

estudio de los intercambiadores de cadenas utilizados en la fabricación de cemento por vía húmeda

M. Papadakis y J. P. Bombled, ingenieros

(Publicación técnica núm. 143 del «Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques»)

I. introducción

El empleo de cadenas como intercambiador de calor es de uso muy extendido por su robustez y reducido gasto de entretenimiento. Su eficacia está comprobada.

No obstante, ciertas dificultades que se presentan durante la marcha y, más acentuadas todavía, durante la puesta en servicio de un horno nuevo, demuestran que el problema no está aún completamente resuelto.

Estas dificultades son de orden reológico. Este estudio tiene por objeto proporcionar un método que permite calcular la repartición y dimensionado óptimo de las cadenas teniendo en cuenta las propiedades reológicas de la pasta. El aspecto térmico de la cuestión parece, en efecto, mucho menos importante.

II. generalidades

El papel de intercambiador es doble: 1) Una primera función de orden térmico que consiste en utilizar el calor de los gases para secar la pasta. El cálculo de la superficie de intercambio a adoptar en cada caso se efectúa partiendo del valor del coeficiente de convección que exista en el horno. 2) La segunda función de orden reológico es de importancia fundamental para la buena marcha del horno. Sus aspectos deben estudiarse sobre el material crudo mediante modelos reducidos a temperatura ambiente.

exposición del método

Es evidente que las funciones 1 y 2 se complementan. Para estudiar el funcionamiento de un intercambiador es necesario establecer ciertas hipótesis para simplificar:

1. la función que define el contenido en agua es lineal

Sea $E = \frac{\text{agua}}{\text{pasta}}$ en peso. Si tomamos como origen de las longitudes el punto de entrada de la pasta en el intercambiador se puede plantear la hipótesis siguiente:

En una sección cualquiera del intercambiador, E será tanto más bajo cuanto mayor es la superficie de intercambio anterior a dicha sección y menor la posterior a dicha sección.

La ecuación más sencilla, representativa de esta hipótesis, es:

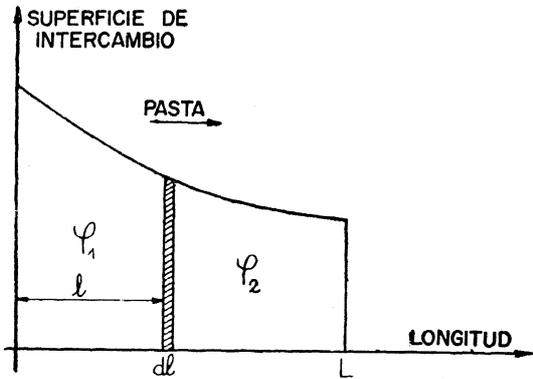


Fig. 1.—Establecimiento de la función de cambio.

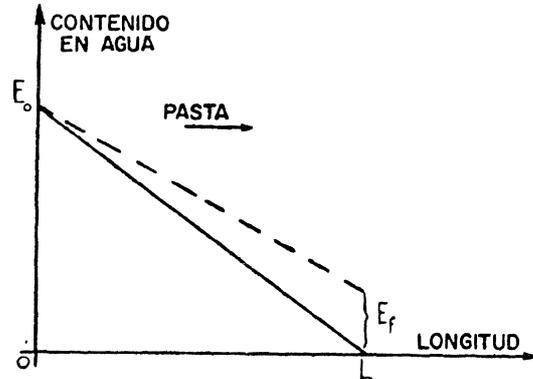


Fig. 2.—Variación del contenido de agua en las cadenas.

$$E = \frac{E_0 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}$$

En la que:

E_0 = contenido inicial de agua.

φ_1 = superficie de intercambio antes de la sección.

φ_2 = superficie de intercambio después de la sección.

En estas condiciones se ve que:

$E = E_0$ cuando $\varphi_1 = 0$, es decir, $l = 0$.

$E = 0$ cuando $\varphi_2 = 0$, es decir, $l = L$.

Siendo L la longitud total del intercambiador.

Sea s la superficie de intercambio contenida en una sección del intercambiador que se expresará, por ejemplo en $m^2/metro$.

Una hipótesis sencilla consiste en suponer que la superficie s , en el interior de cada sección es constante a todo lo largo del intercambiador $\left(\frac{ds}{dl} = 0\right)$

Resulta entonces:

$$E = E_0 \left(1 - \frac{s_0 l}{S}\right) \text{ y se encuentra que:}$$

$$E = E_0 \text{ para } l = 0.$$

$$E = 0 \text{ para } l = L.$$

Resulta una relación lineal entre el contenido de agua y la longitud del intercambiador. Esto corresponde a la hipótesis más sencilla y más lógica que se puede formular (fig. 2).

Hay que hacer notar que E no debe ser totalmente nulo a la salida del intercambiador, pues la presencia de pasta seca en las cadenas favorece mucho la formación de polvo. Es preferible que el material al abandonar la zona de cadenas contenga todavía del 5 al 10 % de agua.

2. Condición de avance del material

Como es sabido, las pastas crudas de cemento son suspensiones en agua de partículas sólidas de caliza y arcilla con aproximadamente un 20 % de esta última (figura 3). La parte arcillosa, siempre muy fina, desempeña un papel esencial desde el punto de vista reológico.

Las pastas crudas son cuerpos de BINGHAM ("flúidos plásticos") caracterizados por: a) una viscosidad plástica U , medida en poises, análoga a la viscosidad dinámica de los flúidos newtonianos, y b) un umbral de cizalladura f , expresado en dinas/cm², tensión crítica por debajo de la cual el escurrimiento ya no se produce (el material presenta entonces propiedades elásticas).

El valor del umbral de cizalladura depende de la finura de la fase sólida y de la concentración de la suspensión.

El umbral de cizalladura tiene un papel preponderante en los desplazamientos de las pastas y en la adherencia de la pasta a las cadenas. Es aquí donde hay que buscar la causa de las dificultades de circulación que se presentan en el intercambiador. En efecto, toda tensión de cizalladura aplicada, inferior a este umbral, no es capaz de poner la pasta en movimiento. Se produce entonces una obturación rápida del intercambiador, catastrófica para la marcha del horno.

Podemos enunciar, pues, la condición de avance de la manera siguiente:

En cada sección de un intercambiador, la tensión de cizalladura ejercida por una malla de cadena debe ser superior al umbral de cizalladura de la pasta situada en esta sección.

Vemos por esto que es imposible definir racionalmente un intercambiador sin tener en cuenta:

- las características de la pasta, por una parte;
- las características del material del intercambiador, de otra.

El montaje de las cadenas no puede efectuarse sin hacer previamente un estudio de la pasta en el laboratorio de Reología.

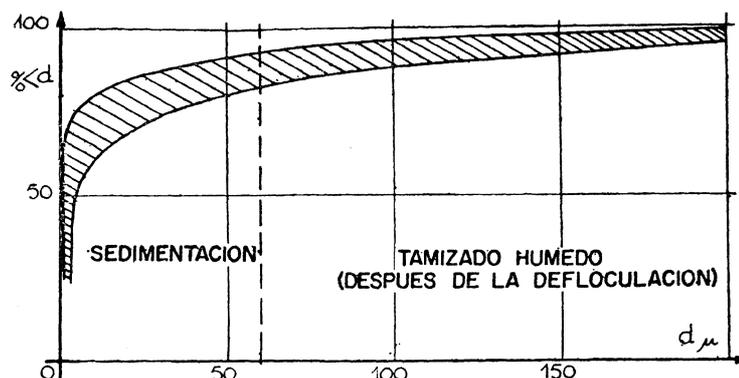


Fig. 3.—Granulometría de pastas crudas de cemento

estudio reológico del material

El umbral de cizalladura f de una pasta depende:

- de la naturaleza y granulometría de la materia sólida constitutiva (comprendida la aportación de polvo);
- el contenido de agua.

Este último factor es fundamental: de una parte, porque el papel del intercambiador es precisamente modificar el contenido en agua E ; de otra parte, porque el umbral de cizalladura varía mucho con E .

Es indispensable conocer la función que relaciona f y E y expresarla mediante una curva que se puede trazar en el laboratorio.

1. variaciones del umbral de cizalladura con el contenido en agua; establecimiento de la curva de consistencia

El umbral de cizalladura de una pasta varía mucho en el transcurso del secado (se encuentran corrientemente variaciones de 1 a 10^4). Es necesario, por lo tanto, recurrir a distintos medios de medida, según el estado reológico de la pasta. Hemos utilizado tres:

a) El viscosímetro de cilindros coaxiales:

Puede medir umbrales comprendidos entre 15 y 3.000 dinas/cm². Si no se dispone de tal aparato, se puede utilizar un viscosímetro de control (Smidth), calculando f mediante la curva de la figura 4.

b) La sonda de consistencia equilibrada:

Es la sonda de TETMAJER provista de un contrapeso. El ensayo consiste en medir la penetración de la sonda en la pasta para diferentes cargas.

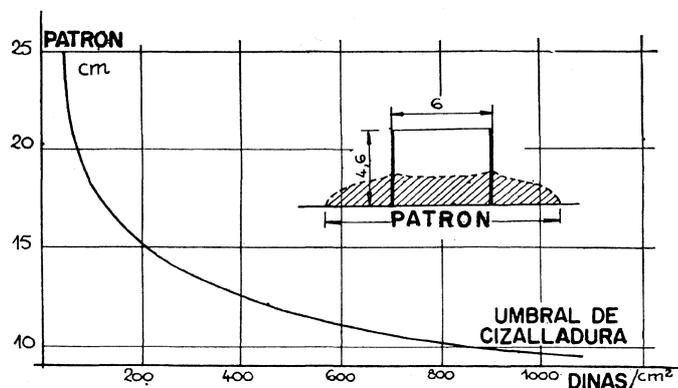


Fig. 4.—Relación entre el diámetro del patrón Smidth y el umbral de cizalladura de una pasta.

El umbral de cizallamiento viene dado por la siguiente fórmula de METROT:

$$\text{dinas/cm}^2 = \frac{Pg}{2\pi Rh + K'\pi R^2 \left(1 + \frac{\lambda}{R\sqrt{\pi}}\right)}$$

cizalla-
efecto de proa =
miento

lateral
= $K\pi R^2$

en la que:

P = carga aplicada (gr)

$g = 981$ (cm/s²)

h = penetración de la sonda (cm)

R = radio de la sonda (cm)

K y λ = constantes,

para un cilindro, METROT indica:

$$\left. \begin{array}{l} K' = 3 \\ \lambda = 1 \end{array} \right\} \text{ lo que da: } K = 3 \left(1 + \frac{1}{R\sqrt{\pi}} \right)$$

para $R = 0,5$ (sonda normalizada en la industria del cemento), la fórmula resulta:

$$f = \frac{981 P}{\pi h + 5,1}$$

[1]

El aparato puede medir prácticamente umbrales de cizallamiento comprendidos entre 6.000 y 100.000 dinas/cm².

Un ensayo de tracción:

Cuando la pasta ha sobrepasado el estado plástico se puede asimilar su umbral de cizallamiento a su resistencia a la tracción obtenida, por ejemplo, sobre probetas en forma de ocho.

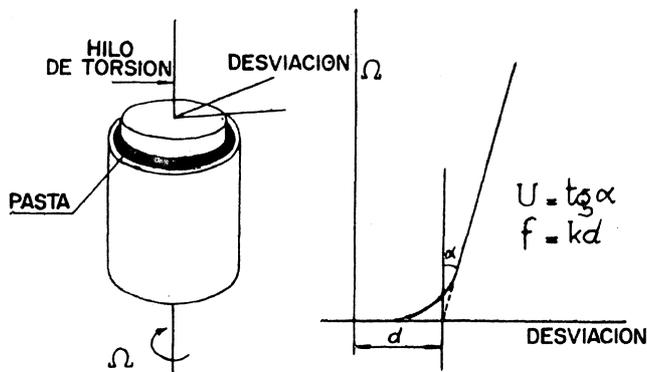


Fig. 5.—Principio y utilización del viscosímetro de cilindros coaxiales.

Estas probetas pueden moldearse en pasta plástica y llevadas por secado lento al contenido en agua del ensayo (un secado rápido corre el riesgo de provocar fisuras). Es fácil entonces efectuar el ensayo de tracción empleando, por ejemplo, una balanza.

El límite inferior de empleo del método es del orden de 100.000 dinas/cm² (para pastas muy plásticas, el desmoldeo resulta difícil y hay una fluencia importante antes de la rotura).

Por debajo de un cierto contenido en agua, la fisuración de las probetas conduce a caídas de cohesión y a una gran dispersión de los ensayos: se puede entonces admitir que a partir de este momento ya no hay problemas en las cadenas, puesto que la pasta se trocea y granula bien.

Para cada ensayo, el contenido en agua se mide por secado en estufa a 100-110° C hasta peso constante.

La figura 5 ilustra el primero de estos tres métodos de medida para establecer la curva de consistencia.

La figura 6 da las curvas de consistencia relativas a las pastas A, B y C. La utilización de ordenadas logarítmicas permite una buena precisión gráfica y da, en la mayoría de los casos, una representación lineal.

La función que relaciona el umbral de cizallamiento con el contenido en agua tiene la siguiente forma para contenidos en agua superiores al límite de plasticidad:

$$\log f = a - b E \quad [2]$$

siendo a y b constantes de la pasta y $E = \frac{\text{agua}}{\text{pasta}}$ en peso.

De ensayos realizados con distintas pastas resulta que el valor de a parece mantenerse entre 7 y 11, mientras que b oscila de 10 a 35, aproximadamente (el umbral de cizallamiento, expresado siempre en dinas/cm²).

Es probable que los coeficientes a y b estén relacionados con la naturaleza mineralógica de las materias primas, con su finura y su plasticidad.

La tabla número 1 agrupa los resultados obtenidos para tres pastas diferentes, A, B y C.

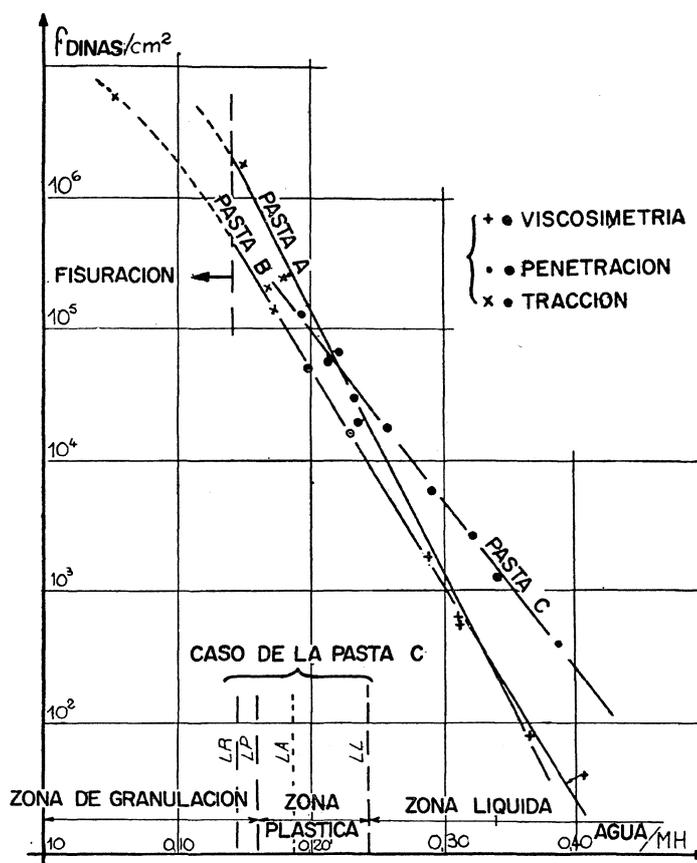


Fig. 6.—Curvas de consistencia de diferentes pastas crudas.

TABLA I

Pasta A		Pasta B		Pasta C		Método de medida.
$\frac{E}{MH}$	f (dinas/cm ²)	$\frac{E}{MH}$	f (dinas/cm ²)	$\frac{E}{MH}$	f (dinas/cm ²)	
0,363	80	0,405	40	0,386	405	Viscosímetro de cilindros coaxiales.
0,312	570	0,310	625	0,337	1.230	
0,289	1.970			0,319	2.500	
0,235	20.000	0,227	16.000	0,288	6.000	Ensayos de penetración.
0,218	69.000	0,198	40.000	0,258	17.000	
				0,233	32.500	
				0,212	60.000	
0,178	$2,55 \times 10^5$	0,174	$1,65 \times 10^5$	0,233	$1,4 \times 10^5$	Ensayos de tracción. ↓ fisuración.
0,162	$7,5 \times 10^5$	0,168	$2,1 \times 10^5$	0,212		
0,151	$1,9 \times 10^6$	0,052	6×10^5	0,195		

2. límites de Atterberg

Parece interesante utilizar los *límites de Atterberg*, empleados en mecánica de suelos, para caracterizar los diferentes estados de la pasta en el curso de su desecación.

Estos puntos de referencia permiten dividir la zona de secado en diferentes regiones para las cuales la pasta resulta bastante bien definida.

Estos límites expresados por la relación $\frac{\text{agua}}{\text{materia húmeda}} \cdot 100$ en peso son los siguientes:

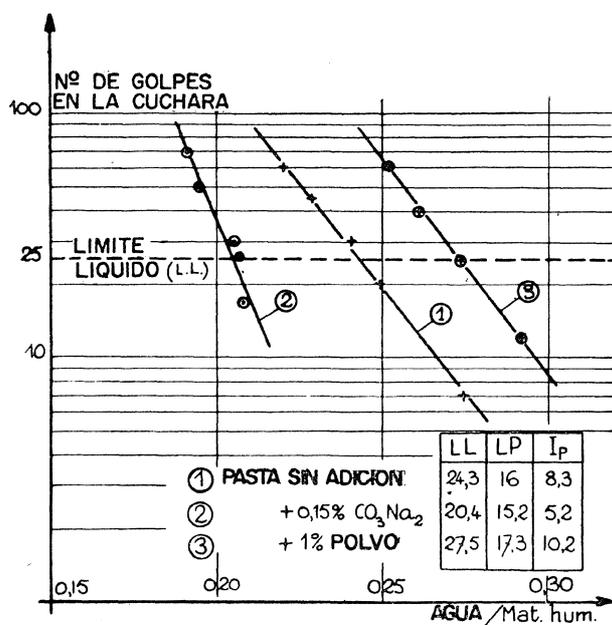


Fig. 7.—Establecimiento de los límites de Atterberg.

a) Límite líquido (LL):

Está definido por el contenido en agua correspondiente a la unión de los bordes de un surco trazado en la pasta contenida en *cuchara de Casagrande* y sometida a una serie de sacudidas bien definidas: el LL corresponde, por convenio, a la unión para 25 golpes.

La figura 7 muestra el diagrama que establece el LL para una pasta cruda con y sin adiciones.

b) Límite plástico (LP):

Corresponde al contenido en agua límite de la pasta que permite enrollar, sin que se fisure, un cilindro macizo de 3 mm de diámetro y 25 mm de longitud como mínimo.

Para contenidos de agua inferiores al LP, el material se fisura, se divide y granula.

Índice de plasticidad (IP) viene dado por:

$$IP = LL - LP \quad [3]$$

en la cual los valores de *LL* y *LP* definen, durante el paso de la pasta a través de la zona de cadenas, tres regiones que llamaremos:

para $\frac{A}{MH} > LL$, zona líquida;

para $LP < \frac{A}{MH} < LL$, zona plástica;

para $\frac{A}{MH} < LP$, zona de granulación.

3. adherencia y límite de adherencia

El agarre de una pasta sobre una superficie hace intervenir dos efectos:

- la adherencia a la superficie que condiciona el agarre;
- la cohesión de la pasta que determina el espesor de la capa adherida.

Estos dos parámetros están relacionados con el contenido en agua y con la naturaleza del material. El primero es también función de la naturaleza de la superficie (acero, ladrillo, costra), de su estado (oxidado, rugoso, pulverulento, caliente...) y, sobre todo, del estado reológico de la pasta.

La pasta puede estar en contacto:

- con el ladrillo o una costra más o menos caliente: la adherencia es buena si la superficie no es pulverulenta;
- con el acero más o menos limpio: la adherencia es función del estado de rugosidad y de la temperatura (una superficie muy caliente disminuye la adherencia).

La experiencia ha demostrado que la aptitud de agarre aumenta con el umbral de cizallamiento hasta un límite que llamaremos *límite de adherencia (LA)*; éste se sitúa entre *LL* y *LP*, en las proximidades de las 120.000 y 150.000 dinas/cm², sin que sea posible situarlo con precisión.

Más allá del límite de adherencia, el umbral de cizallamiento aumenta y la adherencia disminuye, y se ve aparecer en el horno aglomerados rodados de dimensiones variables (estas bolas se fisuran más allá del *LP* y se rompen en gránulos más pequeños).

El pegado a las cadenas y a la pared puede tomar distintos aspectos según el estado reológico de la pasta, el peso de las cadenas y la sección ocupada por el material:

- para una pasta flúida y cadenas de suficiente peso se produce el *recubrimiento de las cadenas*;
- para una pasta más consistente y cadenas demasiado ligeras se produce *el pegado de las cadenas a la pared del horno*;
- para pastas que hayan pasado el límite de adherencia y con cadenas demasiado ligeras se produce *el pegado de las cadenas entre sí en la parte central por grandes bolas de pasta*.

4. comportamiento físico de la pasta en el transcurso de su avance en el intercambiador

Zona líquida: la pasta cubre todas las superficies pero ocupa una pequeña parte de la sección del horno, pues su velocidad de avance es grande.

Zona semiplástica: hay formación de velos y láminas de pasta entre las cadenas.

Zona muy plástica: el material forma un magma barrido por las cadenas si su peso es suficiente. En el caso contrario, la pasta pega las cadenas entre sí o a la pared. La pasta ocupa una mayor parte de la sección, pues su velocidad de avance es débil.

Para $LP < \frac{A}{MH} < LA$: el material forma bolas relativamente móviles y que presentan una superficie arrugada.

Para $\frac{A}{MH} < LP$: los aglomerados anteriores se fisuran, se desconchan en la superficie y rompen (aspecto de piña). Esta disgregación produce trozos angulosos que se redondean al rodar en el horno; es la zona de granulación en la que se encuentran también pequeñas bolas no rotas y trozos desprendidos de la costra.

La repartición del agua en el material es heterogénea, y trozos de material con un contenido de agua media de 0,10 a 0,12 aparecen muy secos en su superficie y están aptos para abandonar la zona de cadenas. Resulta así que las bolas de pasta plástica alcanzan el límite de adherencias antes de lograr el contenido medio de agua.

La granulometría de los productos secos es el reflejo de la marcha del intercambiador y de la naturaleza del material (plasticidad): si el material está seco antes de abandonar la zona de cadenas, contiene una gran proporción de gránulos pequeños y de elementos finos. Si el material sale todavía en estado plástico, hay una gran proporción de bolas (las cuales se disgregan probablemente en parte en el trayecto después del intercambiador).

5. influencia de ciertos factores sobre la evolución de la pasta cruda en la zona de cadenas

Examinaremos sucesivamente la influencia de los efectos físicos o químicos (temperatura, CO_2 , adiciones de fluidificantes o fijación de polvos del horno) sobre el aire de la curva de consistencia.

Acción de la temperatura:

Los ensayos realizados sobre maqueta han demostrado que la temperatura de la pasta permanece del orden de 60-80° C mientras que el secado no ha terminado.

La curva de consistencia (fig. 8) establecida a esta temperatura permite pensar que el efecto de la temperatura, si existe, no es puesto en claro debido a la dispersión de los ensayos.

Acción del CO_2 :

Es posible que la naturaleza del gas procedente del horno influya sobre el comportamiento reológico de la pasta. Para simplificar el problema se ha limitado a estudiar el efecto del CO_2 a la temperatura ambiente.

El ensayo consistía en medir los coeficientes reológicos de la pasta agitada durante dos horas en una atmósfera de CO_2 . A título de comparación, la misma pasta ha sido agitada dos horas en el aire a fin de poner en evidencia el efecto eventual de la agitación.

Los resultados se resumen en la tabla II y se representan en la figura 9.

TABLA II

Ensayo	Contenido en agua A/MH	Umbral de cizallamiento (dinas/cm ²)
Pasta sin agitar	0,373	970
Agitada en aire	0,380	780
Agitada en CO_2	0,380	545

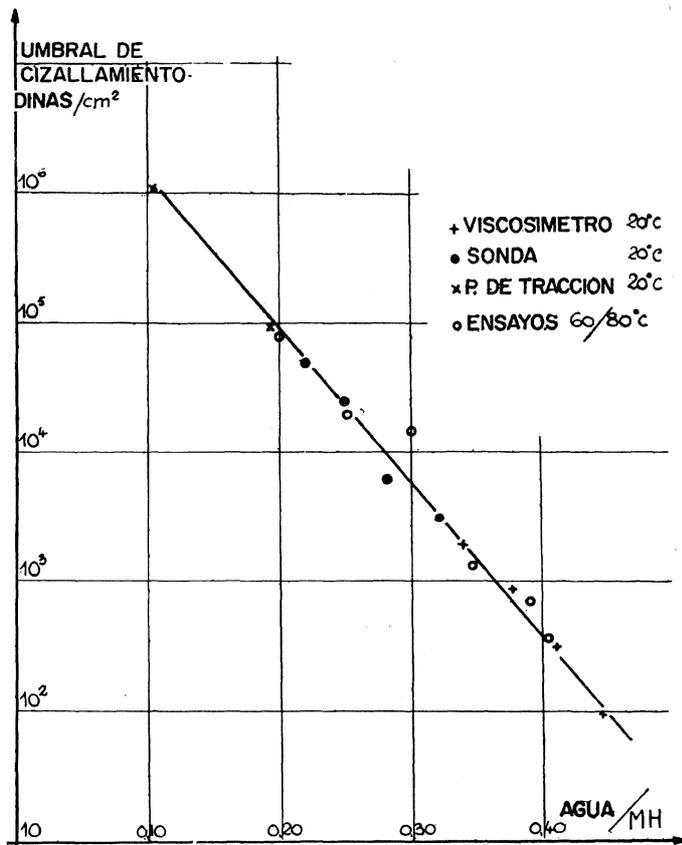


Fig. 8.—Influencia de la temperatura sobre la curva de consistencia.

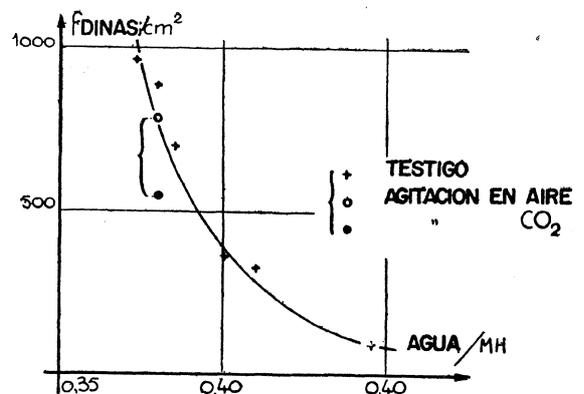


Fig. 9.—Influencia del CO_2 .

Se ve que la agitación en el aire no produce ningún efecto; la agitación en CO_2 tiene, por el contrario, un efecto fluidificante.

☉ *Influencia de las diversas adiciones:*

Se trata aquí de una parte de las adiciones voluntarias de fluidificantes y por otra de la fijación de los polvos del horno (las cadenas tienen un efecto de filtro más o menos eficaz).

La tabla III muestra la influencia del CO_3Na_2 y de los polvos del horno en dosificaciones variables, así como la acción combinada de ambos.

TABLA III

Adiciones		Umbral de cizallamiento (dinas/cm ²)	Observaciones
Naturaleza	Dosificación (*) %		
CO_3Na_2	0	700	En todos los casos se ha añadido la cantidad de agua necesaria para mantener $\frac{E}{MH} = 0,385$
	0,025	530	
	0,05	195	
	0,1	45	
	0,15	Despreciable	
Polvos del horno	0	700	
	0,1	1.120	
	0,25	1.400	
	1	1.650	
	2	1.780	
	100	4.500	
Polvos sólo		25.000	
0,15% CO_3Na_2 + polvos en dosificación variable	Dosificación de polvos		← el umbral de cizallamiento evoluciona con el tiempo.
	0	Despreciable	
	0,1	15	
	0,25	50	
	0,5	≈ 600	

(*) Referido al peso de materia sólida contenida en la pasta.

Estos resultados son llevados parcialmente a la figura 10.

Se ve que si el 0,03 % de CO_3Na_2 es suficiente para dividir por dos el umbral de cizalladura de

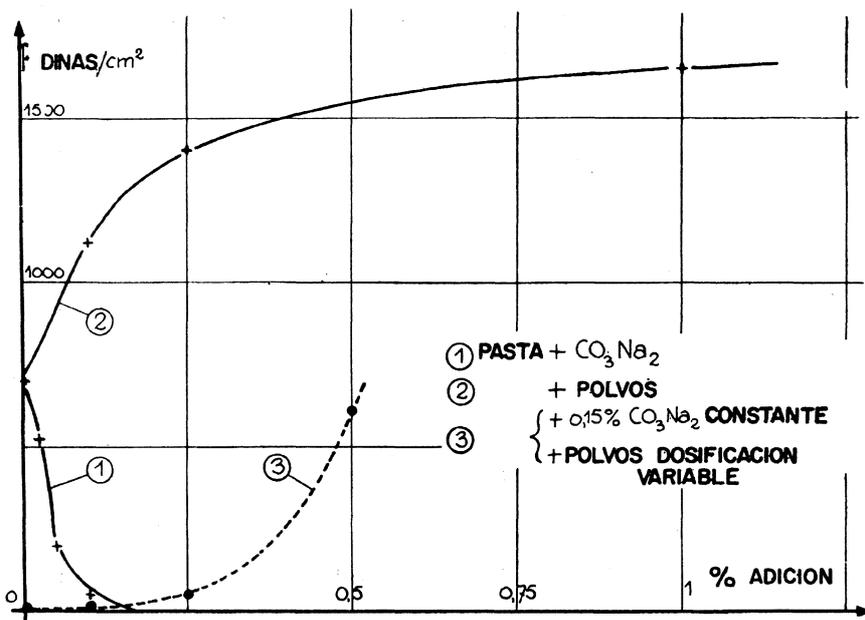


Fig. 10.—Influencia de diversas adiciones sobre el umbral de cizallamiento.

esta pasta, una adición del 0,25 % de polvos le hace subir al doble. Por otra parte, una dosis tan débil como el 0,5 % de polvos puede anular el efecto defloculante del 0,15 % de $CO_3 Na_2$.

El papel del polvo en el comportamiento reológico de la pasta:

La composición de los polvos utilizados era la siguiente:

TABLA IV

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
17,4	2,2	0,15	8,4	43,8	1,3	5,6	0,4	4,9

Otras determinaciones:

Insolubles en HC	...	9,2 %
Pérdida al fuego	...	16
CaO libre	...	4,64
pH	...	11
Superficie específica	...	≈ 11.000 cm ² /gr.

Se trata de polvos recogidos a la salida del horno. Estos polvos han podido sufrir un comienzo de hidratación por los humos cargados de vapor de agua, durante su paso por la zona de cadenas.

El proceso de floculación de la pasta por los polvos del horno es relativamente lento (como todos los efectos que aumentan los coeficientes reológicos).

La tabla V ilustra este fenómeno que es tan característico en los diagramas viscosimétricos por una "tixotropía inversa" (es un caso de evolución de la pasta).

TABLA V

Tiempo en reposo (minutos)	Umbral de cizallamiento (dinas/cm ²)	Observaciones
0	600	Pasta: $\frac{A}{MH} = 0,38$
5	1.100	Adiciones: CO ₂ Na ₂ 0,15 %
10	1.950	Polvos: 0,5 %

La acción rigidificante (llamada comúnmente "cuajado") de los polvos obedece a varias causas físicas o químicas:

a) Aportación de elementos muy finos y movilización de una parte de agua libre en agua de mojado por su gran superficie específica.

b) Absorción de agua por hidratación del CaO contenido en los polvos procedentes de la zona de descarbonatación.

c) Floculación por los iones Ca, cuya presencia, al modificar el estado de equilibrio y las interacciones entre las fuerzas atractivas y repulsivas existentes en la suspensión, provoca la aglomeración de las partículas.

d) Acción posible de otros componentes de los polvos (álcalis por ejemplo).

Es bastante fácil poner en claro la influencia del CaO: una pasta compuesta de polvo y agua, amasada con $\frac{A}{MH} = 0,39$, da después de seca y pesada $\frac{A}{MH} = 0,34$; esta diferencia proviene únicamente de la absorción de agua por hidratación del CaO, lo que equivale a una proporción del 25 % del peso del polvo. Este resultado se confirma por los ensayos de la tabla VI.

TABLA VI

Ensayo	Coeficientes reológicos	
	Viscosidad plástica (poises)	Umbral de cizalladura (dinas/cm ²)
Pasta testigo: $\frac{A}{MH} = 0,38$	920	2,5
+ 0,1 % cal viva	1.400	5,6
+ 0,4 % polvo	1.500	5

Se ve que los coeficientes reológicos obtenidos en los dos últimos casos son aproximados.

En realidad es muy difícil conocer la proporción, la composición exacta y el origen de los polvos que se fijan en la zona de cadenas, lo que hace el estudio reológico de la pasta bastante impreciso.

La figura 11 ilustra la influencia de las distintas adiciones sobre las curvas de consistencia:

- la curva 1 corresponde al testigo sin adición;
- la curva 2 corresponde a la adición de 0,15 % de CO_3Na_2 ;
- la curva 3 corresponde a la adición de 1 % de polvo.

Por último, la curva 4 corresponde a la misma pasta conteniendo el 0,15 % de CO_3Na_2 y a la cual se le ha añadido un porcentaje variable de polvo.

Esta acción combinada de las dos adiciones tenía por objeto aproximarse a las condiciones industriales fijando progresivamente polvo en el curso de la desecación.

La ley arbitraria de variación (figura 12) y los resultados obtenidos se muestran en la tabla VII.

El examen de las curvas de la figura 11 permite sacar algunas conclusiones:

El aumento de cohesión es más rápido con la adición de CO_3Na_2 , pues la desecación actúa sobre un intervalo de contenido en agua más débil.

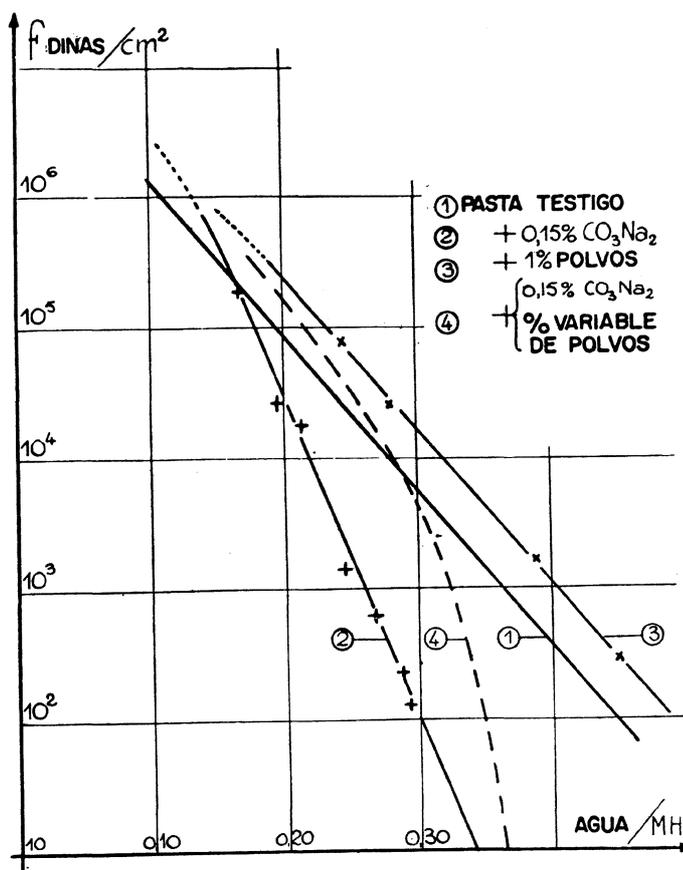


Fig. 11.—Influencia de diversas adiciones sobre la curva de consistencia.

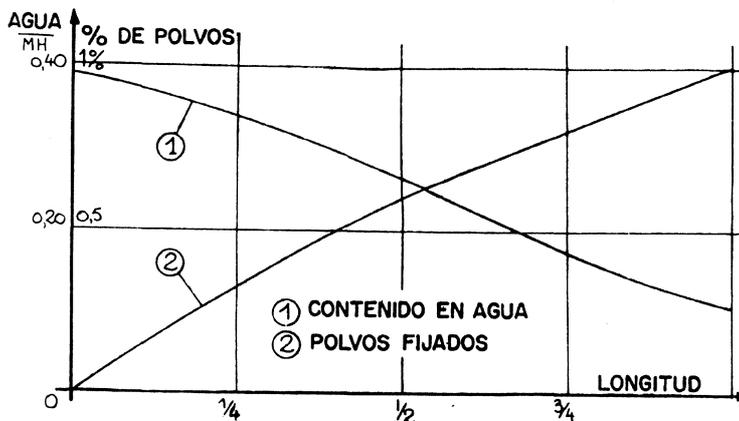


Fig. 12.—Ley supuesta de fijación de polvos.

TABLA VII

Posición en la zona de cadenas	$\frac{A}{MH}$	% de polvo fijado	Umbral de cizallamiento (dinas/cm ²)
Entrada (hacia arriba)	0,39	0	Despreciable (*)
1/5	0,35	0,25	80
2/5	0,30	0,5	9.000
3/5	0,23	0,7	21.500
4/5	0,15	0,85	190.000
Salida (hacia abajo)	0,11	1,0	420.000

(*) Hay que tener en cuenta que la adición del 0,15 % de CO_3Na_2 hubiera permitido entrar al horno una pasta con $\frac{A}{MH}$ alrededor de 0,33.

Parece ser que, cuando la pasta contiene CO_3Na_2 , los terrones que se forman en el transcurso del secado son más compactos y más difíciles de romper.

La temperatura parece no tener influencia sobre el comportamiento de la pasta adicionada de CO_3Na_2 durante su secado.

La pasta estudiada con el 1 % de polvo posee un umbral de cizallamiento superior (a igual contenido de agua) al de la pasta testigo, y ésta hasta una relación $\frac{A}{MH}$ cercana al 0,20. Por debajo de este valor, los terrones parecen más frágiles. Por fin, la acción combinada del fluidificante y del polvo muestra cómo el efecto del CO_3Na_2 es anulado rápidamente (alrededor de $\frac{A}{MH} = 0,30$). Conviene, por lo tanto, señalar que los resultados obtenidos para esta curva de consistencia son relativamente dispersos. Esta dispersión es probablemente debida a los fenómenos de evolución indicados anteriormente.

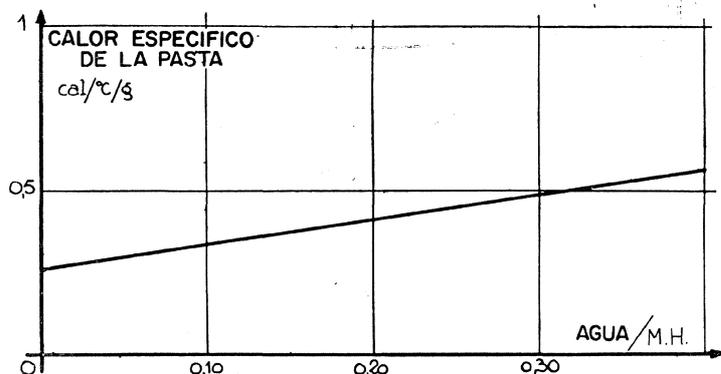


Fig. 13.—Variaciones del calor específico en función del contenido en agua.

Evolución del calor específico durante el secado:

Para los estudios térmicos puede ser útil conocer el valor del calor específico de la pasta a lo largo de la zona de cadenas. La determinación sobre pasta seca dio $c = 0,26$ cal/gr/grado. La curva de la figura 13 da el valor de c en función del contenido de agua de la pasta.

IV. estudio del material

Se trata esencialmente de comprender el proceso por el cual las cadenas llegan a romper y hacer caminar la pasta.

Es probable que una malla de cadenas ejerza una tensión de cizallamiento tanto más fuerte cuanto menor es su superficie específica. Recordemos que la superficie específica de una cadena viene dada por:

$$S_p = \frac{4}{\rho \phi}$$

siendo:

ρ = peso específico del material,

ϕ = diámetro del hilo,

para el acero:

$$S_p \approx \frac{1}{2 \phi}$$

[4]

La figura 14 representa la variación de S_p en función del ϕ para cadenas en acero.

En lo que concierne a la forma de las mallas, es cierto que los anillos circulares son preferibles en cuanto al desgaste y a la movilidad.

Ensayos sobre maqueta:

Es necesario tratar de relacionar experimentalmente la superficie específica, es decir, diámetro de hilo y esfuerzo de cizallamiento producido.

El ensayo se realizó a temperatura ambiente con pastas de diferentes contenidos de agua y para las cuales se habría medido el umbral de cizalladura f . Se empleó una maqueta de 36 cm de diámetro interior y de 60 cm de longitud provista interiormente de cadenas colgadas en cortina.

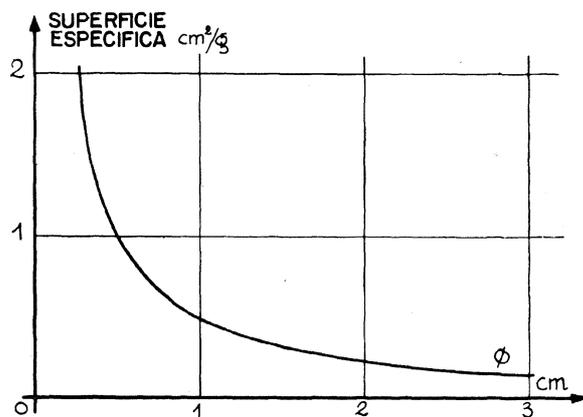


Fig. 14.—Variación de la superficie específica de una cadena en función del espesor del hilo.

Estas cortinas materializan así secciones del cilindro, y el diámetro del hilo empleado, constante para una misma cortina, decrece con la longitud del cilindro. Este último está inclinado algunos grados sobre la horizontal y gira a la velocidad de 11 t/minuto.

El principio de la medida consiste en observar el movimiento, el pegado y el límite de progresión de cada pasta de consistencia conocida y en relacionar el umbral de cizallamiento con el diámetro del hilo de las cadenas que constituyen la sección de parada.

Los numerosos ensayos realizados han permitido trazar sobre la figura 15 la curva media, que representa, en el límite de braceo, la relación entre el valor f y el diámetro del hilo de las cadenas capaz de remover la pasta.

La ecuación de la curva obtenida es aproximadamente:

$$[5] \quad \varnothing = \sqrt[3]{\frac{f}{10}} = 0,046 \sqrt[3]{f}$$

siendo:

\varnothing en cm,

f en dinas/cm².

La condición de progresión muestra que se deberá tener siempre:

$$[6] \quad \varnothing \geq 0,046 \sqrt[3]{f}$$

Fig. 15.—Estudio del cizallamiento en función del grosor de las cadenas

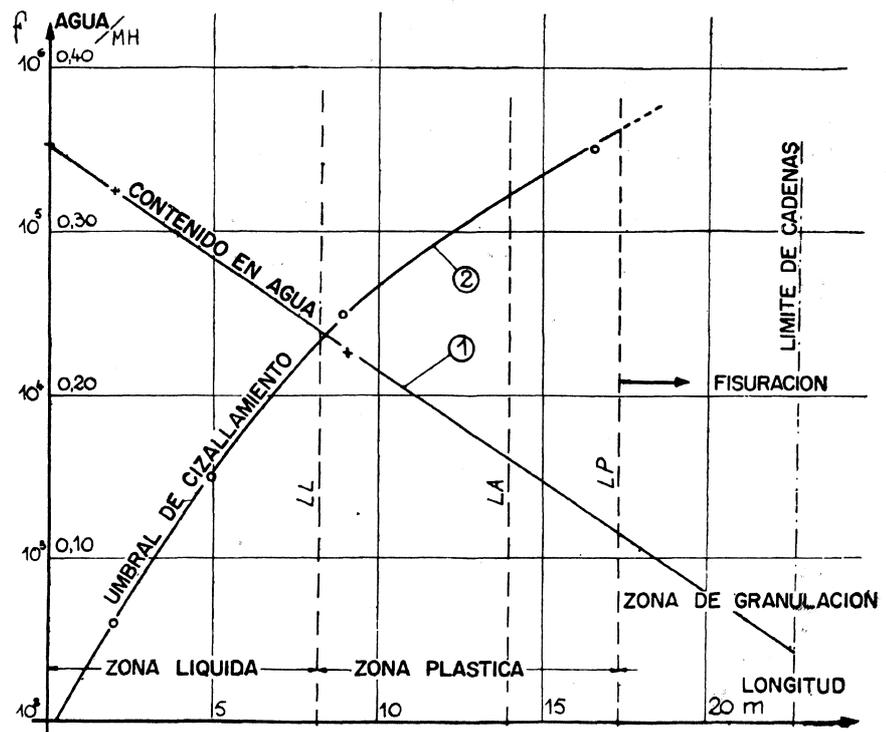
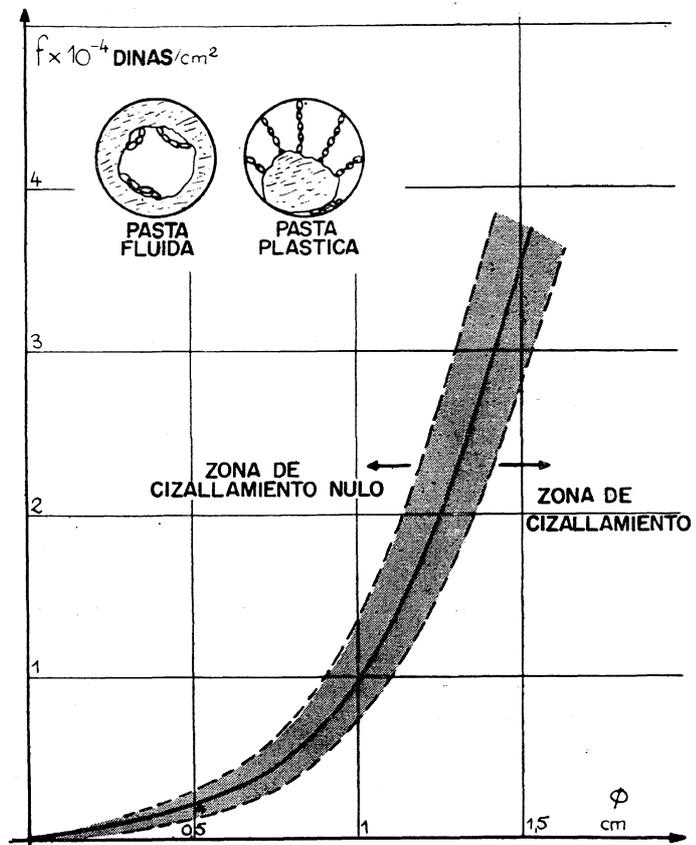


Fig. 16.—Aplicación del método de cálculo a una zona de cambio.

V. método de cálculo de un intercambiador de cadenas

Se trata de establecer el reparto óptimo de las cadenas en masa y en dimensión.

La superficie total de intercambio y la longitud total del intercambiador se suponen sacadas de la experiencia industrial y conocidas de antemano (*).

El método se desarrolla como sigue:

1) *Trazado de la curva del contenido en agua en función de la longitud del intercambiador* (curva núm. 1, fig. 16). Según se ha indicado al comienzo (fig. 2), se limitará el contenido en agua de salida de 5 a 10 % para reducir la subida masiva de polvo.

2) *Trazado de la curva que relaciona el umbral de cizallamiento con el contenido en agua* (ver figura 6) para la pasta estudiada, teniendo en cuenta las eventuales adiciones y, sobre todo, el polvo fijado.

3) *Trazado de la curva que relaciona el valor del umbral de cizallamiento con la longitud de la zona de cadenas* (curva núm. 2, fig. 16).

4) *Cálculo del diámetro del hilo correspondiente por aplicación de la fórmula 6 y trazado de la curva que relaciona el ϕ y la longitud del intercambiador* (fig. 17).

Como se ha dicho en III, no es útil aumentar el peso de las cadenas más allá del límite de adherencia. Es, por otra parte, aconsejable disminuirlo pasado el límite de plasticidad.

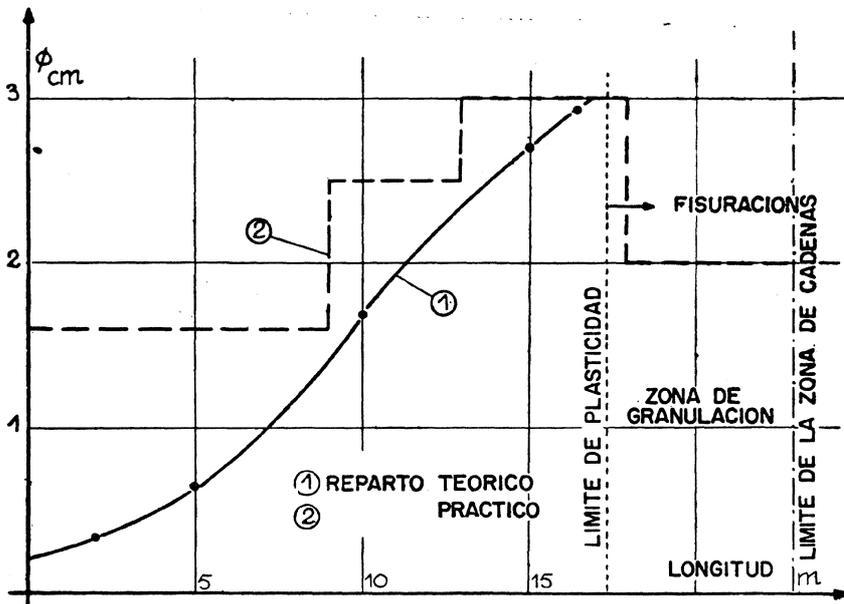


Fig. 17.—Estudio de la repartición de cadenas.

La curva obtenida, que es continua, debe reemplazarse por una serie limitada de trazos rectos que corresponden a los valores de los ϕ suministrados en el mercado. Se pueden fijar 3 ó 4 tipos

(*) La experiencia nos muestra que estudios de este género son difícilmente realizables sobre maqueta en laboratorio; las leyes similares son raramente aplicables.

de cadenas. El método no indica el medio de calcular el valor del último tramo. Una regla sencilla consistirá en establecer una posición intermedia entre los primeros, sabiendo que:

- se debe poner la menor cantidad posible de cadenas pesadas en el horno;
- que las cadenas de salida deben presentar una superficie mínima para limitar la formación de polvo.

En lo que se refiere a las cadenas de entrada, la experiencia demuestra que no interesa ajustarse demasiado a la curva, aun cuando se puedan emplear cadenas de pequeño diámetro. En efecto, las subidas inevitables e irregulares de polvo, tanto en cantidad como en naturaleza, provocan un aumento del umbral de cizallamiento que puede levantar claramente la curva en los primeros metros del intercambiador. Conviene, pues, tener cadenas suficientemente gruesas en esta posición.

De una manera general, *vale mejor tener un cizallamiento sobrado, desde el momento que la superficie de intercambio es suficiente.*

Dicho de otra manera, es necesario realizar un compromiso entre superficie y peso.

El peso de cadenas se determina de la forma siguiente:

Se supone que la superficie de intercambio debe ser constante a todo lo largo del intercambiador:

$$s_o = \frac{S}{L} = \text{Cte.}$$

siendo:

S = superficie total de intercambio,

L = longitud total del intercambiador y

estando s_o expresada en unidades de superficie por unidad de longitud del intercambiador (por ejemplo, en m^2/m).

Sea p el peso de cadena por unidad de longitud del intercambiador, resulta:

$$p = \frac{s_o}{S_p}$$

S_p = superficie específica de la cadena.

El método permite así conocer:

- 1) los tipos de cadenas a utilizar,
- 2) las longitudes de las zonas correspondientes,
- 3) el peso de cadenas por zona y, por consiguiente, el peso total.

Los valores que han permitido construir las figuras 16 y 17 ilustran sobre la aplicación del método a un horno existente. Estos valores se agrupan en las dos tablas siguientes, VIII y IX.

TABLA VIII

Distancia a la entrada del intercambiador L (m)	Contenido en agua, A/MH	Umbral de cizallamiento de la pasta f (dinas/cm ²)	Diámetro teórico del hilo de las cadenas φ (cm)
0	0,36	80	0,20
2	0,325	400	0,34
5	0,282	2.700	0,64
10	0,218	50.000	1,70
15	0,192	200.000	2,70
16,5	0,184	250.000	2,92

TABLA IX

	Zona líquida	Zona plástica		Zona de granulación	Total
Diámetro del hilo Ø (cm)	1,6	2,5	3	2	—
Longitud de la zona L (m)	9	4	5	5	23
Superficies específicas de las cadenas utilizadas:					
(cm ² /g)	0,31	0,20	0,166	0,25	
(m ² /t)	31	20	16,6	25	
Superficie de intercambio:					
unitaria (m ² /m) (*)	77,8	77,8	77,8	77,8	
total (m ²)	700	310	390	390	1.790
Peso de cadena:					
unitaria (t/m)	2,5	3,88	4,68	3,11	
total (t)	22,5	15,5	23,5	15,6	77,1
Densidad (t/m ³)	0,21	0,306	0,372	0,246	

(*) Este valor es constante, puesto que satisface a la hipótesis de partida.

Notas importantes:

Si no ha sido tratado el tema de “disposición” de las cadenas es por que su estudio en laboratorio no es el adecuado. La experiencia industrial recomienda:

- 1) que la disposición en hélice favorece la circulación de la pasta;
- 2) que es mejor reservar la disposición en guirnalda para la zona en que el cizallamiento es máximo. El hecho de que las cadenas se fijen en sus dos extremos impide el que se formen nudos de cadenas aglomeradas por la pasta, cuya consistencia es máxima en esta zona.

La disposición en cortina es más eficaz como filtro contra la subida del polvo.

De una manera general, la forma de fijar las cadenas tiene una importancia secundaria si la repartición y peso de las mismas se ha establecido correctamente.

VI conclusión

El funcionamiento de un intercambiador de cadenas es complejo, pues depende de un gran número de factores más o menos relacionados entre sí. Este funcionamiento es óptimo cuando la repartición de cadenas se adapta a la curva de consistencia de la pasta y cuando el horno es estable. El método de cálculo de las cadenas desarrollado en este trabajo se basa en el estudio reológico del material y, por tanto, no puede aportar resultados satisfactorios más que si la naturaleza, humedad y granulometría del material y producción del horno varían poco.

Cualquier variación importante de uno de estos factores se encuentra aumentada y conduce generalmente a la obstrucción parcial o total del aparato, llevando consigo de paso un mal funcionamiento del horno.