

066.374.411 - 1

## reología de las pastas crudas\*

JOSE LAFFARGA OSTERET  
de «Cementos Guadalquivir»

### INTRODUCCION

En las fábricas de cemento, por vía húmeda, ha sido y es una preocupación constante el porcentaje en agua de las pastas. Muchos estudios se han realizado para lograr pastas *manejables* con bajo contenido en agua. Constantemente se proponen materias fluidificantes que aumentan la *manejabilidad* de las pastas, disminuyendo el agua necesaria. La mayoría de estos estudios son de carácter experimental y, en muchas ocasiones, los fluidificantes que dan un resultado óptimo en unas pastas, en otras dan resultados menos aceptables e, incluso, carecen de utilidad.

Es de todos conocido que, aunque la composición química de las pastas que se utilizan en la fabricación de cemento varía dentro de estrechos límites de una fábrica a otra, en el caso de vía húmeda los porcentajes en agua varían de manera amplia, del 34 % al 45 % o más aún, e incluso dentro de una misma fábrica se trabaja a veces con porcentajes muy diferentes.

De todo lo anterior, se saca la consecuencia lógica de que las pastas tienen unas propiedades físicas que se manifiestan al mezclarlas con agua. Conocemos el caso de margas de yacimientos próximos, de composición química parecida, pero de *manejabilidad* muy distinta. Es lógico pensar que estas margas deben tener distinta estructura molecular. Esta estructura debe influir en las propiedades físicas de las pastas.

En las fábricas de vía húmeda se habla de viscosidad, *fluencia* o *manejabilidad* de las pastas. Se utilizan diversos aparatos, más o menos ingeniosos, que dan cifras particulares, difíciles de relacionar.

La práctica en cada fábrica dicta las cifras que se deben elegir como más convenientes para una mayor eficiencia de las instalaciones de bombeo, tuberías y molinos.

Se sabe por experiencia, que un mayor contenido de agua facilita la *manejabilidad* de las pastas, disminuyendo su *viscosidad* o, lo que es lo mismo, aumentando su *fluidez* o *fluencia*. Pero también se sabe que es necesario reducir hasta donde se pueda el porcentaje en agua, pues esto redundaría de manera importante en la economía del combustible. Y todos sabemos cómo influye el gasto de combustible en el coste de fabricación.

Hablamos de la *viscosidad* de las pastas, pero este término no nos basta para definir de antemano el comportamiento de aquéllas desde el molino al depósito y al horno. A todos nos ha sorprendido algunas veces que la viscosidad de la pasta varíe sin causa aparente; por otro lado, esta *viscosidad* es algo distinta de la de otros materiales, aceites por ejemplo, que podemos medir en un viscosímetro normal y de la que, aunque variable bajo ciertas condiciones (presión y temperatura), conocemos los factores que determinan esta variación, pudiéndola predecir de antemano.

Las pastas, cuando fluyen, poseen una viscosidad especial; no son líquidos newtonianos ni obedecen la ley de Poiseuille.

Para estudiar el fluir de las pastas no nos bastan los conceptos de la fluidodinámica clásica, y mucho menos un empirismo más o menos amplio. Hemos de recurrir a la Reología.

\* Ponencia presentada en los II Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento. I. T. C. C., marzo de 1957.

El estudio reológico de las pastas crudas está apenas iniciado y ofrece halagüeñas perspectivas a los investigadores. La aplicación de la Reología resuelve bastante satisfactoriamente el problema, explica muchas de las aparentes anomalías y permite comparar las características de pastas de origen diverso.

Contribuir a la implantación de los nuevos conceptos reológicos en el control de fabricación del cemento ha sido el objetivo de nuestro trabajo y, a nuestro juicio, no sólo las teorías, sino también los resultados experimentales, parecen justificarlo.

## GENERALIDADES SOBRE REOLOGIA

Si los reólogos se limitasen a emitir hipótesis que explicasen el comportamiento de los cuerpos durante su flujo, y a resolver ecuaciones matemáticas inaplicables en la práctica, la Reología no dejaría de ser una ciencia interesante, digna de estudiarse y progresar, pero de la que los técnicos sólo nos ocuparíamos como mero pasatiempo. Pero la Reología tiene una aplicación práctica inmediata en casi todas las ramas de la ciencia aplicada y de la ingeniería. De hecho, su establecimiento como brazo «independiente» de la Ciencia es reciente. Prácticamente, hasta principios del siglo no se han utilizado los productos sintéticos artificiales en gran escala: pinturas, barnices, lubricantes, cerámicas, celulosas, gomas y «plásticos».

La necesidad de encontrar y fabricar productos de propiedades físicas bien definidas hizo que, al determinar éstas, los investigadores de tales productos se encontrasen con otras «nuevas», que no se explicaban satisfactoriamente con las teorías existentes.

Los químicos que crearon y desarrollaron los nuevos productos se encontraron con que las teorías sobre elasticidad y viscosidad aceptadas entonces, no bastaban para explicar ciertas propiedades: la plasticidad, por ejemplo, cuya teoría se basaba en la conducta plástica de los metales.

Siguiendo al profesor Bingham, los químicos-físicos, tuvieron que encontrar una nueva teoría para el flujo plástico. Espoleada por el creciente interés que despertó la cuestión, la American Chemical Society convocó en 1924 un coloquio especial de Plasticidad, que fué seguido de otros dos en 1926 y 1928. Las comunicaciones leídas

y las discusiones habidas, demostraron que los problemas tratados se salían del campo de acción de la Química. Y otras ramas de la Ciencia habían de ayudar a resolverlos: conocimientos especiales sobre elasticidad, hidráulica e hidrodinámica, ingeniería, física, geología, matemáticas y otros, son necesarios para resolver el problema común de la deformación y flujo de los materiales.

La mayoría de los científicos que asistieron a estos coloquios eran químicos; y para los químicos en general, los problemas de deformación y flujo son de relativo interés. Para los ingenieros y físicos, sin embargo, estas cuestiones son de la mayor importancia. Por ello, con amplio criterio, en el último coloquio (1928) acordaron fundar una sociedad científica especializada para tratar de los problemas de deformación y flujo de los materiales en su más amplio significado. Se denominó la tal sociedad, Society of Rheology, del griego *ρην* = fluir.

Nuevas sociedades reológicas se crearon en otros países, y a través de ellas el desarrollo de la Reología aumentó con la aportación de nuevas teorías y descubrimientos, hasta llegar a su actual pujanza.

La ingeniería se ha servido rápidamente de la nueva Ciencia, al encontrarse con medio camino recorrido por los químicos. Y la Reología, a su vez, ha utilizado ampliamente la ingeniería para avanzar aún más.

Hoy, los ingenieros mecánicos conocen la importancia de la deformación plástica de los metales y, en muchas ocasiones, han de tener en cuenta el «creep» o flujo lento de los mismos. Y la ingeniería civil se ha visto obligada a considerar, la conducta plástica del suelo, el «creep» del hormigón, etc.

Todo esto y mucho más justifica la actualidad de la Reología, que, aunque en plena evolución, ha alcanzado ya un grado de madurez tal, que obliga a colocarla al lado de las ciencias clásicas, como una rama más con su personalidad propia.

La Reología estudia las deformaciones y el flujo de la materia. La generalización de su teoría permite aplicarla a sólidos, líquidos y cuerpos intermedios, indiferentemente. La Reología tiene mucha analogía con la Mecánica, a la que sustituye en ciertos aspectos. Utiliza muchos conceptos de la Mecánica clásica e introduce algunos nuevos. La Reología intenta explicar, o más bien señalar, el comportamiento de los cuerpos reales, tal como se presentan

a nuestra observación directa, es decir, estudia los cuerpos en su realidad práctica, que en general es ignorada por la Física clásica. Las ecuaciones y leyes que propone la Reología son más o menos complicadas, y muchas veces están basadas en datos experimentales. Estas ecuaciones y leyes suelen tener una gran aplicación en la Técnica, porque en la mayoría de los casos son aplicables directamente a cuerpos complejos, cuyas características definitivas son difíciles de establecer.

**Cuerpos ideales reológicos.**—En Reología se consideran tres cuerpos ideales fundamentales: el líquido de Newton, el cuerpo de St. Venant y el sólido de Hooke, cuyas curvas de consistencia pueden verse en la fig. 1. De las propiedades de estos cuerpos ideales, o de la combinación de las mismas, pueden deducirse todas las propiedades reológicas. Las distintas combinaciones entre estos cuerpos originan nuevos cuerpos ideales, que se aproximan más a los cuerpos reales. Entre las combinaciones más interesantes se pueden contar:

El fluido plástico o de Bingham, el líquido de Maxwell y el sólido de Kelvin, que son combinaciones de los de Newton y St. Venant, el primero, y de los de Newton y Hooke los otros. De las combinaciones entre los tres pri-

meros cuerpos ideales simples y estos últimos surgen nuevos cuerpos ideales: el de Burgers, Schwedoff, etc.

Atendiendo a la limitación de este trabajo, sólo describiremos ligeramente el líquido viscoso o de Newton, el cuerpo de St. Venant y el fluido plástico o de Bingham.

**Líquido viscoso o de Newton.**—Reológicamente el cuerpo viscoso ideal es el llamado fluido newtoniano, líquido de Newton o viscoso, cuya ecuación reológica de estado es:

$$P_t = \frac{d v}{d x} \tau_v \quad (1)$$

siendo:  $P_t$  una presión o, mejor aún, una tensión que se ejerce sobre el fluido,  $\tau_v$  la viscosidad o coeficiente de relación, y  $dv/dx$  el gradiente de la velocidad de deformación producida por la presión o tensión para cada viscosidad característica.

**Cuerpo de St. Venant.**—El cuerpo plástico ideal es el de St. Venant, cuya ecuación reológica es:

$$P_t = f \quad (2)$$

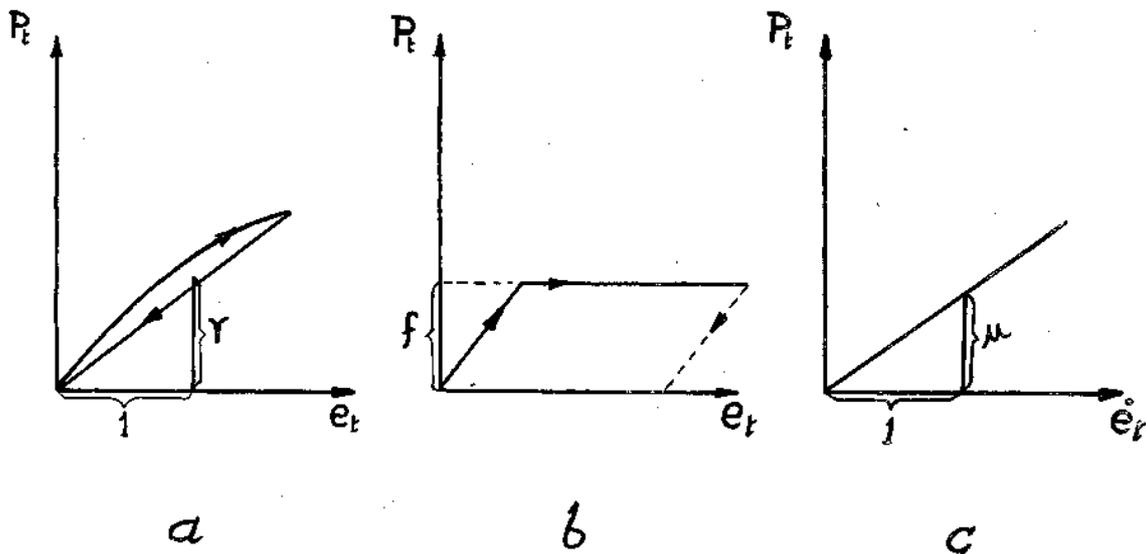


Fig. 1. —Diagramas reológicos  
a. —Sólido de Hooke  
b. —Cuerpo de St. Venant  
c. —Líquido de Newton

teniendo  $P_t$  el mismo significado que en la ecuación (1);  $f$  es el llamado *yield value*, o límite de cizalleo. En una publicación (ver bibliografía) se llama a  $f$  presión mínima de flujo, pues tiene las dimensiones de una presión, y en realidad es la presión mínima que necesita un cuerpo con propiedades plásticas para fluir, debiendo entenderse el concepto de flujo en toda su amplitud, es decir, incluso como una deformación.

**Cuerpo de Bingham.**—Combinando las ecuaciones (1) y (2) obtendremos otra, que define un nuevo estado reológico:

$$P_t = f + \frac{dv}{dx} \eta. \quad (3)$$

Esta ecuación define un nuevo cuerpo ideal, que es el llamado fluido plástico o cuerpo de Bingham, cuya teoría esbozamos seguidamente.

**Teoría del cuerpo de Bingham.**—Estudiando el flujo de los líquidos newtonianos a través de tubos capilares y comparando —para el flujo laminar— los gastos con las presiones correspondientes, vemos que, llevando a las abscisas de un sistema de coordenadas rectangulares los valores de las presiones, y a las ordenadas los de los gastos, se obtiene una línea recta de pendiente directamente proporcional a  $1/\eta$ , que pasa por el origen.

Cuando fluyen en los capilares otros líquidos «no newtonianos», se ve, al realizar la experiencia, que la relación gráfica entre presiones y gastos es una curva más o menos regular. Y esta curva corta al eje de las presiones en un punto  $P_0$  distinto del origen.

Al estudiar Bingham y Green la estructura de las pinturas al aceite, observaron que eran líquidos de características muy especiales, en los que no basta el concepto newtoniano de viscosidad para explicar su comportamiento cuando fluyen.

Bingham emitió la hipótesis de que ciertos cuerpos como las pinturas al aceite, que no cumplen la ley de Newton, se pueden considerar reológicamente como una combinación del líquido de Newton y del cuerpo de St. Venant. Estos son los fluidos plásticos o cuerpos de Bingham. La ecuación de estos cuerpos es la ecuación (3). Escribámosla de la forma:

$$P_t = f + \eta_{pl} \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (4)$$

siendo:  $\eta_{pl}$  la viscosidad plástica y  $f$ , el «yield value» o presión mínima de flujo, que es un valor de la presión por encima del cual el gradiente de la velocidad de flujo es directamente proporcional a la presión.

Se entiende que los valores de  $\eta_{pl}$  y  $f$  son constantes en determinadas condiciones de pre-

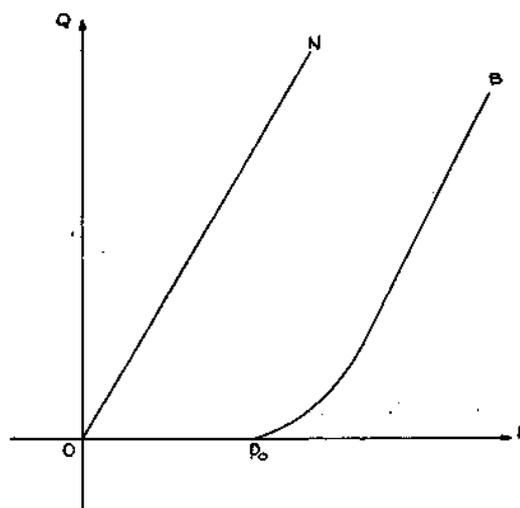


Fig. 2.—Flujo laminar en tubos capilares  
N.—Líquido newtoniano  
B.—Cuerpo de Bingham

sión, temperatura y concentración. En la fig. 2, pueden verse las representaciones gráficas del flujo laminar en tubos capilares.

**Ecuación de Buckingham - Reiner.**—Para calcular el gasto de un cuerpo de Bingham que fluya en régimen laminar por una tubería cilíndrica, recta y horizontal, se puede emplear la ecuación de Buckingham-Reiner:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \eta_{pl}} \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{2 fl}{R \Delta p} + \frac{1}{3} \left( \frac{2 fl}{R \Delta p} \right)^4 \right]. \quad (5)$$

Esta ecuación puede escribirse en forma reducida:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \eta_{pl}} \varphi(D), \quad (6)$$

donde  $Q$  es el gasto;  $\Delta p$ , la diferencia de presión entre los extremos de la tubería;  $R$  y  $l$ , el radio y la longitud de la misma;  $\eta_{pl}$ , el coeficiente de viscosidad plástica;  $f$ , la presión mínima de flujo y  $\varphi(D)$ , una función de  $D$  según:

$$\varphi(D) = 1 - \frac{4}{3} D + \frac{1}{3} D^4. \quad (6a)$$

Siendo  $D$  un número adimensional que vale:

$$D = \frac{2 fl}{R \Delta p}. \quad (6b)$$

Vemos que la ecuación de Buckingham-Reiner es análoga a la de Hagen-Poiseuille, modificada por  $\varphi(D)$ , que es una función de las dimensiones de la conducción, de la presión mínima de flujo y de la de trabajo.

## REOLOGIA DE LAS PASTAS

**Generalidades.**—Estudiando reológicamente las pastas crudas de la vía húmeda observamos que poseen viscosidad en el sentido clásico, pero necesitamos algún otro concepto que nos explique la forma de comportarse las pastas en movimiento. Las pastas tienen otra propiedad que se manifiesta muy claramente cuando tienen poca agua; por ejemplo, al final de la zona de secado de un horno. Las pastas son moldeables, esto es, son plásticas.

Al analizar reológicamente las pastas crudas, se ve que poseen más o menos acusadas las propiedades de los cuerpos de Bingham. Poseen una presión mínima de flujo y tienen viscosidad plástica; y, además, suelen cumplir la ecuación de Buckingham-Reiner.

**Variación de la viscosidad de las pastas.**—Si estudiamos el flujo de las pastas aplicando las teorías de Newton y Poiseuille, se comprueba que tienen una viscosidad «variable». Tal variación es difícil de medir y de explicar sin ayuda de la Reología.

En efecto, aplicando la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \eta'}, \quad (7)$$

donde  $\eta'$  es variable para las pastas, y puede llegar a ser prácticamente infinita, dentro de las condiciones experimentales, anulando el gasto.

Esto hace, que los cálculos y previsiones para las instalaciones de pasta sean difíciles; incluso dentro de una misma pasta pueden notarse frecuentes y rápidas variaciones.

Esta aparente anomalía se explica con facilidad en Reología. Recordemos la ecuación de Buckingham (5); podemos hacer:

$$\eta' = \frac{\eta_{pl}}{\varphi(D)}, \quad (8)$$

y vemos entonces que esa viscosidad «variable» no es otra cosa que una función de la viscosidad real, de las dimensiones de la tubería, de la presión y de la constante reológica de plasticidad  $f$ . Teniendo en cuenta las ecuaciones (8) (6a) y (6b), vemos que toma un valor infinito cuando  $\varphi(D)$  se anula, lo que sucede cuando el número  $D$  valga la unidad, es decir, que  $\Delta p = 2fl/R$ . Esto significa que no habrá flujo más que cuando la diferencia de presión entre los extremos del tubo alcance el valor:

$$\Delta p > \frac{2 fl}{R}. \quad (9)$$

La condición más favorable de flujo se logrará cuando  $D$  se anule y en tal caso  $\eta' = \eta_{pl}$ , comportándose la pasta como un fluido newtoniano simple. En condiciones prácticas, esto no puede lograrse más que si  $f = 0$ .

**Importancia de los coeficientes reológicos.**—Con todo lo anterior no es aventurado afirmar que, para un estudio completo del flujo de las pastas, hemos de contar, no sólo con su viscosidad característica  $\eta_{pl}$ , sino también con sus propiedades plásticas, representadas en su presión mínima de flujo  $f$ . Con estas dos constantes reológicas bien determinadas pode-

mos prever de antemano, y de manera bastante exacta, cómo fluiría cierta pasta en una instalación determinada.

Procediendo inversamente, podemos calcular con buena aproximación una instalación de transporte para pastas de determinadas características.

## PARTE EXPERIMENTAL

**Introducción.**—La parte experimental de este trabajo, cuyos resultados y discusiones veremos luego, se ha realizado sobre pastas crudas fabricadas en nuestro laboratorio. Para esto se mezclaron calizas y margas (Tabla I), que normalmente se utilizan en nuestra fábrica. Las finuras de las pastas empleadas estuvieron siempre dentro de los límites corrientes. Tanto el agua como el carbonato de las pastas sometidas a ensayo comprenden un intervalo mayor del normal, para poder abarcar todos los estados límite posibles.

El análisis reológico se ha realizado siguiendo la técnica de Dellyes (ver bibliografía), utilizando un viscosímetro rotatorio del tipo Couette-Hatschek, cuya descripción damos luego.

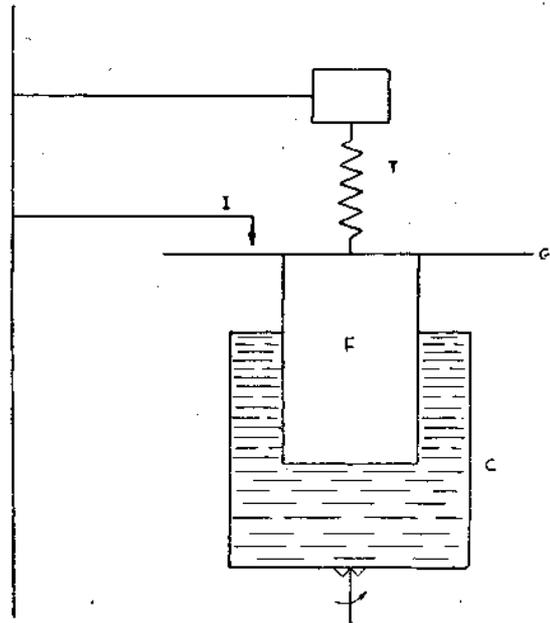


Fig. 3.—Esquema del viscosímetro

Los resultados se han agrupado en tablas y gráficas, relacionando los coeficientes reológicos con el contenido en agua. Se discutirán separadamente y en conjunto.

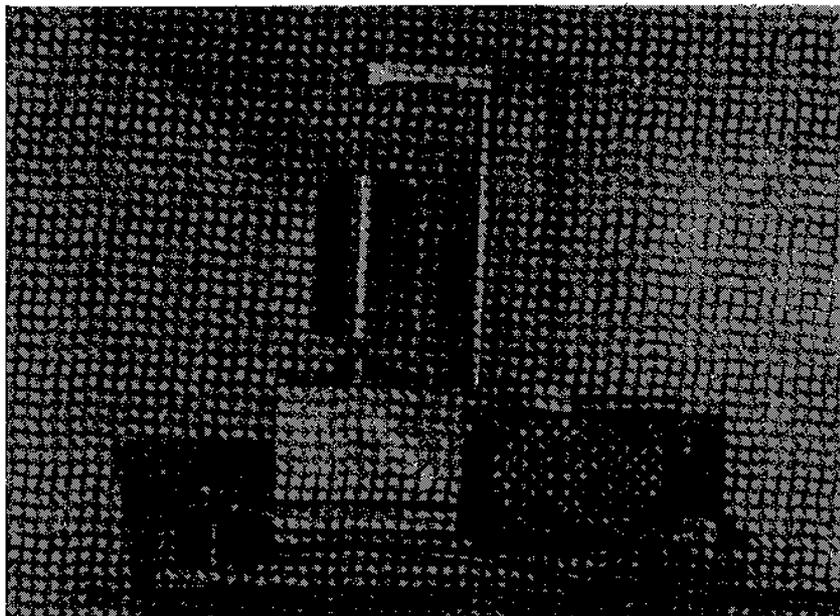


Fig. 4.—Aspecto del viscosímetro rotatorio

**Viscosímetro.**—Rotatorio del tipo Couette-Hatschek, ha sido construido según planos propios. Consta esencialmente de dos cilindros coaxiales (figuras 3 y 4). El cilindro exterior está formado por una cubeta cilíndrica C de eje vertical, que se puede hacer girar variando su velocidad de rotación dentro de amplios límites. El cilindro interior constituye un flotador F dentro de la cubeta, con el mismo eje, y que está fijo a un resorte de torsión T. La pasta a estudiar se introduce entre la cubeta y el flotador. A cada velocidad de la cubeta corresponde un desplazamiento angular definido del flotador, que puede medirse con un círculo graduado G, solidario al flotador, que gira ante un índice fijo I. Las fuerzas de viscosidad de la pasta se equilibran por el par de torsión del resorte. Los ensayos se realizan imprimiendo a la cubeta una serie de velocidades angulares y anotando los correspondientes desplazamientos del flotador. Relacionando estos valores en un sistema de ejes cartesianos se obtienen diferentes curvas, según la naturaleza reológica del material ensayado (fig. 5).

**Características del viscosímetro.**—Se dan en la Tabla II.

**TABLA I**

COMPOSICION QUIMICA MEDIA DE LA CALIZA Y MARGA UTILIZADAS EN LA CONFECCION DE PASTAS DE DIFERENTE TITULO EN  $\text{CaCO}_3$ , PARA ANALISIS REOLOGICO. EXPEDIENTE NUM. 209, 23 de mayo de 1956

**RESULTADOS**

	Caliza	Marga
Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) . . . . .	7,5 %	28,7 %
Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) . . . . .	3,3 %	9,5 %
Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) . . . . .	2,0 %	4,4 %
Cal ( $\text{CaO}$ ) . . . . .	46,2 %	30,7 %
Magnesia ( $\text{MgO}$ ) . . . . .	2,0 %	ind.
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) . . . . .	38,2 %	24,0 %
Pérdida al fuego . . . . .	0,6 %	2,4 %
Sin determinar . . . . .	0,1 %	0,3 %
Total suman . . . . .	100,0 %	100,0 %

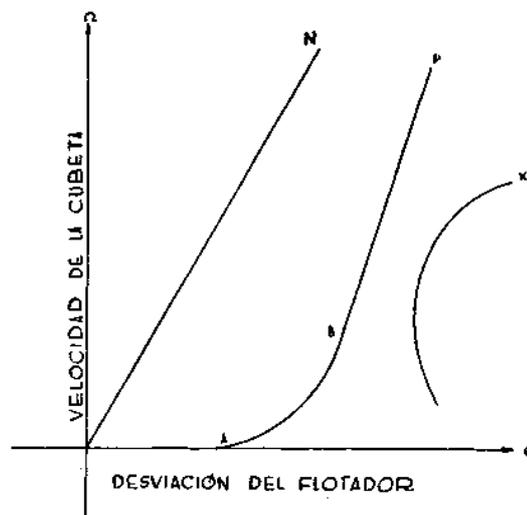


Fig. 5

**TABLA II**

**CARACTERISTICAS DEL VISCOSIMETRO ROTATORIO NUM. 2 RCH**

Radio interior de la cubeta . . . . .	3,52 cm.
Radio exterior del flotador . . . . .	2,99 cm.
Corrección de fondo . . . . .	0,40 cm.
Velocidad máxima angular . . . . .	23,33 rpm.
Velocidad mínima angular . . . . .	3,33 rpm.
Regulación de la velocidad con reostato.	

**Constantes del viscosímetro**

$K_1$ para determinar $f$ . . . . .	13,125
$K_2$ para determinar $\eta_{pl}$ . . . . .	2,100

**Exposición de los resultados.**—Los ensayos reológicos se han realizado sobre cuatro muestras de pasta con diferentes contenidos en agua. Las características de estas muestras se dan en la Tabla III.

**TABLA III**

FINURAS, COMPOSICION QUIMICA Y TITULO EN CARBONATO CALCICO DE LAS MUESTRAS 209A, 209B, 209C y 209D DE PASTAS PREPARADAS EN EL LABORATORIO DE CEMENTOS GUADALQUIVIR

Muestra núm. ....	209A	209B	209C	209D
<b>Residuo en % sobre</b>				
Tamiz de 900 mallas/cm <sup>2</sup> .....	0,32	0,40	0,38	0,45
Tamiz de 4.900 mallas/cm <sup>2</sup> .....	4,75	4,87	5,06	5,12
<b>Composición química</b>				
Sílice (SiO <sub>2</sub> ) .....	12,4	11,1	10,0	7,9
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	4,7	4,3	4,1	3,5
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	2,5	2,3	2,2	2,1
Cal (CaO) .....	42,7	43,6	44,4	45,7
Magnesia (MgO) .....	1,7	1,7	1,7	2,0
Pérdida al fuego .....	35,7	36,5	37,5	38,7
Sin determinar .....	0,3	0,5	0,1	0,1
Total suman .....	100,0	100,0	100,0	100,0
Título en CaCO <sub>3</sub> .....	76,00	77,50	79,00	82,00

Sobre cada una de estas muestras se determinaron los valores de los coeficientes reológicos para diferentes porcentajes de agua. Los valores de estos coeficientes se dan a continuación. Son valores medios de varias determinaciones, habiéndose despreciado en el cálculo de la media las determinaciones que presentaban una dispersión superior al 5%.

**Pasta con contenido bajo en carbonato.**

La muestra 209A tiene una composición que pocas veces se utiliza para alimentar el horno. Si acaso, para revestirlo de costra protectora cuando se quema fuel-oil como combustible. Puede representar el límite inferior de las pastas con bajo contenido en CaCO<sub>3</sub> utilizadas en la fabricación del clínker para cemento Portland. Como puede verse en la Tabla IV, se prepararon muestras cuyo contenido en agua varió desde el 38 al 43%. Porcentajes en agua que com-

prendían los valores «normales» para estas pastas, los cuales conocíamos por anterior experiencia.

**TABLA IV**

ANALISIS REOLOGICO DE LA MUESTRA DE PASTA NUMERO 209A

Muestra número	% de agua	Presión mínima de flujo f. (dinas/cm <sup>2</sup> )	Viscosidad plástica $\eta_{pl}$ (poises)
209A-1	38,0	912	1,70
209A-2	40,0	705	1,25
209A-3	41,5	580	1,16
209A-4	42,0	550	1,10
209A-5	43,0	485	1,00

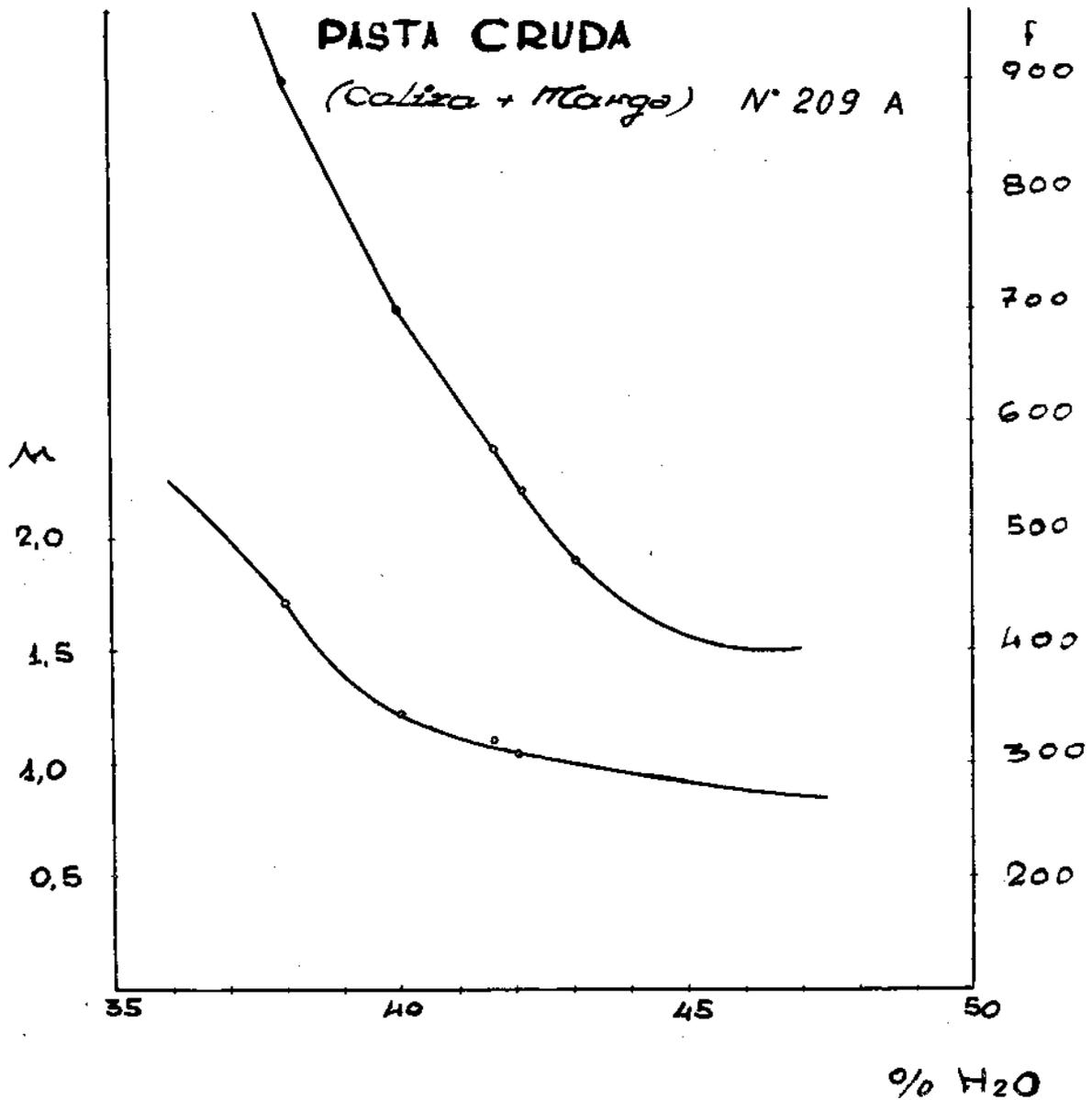


Fig. 6.—Curvas reológicas de la muestra 209A

Por la tabla anterior y de la fig. 6, construída con sus datos, vemos que el valor de los coeficientes reológicos, viscosidad plástica y presión mínima de flujo, disminuyen al aumentar el agua en la pasta. Esta disminución es rápida para bajos contenidos de agua, en tanto que para mayores contenidos parece que el descenso de los valores de los coeficientes reológicos es mucho más suave. Coinciden los hechos analíticos con

la experiencia, pues de sobra es conocido que por encima de un cierto contenido de agua en las pastas, apenas tiene influencia el aumento de la humedad en el mejor rendimiento de las instalaciones de bombeo, mientras que, por debajo de cierto porcentaje, pequeñas disminuciones del agua llegan a dificultar extraordinariamente el transporte de la pasta.

**Pastas de contenido medio en carbonato.**—Las pastas que se utilizan normalmente para fabricar clínquer de cemento Portland tienen una composición química comprendida entre las de las muestras 209B y 209C, incluso cuando se quema en los hornos carbón de baja calidad y hay gran incorporación de cenizas.

Hemos ensayado dichas muestras con porcentajes de agua variables, desde el 35 al 44%; comprendiendo estos límites ampliamente los usuales en nuestras fábricas.

En las Tablas V y VI y figuras 7 y 8, se pueden ver los resultados correspondientes a los ensayos reológicos efectuados sobre las muestras 209B y 209C, respectivamente.

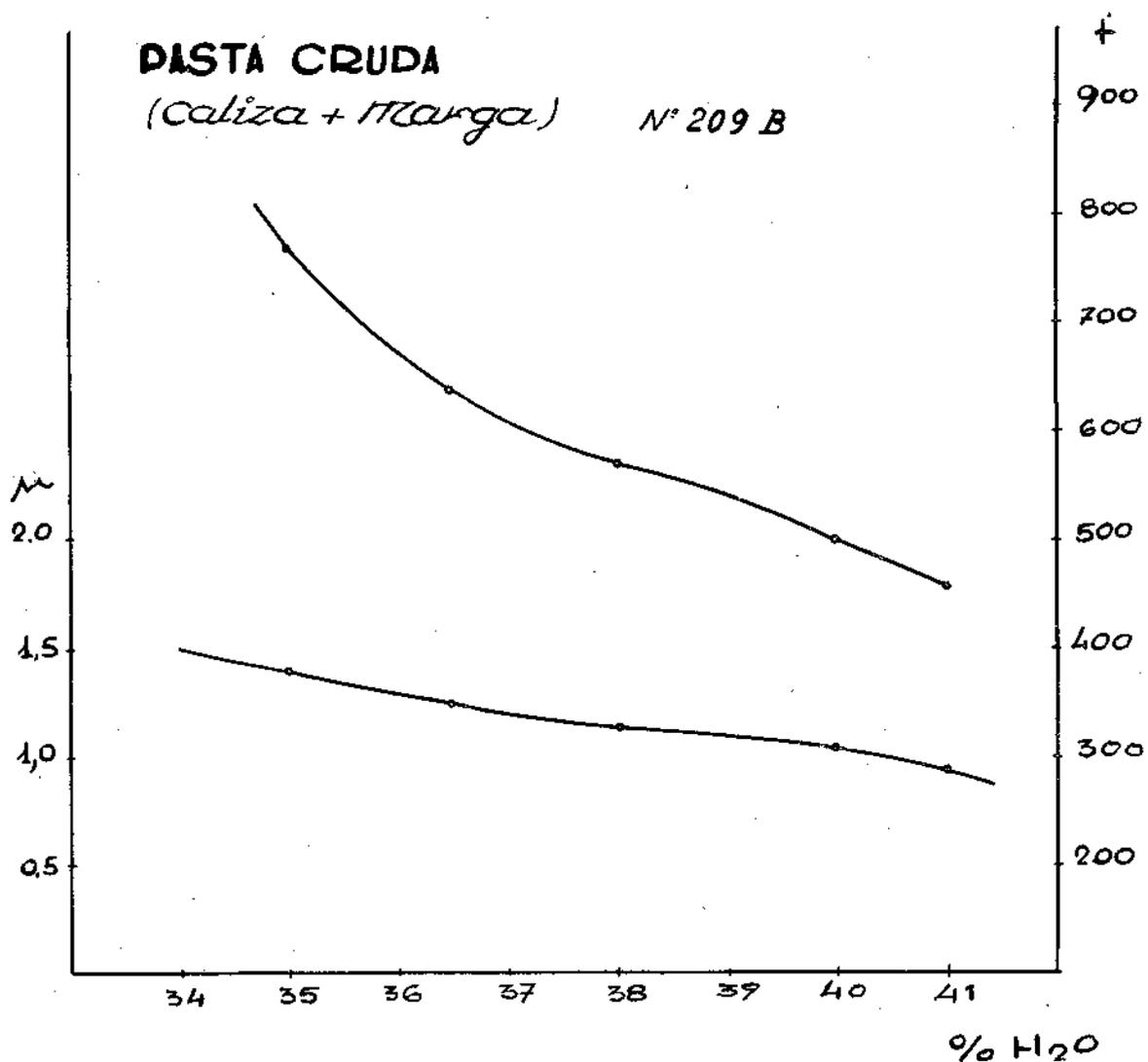


Fig. 7.—Curvas reológicas de la muestra 209B

**TABLA V**

ANALISIS REOLOGICO DE LA MUESTRA DE PASTA NUMERO 209B

Muestra número	% de agua	Presión mínima de flujo f. (dinas/cm <sup>2</sup> )	Viscosidad plástica $\eta_{pl}$ (poises)
209B-1	35,5	856	1,60
209B-2	36,5	765	1,56
209B-3	38,5	650	1,30
209B-4	40,0	576	1,21
209B-5	42,0	506	1,00
209B-6	44,0	450	0,83

**TABLA VI**

ANALISIS REOLOGICO DE LA MUESTRA DE PASTA NUMERO 209C

Muestra número	% de agua	Presión mínima de flujo f. (dinas/cm <sup>2</sup> )	Viscosidad plástica $\eta_{pl}$ (poises)
209C-1	35,0	780	1,41
209C-2	36,5	640	1,30
209C-3	38,0	572	1,21
209C-4	40,0	500	1,14
209C-5	41,0	471	1,00

De las anteriores tablas y figuras se saca en consecuencia que los coeficientes reológicos en las pastas con contenido medio en carbonato, disminuyen también conforme aumenta la cantidad de agua.

Se ve que las curvas que resultan de unir los diferentes valores de la presión mínima son análogas en los dos casos, correspondiendo los valores más altos a la pasta con menor contenido en carbonato. Lo mismo sucede con las curvas representativas de la viscosidad plástica, que en realidad son rectas prácticamente, con mayor pendiente para la muestra 209B.

**Pasta con alto contenido en carbonato.**

Aun cuando en la industria cementera rara vez se fabrican pastas del tipo de la muestra 209D, se preparó y analizó reológicamente dicha muestra para estudiar los posibles efectos de los altos contenidos en caliza, en relación con el comportamiento reológico de las pastas. En la Tabla VII y fig. 9 se han relacionado los resultados del análisis reológico de la muestra 209D, de 82 % de CaCO<sub>3</sub>.

**TABLA VII**

ANALISIS REOLOGICO DE LA MUESTRA DE PASTA NUMERO 209D

Muestra número	% de agua	Presión mínima de flujo f. (dinas/cm <sup>2</sup> )	Viscosidad plástica $\eta_{pl}$ (poises)
209D-1	34,0	675	1,57
209D-2	36,5	563	1,21
209D-3	38,0	500	1,03
209D-4	40,0	436	0,82
209D-5	41,0	401	0,68

Como en las anteriores muestras, observamos que los valores de los coeficientes reológicos disminuyen conforme aumenta la humedad. Las líneas que unen estos valores son prácticamente rectas paralelas de pendiente suave, y es fácil deducir la función que liga la presión mínima de flujo y la viscosidad, con el % de agua.

**Discusión general.**—El carácter de las experiencias realizadas sobre un solo tipo de pasta, no permite desde luego presentar conclusiones definitivas. En cada fábrica habrían de confirmarse con un ensayo reológico. Sin embargo, según nuestras noticias, las fábricas de cemento españolas, salvo contadísimas excepciones, trabajan todas con pastas crudas de un carácter reológico análogo a la que ha sido objeto de nuestro estudio; por ello, estas conclusiones podrán tener aplicación en muchos casos, en los que las pastas sean flúidos de Bingham, sin especiales propiedades reológicas, tixotropía, etc.

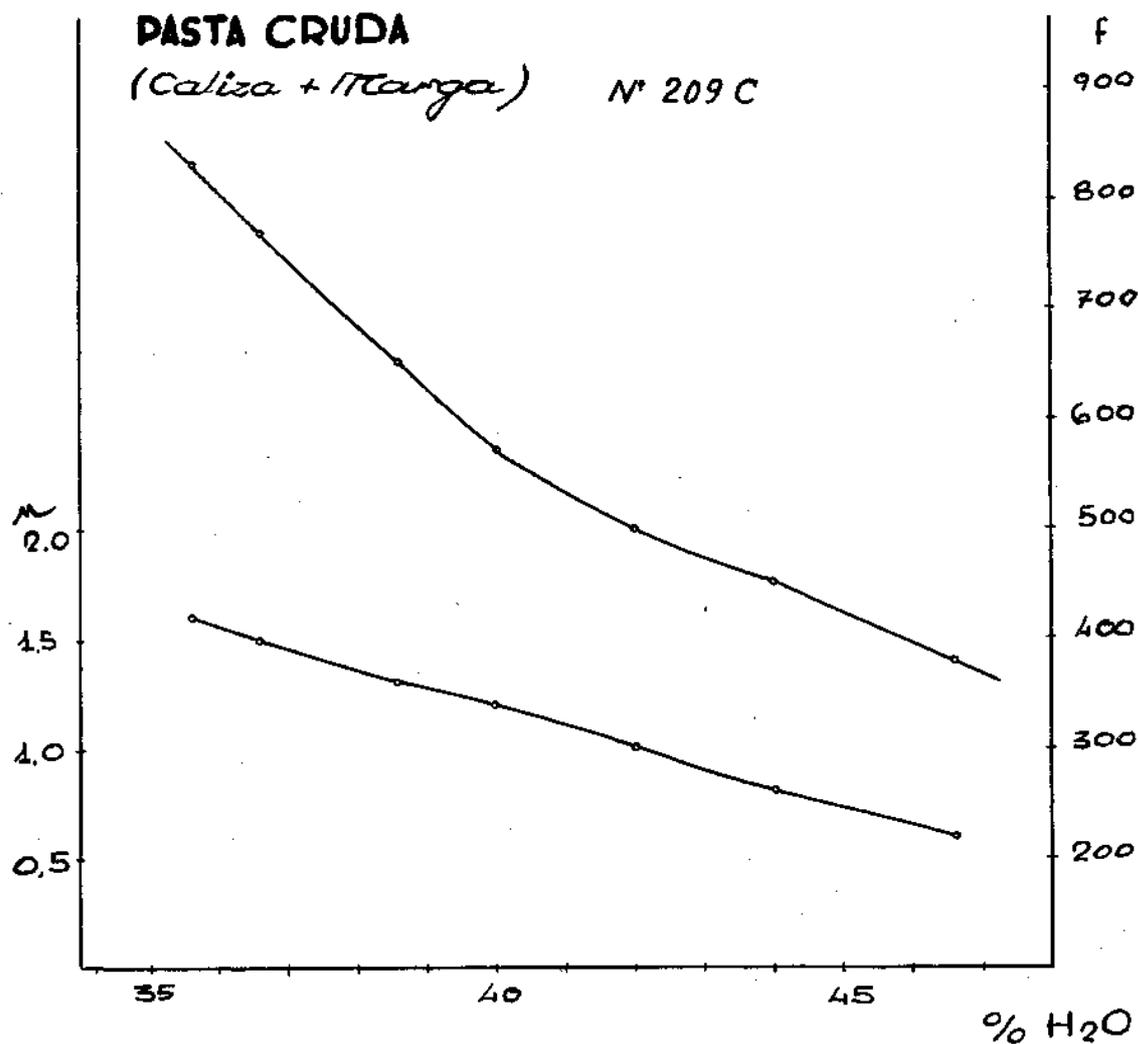


Fig. 8.—Curvas reológicas de la muestra 209C

Los resultados expuestos en las Tablas IV, V, VI y VII indican que altos contenidos en arcilla significan valores altos de los coeficientes reológicos de las pastas. Lo contrario sucede cuando sube el porcentaje de agua.

Como en las tablas, vemos en las figuras 6, 7, 8 y 9 que la viscosidad plástica y la presión mínima de flujo son directamente proporcionales a la proporción de arcilla en las pastas, e inversamente proporcionales a su contenido de humedad. En otras palabras: la fluencia de las pastas disminuye cuando aumentan su densidad y su parte arcillosa.

Desgraciadamente no es posible dar una ley general que relacione la fluencia de las pastas con su humedad y su título en carbonato cálcico, debido a las diferencias estructurales de las distintas margas y arcillas empleadas en la fabricación del cemento. Aunque no creemos muy difícil encontrar fórmulas y ecuaciones experimentales que ligen estas variables dentro de una fábrica, supuesta estructuralmente homogénea la parte arcillosa de la pasta cruda. Desde luego sería necesario un previo y concienzudo análisis reológico, que demostrase, por un lado, la homogeneidad estructural, y por otro lado

nos proporcionase suficientes datos experimentales para deducir las ecuaciones correspondientes.

Por cuanto hemos podido leer y experimentar, parece ser poco probable que la caliza influya en el valor de la viscosidad plástica y de la presión mínima de flujo.

Podemos decir resumiendo: las pastas crudas para la fabricación de cemento por vía húmeda son mezclas en agua de margas y calizas

en proporción variable. Mineralógicamente están constituidas por una mezcla de carbonatos cálcico, magnésico y alcalinos, con silicatos de alúmina y hierro y, a veces, con mineral de hierro. En orden de abundancia ocupa el primer lugar el carbonato cálcico (del 76 al 79 %), seguido por los silicatos (del 18 al 22 %); luego, en menor proporción, otros componentes: carbonato magnésico, compuestos de hierro, alcalinos, manganeso, sílice, etc.

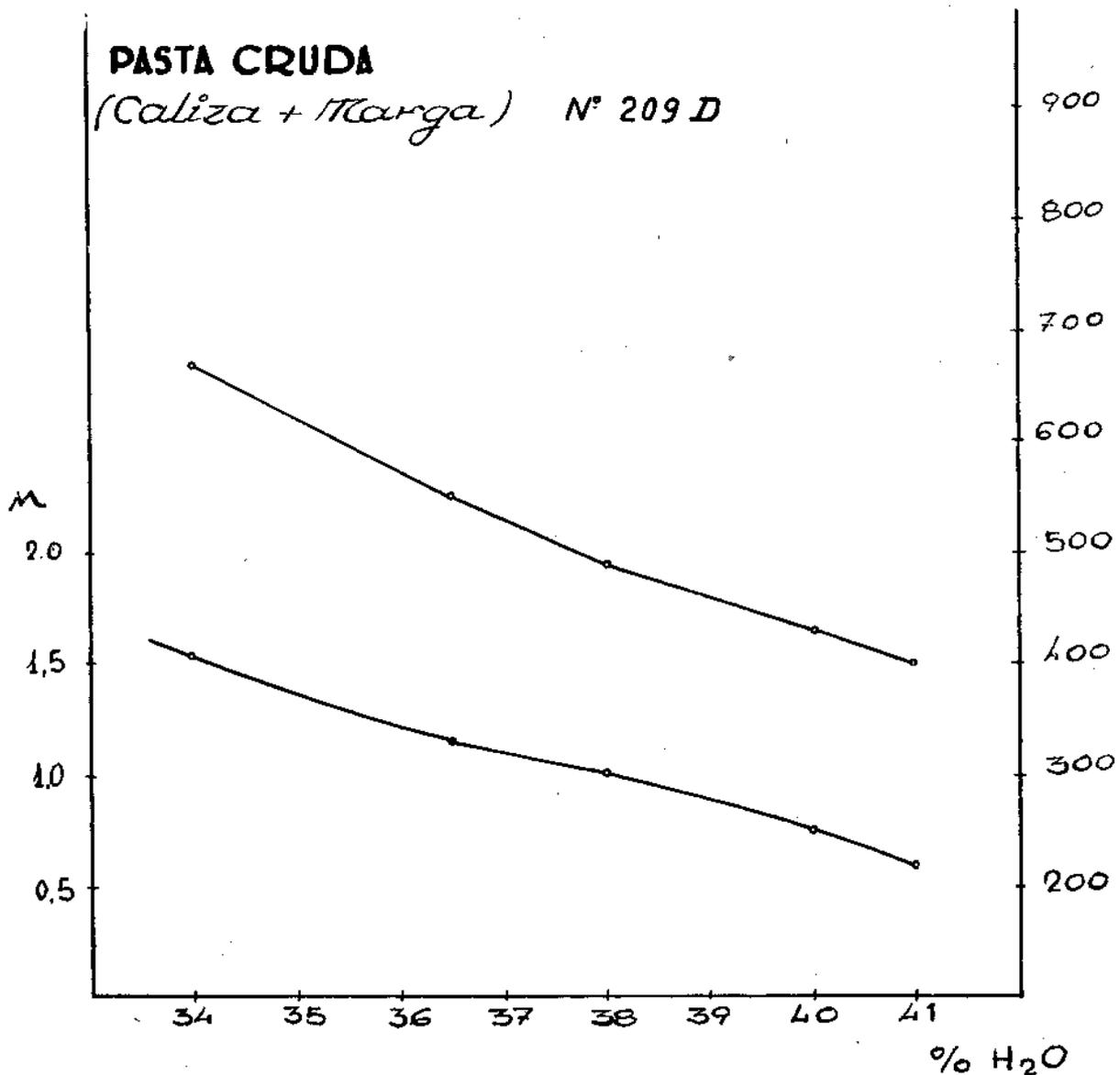


Fig. 9.—Curvas reológicas de la muestra 209D

Como hemos dicho, tanto el  $\text{CaCO}_3$  como el  $\text{MgCO}_3$  parecen tener poca influencia en la variación de las constantes reológicas de las pastas. Por el contrario, los silicatos constituyentes principales de la parte arcillosa determinan fundamentalmente el carácter reológico de la pasta. Sus estructuras moleculares complicadas parecen influir, casi exclusivamente, en el comportamiento de la pasta, desde el punto de vista de la Reología. Como veremos más adelante, existen otros cuerpos y compuestos que tam-

bién pueden influir en las variaciones de las constantes reológicas; si estos compuestos se encuentran naturalmente en las pastas, intervienen en la conducta reológica de las mismas. Precisamente se aprovechan estas propiedades de algunos compuestos fluidificantes, para solucionar problemas en la circulación de las pastas.

El contenido en agua es un factor determinante de las constantes reológicas. De manera general, se puede asegurar que los valores de la

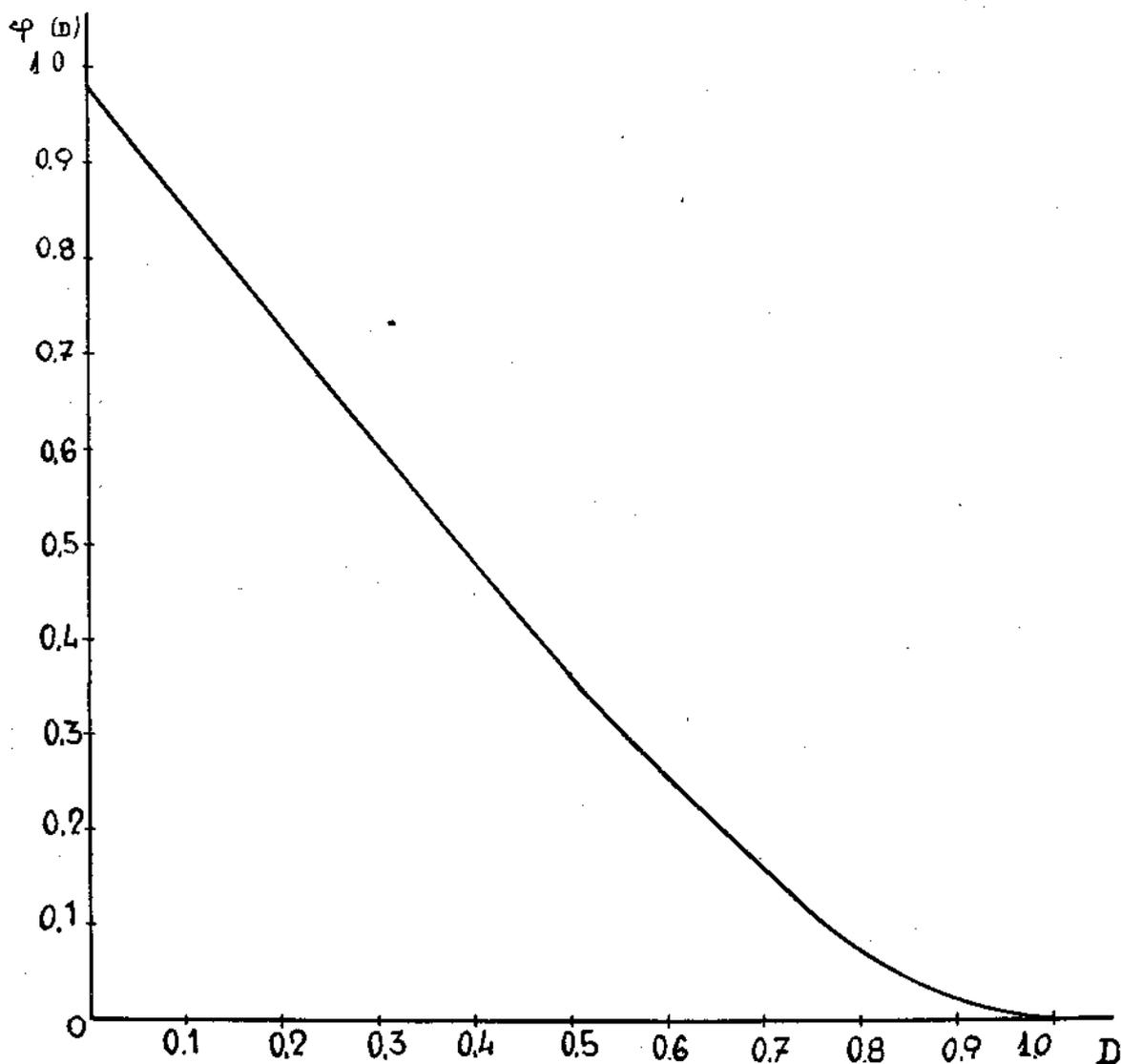


Fig. 10.—Correspondencia entre D y  $\varphi(D)$

viscosidad plástica y presión mínima de flujo, considerados fijos otros factores, aumentan al aumentar el contenido en silicatos o disminuir la humedad de las pastas.

Prácticamente, esto se traduce en el hecho, desgraciadamente tan comprobado, de que las pastas bajas en carbonato y en agua circulan con gran dificultad por las tuberías.

## FORMULAS DE APLICACION PRACTICA

**Introducción.**—La Reología, ciencia eminentemente práctica, nos permite traducir casi inmediatamente los resultados que se obtienen en el laboratorio, en fórmulas de aplicación real y utilitaria. Refiriéndonos a las pastas, es totalmente cierto que, con las constantes  $\eta_{pl}$  y  $f$ , determinadas en el laboratorio, podemos prever el comportamiento de la pasta estudiada durante su flujo. Conociendo así, de antemano, como se comportará esa pasta en instalaciones distintas, lo cual es una forma de comparación. En resumen, podemos determinar, sin necesidad de largos y costosos ensayos, las características óptimas para cada instalación y cada pasta.

A nadie se le ha de ocultar la importancia de esta realidad, no sólo al proyectar nuevas instalaciones de crudo, sino al intentar mejorar las actuales. Para ello sólo es necesario elegir las ecuaciones convenientes, medir las constantes que intervienen, todo lo cual es fácilmente realizable.

Las fórmulas que se utilizan son, en realidad, algo complicadas, y esto obliga algunas veces a operar con sucesivos tanteos, hasta encontrar la solución conveniente. No es ninguna dificultad, ya que es un sistema de cálculo ampliamente empleado entre los proyectistas.

Las fórmulas que daremos a continuación son generales y en su deducción se ha supuesto que la pasta circula impulsada por bombas a través de tuberías circulares. Así sucede en la mayoría de las instalaciones. Es posible, naturalmente, deducir fórmulas aplicables a otros tipos de instalaciones.

Las ecuaciones son siempre homogéneas y, por ello, es indiferente el sistema de unidades empleado, con tal que sea igualmente homogéneo. Nosotros solemos emplear el sistema C. G. S., pasando los resultados finales a unidades prácticas.

Se ha de advertir, finalmente, que las fórmulas sólo tienen validez cuando el flujo es laminar para Números de Reynolds menores de 2.000. Luego veremos cómo se calcula.

**Cálculo práctico del gasto.**—El primer problema que se nos ocurre es calcular el gasto en una determinada instalación, con una pasta de coeficientes reológicos conocidos. Es un caso que se presenta al querer conocer el funcionamiento de una instalación existente, con una nueva pasta.

Para calcular el gasto, podemos aplicar la ecuación de Buckingham-Reiner (6) y las ecuaciones (6a) y (6b).

Se conocen todos los valores, determinamos  $D$  y  $\varphi(D)$  y fácilmente llegamos a fijar el gasto  $Q$ .

Los valores obtenidos son siempre más o menos superiores a los reales. Esto sucede porque la presión que suministra la bomba se utiliza, no sólo en vencer la pérdida de carga de la tubería, sino en vencer el desnivel existente entre la entrada y salida de pasta y en suministrar una cierta energía cinética a la misma. Por otra parte, hay que tener en cuenta los codos, curvas, llaves, etc., que alargan la longitud  $l$  de la tubería.

En este y en los demás casos es de interés, para facilitar los cálculos, determinar de antemano las correspondencias entre los valores de  $D$  y  $\varphi(D)$  con  $\varphi(D)/D$ , para los valores de  $D$  comprendidos entre 0 y 1. En las figuras 10 y 11 vemos las curvas que los relacionan. Para mayor exactitud puede consultarse el ábaco que aparece en el trabajo de Delyes (op. cit.)

**Cálculo de la pérdida de carga.**—De gran utilidad es conocer la pérdida de carga que ocasiona un gasto dado; veamos cómo se calcula.

Para cualquier fluido que circule por un tubo circular y perfectamente horizontal, con un gasto fijo, la pérdida de carga es siempre igual a la diferencia entre las presiones estáticas de la entrada y de la salida.

La solución del problema la tenemos en la misma ecuación de Buckingham, que liga el gasto con la diferencia de presión.

La solución formal, escrita la ecuación de Buckingham en la forma (6), es difícil, pues aparece una función de  $D$  que, a su vez, es función de  $\Delta p$ .

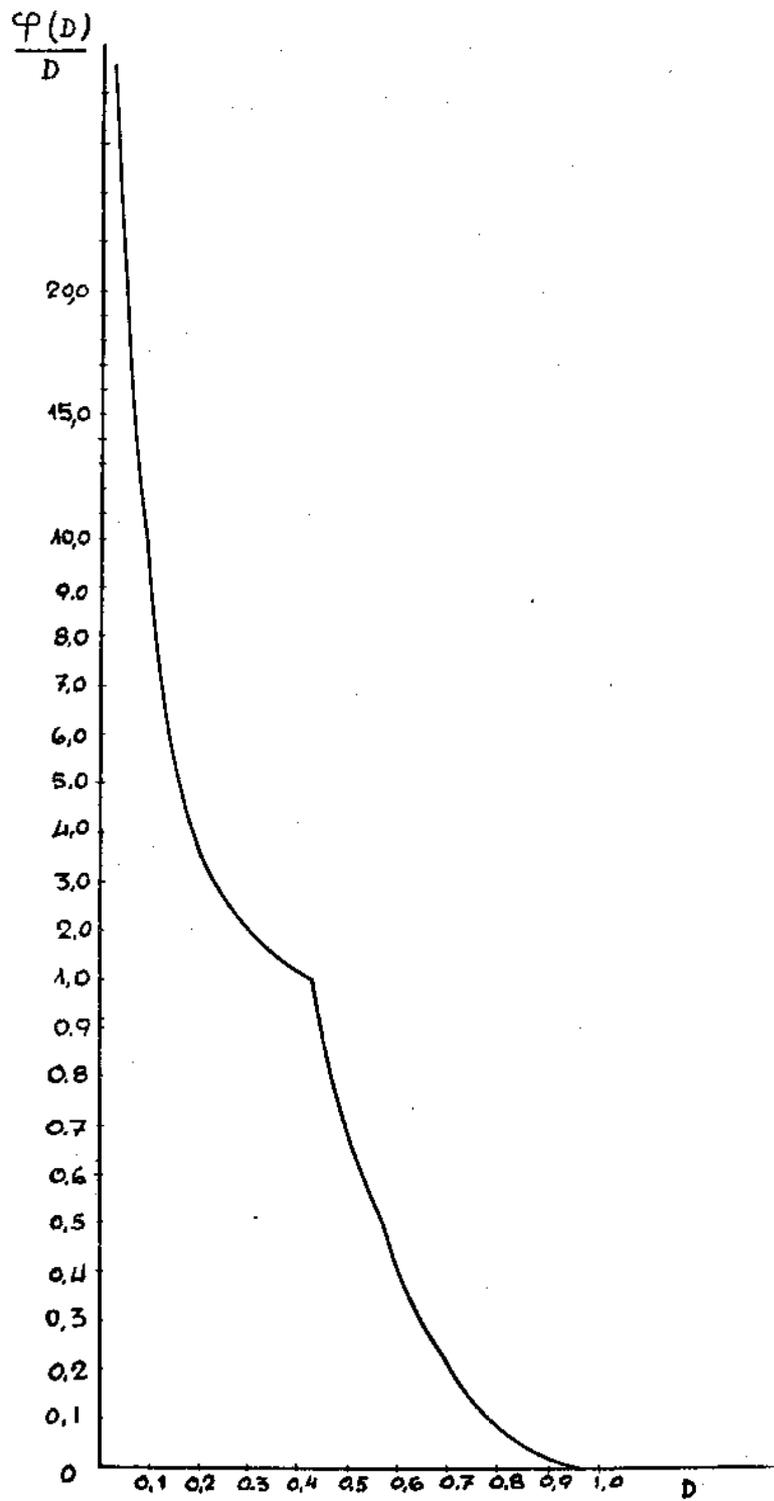


Fig. 11.—Correspondencia entre D y  $\varphi(D)/D$

Debemos recurrir a emplear un ligero artificio. La (6b) podemos escribirla:

$$\Delta p = \frac{2fl}{DR}, \quad (10)$$

y sustituyendo en (6) este valor de  $\Delta p$ , tenemos:

$$Q = \frac{\pi R^3 f}{4 \eta_{pl}} \cdot \frac{\varphi(D)}{D}, \quad (11)$$

que es otra forma de escribir la ecuación de Buckingham. Igualmente podemos escribirla:

$$\frac{4 Q \eta_{pl}}{\pi R^3 f} = \frac{\varphi(D)}{D}, \quad (12)$$

Conocemos el total del primer término, y utilizando la curva de la fig. 11, o el ábaco, determinamos el correspondiente valor de  $D$ . Con la ecuación (10) calculamos  $\Delta p$ , es decir, la pérdida de carga buscada.

**Energía cinética.**—Dijimos ya, que parte de la presión disponible se consume en suministrar energía cinética a la pasta en movimiento.

Afortunadamente, en las condiciones normales de trabajo, la velocidad de circulación de la pasta es lo suficientemente baja, permitiéndonos despreciar la energía cinética. Pero siempre es conveniente asegurarse de su valor real. Conozcamos, pues, su determinación:

Sea  $\delta$  la densidad de la pasta,  $g$  la aceleración de la gravedad, representando las demás letras los mismos conceptos que en las anteriores ecuaciones. Podemos, entonces, asegurar que la pasta sale de una tubería con la velocidad media  $v_m$ .

Y como

$$v_m = \frac{Q}{\pi R^2}, \quad (13)$$

lo correcto sería operar con la suma de las velocidades de cada molécula de la pasta, pero es suficiente aproximación considerar la velocidad media de salida. Para alcanzar esta velocidad por caída libre, la pasta debería caer desde una altura  $h$ , de forma que se cumpla:

$$v_m = \sqrt{2gh} \quad \text{ó} \quad v_m^2 = 2gh, \quad (14)$$

es decir:

$$h = \frac{v_m^2}{2g}. \quad (14')$$

Esta altura ejercerá una presión por unidad de área igual a:

$$P_e = \delta \cdot hg = \delta \cdot \frac{v_m^2}{2}. \quad (15)$$

Por consiguiente, la energía cinética equivale a esta presión  $P_e$ , que puede escribirse teniendo en cuenta (13):

$$P_e = \frac{\delta Q^2}{2 \pi^2 R^4}. \quad (15')$$

**Desnivel de la tubería.**—En el cálculo de la presión necesaria para vencer el desnivel existente entre la entrada y salida de la pasta no intervienen los coeficientes reológicos. Esta presión se calcula con la conocida fórmula:

$$P_h = H \delta g, \quad (16)$$

donde  $H$  es la diferencia de nivel entre los extremos de la conducción. Pudiendo ser  $P_h$  negativa si la salida de pasta tiene una cota inferior en relación con la entrada.

**Presión total.**—Con todo lo anterior podemos concluir que la presión total necesaria para conseguir un gasto  $Q$  en una pasta, con una presión mínima de flujo  $f$ , para una tubería de radio  $R$  y longitud  $l$ , y con desnivel  $H$ , será:

$$\text{Presión total} = \frac{2fl}{RD} + \frac{\delta Q^2}{2\pi^2 R^4} + H \delta g. \quad (17)$$

**Ecuación de Bernouille para los flúidos de Bingham.**—La ecuación (17) no es otra cosa que la expresión analítica del teorema de Bernouille, cuya fórmula general es:

$$p + \delta \frac{v^2}{2} + \delta g h = \text{Cte.} \quad (18)$$

En el caso de las pastas que sean flúidos de Bingham, podemos escribirlo bajo la forma:

$$\frac{2 fl}{RD} + \delta \frac{V_m}{2} + \delta g h = \text{Cte.} \quad (19)$$

donde:

- f es la presión mínima de flujo de la pasta,
- $\delta$  su densidad,
- l la longitud de la tubería,
- R su radio,
- H el desnivel,
- g la aceleración de la gravedad,
- $v_m$  la velocidad media de salida de la pasta, y
- D un número adimensional, característico para cada pasta, cada tubería y cada presión.

**Número de Reynolds.**—Recordemos que el número de Reynolds se puede calcular, en el caso de flúidos viscosos, según la igualdad:

$$Re = 2 v_m R \frac{\delta}{\eta_{pl}} \quad (20)$$

Teniendo en cuenta la anterior ecuación y las (13) y (8), y haciendo las oportunas sustituciones, podemos establecer que el valor del número de Reynolds para los cuerpos de Bingham es:

$$Re = \frac{2 \delta Q}{\pi R \eta_{pl}} \varphi(D) \quad (21)$$

### EJEMPLO NUMERICO REAL

Como ejemplo numérico de lo anteriormente expuesto, nos ha parecido interesante referir un caso real resuelto por nosotros.

**Planteamiento del problema.**—Se trataba de sustituir, en una determinada fábrica, las bombas que impulsan el crudo de los molinos a los depósitos de mezcla y homogeneización.

Las nuevas bombas deberían ser capaces de atender una producción doble de pasta y se había de utilizar la misma instalación de tuberías.

En la fábrica se dispone de bombas centrífugas, procedentes del depósito de pasta dosificada, a las que sustituyen otras de más capacidad para atender la alimentación de un nuevo horno.

La nueva instalación de molienda quedará constituida por dos molinos gemelos «Vickers» de cuatro cámaras, con una producción, garantizada por unidad, de 20 t/h en pasta seca, con 5,00 % de residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>.

### Datos

#### Tuberías de conducción:

Material: Fundición

Longitud total de la tubería.. 52,000 metros

Diámetro interior de la tubería. 0,125 id.

Desnivel entre los puntos más alto y más bajo de la tubería. 10,000 id.

Corrección de longitud por:

1 curva, 5 codos y 2 llaves.... 8,000 id.

Total longitud corregida .... 60,000 id.

#### Caudal:

Dada la experiencia del primer molino instalado, la instalación se calcula para un caudal de 50 m<sup>3</sup>/hora.

#### Características de la pasta:

El análisis reológico de la pasta es el que exponemos en las tablas. Se vió que el caso más desfavorable, dentro de las condiciones normales de trabajo, redondeando cifras, puede estimarse en una pasta de las siguientes características:

Las correspondientes a la muestra 209B-I, de la Tabla V.

**Cifras para el cálculo.**—Redondeando, de los datos anteriores disponemos de las siguientes cifras:

Para la pasta:

$$f = 860 \text{ dinas/cm}^2 \text{ (presión mínima de flujo)}$$

$$\eta_{pl} = 1,60 \text{ poises (viscosidad plástica)}$$

$$\delta = 1,71 \text{ (densidad)}$$

**Caudal:**

$$Q = 14,0 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{seg (gasto)}$$

**Tuberías:**

$$l = 6,0 \times 10^3 \text{ cm (longitud)}$$

$$R = 6,25 \text{ cm (radio interior)}$$

$$H = 103 \text{ cm (desnivel)}$$

**Cálculos:**

1. Pérdida de carga por flujo:

1a. Fórmulas aplicables: Ecuaciones (10) y (11)

1b. Solución numérica:

$$\frac{\varphi(D)}{D} = \frac{4 \times 14 \times 1,6 \times 10^3}{\pi \times 6,25^3 \times 860} = 0,136 \quad D = 0,754$$

$$\Delta P = \frac{2 \times 860 \times 6 \times 10^3}{0,754 \times 6,25} = 2,19 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 2,23 \text{ kg/cm}^2$$

**Supone la pérdida de carga 2,23 kg/cm<sup>2</sup>**

2. Presión necesaria para vencer el desnivel:

2a. Fórmula aplicable: Ecuación (16)

2b. Solución numérica:

$$P_h = 10^3 \times 981 \times 1,71 = 1,68 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 1,71 \text{ kg/cm}^2$$

**Supone la presión 1,71 kg/cm<sup>2</sup>**

3. Energía cinética:

3a. Fórmula aplicable: Ecuación (15<sup>o</sup>)

3b. Solución numérica:

$$P_a = \left( \frac{14 \times 10^3}{\pi \times 6,25^2} \right)^2 \cdot \frac{1,71}{2} = 0,01 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 0,01 \text{ kg/cm}^2$$

**Supone la energía cinética 0,01 kg/cm<sup>2</sup>**

4. Presión total necesaria:

4a. Por flujo ..... 2,23 kg/cm<sup>2</sup>

4b. Por desnivel ..... 1,71 »

4c. Por energía cinética ..... 0,01 »

4d. Presión total a suministrar .. 3,95 »

**Supone la presión total necesaria 3,95 kg/cm<sup>2</sup>**

**Número de Reynolds.**—Se determinó el número de Reynolds para asegurar que el flujo es laminar, dentro de las condiciones previstas. La aplicación de la ecuación (21) fija, en nuestro caso, el valor del número de Reynolds en 157.

Ese valor del número de Reynolds asegura el flujo laminar y justifica los cálculos anteriores.

**Solución propuesta.**—Las cifras obtenidas nos hacen fijar las siguientes características mínimas para la bomba:

**Caudal de 50 m<sup>3</sup>/hora. Altura manométrica de 40 m.**

La bomba disponible según el catálogo de la casa constructora, no alcanzaba el caudal previsto ni la altura manométrica deseada, para un porcentaje de sólidos del 65 % en nuestro caso. No obstante, se comprobó experimentalmente que era capaz de suministrar normalmente un caudal de 100 m<sup>3</sup>/hora para una altura manométrica de 40 m, aconsejándose por este motivo su instalación.

## CONSIDERACIONES FINALES

Son muy amplias las perspectivas que abre el análisis reológico de las pastas crudas para la fabricación de cemento por vía húmeda.

Con ayuda del viscosímetro rotatorio es posible determinar y medir la tixotropía de las pastas, así como su variación en distintas condiciones.

Otra posibilidad interesante es la de poder conocer en el laboratorio la acción de los diversos fluidificantes sobre las pastas, observar su influencia en el valor de los coeficientes reológicos y fijar las condiciones más favorables para la circulación de la pasta, según los contenidos de agua y fluidificante. Todo esto sin necesidad de ensayos largos y costosos.

Por otra parte, al proyectar nuevas instalaciones, se hace imprescindible el análisis reológico de las pastas para conocer realmente sus características. Se podrá así elegir el sistema de conducción más conveniente, e incluso, ante coeficientes reológicos demasiado altos, se podrá justificar la elección del sistema seco.

Llamamos la atención del lector acerca del hecho, que hemos encontrado, de que las bombas diseñadas para «suspensiones sólidas» suelen tener características muy superiores a las especificadas en los catálogos. Esto sucede debido a que, hasta ahora, las casas constructoras de bombas de impulsión para suspensiones sólidas, coloidales, y seudocoloidales, no suelen tener en cuenta las propiedades reológicas de las mismas, operando con un excesivo coeficiente de seguridad y dimensionando ampliamente sus máquinas. El conocimiento íntimo de cada problema nos permitirá elegir, en cada caso, las dimensiones de las bombas, que generalmente serán menores que las actuales.

Queda abierto ancho campo para la investigación, siendo viable esperar que en un futuro próximo sea posible fijar las condiciones de molienda, temperatura, agua, etc., óptimas y favorables para cada pasta y cada fábrica. Consiguiéndose así la mayor eficacia y economía en el transporte de pastas y arcillas en las fábricas, llegándose cada vez a más bajos contenidos en agua, lo que redundará, en definitiva, en beneficio de los costes de fabricación, con un mayor ahorro de combustibles.

Reiterando lo que tuvimos oportunidad de decir en los últimos Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento, creemos en

la necesidad de una Sección de Reología en el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, que abarcase, no sólo lo relacionado con las pastas crudas, sino el aspecto reológico del cemento y otros muchos materiales relacionados con la construcción. Se podrían iniciar o completar estudios sobre el «creep» del hormigón y metales, reología de betunes y asfaltos, plasticidad de los suelos, etc., todos tan interesantes. En nuestro país se han realizado ya afortunadas investigaciones en este sentido; entre las que conocemos, citamos, por ser afín al tema, la publicación del Dr. Ortega (ver bibliografía).

Es de esperar la pronta formación de un equipo de reólogos que enfoquen y resuelvan con amplio criterio los problemas reológicos relacionados con nuestra industria. De esta manera y a no dudarlo, se conseguirán resultados que para los técnicos de fábricas son difícilmente alcanzables, pues actualmente las investigaciones en las fábricas están presididas por un criterio localista y de resultados inmediatos, que tantas veces nos hace soslayar cuestiones generales, de solución larga y complicada tal vez, pero de indudable interés para todos.

## RESUMEN

Se inicia el presente trabajo con algunas consideraciones acerca del empirismo actual de los conceptos de fluencia y «manejabilidad» de las pastas crudas para la fabricación de cemento por vía húmeda. Se trata la oportunidad de los estudios reológicos.

Se hace una breve reseña histórica de la Reología. Se sigue con un ligero estudio de la teoría general, sus principios fundamentales y algunas ecuaciones de estado. Se definen algunos coeficientes reológicos relacionados con las pastas.

Considerando las pastas como flúidos o cuerpos de Bingham, se expone la teoría de estos cuerpos, aplicando la ecuación de Buckingham-Reiner para el cálculo del gasto en tuberías circulares, bajo el régimen laminar.

Se aplica la teoría reológica a las pastas, explicándose la aparente variación de la viscosidad, dándose la condición de flujo y señalándose la importancia que adquieren, en un estudio completo, los coeficientes reológicos.

En la parte experimental del trabajo se describe el viscosímetro empleado, y se dan los resultados obtenidos en los ensayos practicados sobre varias muestras de pasta. Los resultados y datos se han agrupado en tablas y gráficas, que relacionan los coeficientes reológicos con el contenido en agua y la proporción de arcilla de las muestras. Se discuten los resultados obtenidos.

Se dan a conocer algunas fórmulas de aplicación práctica para calcular el gasto, características de las bombas y tuberías.

Un ejemplo numérico real.

Se habla, por último, de las posibilidades que tienen el estudio reológico de las pastas: reconocimiento de la posible tixotropía, utilización eficiente de fluidificantes, elección del sistema de transporte e, incluso, la determinación del sistema de fabricación, seco o húmedo.

## RECONOCIMIENTO

Queremos expresar nuestro agradecimiento al ingeniero director de Cementos Guadalquivir, Sr. Gavala, por las facilidades que nos prestó en la realización de la parte experimental de este trabajo. Igualmente, agradecemos a nuestro colega Sr. García Martínez y a los Sres. Lang y Hernández la colaboración prestada.

## BIBLIOGRAFIA

Al redactar nuestro trabajo, hemos consultado las siguientes obras y publicaciones:

Eggert, J.: «Tratado de Química Física». Barcelona, 1943.

González del Tánago, J.: «Fluidodinámica y transporte de flúidos en sus aplicaciones a la Ingeniería Química». Madrid, 1953.

Vian, A. y Ocon, J.: «Elementos de Ingeniería Química». Madrid, 1952.

Green, H. S.: «The molecular theory of fluids». Amsterdam, 1952.

Green, H. S.: «Industrial Rheology and rheological structures». Nueva York, 1949.

Reiner, M.: «Twelve lectures on theoretical Rheology». Amsterdam, 1949.

Reiner, M.: «Deformation and flow». Londres, 1949.

Dellyes, R.: «La Rhéologie des pâtes à ciment dans la voie humide». Rev. Matér. Constr. Ed. C, (julio, agosto y setiembre 1954).

Papadakis, M.: «Rhéologie des suspensions de ciment». Rev. Matér. Constr. Ed. C, (mayo 1955).

Ortega, J. J.: «Contribución al estudio reológico de los betunes asfálticos». Publicación núm. 86 del Lab. Central de Ensayos de Materiales de Construcción. Madrid, 1955.

Laffarga Osteret, J.: «Aplicación de la Reología al estudio de las pastas crudas para la fabricación del cemento por vía húmeda». Cemento-Hormigón (junio, julio y agosto, 1956).

## **índice**

### **I.—INTRODUCCION**

### **II.—GENERALIDADES SOBRE REOLOGIA**

- 1.—Cuerpos ideales reológicos.
- 2.—Líquido viscoso o de Newton.
- 3.—Cuerpo de St. Venant.
- 4.—Cuerpo de Bingham.
- 5.—Teoría del cuerpo de Bingham.
- 6.—Ecuación de Buckingham-Reiner.

### **III.—REOLOGIA DE LAS PASTAS**

- 1.—Generalidades.
- 2.—Variación de la viscosidad de las pastas
- 3.—Importancia de los coeficientes reológicos.

### **IV.—PARTE EXPERIMENTAL**

- 1.—Introducción.
- 2.—Viscosímetro.
- 3.—Características del viscosímetro.
- 4.—Exposición de los resultados.
- 5.—Pasta con contenido bajo en carbonato.
- 6.—Pastas con contenido medio en carbonato.
- 7.—Pasta con alto contenido en carbonato.
- 8.—Discusión general.

### **V.—FORMULAS DE APLICACION PRACTICA**

- 1.—Introducción.
- 2.—Cálculo práctico del gasto.
- 3.—Cálculo de la pérdida de carga.
- 4.—Energía cinética.
- 5.—Desnivel de la tubería.
- 6.—Presión total.
- 7.—Ecuación de Bernouille para los flúidos de Bingham.
- 8.—Número de Reynolds.

### **VI.—EJEMPLO NUMERICO REAL**

- 1.—Planteamiento del problema.
- 2.—Cifras para el cálculo.
- 3.—Cálculos.
- 4.—Número de Reynolds.
- 5.—Solución propuesta.

### **VII.—CONSIDERACIONES FINALES.**

### **VIII.—RESUMEN.**

### **IX.—RECONOCIMIENTO**

### **X.—BIBLIOGRAFIA**