferencia de temperatura media es:

$$\delta = \delta_T \cdot \frac{\Delta t}{475} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}). \qquad [17]$$

La representación gráfica para hallar los valores de las magnitudes que entran en la fórmula [16], se encuentra en la figura 1. Una confrontación de las características de una serie de hornos, de acuerdo con los datos de los ensayos, hace que quede justificado admitir:

$$V_e = K \cdot D_b^{0,25} \quad (\text{m}^3/\text{t de clínker}), \qquad [18]$$

en donde:

$$K = 23 - 0{,}009 \cdot t_k,$$

o sea:

$$v = K \cdot D_b^{0,25} + \frac{G_f}{W_m} \quad (\text{m}^3/\text{t de clínker} \cdot \text{h}) \qquad [19]$$

y el rendimiento del horno:

$$B = \frac{V}{v} = \frac{66 \cdot D_b^{2,5}}{K \cdot D_b^{0,25} + \dfrac{G_f}{W_m}} \quad (\text{t/h}). \qquad [20]$$

Por la última ecuación se deduce que el rendimiento se determina por el volumen del horno, el diámetro de la zona de cocción, la cantidad de humedad eliminada, la extracción de humedad y el grado del calentamiento del material en la zona de las instalaciones intercambiadoras de calor.

El diámetro interior del extremo frío del horno, D_k, para que se cumpla la condición de que la velocidad del gas en la salida no sea mayor de 6 m/s y pueda mantenerla, ha de corresponder a la ecuación:

$$D_k = 0{,}5 \cdot \sqrt{Q} \ . \qquad [21]$$

El diámetro de la parte central del horno, D_m, es, suponiendo que se consume el 30 % de su longitud total en cada uno de los extremos frío y caliente:

$$D_m = \sqrt{1{,}75 \cdot D_b^2 - 0{,}75 \cdot D_k^2} \quad \text{(m).} \qquad [22]$$

Por último, se propone además un método simplificado para determinar el consumo de calor específico para la cocción del clínker. Este problema se soluciona de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$q = q_{kl} + q_k + d_{tr} \left(597 \cdot \frac{W_a}{100 - W_a} - 0{,}95 \cdot t_s \right) +$$

$$+ q_u + \frac{14 \cdot W_a \cdot D_k}{D_b^{1{,}75}} (1 - 0{,}006 \cdot t_m) + q \ , \qquad [23]$$

siendo:

$$q_a = \frac{0{,}4\ (q - q_a) \cdot d}{1 - 0{,}4 \cdot d} \quad ; \quad d = \frac{t}{t_a + 273} .$$

q_k = consumo de calor en la formación de clínker (kcal/kg clínker).

q_{kl} = pérdida de calor con el clínker extraído (teniendo en cuenta la pérdida de calor del aire a la salida del enfriador) (kcal/kg de clínker).

d_{tr} = alimentación de material crudo seco teniendo en cuenta las pérdidas irrecuperables (kg/kg de clínker).

W_a = humedad inicial de la pasta.

t_s = temperatura de la pasta (°C).

D_k = diámetro medio del cuerpo del horno (m).

t_m = temperatura del medio ambiente (°C).

t_a = temperatura de los gases de escape del horno (°C).

q_a = pérdida de calor por los gases de escape (kcal/kg de clínker).

q_u = pérdida de calor por combustión incompleta (kcal/kg de clínker).

El método propuesto ofrece la posibilidad de simplificar el cálculo de un horno a proyectar, haciéndolo para la práctica de la siguiente forma:

Si se dan el rendimiento requerido del horno y los parámetros tecnológicos fundamentales que en el denominador de la fórmula [20] determinan magnitudes detalladas, de acuerdo con esta fórmula [20] se determina el valor de D_b y, por consiguiente, la longitud del horno —$L = 84 \cdot D_b^{0,5}$— poniéndose $D_{ml} = D_b$.

Según la fórmula [23], se averigua el consumo de calor específico q y, seguidamente, el rendimiento térmico $Q = B_q$.

A partir del rendimiento térmico Q y del espacio útil del horno, $V = 66 \cdot D_b^{2,5}$, se halla φ:

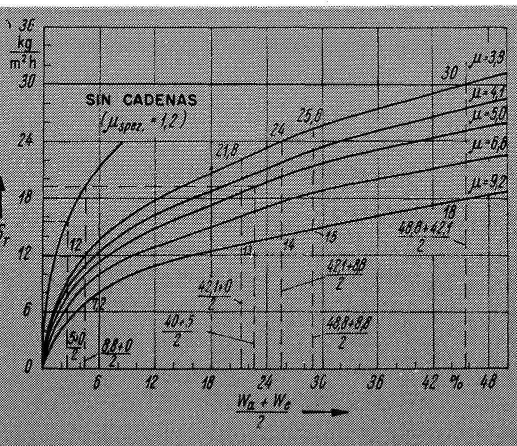
$$\varphi = \frac{Q}{V}$$

y por fin el valor a:

$$a = \varphi \cdot L = \frac{Q}{V} \cdot 84 \cdot D_b^{0,5}.$$

El diámetro interior del extremo frío del horno se halla según la fórmula [21] y el de la zona central (con $D_{ml} = D_b$) según la fórmula [22]. En la tabla 1 se indican los criterios de semejanza propuestos por diferentes autores con un coeficiente de modelado de $x = \frac{B_x}{B_o}$.

La figura 1 muestra la relación entre la eliminación total de la humedad en la zona de secado y la eliminación de la humedad por unidad de superficie de caldeo de las cadenas, del intervalo de humedad de la pasta, de la densidad de suspensión de las cadenas y de la diferencia de temperatura media.



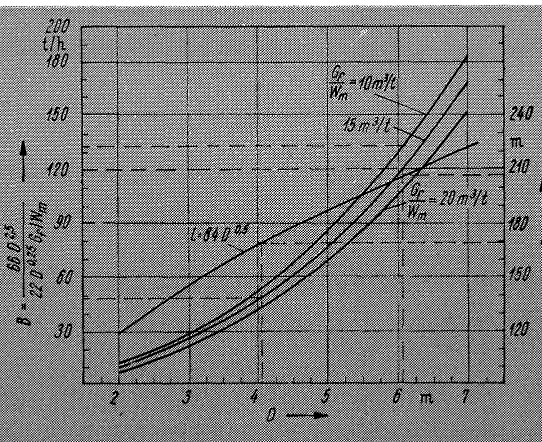


Fig. 1.—Relación entre la eliminación de la humedad y la densidad de la cortina de cadenas para diferentes intervalos de pasta (cortina con cadenas suspendidas libremente).

$$\delta = \delta_T \cdot \frac{\Delta t}{475} \quad \left(\frac{kg}{m^3 \cdot h}\right), \qquad W = \mu \cdot \delta \quad \left(\frac{kg}{m^3 \cdot h}\right).$$

Fig. 2.—Relaciones entre diámetro, rendimiento y longitud del horno (con $D = D_b = D_{ml}$) y diferentes valores para $\frac{G_r}{W_m}$, con $K = 22$.

TABLA 1

Criterios de semejanza

Criterio	Gigi	SEGUN: Hodorow	SEGUN: Bornschein	del método propuesto *
1. Relación de los diámetros medios	$\frac{D_x}{D_0} = \sqrt{x}$		$\frac{D_x}{D_0} = \sqrt[2,22]{x}$	$\frac{D_x}{D_0} = \sqrt[2,25]{x}$
2. Relación del rendimiento de volumen específico	$\frac{b_x}{b_0} = \sqrt{\frac{1}{x}}$			$\frac{b_x}{b_0} = \sqrt[9]{x}$
3. Relación de la longitud del horno a su diámetro interior	$\frac{L_x}{D_x}$ = const.	$\frac{L_x}{D_x}$ = const.	$\frac{n_x}{n_0} = x^{-0,05}$ $n = L/D$	$\frac{n_x}{n_0} = \sqrt{\frac{D_0}{D_x}}$
4. Relación del rendimiento térmico al diámetro interior de la zona de cocción		$\frac{Q_x}{Q_0} = \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^2$		$\frac{Q_x}{Q_0} = \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^{2,25}$
5. Relación del espacio útil del horno al diámetro interior.				$\frac{V_x}{V_0} = \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^{2,5}$

* Los criterios del método propuesto se han establecido en la suposición de que los valores q y φ permanecen constantes.

En la figura 2 se muestra la relación entre el rendimiento del horno, el diámetro interior de la zona de cocción, el contenido de humedad de la pasta y la característica de las instalaciones intercambiadoras de calor (con $K = 22$), así como la correspondiente longitud del horno (con $D_{ml} = D_b$).