

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

618-30 CONSIDERACIONES SOBRE EL TRANSPORTE Y CALENTAMIENTO DEL MATERIAL EN LOS HORNOS ROTATORIOS, EN RELACION CON SUS DIMENSIONES.

(Modellbetrachtungen über die Förderung und Erwärmung des Gutes in Drehöfen).

W. Anselm, E. Schwarz-Bergkampf.

De: "ZEMENT-KALK-GIPS", número extraordinario nº 5, octubre 1954, pág. 101.

- S i n o p s i s -

Los autores presentan los resultados de sus estudios sobre las dimensiones apropiadas que se han de dar a los hornos rotatorios, en relación al transporte del material y a las condiciones de transmisión del calor; dichos resultados prueban la existencia de una regularidad perfecta. Estudian, especialmente, la influencia de la radiación en los hornos rotatorios de dimensiones variables. De acuerdo con dichos estudios se puede fijar la transmisión de calor en las diferentes zonas del horno rotatorio y establecer comparaciones entre los diversos sistemas de hornos.

- - -

El horno rotatorio ha alcanzado en la industria del cemento una posición extraordinaria y, por esta razón, se han llevado a cabo minuciosas y extremas contribuciones al conocimiento de su forma de funcionamiento. Schwarz v. Bergkampf y Modl (1) han establecido consideraciones, de tipo general, sobre las dimensiones de los hornos rotatorios. Anselm (2) ha obtenido indicaciones

fundamentales sobre la construcción, funcionamiento y rendimiento para diferentes hornos grandes, funcionando según cualquiera de los dos procedimientos; las ha reunido, también en forma de consideraciones análogas.

Con todo ello se relacionan estas indicaciones sobre el proceso fundamental de la corriente y de la transmisión de calor, en las que se indica que el horno rotatorio es una instalación de combustión, que trabaja establemente y con seguridad.

El interés fundamental de los autores ha sido comprobar los valores indicados, introduciendo relaciones entre el transporte y la transmisión de calor; para esto eran necesarias todas las indicaciones numéricas de los grandes hornos.

Los valores de Anselm se dan en la tabla I.

A partir de estos valores se calculan, basándose en la producción diaria D (toneladas/día), las citadas relaciones, obteniéndose una concordancia muy buena, como ya había sido indicado, en parte, por Anselm.

Hornos rotatorios, en vía húmeda:

Diámetro interno del horno .....	$d_i$ (m)	=	$0,38 \cdot D^{0,33}$
Longitud total del horno .....	$L_G$ (m)	=	$7,5 \cdot D^{0,40}$
Número de revoluciones .....	$U$ ( $\text{min}^{-1}$ )	=	$0,344 \cdot D^{0,156}$
Inclinación .....	$N$ (%)	=	$2,72 \cdot D^{0,060}$
Grado de llenado relativo .....	$\varphi$ (%)	=	$40,0 \cdot D^{-0,22}$
Tiempo de circulación del material ..	$Z$ (min)	=	$375,0 \cdot D^{-0,13}$
Velocidad media del gas .....	$V_0$ (m/s)	=	$0,16 \cdot D^{0,31}$

y de aquí, como magnitud invariable, U.N.  $\gamma = 36$ .

Como comprobación de los exponentes se puede poner:

$$1 = 3 p(d) + p(U) + p(N) + p(\gamma)$$

$$p(z) = p(L) - p(d) - p(U) - p(N)$$

Hornos Lepol:

$$d_i \text{ (m)} = 0,39 \cdot D^{0,34}$$

$$L_G \text{ (m)} = 2,68 \cdot D^{0,46}$$

$$U \text{ (min}^{-1}\text{)} = 0,323 \cdot D^{0,17}$$

$$N \text{ (\%)} = 2,40 \cdot D^{0,06}$$

$$\gamma \text{ (\%)} = 57,0 \cdot D^{-0,24}$$

$$Z \text{ (min)} = 170,0 \cdot D^{-0,1}$$

$$V_0 \text{ (m/s)} = 0,1666 \cdot D^{0,27}$$

deduciéndose, de nuevo, como magnitud prácticamente constante, -  
U.N.  $\gamma = 42$ .

Resulta como consecuencia que el transporte del material es muy regular en las dos clases de hornos, aunque trabajan de forma diferente, y que incluso el producto de  $UN\gamma$  alcanza un valor prácticamente constante, lo que representa un medio para determinar el transporte de materiales en los diferentes procedimientos de trabajo en los hornos rotatorios -como Anselm (2) ya lo había determinado en sus fórmulas para el tiempo de circulación y para el grado de llenado relativo-. Por consiguiente, el cociente  $D/d_i^3$  también es prácticamente constante, pero no es tan expresivo en sus conclusiones.

A partir de este conocimiento más exacto del transporte del material es ahora interesante considerar la transmisión

TABLA I

HORNOS ROTATORIOS DE CEMENTO (ANSELM).

A. Hornos rotatorios, en vía húmeda.

Producción (Tm/dfa)	$d_i$ (m)	$L_G$ (m)	$U$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$N$ (%)	$Z$ (min)	$\gamma$ (%)	$v_o$ (m/s)	$UN\gamma$	$D/d_i^3$
100	1,9	56,5	0,71	3,6	206	14,2	0,761	36,2	14,6
300	2,8	88,5	0,84	3,7	178	10,3	1,024	32,0	13,7
600	3,5	118,0	0,94	4,0	163	9,6	1,284	36,0	14,0
900	4,0	139,0	1,00	4,1	154	8,8	1,46	36,0	14,0
1.200	4,4	165,0	1,05	4,2	154	8,7	1,595	38,4	14,0
								36,0	

B. Hornos Lepol.

140	2,1	26,0	0,75	3,2	101	17,4	0,635	41,7	15,2
280	2,65	35,0	0,85	3,4	92	14,7	0,766	42,5	15,2
560	3,4	50,5	0,95	3,5	90	12,2	0,86	40,5	14,3
1.120	4,25	68,5	1,05	3,6	87	11,1	1,111	42,0	14,6
								42,0	

del calor al material que se introduce. Se necesita, como magnitud más importante, la superficie a través de la cual pasa el calor. Puede, en una primera aproximación, suponerse igual a la superficie interna del horno rotatorio. Pero, como el material se desplaza continuamente, debe emplearse, como superficie de las capas superiores de las partículas -aproximadamente esféricas-, la superficie de la capa, es decir, en el cálculo se ha de emplear un valor 3,2 veces mayor (\*).

Con ello se obtiene  $F/d \cdot L = 4 \cdot D^{0,066}$ , es decir, para el horno Lepol,  $F = 5,5 D^{0,78}$  y para el horno rotatorio, funcionando por vía húmeda,  $F = 17,5 \cdot D^{0,74}$ .

En los sistemas considerados horno Lepol-horno rotatorio de vía húmeda, deben transmitirse las cantidades de calor (kcal/kg clinker) indicadas en la tabla II, que resultan de un balance térmico, relacionado con el lugar de consumo.

Estas cantidades de calor se transferirán, en los sistemas indicados en el horno rotatorio, habiéndose realizado el cálculo a lo largo de la longitud total del horno.

Las diferencias medias de temperaturas entre el gas y el material ascienden, según Anselm (realizado el cálculo como media de cada sección),

para el horno Lepol .....  $t_m = 570^\circ\text{C}$   
para el horno rotatorio, funcionando en vía húmeda  $t_m = 515^\circ\text{C}$

Por consiguiente, se obtiene el coeficiente de transmisión de calor para el horno Lepol:

$$\frac{D}{24} \cdot 488 \cdot 10^3 = \alpha \cdot 5,5 \cdot D^{0,78} \cdot 570; \alpha = 6,48 \cdot D^{0,22}$$

(\*) La superficie de una esfera es cuatro veces su sección; por lo tanto, las superficies de las bolas que se hallan en una sola capa sobre una superficie, se hallarán, con respecto a ésta, en la relación de 3,2:1 (se calcula con un 80%).

TABLA II

	Horno Lepol 14% H <sub>2</sub> O 75% Descarbonatación 25%		Horno rotatorio, en vía húmeda 35% H <sub>2</sub> O
	Horno rotatorio	Parrilla	100% Descarbonatación
Consumo			
Sinterización	25	--	25
Descarbonatación de CaCO <sub>3</sub>	351	118	469
Descarbonatación de MgCO <sub>3</sub>	--	10	10
Deshidratación del caolín	30	10	40
Consumo total	406	138	544
Ganancia			
Transformación del caolín	11	--	11
Formación del clinker	103	--	103
Desprendimiento de CO <sub>2</sub> del CaCO <sub>3</sub>	79	26	105
Desprendimiento de CO <sub>2</sub> del MgCO <sub>3</sub>	--	2	2
Desprendimiento de H <sub>2</sub> O del caolín	16	5	21
Ganancia total	209	33	242
Consumo - Ganancia	197	105	302
Calentamiento del material	291	192	483
Consumo total = Calor utilizable	488	297	785
H <sub>2</sub> O - Evaporación de agua	--	150	497
Radiación del horno (+ parrilla sin enfriador)	185	20	220
Gases de escape	547	80	248
Consumo bruto	1.220	547	1.750
Recuperación de calor del aire	250	--	300
Consumo neto	970		1.450
Cantidad de calor transmitida en el horno rotatorio, sin radiación, con evaporación de agua	488		1.282

(para los hornos Lepol investigados 1-4, los valores de  $\alpha$  se hallan entre 19 y 30 kcal/m<sup>2</sup>h°C)

para el horno rotatorio, trabajando en vía húmeda:

$$\frac{D}{24} \cdot 1282 \cdot 10^3 = \alpha \cdot 17,5 \cdot D^{0,74} \cdot 515; \alpha = 7,5 \cdot D^{0,22}$$

(para los hornos rotatorios, funcionando en vía húmeda, 1-5, los valores de  $\alpha$  se hallan entre 19 y 37 kcal/m<sup>2</sup>h°C).

La diferencia de los valores de  $\alpha$  en ambos sistemas de hornos se debe a que en el caso del horno rotatorio, empleando vía húmeda, se expulsan grandes cantidades de agua y se alcanza la total descarbonatación en el horno rotatorio; en el caso del horno Lepol sólo hay una pequeña deshidratación en el horno en sí, y la descarbonatación es solamente de 75%.

Los valores indicados para  $\alpha$  valen, solamente, para una temperatura media de sinterización de 1450°C; para 1350°C son, aproximadamente, un 2% más bajos, y para 1500°C, un 4% más altos. Valen, para la indicada diferencia de temperaturas, en el horno Lepol, o, lo que es equivalente, para hornos rotatorios con cambiador de calor acoplado a continuación, y en el horno rotatorio, trabajando por vía húmeda. Para cada tipo de horno pueden establecerse comparaciones, lo cual no era posible anteriormente. En este aspecto, no es decisivo el que circule, a través del horno, polvo finamente molido o gránulos; pues, en cada caso, la superficie ofrecida es suficientemente grande, para los respectivos tiempos de permanencia.

Una comparación para el control de estos valores de  $\alpha$  es posible a base de la velocidad del gas  $v_0$  en el horno; el aumento de  $v_0$ , debido a las cantidades expulsadas de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>O

a lo largo del horno, se ha de tomar como un valor medio, con lo que resulta una elevación de  $v_o$ ,

en el horno Lepol ..... 3%  
 en el horno rotatorio, funcionando en vía húmeda .... 20%.

Los correspondientes valores  $v_{om}$ , como velocidad media del gas, se relacionan con la longitud total  $y$ , por consiguiente, los valores de  $\alpha$  que se deducen serán,

en el horno rotatorio, funcionando en vía húmeda:

	$v_{om}$	$\alpha$
1	0,913 m/s	19 kcal/m <sup>2</sup> h°C.
2	1,23 "	26 "
3	1,54 "	32 "
4	1,75 "	35 "
5	1,91 "	37 "

en el horno Lepol:

1	0,655 "	19 "
2	0,79 "	22 "
3	0,886 "	26 "
4	1,143 "	30 "

Por consiguiente, se obtiene para el horno rotatorio con cambiador de calor, y una descarbonatación de 75%,

$$\alpha = 27,8 v_{om}^{0,882} \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$$

y para los hornos rotatorios, en vía húmeda,

$$\alpha = 21,3 v_{om}^{0,882} \text{ (kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)}.$$

Los valores obtenidos para los coeficientes de transmisión de calor tienen propiamente el sentido de números de inter

cambio de calor de los hornos rotatorios, conservando su carácter después de ulteriores determinaciones. La potencia de  $v_0$  es algo superior que lo que indican las leyes de Termodinámica, que dan un valor de  $v_0^{0,8}$ ; sin embargo, en el caso de las respectivas velocidades de gas, están en concordancia con los nuevos resultados de Wicke.

Por lo tanto, es posible calcular el valor de  $\alpha$  para cada sección del horno; en la zona de sinterización es fundamentalmente más alto, y en la zona de secado, más bajo. Esta relación, de acuerdo con la ley, puede ampliarse con un factor de temperatura para las variaciones de las diferencias medias de temperatura; la fórmula es suficiente para llevar a cabo, en todos los casos, las comparaciones, y poder determinar las dimensiones.

En el caso de carga a granel -como se presenta en la producción de cemento- los valores de  $\alpha$  son, para los gránulos, en la parrilla o en el cambiador de calor, tres veces más altos que en el horno mismo. En este aspecto, la figura 1 presenta los índices de transmisión de calor de los materiales cargados a granel y de los hornos rotatorios.

Todavía es posible una pequeña corrección para el cálculo más exacto en la comparación de hornos rotatorios pequeños y grandes, lo cual, naturalmente, no vale para el cálculo de un horno; se podía considerar la parte de radiación, en el consumo total de calor, pues no son suficientes los simples cálculos de conductividad. Los cálculos indicados se llevaron a cabo sin tener en cuenta la pérdida por radiación. Se debe considerar que la pérdida por radiación, en el caso de los hornos mayores, disminuye (en kcal/kg clinker); esto se debe a la disminución de la relación:



$$\frac{\text{superficie radiante del manto metálico (m}^2\text{)}}{\text{volumen libre del horno (m}^3\text{)}}$$

a lo que se opone, en el caso de los hornos mayores, la producción específica decreciente (toneladas/día/m<sup>3</sup>).

Según esto, la parte radiante (kcal/kg clinker) (únicamente, horno sin precalentador y sin enfriador) disminuye, en el caso de iguales temperaturas del manto metálico, en la forma:

	Horno Lepol	Horno rotatorio, vía húmeda
100 Tm/día	200	300
300 "	182	214
600 "	168	186
900 "	160	175
1,200 "	157	165

Esto influye, en parte, rebajando el consumo total de calor.

Un conocimiento exacto, análogo, de la función del horno rotatorio, poseerá, sin duda, una cierta importancia económica, porque los valores aquí obtenidos corresponden a las mejores condiciones de trabajo del horno rotatorio en la preparación de cemento, especialmente en lo que se refiere a la calidad del producto y a la inalterabilidad del revestimiento.

También estos resultados, de acuerdo con el transporte y con la transmisión de calor, presentan una exacta conformidad con la ley de la interpretación de las dimensiones de los hornos rotatorios.

S.F.S.

Bibliografía.

- (1) E. Schwarz v. Bergkamp y E. Modl: Rationelle Modellberechnungen von brennstoffbeheizten Industrieöfen. Techn. Mitteilungen 45 (1952), nº 11, 388 - 394.
- (2) W. Anselm: Der Drehofen, Dimensionbestimmungen und Modellähnlichkeit. Zement-Kalk-Gips, 1953, 5, 151 - 164.