

LEMIT

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES
E INVESTIGACIONES TECNOLOGICAS DE LA
PROVINCIA DE BUENOS AIRES
LA PLATA - ARGENTINA

3-1969

LEMIT

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES
E INVESTIGACIONES TECNOLOGICAS DE LA
PROVINCIA DE BUENOS AIRES
LA PLATA - ARGENTINA

3-1969

AUTORIDADES DEL MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

Ministro, Ing. Héctor A. Pérez Pesce

Subsecretario de Obras Públicas, Ing. Rodolfo A. Montalvo

Subsecretario de Urbanismo y Vivienda, Arq. Godofredo A. Cesio

Subsecretario de Programación, Ing. Pedro A. Gortari

L E M I T

Director, Dr. Pedro J. Carriquiriborde

Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Mecánica e Hidráulica
Ing. Mecánico y Electricista Américo O. Boero

Jefe del Departamento de Ingeniería Civil y Tecnología de la Construcción
Ing. Civil Alberto S. C. Fava

Jefe del Departamento Tecnología Aplicada y Plantas Experimentales
Dr. en Química Luis A. Mennucci

Jefe del Departamento Análisis y Ensayos de Materiales
Dr. en Química Vicente J. D. Rascio

I N D I C E

- pág. 1 LA COMPUTACION ELECTRONICA APLICADA A LA SELECCION DE ACEROS
Ing. C. A. Carreras
Ing. S. Mitidieri
- pág. 31 DILATOMETRIA DE ARCILLAS REFRACTARIAS NACIONALES
Dr. A. Rossini
Dr. L. A. Mennucci
Tco. R. Figueras
- pág. 69 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACION DE UN SUELO PLASTICO CON CAL Y/O CEMENTO PORTLAND
Ing. L. M. Fossa
Ing. C. A. Alemán
Sr. O. Arrechea
- pág. 89 NUEVOS CRITERIOS SOBRE ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS PARA USO VIAL
Dr. A. Pinilla
- pág. 119 ENSAYOS DE MEZCLAS ASFALTICAS PARA EL SELLADO DE JUNTAS EN PAVIMENTOS DE HORMIGON
Ing. D. D. Massaccesi
Ing. J. F. Rocco

APENDICE

Resúmenes de los trabajos

LA COMPUTACION ELECTRONICA APLICADA A LA
SELECCION DE LOS ACEROS

Ing. Carlos A. Carreras (LEMIT)
Ing. Salvador Mitidieri (Univer-
sidad Nacional de La Plata)

INTRODUCCION

La utilización de los aceros de construcción mecánica es comunmente regida por la similitud de la composición química y por algunos valores de resistencia. Sin embargo, actualmente es indispensable considerar como verdadero factor de equivalencia, la respuesta que tengan a los tratamientos térmicos. Esas respuestas obedecen a las microestructuras debidas a los cambios de fase producidos en las distintas etapas de los ciclos térmicos. Conviene por lo tanto exponer previamente algunos conceptos antes de explicar el alcance del presente trabajo.

Una pieza de maquinaria está diseñada y calculada para cumplir determinadas funciones y propiedades, de manera que su vida útil sea lo suficientemente prolongada. No hay términos absolutos en la elección del material con el cual vaya a construirse. Esto quiere decir, si se demuestra que, en lugar de utilizar una aleación, se puede emplear un material no metálico, no tiene por qué rechazarse la idea. Indudablemente también puede primar la alternativa de un menor costo de elaboración o de reposición.

La idea primaria que se tiene en la elección de un material metálico es su composición química. No se está muy errado en ello, ya que es de fundamental importancia en su comportamiento posterior. Por eso es razonable guiarse por tablas de especificaciones SAE (EE.UU.), AFNOR (Francesas) o B.S. (Inglesas), etc. Donde comienzan a plantearse las primeras dificultades es cuando por diferencia de décimas o centésimas el tenor de los elementos están fuera de norma. La pregunta es: Tiene ello importancia en la pieza que se va a construir, especialmente en su tratamiento térmico?. Indudablemente que existen otros caminos para precisar si estas diferencias de composición tienen o no importancia.

El camino modernamente seguido es a través de la respuesta que tenga el material a los tratamientos térmicos, esto es su resistencia final. Nada mejor que para cualquier tipo de aleación se pueda predecir su comportamiento sin necesidad de efectuar los ensayos correspondientes.

Nosotros hemos creído oportuno presentar en estas Jornadas, un método mediante el cual es posible iniciar un estudio de equivalencia entre los aceros basados en la aplicación de la computación electrónica.

CRITERIO DE EQUIVALENCIA

Se estima que la equivalencia entre tipos de aceros está basada fundamentalmente en la similitud de sus contenidos de carbono y de otros parámetros denominados (DI) diámetro crítico ideal, (Ms) temperatura de transformación austenita-martensita y (Hr) dureza final a determinada temperatura y tiempo de revenido.

Con bastante aproximación la resistencia mecánica está basada en el contenido de carbono del acero. Es un hecho comprobado estadísticamente que a mayor porcentaje de carbono corresponde mayor tensión de rotura y menor ductilidad, independientemente del contenido de los elementos de aleación.

Si bien ésta es la primera condición de equivalencia, otra condición es la templabilidad. Por templabilidad se define al fenómeno de penetración de temple que experimenta un acero sometido a un determinado proceso de enfriamiento desde la temperatura de austenización. Es un hecho conocido que los elementos de aleación, especialmente los formadores de carburos, son los que introducen una mejora en la templabilidad con respecto a los de igual contenido de carbono de los aceros comunes. La medida técnica en metalurgia para reconocer la templabilidad de un acero es el (DI) diámetro crítico ideal, esto es el diámetro capaz de templarse totalmente (o por lo menos hasta un 50 % de martensita) cuando las condiciones de enfriamiento son infinitamente severas.

El paso a las reales condiciones de severidad de enfriamiento (agua, aceite, con/sin agitación) esto es, la determinación de los diámetros críticos reales, es tarea más simple, siempre que se disponga de ese valor característico del acero.

En nuestro caso hemos acudido a la determinación teórica del DI en función de distintos tamaños de grano, para una composición promedio de los aceros. Como a través del DI también puede determinarse la curva teórica de Jominy que también expresa la templabilidad, hemos efectuado los cálculos correspondientes.

Otro parámetro característico de los aceros es la temperatura M_s de transformación austenita-martensita. Esta temperatura es función de la composición química. El valor de M_s tiene influencia en los tratamientos isotérmicos, en la probable retención de austenita por rápido enfriamiento, en la temperatura de revenido para lograr la transformación austenita-bainita, y en la creación de tensiones que originan deformaciones y roturas en el temple.

Como datos complementarios a M_s hemos calculado las temperaturas M_{50} y M_{90} que corresponden a los niveles de porcentajes de transformación 50 % y 90 % austenita-martensita, información que resulta sumamente útil en el caso de aplicarse tratamientos isotérmicos.

Finalmente otro factor esencial en la equivalencia de aceros, es su comportamiento al tratamiento térmico de revenido. En base a resultados estadísticos se ha asignado a cada tipo de acero un valor ideal llamado "Dureza potencial" que es dependiente esencialmente de la composición química. Esta "dureza potencial" es luego afectada por los llamados "coeficientes de ablandamiento" que son a su vez función de tres variables: el contenido de carbono, la temperatura y el tiempo de revenido. Mediante un sistema de cálculo es posible llegar al valor de la dureza (H_r) de un acero determinado, cuando ha sido templado y revenido a una cierta temperatura y tiempo. Como el valor de H_r es un síntoma de comportamiento mecánico, también hemos efectuado los cálculos correspondientes para algunas temperaturas y tiempos habituales, de manera que los resultados sirvan como índice de comparación.

Nos ha parecido importante agregar el cálculo de los llamados "precios índices" en dólares por tonelada, para el caso de barras macizas, ya que una vez establecida la equivalencia entre aceros de similares características la elección podrá también hacerse teniendo en cuenta este factor.

FORMULAS Y METODOS UTILIZADOS

I) Diámetro crítico ideal (DI)

$$DI = D_{IC} \times F(\text{Mn}\%) \times F(\text{Si}\%) \times F(\text{Ni}\%) \times F(\text{Cr}\%) \times F(\text{Mo}\%)$$

D_{IC} = diámetro crítico ideal función porcentaje de carbono y tamaño de grano austenítico.

$F(\text{Mn}\%)$; $F(\text{Si}\%)$; etc. Factores multiplicadores dependientes de la composición química.

Referencias: Boyd and Field, American Iron and Steel Inst. (1946).

Grossmann - Transactions AIMME - 1942

Apraiz Barreiro - "Trat. térmicos de los aceros" (1950).

II) Curva de Jominy

Método de J. Field - American Iron and Steel Inst. (1946) y publicación ya citada de Apraiz Barreiro.

III) Temperatura M_s

$$M_s = 539 - 423 \cdot \%C - 30,4 \cdot \%Mn - 17,7 \cdot \%Ni - 12,1 \cdot \%Cr - 7,5 \cdot \%Mo$$

Referencias: Courbes de transformation de aciers française. Publicación del IRSID - 1959.

K. W. Andrews - Journal of Iron and Steel Inst. (1965).

$$M_{50} = M_s - 30$$

$$M_{90} = M_s - 85$$

Referencias: Steven and Haynes - Journal Iron Steel Inst.

IV) Dureza final de revenido Hr

$$H_r = H_{PF} - H_c$$

$$a) H_{PF} = H_{PN} + \frac{H_{ps} - H_{pn}}{5} \cdot n$$

H_{ph} = Dureza potencial normal (función de la comp. química).

H_{ps} = Dureza potencial por efecto de dureza secundaria (función de la composición química).

n = Coeficiente dependiente de la temperatura de revenido.

H_{PF} = Dureza potencial final a determinada temperatura y afectada por la dureza secundaria.

$$b) H_c = 0,00216 T (c + \log t)$$

T = temperatura absoluta grados Rankine

c = coeficiente variable con el contenido de carbono

t = tiempo en horas del revenido

Referencias: Crafts y Lamont - "Hardenability and Steel Selection (1949).

Calvo Rodés "El acero su elección y selección" (1950).

V) Costo de barras macizas en dólares por tonelada

Los "precios índices" han sido calculados siguiendo los lineamientos establecidos en Europa por la CECA y que son base actual de un proyecto elaborado por el Centro de Industriales Siderúrgicos. No deben por consiguiente considerarse como costos absolutamente reales debidos a la variación en los recargos de importación y al volumen del producto a adquirir. Por eso se le denomina "precio índice" ya que tiene en cuenta solamente un valor básico dependiente de la composición química.

ESTUDIO CRITICO DEL SISTEMA

El cálculo del DI está basado en el método de Grossmann "Hardenability calculated from chemical composition" (transactions del A.I.M.M.E. vol. 150 - 1942). El presumió y luego confirmó que el endurecimiento del acero es consecuencia de su contenido de carbono que afecta la transformación austenita-martensita, y que los elementos de aleación actúan solamente afectando la velocidad de reacción, en forma prácticamente independiente del tamaño de grano y del contenido de carbono. Por esta razón sus efectos individuales son aditivos y válidos para cualquier tipo de acero. Téngase presente que hablamos de la presencia en el núcleo de una estructura de 50 % de martensita. El otro 50 % puede ser una mezcla de constituyentes ferríticos, perlíticos, sorbíticos o bainíticos, y sus velocidades de formación son afectadas de otra forma por los elementos aleantes. Por consiguiente los factores multiplicadores que se utilizan para el cálculo teórico del DI pueden estar sujetos a error, especialmente en los aceros cromo-molibdeno. Nosotros hemos encontrado un margen de error de alrededor del 10 % en algunos casos. Debe sin embargo tenerse en cuenta que sólo buscamos una aproximación a los efectos comparativos.

El método usado para calcular teóricamente la curva de Jominy, corresponde al establecido por J. Field (Metal Progress V 43-1943) y posteriormente corregido por Craft y Lamont (Transactions AIMME V 172-1947). Evidentemente que, partiendo de determinaciones estadísticas, de ninguna manera reemplaza al ensayo propiamente dicho, pero como en el caso anterior es una buena aproximación a la realidad, y además de servir como factor de comparación, permite efectuar los cálculos que conducen por ejemplo, a la determinación de las curvas "U" para distintas severidades de temple.

En un trabajo anterior titulado "Acerca del cálculo de templeabilidad en piezas de automotores" presentado al "III Simposio de Materiales y partes de automotores" del LEMIT (agosto 1964) hemos efectuado ya un estudio crítico de los

factores de error.

El cálculo de la dureza del acero, después de revenido a determinada temperatura y tiempo, está basado en las fórmulas empíricas establecidas por Holliman y Jaffe (Transactions AIMME V 167-1946). Los resultados corresponden bastante a la realidad, no sólo de ensayos experimentales, sino también a las referencias dadas en diversos manuales de metalurgia tales como el "Metal Data" de Hoyt y el "Metals Properties" del A.S.M.E.

La limitación de estas determinaciones del Hr es que se parte del supuesto de tener inicialmente una estructura de 100 % de martensita, hecho que después del temple se presentará en muchos casos sólo hasta determinada profundidad de la pieza. Pero no debe olvidarse que con este dato de endurecimiento de la superficie, existen también otros métodos para calcular cuál es la ley de variación de dureza en toda la sección transversal. En el citado trabajo al Simposio del LEMIT nosotros hemos demostrado cómo pueden hacerse tales determinaciones.

Para el cálculo de la temperatura Ms hemos utilizado la fórmula de K.W. Andrews (Empirical Formulae for calculation of transformation temperature - Journal of Iron and Steel Inst. V 203-1965) por considerarla más actualizada.

Indudablemente que conforme a estos tres parámetros determinados con la computadora (DI, Ms y Hr) se tiene la primera base para establecer la equivalencia de comportamiento en el temple y revenido de los aceros para construcción mecánica, y para que también a partir de ellos se pueda aplicar una gama de métodos de cálculo que permitan determinar a priori si el acero elegido es el adecuado para la pieza a construir.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Las tablas elaboradas por la computadora dan para ca-

da tipo de acero normalizado los siguientes datos:

- a) Diámetro crítico ideal para distinto tamaño de grano.
- b) Curva de Jominy resultante para esos distintos tamaños de grano.
- c) Temperatura M_s de transformación austenítica-martensítica (independiente del tamaño de grano) y temperatura M_{150} y M_{90} .
- d) H_R = dureza de revenido, para 100 % de Martensita, a distintas temperaturas y tiempos.
- e) "Precio índice" de barras macizas en dólares por tonelada.

Observaciones:

- a) En el caso de obtener DI menores a 1,5 pulgadas como no se disponían de los factores de cálculo correspondientes para la obtención de la curva de Jominy se optó por dejar una línea de ceros en ese sector.
- b) En el caso de obtener DI superiores a 7 pulgadas, se adoptó idéntico criterio.
- c) El agrupamiento de los aceros se hizo en sentido creciente de su mayor resistencia al estado templado (indicado por la dureza a $1/16''$ en la curva de Jominy) y simultáneamente en orden creciente a su DI (diámetro crítico ideal). Con el objeto de no confeccionar planillas demasiado extensas no se realizó otra forma de agrupamiento pero se entiende que con la computadora no hay ninguna dificultad en hacerlo de otro modo.
- d) En la composición química de los aceros se han tomado los porcentajes promedios para evitar también de hacer planillas extensas. Como el programa de cálculo está hecho bastaría perforar una tarjeta con la variable de composición para obtener los resultados. El origen de la especificación de los aceros debe interpretarse de la siguiente forma:
 - I) Especificación americana (SAE): figura como SAE.
Ejemplo: SAE 1040.
 - II) Especificación inglesa (B.S.): figura como EN. Ejem-

plo: EN 20.

- III) Especificación francesa (AFNOR): figura con la letra F antepuesta a la sigla del acero. Por ejemplo: F 18CD4.
- IV) Especificación italiana (UNI): figura con la letra I antepuesta a la sigla del acero. Por ejemplo: I 25MG6.
- V) Especificación alemana (DIN): figura con la letra A antepuesta a la sigla del acero. Por ejemplo: A 65S7.

CONCLUSIONES

Los sistemas de cálculos aplicados no son sustancialmente una novedad para los especialistas en tratamientos térmicos. Varios metalurgistas del país han trabajado en idéntico camino, e incluso nosotros con anterioridad hemos hecho un estudio crítico del sistema. La importancia del presente trabajo radica más en el hecho de haber aplicado la computadora electrónica para obtener los resultados con extraordinaria rapidez. El hecho de haber tomado algunos grupos de aceros SAE, B.S., AFNOR, U.N.I. y D.I.N., compararlos en función de su templabilidad y respuesta al revenido es un ejemplo de lo mucho que puede hacerse en ese sentido.

TIPO DE ACEROS	COSTO EN DOLLS/TN	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)	CRISTALES AUSTENITA MARIENITA MS	HR	DUREZA DE REVENIDO EN RC				
					1/2 HORA	1 HORA	1 HORA	1 HORA	1 HORA
		1/16 1/4 1/2 3/4 1 5/4 3/2 7/4 2	M50 M90	400 450 500 550 600 650	400 450 500 550 600 650	400 450 500 550 600 650	400 450 500 550 600 650	400 450 500 550 600 650	400 450 500 550 600 650
EN 34	1.5	44.5 29.6 18.9 15.4 13.6 12.6 11.9 11.4 10.9							
EN 36	1.3	44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
EN 7	1.2	44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
EN 8	1.1	304 44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	407 377 222	34.8 32.0 29.2 26.4 23.6 20.9 33.0 30.0 27.1 24.2 21.3 18.4					
SAE 5	1.6	44.5 32.4 20.9 16.6 14.7 13.5 12.8 12.3 11.9							
SAE 6	1.5	44.5 30.6 19.6 15.7 14.0 12.8 12.2 11.7 11.2							
SAE 7	1.4	44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
SAE 8	1.3	236 44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	401 371 216	36.9 33.3 29.6 25.9 22.3 18.6 35.1 31.3 27.5 23.7 19.9 16.1					
EN 207	1.5	44.5 33.4 22.2 17.5 15.4 14.2 13.5 13.0 12.6							
EN 7	1.4	44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
EN 8	1.3	235 44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	424 394 239	34.1 30.9 27.7 24.6 21.4 18.2 32.2 28.9 25.6 22.3 19.0 15.7					
SAE 5	1.7	44.5 32.9 21.6 17.1 15.1 13.9 13.2 12.7 12.3							
SAE 6	1.5	44.5 31.5 20.3 16.2 14.4 13.2 12.6 12.0 11.5							
SAE 7	1.4	44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
SAE 8	1.3	305 44.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	405 375 220	35.2 32.4 29.7 26.9 24.1 21.3 33.4 30.5 27.6 24.7 21.7 18.8					
SAE 5	2.0	44.5 36.7 26.0 20.6 18.0 16.5 15.8 15.2 14.7							
SAE 6	1.9	44.5 35.4 24.5 19.3 16.9 15.6 14.9 14.3 13.9							
SAE 7	1.7	44.5 34.0 22.8 18.0 15.8 15.5 13.9 13.3 13.0							
SAE 8	1.6	240 44.5 32.4 20.9 16.6 14.7 13.5 12.8 12.3 11.9	420 390 235	34.8 31.7 28.6 25.5 22.4 19.3 32.9 29.7 26.5 23.2 20.0 16.8					
F1RC3	1.9	44.5 37.0 26.4 21.1 18.3 16.8 16.0 15.5 15.0							
EN 7	1.8	44.5 36.0 25.0 19.8 17.3 16.0 15.2 14.6 14.2							
EN 8	1.7	242 44.5 34.4 23.4 18.5 16.1 14.9 14.2 13.6 13.5	421 391 236	35.1 32.0 28.9 25.8 22.7 19.6 33.3 30.0 26.8 23.6 20.3 17.1					
EN 5	2.2	44.5 37.8 27.2 21.9 19.0 17.3 16.6 16.0 15.5							
EN 6	2.0	44.5 36.7 26.0 20.6 18.0 16.5 15.8 15.2 14.7							
EN 7	1.9	44.5 35.4 24.5 19.3 16.9 15.6 14.9 14.3 13.9							
EN 8	1.7	253 44.5 34.0 22.8 18.0 15.8 14.5 13.9 13.3 13.0	398 368 213	36.5 33.0 29.5 26.0 22.5 19.1 34.7 31.0 27.4 23.8 20.2 16.6					
SAE 5	2.4	44.5 39.3 28.9 23.9 20.5 18.6 17.8 17.1 16.6							
SAE 6	2.2	44.5 38.1 27.5 22.3 19.3 17.5 16.8 16.2 15.7							
SAE 7	2.1	44.5 37.0 26.4 21.1 18.3 16.8 16.0 15.5 15.0							
SAE 8	1.9	285 44.5 35.4 24.5 19.3 16.9 15.6 14.9 14.3 13.9	403 373 218	35.4 32.2 29.0 25.8 22.6 19.4 33.6 30.2 26.9 23.6 20.2 16.9					
EN 5	2.9	44.5 41.5 32.0 26.8 23.3 21.0 20.0 19.2 18.8							
EN 6	2.7	44.5 40.4 30.2 25.1 21.8 19.6 18.6 18.0 17.5							
EN 7	2.5	44.5 39.3 28.9 23.9 20.5 18.6 17.8 17.1 16.6							
EN 8	2.3	278 44.5 38.3 27.8 22.7 19.6 17.9 17.1 16.5 16.0	394 364 209	38.0 35.2 32.4 29.6 26.8 24.1 36.2 33.2 30.3 27.4 24.5 21.6					

TIPO	COSTO EN BARRAS	CURVA DE JOMINY	DUREZA EN RC	CRISTALES	AUSTENITA	MARTENITA	M50 M90	1/2 MORA DE REVENIDO A	1 MORA DE REVENIDO A	DUREZA DE REVENIDO EN RC
5	4.3	1/16 1/4 1/2 3/4 1 5/4 3/2 7/4 2	44.5 44.0 38.8 34.4 30.5 28.1 26.8 25.7 25.0	400 370 215	38.0 35.2 32.5 29.7 27.0 24.2 36.2 33.3 30.4 27.5 24.6 21.8	400 450 500 550 600 650 1 400 450 500 550 600 650				
6	4.6		44.5 44.2 40.0 36.1 32.3 29.9 28.6 27.4 26.7							
7	4.3		44.5 44.0 38.8 34.4 30.5 28.1 26.8 25.7 25.0							
8	4.0		44.5 43.6 37.2 32.1 28.2 26.0 24.7 23.7 23.1	397 367 212	38.7 36.0 33.3 30.6 27.8 25.1 36.9 34.0 31.2 28.3 25.5 22.6					
5	6.3		44.5 44.5 44.2 43.6 44.2 41.3 40.4 38.6 39.0							
6	5.8		44.5 44.5 43.6 42.1 39.5 37.7 36.6 35.8 34.9							
7	5.4		44.5 44.5 42.7 40.4 37.0 34.9 33.7 32.6 31.7							
8	5.0		44.5 44.5 41.5 38.3 34.7 32.4 31.1 29.8 29.0	397 367 212	38.2 36.4 34.6 32.7 30.9 29.1 36.4 34.4 32.5 30.5 28.5 26.6					
5	1.9		45.0 35.8 24.7 19.6 17.1 15.7 15.0 14.4 14.1							
6	1.7		45.0 34.4 23.1 18.2 16.0 14.7 14.0 13.5 13.1							
7	1.6		45.0 32.8 21.2 16.8 14.9 13.6 13.0 12.5 12.0							
8	1.5		45.0 31.0 19.8 15.9 14.1 13.0 12.4 11.8 11.3	390 360 205	37.7 34.1 30.4 26.7 23.1 19.4 35.9 32.1 28.3 24.5 20.7 16.9					
5	5		45.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
6	4		45.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
7	4		45.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
8	4	209	45.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	432 402 247	31.5 27.9 24.2 20.5 16.9 13.2 29.7 25.9 22.1 18.3 14.5 10.7					
5	1.4		46.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
6	1.3		46.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
7	1.2		46.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
8	1.1	242	46.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	415 385 230	35.6 32.8 30.1 27.3 24.5 21.7 33.8 30.9 28.0 25.1 22.1 19.2					
5	1.6		47.0 34.3 22.1 17.6 15.5 14.3 13.6 13.0 12.6							
6	1.5		47.0 31.3 20.0 16.3 14.4 13.3 12.6 12.0 11.5							
7	1.4		47.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
8	1.3	304	47.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	390 360 205	36.8 34.0 31.2 28.4 25.6 22.9 35.0 32.0 29.1 26.2 23.3 20.4					
5	1.6		47.5 35.1 23.1 18.2 16.1 14.8 14.1 13.5 13.1							
6	1.5		47.5 32.7 20.9 16.8 14.9 13.7 13.1 12.5 11.9							
7	1.4		47.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0							
8	1.3	245	47.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	380 350 195	37.9 34.3 30.6 26.9 23.3 19.6 36.1 32.3 28.5 24.7 20.9 17.1					
5	3.0		47.5 44.8 34.7 29.1 25.4 22.9 21.8 21.0 20.5							
6	2.8		47.5 43.5 32.8 27.4 23.8 21.4 20.4 19.6 19.1							
7	2.5		47.5 42.6 31.6 26.2 22.6 20.4 19.4 18.7 18.2							
8	2.4	245	47.5 41.4 30.1 24.7 21.2 19.4 18.5 17.8 17.3	383 353 198	38.9 35.6 32.2 28.9 25.5 22.2 37.1 33.6 30.1 26.7 23.2 19.7					

TIPO DE ACEROS	COSTO EN BARRA EN DOLLS/IN.				CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)				CRISTALES AUSTENITA MARTENITA	NR	(DUREZA DE REVENIDO EN RC)														
	1/16	1/4	1/2	3/4	1	5/4	3/2	7/4			2	1/2 MORA DE REVENIDO A 400	1 MORA DE REVENIDO A 500	2 MORA DE REVENIDO A 600	3 MORA DE REVENIDO A 650										
5 3.8	47.5	46.3	39.2	33.6	29.5	27.1	25.8	24.8	24.2																
6 3.5	47.5	45.6	37.1	31.4	27.4	25.0	23.7	22.7	22.3																
7 3.2	47.5	45.2	35.8	30.2	26.3	23.9	22.7	21.8	21.3																
8 3.0	47.5	44.3	34.1	28.6	24.9	22.5	21.3	20.5	20.0	399	369	214	37.8	35.6	33.4	31.2	28.9	26.7	36.0	33.7	31.3	29.9	28.6	24.2	
5 3.8	47.5	46.1	38.7	33.1	29.0	26.6	25.3	24.2	23.7																
6 3.5	47.5	45.6	37.1	31.4	27.4	25.0	23.7	22.7	22.3																
7 3.2	47.5	45.0	35.3	29.7	25.9	23.4	22.3	21.4	20.9																
8 3.0	47.5	44.3	34.1	28.6	24.9	22.5	21.3	20.5	20.0	400	370	215	38.0	35.7	33.4	31.1	28.8	26.5	36.2	33.8	31.3	28.9	26.5	24.1	
5 4.0	47.5	46.5	40.2	34.9	30.7	28.2	26.9	25.8	25.2																
6 3.7	47.5	46.1	38.7	33.1	29.0	26.6	25.3	24.2	23.7																
7 3.4	47.5	45.6	37.1	31.4	27.4	25.0	23.7	22.7	22.3																
8 3.2	47.5	45.0	35.3	29.7	25.9	23.4	22.3	21.4	20.9	374	344	189	38.8	35.8	32.8	29.8	26.8	23.8	37.0	33.9	30.7	27.6	24.5	21.4	
5 4.1	47.5	46.5	40.7	35.4	31.3	28.8	27.5	26.3	25.7																
6 3.8	47.5	46.3	39.2	33.6	29.5	27.1	25.8	24.8	24.2																
7 3.5	47.5	45.8	37.6	31.9	28.0	25.5	24.2	23.2	22.7																
8 3.3	47.5	45.2	35.8	30.2	26.3	23.9	22.7	21.8	21.3	383	353	198	38.7	36.1	33.5	31.0	28.4	25.8	36.9	34.2	31.4	28.7	26.0	23.3	
5 4.6	47.5	47.2	42.7	38.6	34.5	31.9	30.6	29.3	28.5																
6 4.2	47.5	46.7	41.1	36.1	31.9	29.5	28.3	26.9	26.2																
7 3.9	47.5	46.5	39.7	34.2	30.1	27.7	26.3	25.3	24.7																
8 3.6	47.5	46.1	38.1	32.5	28.5	26.0	24.8	23.7	23.2	397	367	212	38.8	36.7	34.7	32.6	30.5	28.4	37.0	34.8	32.6	30.4	28.1	25.9	
5 1.5	48.5	33.4	21.3	17.1	15.2	14.0	13.3	12.7	12.2																
6 1.4	48.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
7 1.3	48.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
8 1.2	48.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	398	368	213	37.5	34.7	31.9	29.2	26.4	23.6	35.7	32.8	29.8	26.9	24.0	21.1	
5 5.6	48.5	48.5	46.8	44.7	41.1	38.8	37.5	36.4	35.5																
6 5.1	48.5	48.5	45.3	41.8	37.8	35.4	33.9	32.5	31.6																
7 4.7	48.5	48.2	43.6	39.4	35.2	32.6	31.1	29.9	29.1																
8 4.4	48.5	48.0	42.3	37.5	33.3	30.6	29.3	28.1	27.3	363	333	178	41.1	38.4	35.8	33.1	30.5	27.8	39.2	36.5	33.7	30.9	28.1	25.4	
5 5.6	49.0	49.0	47.3	45.1	41.5	39.2	37.9	36.8	35.8																
6 5.1	49.0	49.0	45.7	42.2	38.2	35.7	34.2	32.8	32.0																
7 4.7	49.0	48.7	44.1	39.8	35.6	32.9	31.5	30.2	29.4																
8 4.3	49.0	48.5	42.7	37.9	33.6	31.0	29.6	28.4	27.6	370	340	185	39.9	37.9	35.9	33.9	31.9	29.9	38.1	36.0	33.8	31.7	29.5	27.4	
5 1.4	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
6 1.3	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
7 1.2	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
8 1.1	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	371	341	186	39.1	35.5	31.8	28.1	24.5	20.8	37.3	33.5	29.7	25.9	22.1	18.3	

TIPO DE PRODUCTOS	COSTO EN DOLLS/TON.	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)				CRISTALES AUSTENITA	MARTENITA	DUREZA DE REVENIDO A 1/2 HORA DE REVENIDO A 1 HORA DE REVENIDO																	
		1/16	1/4	1/2	3/4			1	5/4	3/2	7/4	2	MS	MS	MS	MS									
SAE 1330	2.0	50.0	40.8	28.6	22.7	19.9	18.3	17.4	16.8	16.3	40.9	37.3	33.6	29.9	26.3	22.6	39.1	35.3	31.5	27.7	23.9	20.1			
SAE 1330	1.8	50.0	39.3	26.9	21.3	18.5	17.1	16.3	15.7	15.3															
SAE 1330	1.7	50.0	37.5	25.0	19.7	17.3	16.0	15.2	14.6	14.2															
SAE 1330	1.6	50.0	35.4	22.8	18.2	16.2	14.8	14.1	13.5	12.9	358	328	173												
EN18A	2.7	50.0	45.4	34.0	28.2	24.5	22.0	21.0	20.2	19.6															
EN18A	2.4	50.0	44.2	32.5	26.8	23.0	20.9	20.0	19.3	18.7															
EN18A	2.3	50.0	42.9	30.9	25.1	21.6	19.7	18.9	18.2	17.6															
EN18A	2.1	50.0	41.6	29.6	23.7	20.6	18.9	18.0	17.4	16.8	377	347	192	38.8	35.8	32.8	29.8	26.8	23.8	37.0	33.9	30.7	27.6	24.5	21.4
SAE 5130	2.8	50.0	46.2	35.3	29.4	25.7	23.0	21.9	21.1	20.6															
SAE 5130	2.6	50.0	44.8	33.3	27.6	23.8	21.5	20.4	19.7	19.2															
SAE 5130	2.4	50.0	43.8	32.1	26.4	22.7	20.7	19.7	19.0	18.4	376	346	191	39.1	36.1	33.1	30.1	27.1	24.1	37.3	34.1	31.0	27.9	24.8	21.6
SAE 3130	3.0	50.0	47.1	36.6	30.6	26.7	24.1	22.9	22.1	21.5															
SAE 3130	2.8	50.0	45.8	34.6	28.9	25.0	22.5	21.5	20.7	20.1															
SAE 3130	2.6	50.0	44.8	33.3	27.6	23.8	21.5	20.4	19.7	19.2															
SAE 4130	2.3	50.0	43.6	31.7	26.0	22.3	20.4	19.4	18.7	18.2	360	330	175	39.4	36.2	33.0	29.8	26.6	23.4	37.6	34.2	30.9	27.6	24.2	20.9
SAE 4130	3.3	50.0	47.8	38.4	32.4	28.4	25.7	24.5	23.5	23.0															
SAE 4130	3.0	50.0	47.1	36.6	30.6	26.7	24.1	22.9	22.1	21.5															
SAE 4130	2.8	50.0	46.2	35.3	29.4	25.7	23.0	21.9	21.1	20.6															
SAE 8630	2.6	50.0	44.8	33.3	27.6	23.8	21.5	20.4	19.7	19.2	383	353	198	39.1	36.8	34.5	32.2	29.9	27.6	37.3	34.8	32.4	30.0	27.6	25.1
SAE 8630	3.7	50.0	48.5	40.8	34.8	30.5	28.0	26.6	25.5	25.0															
SAE 8630	3.4	50.0	48.0	39.0	33.1	28.9	26.3	25.0	23.9	23.5															
SAE 8630	3.2	50.0	47.3	37.1	31.3	27.3	24.6	23.4	22.5	22.0															
SAE 8630	2.9	50.0	46.7	35.9	30.1	26.2	23.6	22.4	21.6	21.1	370	340	185	39.8	37.2	34.6	32.0	29.4	26.8	38.0	35.3	32.5	29.8	27.1	24.3
CND88	8.4	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0															
CND88	7.7	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0															
CND88	7.1	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	49.5															
CND88	6.5	50.0	50.0	50.0	49.5	48.5	47.6	47.1	46.2	45.6	342	312	157	42.4	40.3	38.3	36.2	34.1	32.0	40.6	38.4	36.2	34.0	31.7	29.5
SAE 4032	1.7	51.5	38.7	25.7	20.3	17.9	16.4	15.7	15.0	14.6															
SAE 4032	1.5	51.5	36.5	23.5	18.8	16.7	15.3	14.5	13.9	13.3															
SAE 4032	1.4	51.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0															
SAE 4032	1.3	51.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	377	347	192	38.6	35.8	33.1	30.3	27.5	24.7	36.8	33.9	31.0	28.1	25.1	22.2
F92C4	2.9	51.5	48.1	37.0	31.0	27.0	24.4	23.1	22.2	21.7															
F92C4	2.7	51.5	46.8	35.0	29.0	25.2	22.6	21.6	20.8	20.2															
F92C4	2.5	51.5	45.5	33.5	27.6	23.7	21.5	20.6	19.8	19.2															
F92C4	2.3	51.5	44.2	31.8	25.8	22.3	20.3	19.5	18.8	18.2	369	339	184	39.3	36.3	33.2	30.2	27.2	24.2	37.5	34.3	31.2	28.0	24.8	21.7

TIPOS DE ACEROS	COSTO EN DOLLS/TON	CURVA DE JOMINY	DUREZA EN RC		CRISTALES AUSTENITA MARTENITA	HR	DUREZA DE REVENIDO EN RC																							
			1/2	3/4			1	5/4	3/2	7/4	2	1/2 MORA DE REVENIDO A	1 MORA DE REVENIDO A																	
5 4.3	51.5	50.7	44.5	39.1	34.6	31.9	30.4	29.2	28.4	27.4	26.8	26.1	25.2	24.2	23.7	370	340	185	40.0	37.7	35.4	33.1	30.8	28.5	38.2	35.8	33.3	30.9	28.5	26.1
5 3.3	52.0	49.5	39.2	33.1	28.8	26.2	24.9	23.9	23.4	22.4	21.4	20.8	20.0	19.4	17.9	363	333	178	39.5	36.6	33.6	30.6	27.7	24.7	37.7	34.6	31.5	28.4	25.3	22.2
5 2.7	53.0	48.1	36.0	29.9	25.9	23.3	22.2	21.4	20.8	20.0	19.8	19.8	19.8	18.7	17.9	350	320	165	42.5	39.9	37.3	34.7	32.1	29.5	40.7	38.0	35.2	32.5	29.7	27.0
5 4.4	53.0	46.9	34.5	28.4	24.4	22.1	21.2	20.4	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	18.7	17.9	361	331	176	40.8	38.6	36.4	34.2	31.9	29.7	39.0	36.7	34.3	31.9	29.6	27.2
5 7.7	53.0	44.1	31.4	25.1	21.9	20.0	19.1	18.4	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	330	300	145	43.1	41.2	39.3	37.5	35.6	33.7	41.3	39.3	37.2	35.2	33.2	31.2
5 8.3	53.0	42.4	28.4	22.4	19.8	18.7	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	374	344	189	36.9	33.3	29.6	25.9	22.3	18.6	35.1	31.3	27.5	23.7	19.9	16.1
5 4.1	53.0	40.9	30.9	25.9	23.3	22.2	21.4	20.8	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	354	324	169	39.3	35.7	32.0	28.3	24.7	21.0	37.5	33.7	29.9	26.1	22.3	18.5
5 7.1	53.0	41.4	32.4	26.4	22.8	21.9	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	354	324	169	40.1	36.5	32.8	29.1	25.5	21.8	38.3	34.5	30.7	26.9	23.1	19.3
5 6.6	53.0	41.4	32.4	26.4	22.8	21.9	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	354	324	169	40.1	36.5	32.8	29.1	25.5	21.8	38.3	34.5	30.7	26.9	23.1	19.3

TIPOS DE BARRAS	COSTO EN DOLLS/IN	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)				CRISTALES AUSTENITA	HR	(DUREZA DE REVENIDO EN RC)																	
		1/16	1/4	1/2	3/4			1	5/4	3/2	7/4	2	MS	450	500	550	600	650	400	450	500	550	600	650	
5	1.7	53.5	40.2	26.7	21.1	18.6	17.1	16.3	15.6	15.1	345	315	160	40.5	36.9	33.2	29.5	25.9	22.2	30.7	34.9	31.1	27.3	23.5	19.7
6	1.6	53.5	37.9	24.4	19.5	17.3	15.9	15.1	14.4	13.8	355	325	170	42.9	39.3	35.6	31.9	28.3	24.6	41.1	37.3	33.5	29.7	25.9	22.1
7	1.4	53.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	354	324	169	43.3	39.7	36.0	32.3	28.7	25.0	41.5	37.7	33.9	30.1	26.3	22.5
8	1.3	229	53.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	337	307	152	41.9	38.3	34.6	30.9	27.3	23.6	40.1	36.3	32.5	28.7	24.9	21.1
5	2.0	53.5	44.5	31.7	25.4	22.1	20.2	19.3	18.6	18.0	358	328	173	39.7	36.7	33.7	30.7	27.7	24.7	37.9	34.7	31.6	28.5	25.4	22.2
6	1.8	53.5	43.3	30.0	23.8	20.8	19.2	18.3	17.5	17.1	338	308	153	40.3	37.0	33.8	30.6	27.3	24.1	30.5	35.1	31.7	28.4	25.0	21.6
7	1.8	53.5	41.4	28.1	22.2	19.4	17.9	17.1	16.4	16.0	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	1.6	243	53.5	39.6	26.0	20.5	18.1	16.7	15.9	15.2	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	2.2	53.5	45.1	32.2	25.9	22.4	20.6	19.7	18.9	18.3	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	2.0	53.5	43.6	30.6	24.3	21.3	19.5	18.6	17.9	17.4	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	1.8	53.5	42.1	28.8	22.8	19.8	18.3	17.5	16.8	16.4	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	1.7	236	53.5	40.2	26.7	21.1	18.6	17.1	16.3	15.6	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	2.8	53.5	49.0	37.0	30.9	26.8	24.1	23.0	22.1	21.5	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	2.6	53.5	47.9	35.6	29.5	25.4	23.0	21.9	21.1	20.5	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	2.4	53.5	46.7	33.9	27.8	23.9	21.8	20.8	20.1	19.5	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	2.2	243	53.5	45.5	32.7	26.4	22.8	20.8	20.0	19.2	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	3.2	53.5	50.7	39.7	33.5	29.2	26.4	25.1	24.1	23.6	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	2.9	53.5	50.0	38.4	32.2	28.0	25.3	24.0	23.1	22.6	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	2.7	53.5	48.6	36.3	30.2	26.2	23.5	22.4	21.6	21.0	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	2.5	283	53.5	47.3	34.8	28.7	24.7	22.3	21.4	20.6	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	3.2	53.5	50.9	40.3	34.0	29.7	27.0	25.6	24.6	24.0	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	3.0	53.5	50.0	38.4	32.2	28.0	25.3	24.0	23.1	22.6	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	2.8	53.5	49.0	37.0	30.9	26.8	24.1	23.0	22.1	21.5	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	2.5	285	53.5	47.9	35.6	29.5	25.4	23.0	21.9	21.1	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	3.8	53.5	51.9	43.6	37.2	32.7	29.9	28.5	27.3	26.7	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	3.5	53.5	51.4	41.7	35.4	30.9	28.2	26.7	25.6	25.1	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	3.2	53.5	50.9	40.3	34.0	29.7	27.0	25.6	24.6	24.0	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	2.9	291	53.5	50.0	38.4	32.2	28.0	25.3	24.0	23.1	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
5	4.0	53.5	52.4	45.3	39.3	34.6	31.8	30.3	29.1	28.4	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
6	3.7	53.5	51.9	43.6	37.2	32.7	29.9	28.5	27.3	26.7	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
7	3.5	53.5	51.4	41.7	35.4	30.9	28.2	26.7	25.6	25.1	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9
8	3.2	254	53.5	50.7	39.7	33.5	29.2	26.4	25.1	24.1	339	309	154	40.4	37.2	34.0	30.8	27.6	24.4	30.6	35.2	31.9	28.6	25.2	21.9

TIPO DE ACEROS	COSTO EN DOLLS/	CURVA DE DISTANCIAS EN PULGADAS	JOMINY (DUREZA EN RC)	CRISTALES	MR	DUREZA DE REVENIDO EN RC											
						1/2 HORA DE REVENIDO A 1	1 HORA DE REVENIDO A 1	1 HORA DE REVENIDO A 1	1 HORA DE REVENIDO A 1	1 HORA DE REVENIDO A 1							
		1/16 1/4 1/2 3/4 1 5/4 3/2 7/4 2		MS M50 M90	400	450	500	550	600	650	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
5 2.6	1	54.0	49.0	36.7	30.5	26.4	23.7	22.6	21.8	21.2							
A34-6	2.4	1	54.0	47.3	34.7	28.5	24.5	22.3	21.3	20.5	19.9						
MCR6	7 2.2	1	54.0	46.3	33.4	27.1	23.4	21.3	20.4	19.7	19.1						
8 2.1	287	1	54.0	44.6	31.5	25.1	21.9	20.1	19.1	18.4	17.9						
5 2.9	1	54.0	50.4	38.8	32.5	28.3	25.5	24.2	23.3	22.8							
6 2.7	1	54.0	49.0	36.7	30.5	26.4	23.7	22.6	21.8	21.2							
7 2.5	1	54.0	47.7	35.1	29.0	24.9	22.5	21.6	20.8	20.2							
8 2.3	254	1	54.0	46.5	33.8	27.6	23.7	21.7	20.7	20.0	19.4						
5 2.9	1	54.0	50.4	38.8	32.5	28.3	25.5	24.2	23.3	22.8							
6 2.7	1	54.0	49.0	36.7	30.5	26.4	23.7	22.6	21.8	21.2							
7 2.5	1	54.0	47.7	35.1	29.0	24.9	22.5	21.6	20.8	20.2							
8 2.3	244	1	54.0	46.5	33.8	27.6	23.7	21.7	20.7	20.0	19.4						
5 8.5	1	54.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
6 7.8	1	54.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
7 7.3	1	54.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
8 6.7	323	1	54.0	54.0	54.0	54.0	53.4	52.9	52.1	51.6	51.1						
5 1.8	1	54.5	42.2	28.6	22.6	19.8	18.3	17.4	16.7	16.3							
6 1.7	1	54.5	40.3	26.5	20.9	18.5	17.0	16.2	15.5	15.0							
7 1.5	1	54.5	38.6	24.9	19.9	17.6	16.2	15.4	14.7	14.1							
8 1.4	242	1	54.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
5 2.2	1	54.5	45.9	32.8	26.4	22.8	21.0	20.0	19.3	18.7							
6 2.0	1	54.5	44.4	31.2	24.8	21.7	19.9	18.9	18.3	17.7							
7 1.8	1	54.5	42.9	29.3	23.2	20.2	18.7	17.8	17.1	16.7							
8 1.7	243	1	54.5	40.9	27.2	21.5	18.9	17.4	16.6	15.9	15.4						
5 3.8	1	54.5	52.9	44.4	37.9	33.3	30.5	29.0	27.8	27.2							
6 3.5	1	54.5	52.4	42.5	36.0	31.5	28.7	27.2	26.1	25.6							
7 3.2	1	54.5	51.0	41.1	34.7	30.2	27.5	26.1	25.1	24.5							
8 3.0	263	1	54.5	50.9	39.2	32.8	28.6	25.8	24.4	23.5	23.0						
5 4.4	1	54.5	53.9	48.2	42.9	38.1	35.1	33.6	32.2	31.4							
6 4.1	1	54.5	53.4	48.1	40.0	35.2	32.4	30.9	29.7	28.9							
7 3.8	1	54.5	52.9	44.4	37.9	33.3	30.5	29.0	27.8	27.2							
8 3.5	275	1	54.5	52.4	42.5	36.0	31.5	28.7	27.2	26.1	25.6						

TIPO DE BARRAS	COSTO EN DOLLS/IN.	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)				CRISTALES AUSTENITA MARTENITA	MS M50 M90	DUREZA DE REVENIDO EN RC																
		1/16	1/4	3/4	1			5/4	3/2	7/4	2	1/2 HORA	1 HORA											
5 6.5	54.5	54.5	53.6	52.4	51.4	50.4	49.7	48.8																
6 6.0	54.5	54.5	53.6	52.4	51.4	50.4	49.7	48.8																
7 5.5	54.5	54.5	53.6	52.4	51.4	50.4	49.7	48.8																
8 5.1	291	54.5	51.1	47.5	43.2	40.5	39.9	36.4	321	291	136	43.1	40.4	37.8	35.1	32.5	29.8	41.2	38.5	35.7	32.9	30.1	27.4	
5 7.7	54.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
6 7.1	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5																
7 6.6	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5																
8 6.1	337	54.5	53.9	52.6	50.4	48.6	48.6	45.9	316	286	131	42.7	40.5	38.3	36.0	33.8	31.6	40.9	38.5	36.2	33.8	31.5	29.1	
5 1.5	39.0	25.1	20.1	17.8	16.2	15.5	16.8	16.2																
6 1.4	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
7 1.3	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
8 1.2	236	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	358	328	173	43.3	39.7	36.0	32.3	28.7	25.0	41.5	37.7	33.9	30.1	26.3	22.5	
5 3.3	55.0	52.3	41.5	35.0	30.5	27.7	26.3	25.9	471															
6 3.0	55.0	51.8	40.2	33.7	29.4	26.5	25.2	24.9	327															
7 2.8	55.0	50.4	38.0	31.7	27.5	24.8	23.6	23.7	281															
8 2.6	247	55.0	49.3	36.6	30.3	26.1	25.6	25.9	343	313	158	41.4	38.4	35.4	32.4	29.4	26.4	39.6	36.5	33.3	30.2	27.1	24.0	
5 4.6	55.0	54.7	49.5	44.7	40.0	37.0	35.3	35.0																
6 4.3	55.0	54.1	47.6	42.8	37.0	34.1	32.5	32.2	30.3															
7 4.0	55.0	53.9	46.0	39.7	34.9	32.1	30.6	29.9	29.6															
8 3.7	264	55.0	53.3	44.1	37.6	33.0	30.2	28.7	345	315	160	42.0	39.7	37.4	35.1	32.8	30.5	40.2	37.8	35.3	32.9	30.5	28.1	
5 5.2	55.0	55.0	51.8	48.6	44.5	41.4	40.0	38.5	37.6															
6 4.8	55.0	54.7	50.0	45.4	40.7	37.8	36.0	34.7	33.7															
7 4.4	55.0	54.4	48.6	43.3	38.4	35.4	33.9	33.5	31.7															
8 4.1	292	55.0	53.9	47.2	42.0	38.3	33.4	31.8	332	302	147	42.4	40.0	37.6	35.1	32.7	30.3	40.6	38.0	35.5	32.9	30.3	27.8	
5 1.0	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
6 .9	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
7 .8	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
8 .7	215	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	348	318	163	39.7	36.1	32.4	28.7	25.1	21.4	37.9	34.1	30.3	26.5	22.7	18.9	
5 1.3	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
6 1.2	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
7 1.1	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0																
8 1.0	222	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	340	310	155	41.1	37.5	33.8	30.1	26.5	22.8	39.3	35.5	31.7	27.9	24.1	20.3	
5 1.9	56.0	45.3	31.4	25.0	21.8	20.1	19.9	18.4	19.9															
6 1.8	56.0	43.4	29.4	23.2	20.3	18.8	17.9	17.2	16.8															
7 1.6	56.0	41.4	27.2	21.5	19.0	17.5	16.6	16.0	15.4															
8 1.5	303	56.0	38.6	24.6	19.8	17.6	16.2	15.4	17.7	14.1	324	294	139	41.6	38.8	36.0	33.2	30.4	27.7	24.9	22.1	19.3	16.5	

TIPOS DE SACEROS	COSTO EN DOLLS/	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)	CRISTALES AUSTENITA MARTENITA	HR (DUREZA DE REVENIDO EN RC)	1/2 HORA DE REVENIDO A 1 HORA DE REVENIDO A
	TM.	1/16 1/4 1/2 3/4 1 5/4 3/2 7/4 2	MS M50 M90	400 450 500 550 600 650 1 400 450 500 550 600 650	
5 2.0	56.0	49.7 32.0 25.5 22.3 20.5 19.5 18.8 18.2			
6 1.8	56.0	44.0 30.1 23.8 20.8 19.2 18.3 17.6 17.2			
7 1.7	56.0	42.1 28.0 22.1 19.4 17.9 17.0 16.3 15.9			
8 1.6	244	39.7 25.6 20.4 18.1 16.6 15.8 15.1 14.5	345 315 160	45.9 42.3 38.6 34.9 31.3 27.6 44.1 40.3 36.5 32.7 28.9 25.1	
5 2.3	56.0	48.9 35.5 29.1 25.0 22.9 21.8 21.0 20.4			
6 2.2	56.0	47.2 33.7 27.1 23.5 21.5 20.6 19.8 19.2			
7 2.0	56.0	45.7 32.0 25.5 22.3 20.5 19.5 18.8 18.2			
8 1.8	261	44.0 30.1 23.8 20.8 19.2 18.3 17.6 17.2	310 280 125	43.3 39.7 36.0 32.3 28.7 25.0 41.5 37.7 33.9 30.1 26.3 22.5	
5 2.3	56.0	48.2 35.1 28.6 24.6 22.5 21.5 20.7 20.1			
6 2.1	56.0	46.6 33.2 26.6 23.1 21.2 20.2 19.5 18.9			
7 2.0	56.0	45.3 31.4 25.0 21.8 20.1 19.1 18.4 17.9			
8 1.8	236	43.4 29.4 23.2 20.3 18.8 17.9 17.2 16.8	316 286 131	43.9 40.3 36.6 32.9 29.3 25.6 42.1 38.3 34.5 30.7 26.9 23.1	
5 2.9	56.0	52.3 40.2 33.7 29.3 26.5 25.1 24.2 23.6			
6 2.7	56.0	50.9 38.0 31.6 27.4 24.6 23.5 22.6 22.0			
7 2.5	56.0	49.5 36.4 30.1 25.8 23.4 22.4 21.6 20.9			
8 2.3	313	48.2 35.1 28.6 24.6 22.5 21.5 20.7 20.1	313 283 128	42.9 40.2 37.4 34.6 31.8 29.0 41.1 38.2 35.3 32.4 29.5 26.6	
5 2.9	56.0	52.3 40.2 33.7 29.3 26.5 25.1 24.2 23.6			
6 2.7	56.0	50.9 38.0 31.6 27.4 24.6 23.5 22.6 22.0			
7 2.5	56.0	49.5 36.4 30.1 25.8 23.4 22.4 21.6 20.9			
8 2.3	240	48.2 35.1 28.6 24.6 22.5 21.5 20.7 20.1	335 305 150	41.8 38.7 35.6 32.5 29.4 26.3 39.9 36.7 33.5 30.2 27.0 23.8	
5 3.1	56.0	52.8 41.0 34.3 29.9 27.0 25.7 24.7 24.1			
6 2.8	56.0	51.8 39.5 33.0 28.7 25.8 24.6 23.6 23.0			
7 2.6	56.0	50.9 38.0 31.6 27.4 24.6 23.5 22.6 22.0			
8 2.4	244	49.5 36.4 30.1 25.8 23.4 22.4 21.6 20.9	335 305 150	41.8 38.8 35.8 32.8 29.8 26.8 40.0 36.9 33.7 30.6 27.5 24.4	
5 3.1	56.0	53.0 41.6 35.1 30.6 27.6 26.2 25.2 24.7			
6 2.9	56.0	51.8 39.5 33.0 28.7 25.8 24.6 23.6 23.0			
7 2.6	56.0	50.9 38.0 31.6 27.4 24.6 23.5 22.6 22.0			
8 2.5	245	49.5 36.4 30.1 25.8 23.4 22.4 21.6 20.9	337 307 152	42.0 39.0 36.0 33.0 30.0 27.0 40.2 37.1 33.9 30.8 27.7 24.6	
5 3.4	56.0	53.5 43.0 36.3 31.8 28.8 27.4 26.3 25.8			
6 3.1	56.0	53.0 41.6 35.1 30.6 27.6 26.2 25.2 24.7			
7 2.9	56.0	51.8 39.5 33.0 28.7 25.8 24.6 23.6 23.0			
8 2.7	250	50.9 38.0 31.6 27.4 24.6 23.5 22.6 22.0	335 305 150	42.2 39.3 36.5 33.7 30.9 28.1 40.3 37.4 34.4 31.5 28.5 25.6	
5 3.8	56.0	54.6 46.2 39.7 34.8 32.0 30.4 29.2 28.5			
6 3.5	56.0	54.1 44.4 37.7 33.0 30.1 28.6 27.4 26.8			
7 3.3	56.0	53.3 42.2 35.6 31.1 28.2 26.8 25.8 25.2			
8 3.0	287	52.8 41.0 34.3 29.9 27.0 25.7 24.7 24.1	315 285 130	42.8 39.6 36.4 33.2 30.0 26.8 41.0 37.6 34.3 31.0 27.6 24.3	

TIPO	COSTO EN BARRAS	CURVA DE JOMINY	DUREZA EN RC	CRISTALES	AUSTENITA	MARTENITA	MS	1/2 MORA DE REVENIDO		DUREZA DE REVENIDO EN RC		
								400	500	600	650	400
DEG	DI	STANCIA	EM PULGADAS					1/2 MORA DE REVENIDO	A	I	1 MORA DE REVENIDO	A
ACEROS	DOLLS/	TN.	1/16	1/4	1/2	3/4	1	5/4	3/2	7/4	2	
5	4.9	1	59.0	59.0	54.1	49.3	44.5	41.4	39.4	38.0	36.9	
6	4.5	1	59.0	56.4	52.2	46.4	41.2	38.0	36.4	34.9	34.0	
7	4.1	1	59.0	57.8	50.6	44.0	38.9	35.8	34.2	32.7	31.9	
8	3.8	264	1	59.0	57.5	48.7	41.8	36.7	33.7	32.0	30.8	30.1
5	5.3	1	59.0	59.0	56.1	52.9	48.3	45.5	43.8	42.2	41.2	
6	4.9	1	59.0	59.0	54.1	49.3	44.5	41.4	39.4	38.0	36.9	
7	4.5	1	59.0	58.7	52.6	47.2	42.1	38.9	37.2	35.7	34.7	
8	4.2	280	1	59.0	57.8	50.6	44.0	38.9	35.8	34.2	32.7	31.9
5	6.3	1	59.0	59.0	58.7	57.8	58.7	54.6	53.6	51.3	51.7	
6	5.8	1	59.0	59.0	57.8	55.9	52.4	50.0	48.5	47.5	46.2	
7	5.4	1	59.0	59.0	56.1	52.9	48.3	45.5	43.8	42.2	41.2	
8	5.0	268	1	59.0	59.0	54.6	50.0	45.2	42.1	40.4	38.8	37.8
5	6.8	1	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	58.4	57.8	57.2	56.7	
6	6.3	1	59.0	59.0	58.7	57.8	58.7	54.6	53.6	51.3	51.7	
7	5.8	1	59.0	59.0	57.8	55.9	52.4	50.0	48.5	47.5	46.2	
8	5.4	284	1	59.0	59.0	56.7	53.6	49.1	46.2	44.6	43.2	42.1
5	1.8	1	60.0	46.5	31.5	24.9	21.8	20.1	19.2	18.4	18.0	
6	1.7	1	60.0	44.4	29.1	23.0	20.4	18.7	17.8	17.1	16.5	
7	1.5	1	60.0	42.5	27.4	21.9	19.4	17.8	16.9	16.2	15.5	
8	1.4	242	1	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	2.6	1	60.0	53.8	40.0	33.1	28.5	25.8	24.5	23.7	23.0	
6	2.4	1	60.0	52.4	38.0	31.2	26.8	24.5	23.3	22.5	21.8	
7	2.2	1	60.0	50.6	36.1	29.1	25.2	23.1	22.0	21.2	20.6	
8	2.0	237	1	60.0	48.9	34.3	27.3	23.9	21.9	20.9	20.1	19.5
5	2.0	1	60.5	50.0	35.3	28.1	24.5	22.5	21.4	20.7	20.0	
6	1.9	1	60.5	48.2	33.3	26.3	23.0	21.2	20.2	19.4	18.9	
7	1.7	1	60.5	46.3	31.1	24.5	21.5	19.8	18.9	18.1	17.6	
8	1.6	242	1	60.5	44.1	28.5	22.7	20.0	18.4	17.5	16.8	16.2
5	2.8	1	60.5	55.5	41.8	34.9	30.3	27.3	26.0	25.0	24.3	
6	2.6	1	60.5	54.2	40.3	33.4	28.8	26.0	24.7	23.9	23.2	
7	2.4	1	60.5	53.0	38.9	32.0	27.5	25.0	23.9	23.0	22.3	
8	2.2	262	1	60.5	51.4	37.0	29.8	25.6	23.6	22.6	21.8	21.1
5	3.8	1	60.5	59.0	50.0	42.9	37.6	34.5	32.8	31.5	30.8	
6	3.5	1	60.5	58.4	48.0	40.7	35.6	32.5	30.9	29.6	29.0	
7	3.3	1	60.5	57.6	45.6	38.5	33.6	30.5	29.0	27.8	27.2	
8	3.0	247	1	60.5	57.0	44.3	37.1	32.3	29.2	27.8	26.7	26.1
5	4.2	1	60.5	59.0	50.0	42.9	37.6	34.5	32.8	31.5	30.8	
6	3.9	1	60.5	58.4	48.0	40.7	35.6	32.5	30.9	29.6	29.0	
7	3.6	1	60.5	57.6	45.6	38.5	33.6	30.5	29.0	27.8	27.2	
8	3.4	247	1	60.5	57.0	44.3	37.1	32.3	29.2	27.8	26.7	26.1
5	4.2	1	60.5	59.0	50.0	42.9	37.6	34.5	32.8	31.5	30.8	
6	3.9	1	60.5	58.4	48.0	40.7	35.6	32.5	30.9	29.6	29.0	
7	3.6	1	60.5	57.6	45.6	38.5	33.6	30.5	29.0	27.8	27.2	
8	3.4	247	1	60.5	57.0	44.3	37.1	32.3	29.2	27.8	26.7	26.1

TIPO DE TACEROS	COSTO EN DOLLS/TN.	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)	CRISTALES AUSTENITICA MARTENITICA	MA (DUREZA DE REVENIDO EN RC)	1/2 MORA DE REVENIDO A 1 MORA DE REVENIDO A
		1/16 1/4 1/2 3/4 1 5/4 3/2 7/4 2	MS M50 M90	400 450 500 550 600 650 1 400 450 500 550 600 650	1 1 MORA DE REVENIDO A 1 MORA DE REVENIDO A
5 1.5	1.5	61.0 43.2 27.9 22.3 19.8 18.1 17.2 16.4 15.8			
6 1.4	1.4	61.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
7 1.3	1.3	61.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
8 1.2	234	61.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	317 287 132	49.7 46.2 42.8 39.4 36.0 32.5 47.8 44.3 40.7 37.2 33.6 30.1	
5 1.1	1.1	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
6 1.0	1.0	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
7 .9	1050	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
8 .8	215	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	306 276 121	46.9 43.4 40.0 36.6 33.2 29.7 45.0 41.5 37.9 34.4 30.8 27.3	
5 3.3	3.3	62.0 59.0 46.7 39.4 34.4 31.3 29.7 28.5 27.9			
6 3.0	3.0	62.0 58.4 45.4 38.0 33.1 29.9 28.5 27.4 26.7			
7 2.8	5150	62.0 56.8 42.9 35.8 31.0 27.9 26.6 25.6 25.0			
8 2.6	240	62.0 55.6 41.3 34.2 29.5 26.6 25.4 24.5 23.8	293 263 108	48.9 46.0 43.2 40.3 37.4 34.6 47.1 44.1 41.1 38.1 35.1 32.1	
5 4.9	4.9	62.0 62.0 56.8 51.8 46.7 43.5 41.4 40.0 38.8			
6 4.5	4.5	62.0 61.3 54.8 48.8 43.3 40.0 38.2 36.6 35.7			
7 4.1	3150	62.0 60.7 53.2 46.2 40.9 37.6 35.9 34.4 33.6			
8 3.8	291	62.0 60.4 51.2 43.9 38.6 35.4 33.6 32.3 31.6	271 241 86	50.3 47.4 44.5 41.7 38.8 36.0 48.5 45.5 42.5 39.5 36.5 33.5	
5 5.1	5.1	62.0 62.0 58.2 54.1 49.2 46.0 44.2 42.6 41.4			
6 4.7	4.7	62.0 61.6 56.3 51.2 45.9 42.6 40.6 39.1 38.0			
7 4.4	8650	62.0 61.3 54.1 48.0 42.6 39.2 37.4 35.9 34.9			
8 4.0	275	62.0 60.7 52.5 45.5 40.1 36.9 35.2 33.7 32.9	284 254 99	50.3 47.9 45.6 43.2 40.8 38.4 48.5 46.0 43.5 41.0 38.5 36.0	
5 5.4	5.4	62.0 62.0 59.0 55.6 50.8 47.8 46.0 44.4 43.3			
6 5.0	4.6	62.0 62.0 57.4 52.5 47.5 44.2 42.4 40.7 39.7			
7 4.6	CRM04	62.0 61.6 55.3 49.6 44.2 40.9 39.1 37.5 36.4			
8 4.2	265	62.0 61.0 53.6 47.1 41.7 38.5 36.6 35.2 34.2	293 263 108	50.0 48.0 46.0 44.0 42.0 40.0 48.2 46.0 43.9 41.8 39.7 37.5	
5 5.6	5.6	62.0 62.0 60.1 57.6 53.4 50.6 49.0 47.6 46.4			
6 5.2	4.8	62.0 62.0 58.2 54.1 49.2 46.0 44.2 42.6 41.4			
7 4.8	8750	62.0 61.6 56.3 51.2 45.9 42.6 40.6 39.1 38.0			
8 4.4	280	62.0 61.3 54.8 48.8 43.3 40.0 38.2 36.6 35.7	284 254 99	50.6 48.4 46.2 44.0 41.8 39.6 48.8 46.5 44.1 41.8 39.5 37.1	
5 6.3	6.3	62.0 62.0 61.6 60.4 58.2 56.6 55.3 54.3 53.4			
6 5.8	5.8	62.0 62.0 60.4 58.2 54.1 51.6 50.0 48.8 47.5			
7 5.3	4150	62.0 62.0 59.0 55.6 50.8 47.8 46.0 44.4 43.3			
8 4.9	266	62.0 62.0 57.4 52.5 47.5 44.2 42.4 40.7 39.7	208 258 103	50.7 48.6 46.6 44.5 42.5 40.4 48.9 46.7 44.5 42.3 40.1 37.9	
5 8.0	8.0	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
6 7.4	7.4	62.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0			
7 6.8	9050	62.0 62.0 62.0 62.0 62.0 61.3 60.7 60.1 59.6			
8 6.3	306	62.0 62.0 61.6 60.7 61.6 57.6 56.3 53.9 54.3	273 243 88	51.5 49.5 47.5 45.6 43.6 41.6 49.7 47.6 45.5 43.3 41.2 39.1	

TIPO DE BARRAS	COSTO EN DOLLS/TN.	CURVA DE JOMINY	DUREZA EN RC	CRISTALES	AUSTENITA	MARTENITA	1/2 MORA DE REVENIDO A		DUREZA DE REVENIDO EN RC	
							1	2	1	2
5 2.5	65.0	58.2	43.3	35.9	30.9	27.9	26.6	25.6	25.0	
6 2.3	65.0	56.0	40.7	33.2	28.6	26.1	25.0	24.1	23.3	
7 2.1	65.0	54.8	39.1	31.5	27.3	25.0	23.9	23.0	22.3	
8 2.0	65.0	52.6	36.5	29.0	25.3	23.3	22.2	21.3	20.8	
5 2.6	65.0	59.0	44.2	36.7	31.8	28.6	27.3	26.3	25.5	
6 2.4	65.0	57.0	41.8	34.3	29.5	26.9	25.6	24.7	24.0	
7 2.2	65.0	55.3	39.7	32.0	27.7	25.3	24.2	23.4	22.6	
8 2.0	65.0	53.7	36.0	30.2	26.3	24.2	23.0	22.2	21.5	
5 2.6	65.0	58.2	43.3	35.9	30.9	27.9	26.6	25.6	25.0	
6 2.4	65.0	56.7	41.2	33.8	29.0	26.5	25.3	24.4	23.7	
7 2.2	65.0	55.3	39.7	32.0	27.7	25.3	24.2	23.4	22.6	
8 2.0	65.0	53.0	37.2	29.6	25.8	23.8	22.6	21.8	21.2	
5 2.6	65.0	59.0	44.2	36.7	31.8	28.6	27.3	26.3	25.5	
6 2.4	65.0	57.0	41.8	34.3	29.5	26.9	25.6	24.7	24.0	
7 2.2	65.0	55.7	40.2	32.6	28.1	25.6	24.6	23.7	23.0	
8 2.0	65.0	53.7	38.0	30.2	26.3	24.2	23.0	22.2	21.5	
5 2.7	65.0	59.6	44.9	37.5	32.5	29.3	27.9	26.9	26.2	
6 2.5	65.0	57.5	42.3	34.9	30.0	27.1	26.0	25.0	24.3	
7 2.3	65.0	56.0	40.7	33.2	28.6	26.1	25.0	24.1	23.3	
8 2.1	65.0	54.8	39.1	31.5	27.3	25.0	23.9	23.0	22.3	
5 2.8	65.0	60.1	45.9	38.3	33.4	30.0	28.5	27.4	26.8	
6 2.6	65.0	59.0	44.2	36.7	31.8	28.6	27.3	26.3	25.5	
7 2.4	65.0	57.0	41.8	34.3	29.5	26.9	25.6	24.7	24.0	
8 2.2	65.0	55.3	39.7	32.0	27.7	25.3	24.2	23.4	22.6	
5 3.4	65.0	62.5	50.7	43.0	37.5	34.3	32.5	31.1	30.5	
6 3.1	65.0	61.6	48.3	40.7	35.5	32.0	30.5	29.3	28.6	
7 2.9	65.0	60.1	45.9	38.3	33.4	30.0	28.5	27.4	26.8	
8 2.7	65.0	59.0	44.2	36.7	31.8	28.6	27.3	26.3	25.5	
5 3.7	65.0	63.1	52.2	44.5	39.0	35.7	33.9	32.5	31.8	
6 3.4	65.0	62.2	50.0	42.2	36.9	33.5	31.8	30.5	29.9	
7 3.1	65.0	61.6	48.3	40.7	35.5	32.0	30.5	29.3	28.6	
8 2.9	65.0	60.1	45.9	38.3	33.4	30.0	28.5	27.4	26.8	
5 4.0	65.0	63.7	55.0	47.7	42.0	38.6	36.9	35.4	34.5	
6 3.7	65.0	63.1	52.2	44.5	39.0	35.7	33.9	32.5	31.8	
7 3.4	65.0	62.5	50.7	43.0	37.5	34.3	32.5	31.1	30.5	
8 3.1	65.0	61.6	48.3	40.7	35.5	32.0	30.5	29.3	28.6	

TIPO DE BARRAS ACEROS	CURVA DE JOMINY (DUREZA EN RC)		CRISTALES AUSTENITA MARTENITA	HR 1/2 HORA DE REVENIDO A 1 HORA DE REVENIDO	(DUREZA DE REVENIDO EN RC)																				
	DISTANCIAS EN PULGADAS	EN PULGADAS																							
5	1/16	1/4	1/2	3/4	1	5/4	3/2	7/4	2	MS	M50	M90	400	450	500	550	600	650	400	450	500	550	600	650	
6	4.6	65.0	64.6	58.5	52.8	47.2	43.7	41.8	40.1	39.0															
7	4.3	65.0	64.0	56.2	49.4	43.7	40.3	38.4	36.9	35.9															
8	3.9	65.0	63.7	54.3	46.9	41.2	38.0	36.1	34.6	33.8															
5	5.7	65.0	63.1	52.2	44.5	39.0	35.7	33.9	32.5	31.8	255	225	70	57.9	54.7	51.5	48.3	45.1	41.9	56.1	52.8	49.4	46.1	42.7	39.4
6	5.2	65.0	65.0	63.1	60.4	56.0	53.0	51.3	50.0	48.6															
7	4.8	65.0	65.0	61.3	57.5	52.6	49.2	47.2	45.6	44.5															
8	4.4	65.0	64.3	57.5	51.1	45.4	41.9	40.1	38.4	37.4	242	212	57	53.3	50.9	48.6	46.2	43.8	41.4	51.5	49.0	46.5	44.0	41.5	39.0

DILATOMETRIA DE ARCILLAS REFRACTARIAS NACIONALES

Dr. Angel Rossini
Dr. Luis A. Mennucci
Tco. Roberto Figueras

Serie II, n° 141

INTRODUCCION

Antecedentes

La tecnología moderna de los materiales cerámicos exige una serie de controles previos de las materias primas y de las mezclas que se utilizan para la elaboración de los diversos productos. Estos controles, son necesarios para establecer el proceso tecnológico más adecuado en la obtención de materiales, que respondan a las características específicas de calidad, que para cada caso que se establezca.

La arcilla, materia prima primordial de la industria cerámica, es controlada frecuentemente mediante ensayos químicos y físicos. Composición química, plasticidad, granulometría, cono pirométrico equivalente ("punto de fusión") y sobre todo, comportamiento a la cocción, son ensayos clásicos de control en todo proceso de elaboración. Sin lugar a dudas, por la importancia que reviste interesa conocer también, la composición mineralógica, mediante el análisis térmico diferencial (A.T.D.), difracción por rayos X o microscopía electrónica, pero estos ensayos son costosos, no solamente por el alto valor de los equipos que utilizan, sino también por que exigen personal especializado para la ejecución de las operaciones e interpretación de los resultados. Además las informaciones que suministran, si bien, como métodos de identificación de especies mineralógicas poseen alto valor por su especificidad y sensibilidad, no aportan datos de gran significación desde el punto de vista tecnológico, como lo ofrecen los ensayos mencionados anteriormente.

Las variaciones de longitud que experimentan las arcillas o sus mezclas con otros materiales cerámicos, cuando se las somete a la acción de la temperatura durante el proceso de cocción, ha sido desde hace tiempo objeto de atención por parte de los ceramistas, ya que permite fijar en forma absoluta la variación de longitud (contracción o expansión) de los cuerpos cerámicos elaborados y en consecuen-

cia, establecer las dimensiones correctas de los moldes con que se los confeccionan.

Los ensayos que se basan en determinar la contracción o dilatación irreversible, sobre una probeta confeccionada con arcilla, en determinadas condiciones de moldeo y sometida a una determinada temperatura de cocción, informan datos de importancia, por cuanto puede apreciarse o medirse propiedades como, textura, resistencia mecánica, porosidad, color, etc., desarrollada en material. No dan, sin embargo, ninguna indicación con respecto a que temperaturas se producen las variaciones de dimensiones, ni a que velocidad ellas se desarrollan. Esta técnica, que se aplica para determinar la temperatura a la que debe calcinarse una arcilla para obtener una máxima densificación del chamote, exige realizar por tanteo, un gran número de ensayos, lo cual puede resultar costoso y a veces con resultados no del todo satisfactorios, ya que la temperatura óptima de cocción de la arcilla puede resultar diferente de la temperatura de cocción del producto elaborado con ella y, en consecuencia, producir variaciones adicionales: expansiones (por exfoliación, hinchamiento) o contracciones (sinterización del material arcilloso).

El análisis dilatométrico, es sin lugar a dudas, la técnica más adecuada para revelar el comportamiento térmico de las arcillas y sus mezclas durante el proceso de cocción, ya que grafica el cambio de dimensiones de una probeta confeccionada con ella, en determinadas condiciones, en función de la temperatura de calentamiento.

Las curvas obtenidas, llamadas dilatogramas, muestran a que temperaturas se producen contracciones y expansiones, y a que velocidad ellas se desarrollan. Además, el análisis de los dilatogramas permite la identificación, en muchos casos, de las especies mineralógicas que predominan, siempre que se disponga, como referencia, de dilatogramas patrones de especies mineralógicas de suficiente grado de pureza y operando en condiciones semejantes.

El análisis dilatométrico tiene sus ventajas con respecto a los otros métodos mencionados, por ser una técnica simple, rápida y fácil de interpretar, especialmente cuando se controla sistemáticamente el grado de uniformidad de

materias primas o de productos elaborados, como así también, establecer curvas óptimas de calentamiento y máxima temperatura de cocción de una arcilla o mezclas de materiales cerámicos, para la obtención de un determinado producto.

Según Davis (1), el análisis dilatométrico ha tenido amplia aplicación en la tecnología cerámica, principalmente para determinar expansión lineal reversible de materiales cerámicos elaborados por cocción.

Los antecedentes bibliográficos del empleo de esta técnica, para el estudio del comportamiento a la cocción de piezas cerámicas es sin embargo limitado, pero según Forbes (3), menciona que Van Der Beck y Everhart han presentado interesantes informes sobre la aplicación de esta técnica para el estudio de productos de arcillas. Forbes y Holdridge (2, 4) han señalado las ventajas del análisis dilatométrico para la investigación de la composición y características de materias primas cerámicas o mezclas de materiales usados en la elaboración de productos cerámicos antes de su proceso de cocción.

La aplicación del análisis dilatométrico a materiales arcillosos, data desde hace tiempo. En el trabajo de Munier y Meneret (5), se menciona una breve referencia bibliográfica de los diferentes investigadores que lo han aplicado, entre ellos a Stevens y Birch, que han medido mediante un dispositivo óptico, las variaciones de longitud, entre 20°C y 1480 °C, de diferentes arcillas refractarias y relacionan sus resultados con los obtenidos por el A.T.D., estableciendo conclusiones para la elección de las curvas óptimas de calcinación para cada arcilla estudiada.

Munier y Meneret (5), en un trabajo relativo a la identificación de arcillas, estudian la influencia del contenido de humedad inicial de la probeta de ensayo, método de moldeo de la misma y velocidad de calentamiento, sobre las modificaciones de las curvas dilatométricas.

Mediante su técnica, con un dilatómetro diferencial con sistema registrador tipo Chevenard, establece dilatogramas tipos de las principales especies mineralógicas que constituyen las arcillas refractarias.

Paquin (6) ha aplicado la dilatometría como ensayo cuantitativo para determinar impurezas de cuarzo y muscovita en las arcillas del tipo caolinitico, llegando a conclusiones interesantes con respecto a la correlación existente, para arcillas del mismo yacimiento, entre la inclinación ascendente sobre la línea de base de la curva dilatométrica y el grado de impurificación. Para arcillas de diferente procedencia, dicha correlación no es cuantitativa. Esta sin embargo se cumple con bastante aproximación, cuando se mide la inclinación sobre el dilatograma entre temperaturas de 200 °C a 900 °C, siendo más perfecta a 700 °C.

Forbes (3) aplica la dilatometría como método para identificar especies mineralógicas que poseen los materiales arcillosos. A partir de los dilatogramas obtenidos, derivan las curvas de coeficiente diferencial de expansión (D.C.E.) que en nuestro trabajo denominaremos, coeficiente de dilatación diferencial (C.D.D.). Este antecedente ha sido aplicado en este trabajo, para mostrar la correlación entre las curvas: dilatométricas (dilatogramas), análisis térmico diferencial (A.T.D.) y coeficiente de dilatación diferencial (C.D.D.), de las arcillas estudiadas, para tratar de interpretar los fenómenos físicos-químicos que se producen durante el calentamiento de las mismas.

Recientemente P. Renault (7), en una serie de comunicaciones presentadas al XXXV Congreso Internacional de Química Industrial (Varsovia), utiliza la técnica de doble análisis dilatométrico, aplicada a arcillas, caolines y pastas cerámicas, como medio de identificación, de estudio de materias primas, y de control de fabricación de productos cerámicos. Del análisis de estos antecedentes, surge la importancia que ha adquirido esta técnica para estudiar, no solamente el comportamiento térmico de materias primas, especialmente arcillas, sino también, las variaciones dimensionales que experimenta un producto cerámico durante su calentamiento, como por ejemplo, la correcta transformación cristalográfica del cuarzo en los ladrillos sílicos.

Objeto del trabajo

Determinar los dilatogramas de las principales arci-

llas refractarias nacionales, frecuentemente utilizadas en la industria de refractarios y procedentes de diferentes zonas del país, con el fin de identificar la especie mineralógica predominante y las impurezas menores que la acompañan (cuarzo, illita o muscovita). Además, para cada una de ellas, determinar las zonas de temperatura donde se producen contracciones y expansiones, durante el proceso de cocción (desde temperatura ambiente hasta 1400 °C - 1500 °C) con el objeto de fijar curvas óptimas de calcinación para obtener chamote o refractarios bien densificados.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestras

Las muestras de arcillas utilizadas en este estudio han sido tomadas de los depósitos existentes en las principales fábricas de materiales refractarios del país y utilizadas como ligante cerámico o previamente calcinadas como chamote, para preparar las mezclas destinadas a la elaboración de refractarios sílico-aluminosos de los Tipos II, III y IV, y con chamote aluminoso a base de bauxita, silimanita o cianita calcinadas, refractarios de alta alúmina del Tipo I, norma IRAM 12508.

Estas arcillas son representativas típicas de las zonas donde fueron extraídas y muy difundidas entre los usuarios. Otras arcillas, de canteras vecinas a las estudiadas o de otras zonas del país, no se han incluido en esta trabajo por considerar que poseen una composición química y mineralógica semejante o por ser empleadas en menor escala por la industria de refractarios.

Las muestras, tal cual se recibieron y sin ningún tratamiento previo de purificación, fueron trituradas y molidas a la finura adecuada para confeccionar las probetas de ensayos. La composición química y algunas características físicas fueron determinadas y sus resultados promedios se muestran en la tabla I.

Identificación de las muestras:

Las muestras han sido identificadas de acuerdo a un orden geográfico: norte a sud del país, señalándose para cada una de ellas, la Provincia, Departamento y/o denominación más difundida entre los usuarios:

Muestra Nº 1.- Arcilla "Amaná", Provincia de la Rioja, Departamento de Patquía.

Muestra Nº 2.- Arcilla "Sonia", Provincia de la Rioja, Departamento de Patquía.

Muestra Nº 3.- Arcilla "Claraz", Provincia de Buenos Aires, Tandil, Cantera "San Ramón".

Muestra Nº 4.- Arcilla "Barker", Provincia de Buenos Aires, Tandil, Estación Barker.

Muestra Nº 5.- Arcilla "Norquincó", Provincia de Río Negro, Departamento Norquincó. Esta arcilla responde a características químicas, físicas y mineralógicas muy semejantes a las arcillas provenientes de Estación Comallo, Departamento Pilcaniyeu, de la misma provincia; esta arcilla es también muy difundida en la industria de materiales cerámicos.

Muestra Nº 6.- Arcilla "Plástica", Provincia de Neuquén, Estación Ramón Castro.

Muestras Nº 7, 8 y 9.- Arcillas del Departamento Zapala, Provincia de Neuquén.

Equipo utilizado

El equipo utilizado es un dilatómetro Steger Tonindustrie, automático, con programador y registrador electrónico. El horno es calentado con resistencia de platino y alcanza temperaturas de 1500 °C. El registrador de seis puntos, grafica simultáneamente las temperaturas del horno, del interior de la probeta de ensayo y la dilatación total, correspondiente a la probeta y barras soportes. La dilatación

de los soportes, constituidos de material de alta alúmina, se determina previamente por calibración con una probeta de vidrio de sílice (cuarzo fundido). La escala del registrador tiene una amplitud de 25 cm y corresponde a una variación de longitud de 1 mm. Los detalles del equipo se muestran en las figuras 1 y 2.

Probeta de ensayo

Es un cilindro de 100 mm de largo, por 25 mm de diámetro. Tiene una perforación central a lo largo de la probeta, de 6 mm de diámetro, que permite introducir la termocupa de Pt-Pt 10% Rh destinada a medir la temperatura en el centro geométrico de la probeta. Esta se obtiene para materiales elaborados (ladrillos o piezas cerámicas planas-prismáticas) mediante trépanos de diamantes, y para materiales molidos (arcillas, mezclas refractarias crudas, etc.) por moldeo a presión.

La probeta se coloca en el equipo entre tubos de cerámica de alta alúmina y se sostiene mediante una presión regulable entre 10 y 60 g/cm².

Moldeo de la probeta de ensayo

Las arcillas tal cual se reciben, se muelen hasta pasar el tamiz IRAM N^o 70 y se moldean en moldes de acero a una presión de 15 Kg/cm², con una humedad en el polvo de 15%. Luego se secan en estufa a 40 °C, durante 24 h, colocándolas en posición horizontal.

No se observan diferencias en los dilatogramas, si las condiciones de moldeo (presión, humedad y finura del polvo) variaron dentro de ciertos límites, lo cual corroboraría en parte lo establecido por Munier y Meneret (5).

Condiciones de ensayo

Se adopta la velocidad de calentamiento de 2,5 C/min, luego de comprobar experimentalmente que las muy bajas velocidades de calentamiento aconsejadas por la bibliografía co

consultada (5), del orden de 0,5 C/min., no son necesarias para lograr la correcta identificación e interpretación de los termogramas, ya que las diferencias obtenidas, en nada cambian el resultado general del ensayo. Con la velocidad de 2,5 C/min. se consigue acortar el tiempo de duración del ensayo.

Todas las probetas se ensayan con una presión de 10 g/cm², suficiente para sostener la probeta y además se evita la deformación de la misma cuando se alcanzan temperaturas de ablandamiento (estado piropástico del material).

RESULTADOS OBTENIDOS. ANALISIS DE LOS DILATOGRAMAS

Muestra N^o 1: Arcilla "Amaná"

Mediante análisis térmico diferencial (A.T.D.) y difracción de rayos X (D.R.X), se identifica como un material de alto contenido en la especie mineralógica caolinita, impurificada por pequeñas cantidades de materia orgánica del tipo carbonosa (ligero pico exotérmico que aparece a 500 °C aproximadamente, en el A.T.D.), cuarzo y muy pequeñas cantidades de feldespato, el cual disminuye la intensidad del pico exotérmico entre 900 °C a 1000 °C (Figuras N^o 3 y N^o 7).

El dilatograma correspondiente (fig. 3) presenta las siguientes inflexiones:

- a) Suave dilatación que se inicia a temperatura ambiente y llega a un máximo de aproximadamente 500 °C. Se atribuye a la dilatación térmica propia del sólido y dependiente de la naturaleza química, mineralógica y/o cristalográfica.
- b) Rápida contracción entre 500 °C y 550 °C, debida a la pérdida de agua, por condensación de oxidrilos del retículo cristalino de la especie

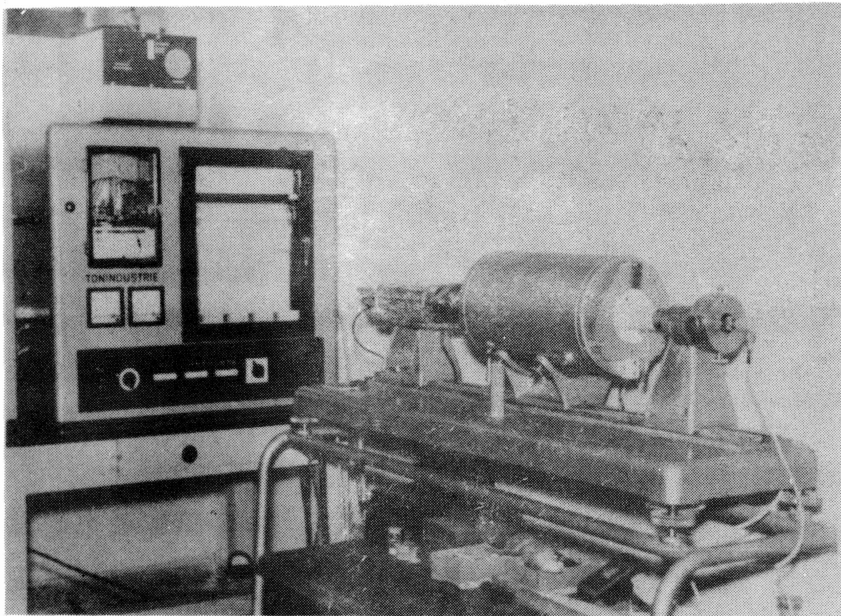
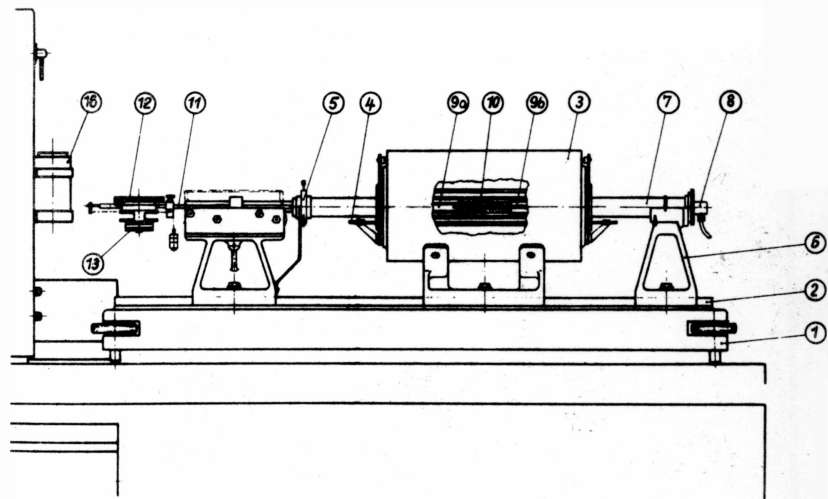


Fig. 1
Dilatómetro automático
Steger-Tonindustrie

Fig. 2



- 1.- Mesa y regulación de nivel
- 2.- Corredera guía del horno y los cabezales
- 3.- Horno a resistencia de platino
- 4.- Termocupla del horno
- 5.- Sostén del tubo exterior de "piroceraam" (porcelana de alta temp.)
- 6.- Base de cabel fija
- 7.- Tubo exterior de "piroceraam"
- 8.- Termocupla del interior de la probeta de ensayo
- 9.^a Soporte de "piroceraam" para transmisión de movimiento
- 9.^b Soporte fijo de "piroceraam"
- 10.- Probeta de ensayo
- 11.- Sistema de aplicación de carga sobre la probeta
- 12.- Dial indicador del dilatómetro
- 13.- Potenciómetro
- 16.- Registrador electrónico y programador

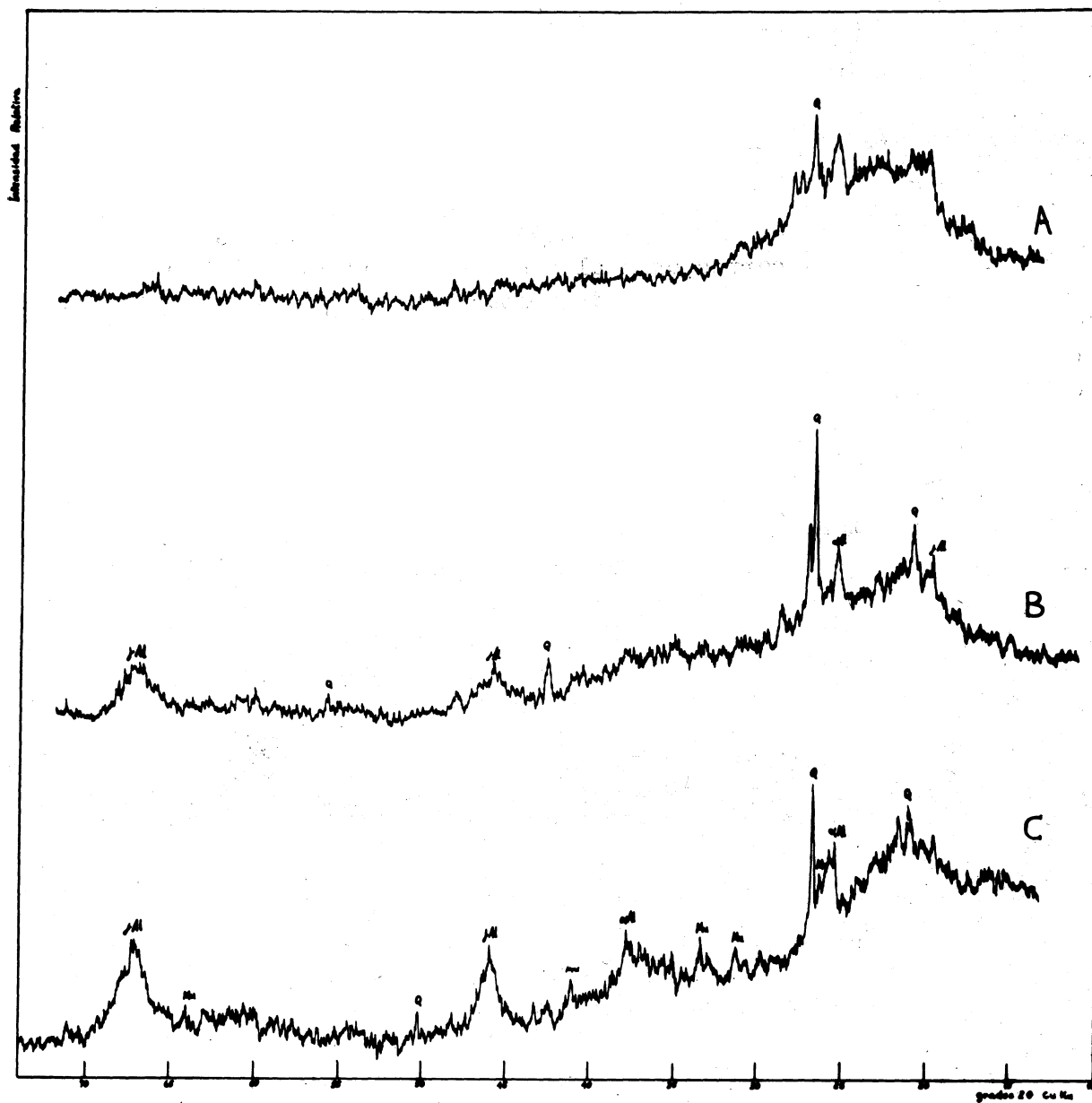


Fig. 4

Muestra n° 2 - Arcilla "SONIA", calcinada durante una hora

Difractogramas: (A) a 850 C, (B) a 1000 C, (C) a 1100 C.

Referencias: Q-cuarzo; γ Al-gama alúmina; α Al-alfa alúmina; Mu-mullita

Equipo: Philips P.W.1010-40 K volt. 20 mA.

Registro: 100 c.p.s.

mineralógica. Luego esta contracción continúa suavemente hasta 850 °C, como consecuencia de la eliminación del agua residual del retículo cristalino.

Esta zona del dilatograma - primera gran contracción - rápida al principio y suave al final, corresponde al pico endotérmico del A.T.D., cuya temperatura de "pico" se sitúa en los 600°C, siendo ésta una de las características de la especie caolinita.

- c) La segunda gran contracción se inicia aproximadamente a 850 °C y se prolonga hasta la máxima temperatura alcanzada en el ensayo. En su primera parte (850 °C a 900 °C) es debida, probablemente a la formación del metacaolín y/o reordenamiento de las formas cristalinas, no perfeccionadas de silicatos de aluminio anhidro, con liberación de sílice amorfa que a mayores temperaturas se transforma en cristobalita.

La difracción de rayos X, muestra en la arcilla calcinada durante una hora a 850 °C un pico característico de cuarzo de poca intensidad, proveniente de la muestra original. Además, una línea de fondo desplazada, dentro de cierto rango de ángulos de difracción, debida a numerosos picos de poca intensidad que indicarían la presencia de compuestos no identificables y de bajo desarrollo cristalino.

Entre 900 °C a 1030 °C se desarrolla una reacción expansiva, que corresponde al pico exotérmico entre 900 °C a 1000 °C del A.T.D., que algunos autores atribuyen al proceso de mullitización y otros a la formación de gama alúmina.

La difracción de rayos X, muestra en la arcilla calcinada en el rango de temperatura antes mencionado, el aumento de la amplitud del pico que caracteriza al cuarzo, debido a una reflexión anómala, que no debe considerarse, y la aparición de cristales de gama alúmina con

desarrollo cristalino no muy perfeccionado (picos de poca altura y base ancha).

Si bien el difractograma no muestra la presencia de cristales de mullita, es un hecho bien conocido, que la reacción de su formación se inicia a temperaturas de 900 °C a 1000 °C; que el perfeccionamiento y crecimiento de los núcleos de los cristales (no identificables por D.R.X.), por reacción difusional de la sílice en los granos de alúmina, depende de la temperatura y de la naturaleza físico-química de sus componentes (tamaño de partículas, forma cristalográfica, presencia de catalizadores, etc.), acelerándose en rangos de temperaturas del orden de 1300 °C a 1400 °C, y siendo muy rápida entre 1600 °C a 1700 °C, como se ha demostrado en los ensayos de variación lineal permanente por recalentamiento de ladrillos refractarios de alta alúmina elaborados a base de bauxitas calcinadas (8).

Como los procesos de formación de mullita y cristalización de gama alúmina son expansivos, según sus intensidades y velocidades de reacción, pueden anteponerse a la contracción originada por la formación del metacaolín y como consecuencia el material, dentro de ese rango de temperatura, no experimenta variaciones de dimensiones (zona de estabilización, primera meseta o escalón del dilatograma), o bien disminuir la velocidad de contracción, originando ligera inflexión en la curva dilatométrica, inflexión que será tanto más visible, cuando mayor sensibilidad tenga el aparato registrador de las variaciones de dimensiones (ver dilatogramas correspondientes a las arcillas N°s 2, 4 y 6).

Puede observarse en el gráfico, que la primera zona de estabilización de dimensiones o de disminución de la velocidad de contracción (primera meseta), coincide, dentro del mismo rango de temperatura, con el pico exotérmico del A.T.D. cuya máxima temperatura de "pico" se ubica aproximadamente en 980 °C. Cuanto mayor amplitud posea este pico, otras de las características de caolinitas muy puras y con buen desarrollo cristalino, tanto mayor será el rango de temperatura que limita dicha zona.

Entre 1050 °C a 1200 °C, continúa la contracción y comienzo del fraguado cerámico por sinterización del material, contracción que disminuye de velocidad o hasta puede anularse entre 1200 °C a 1350 °C, nueva zona de estabilización (segunda meseta) por reacción expansiva debida a la transformación de cuarzo en cristobalita y crecimiento de los cristales de mullita. Esta segunda meseta dependerá: del contenido de cuarzo presente en la arcilla, del contenido de mullita y velocidad de crecimiento de sus cristales. Ambos procesos expansivos se oponen al de contracción por sinterización del material, con aumento del contenido de fase líquida y este último dependerá principalmente, de la refractariedad del material (óxidos fundentes que puede contener la arcilla).

La difracción de rayos X, de la arcilla calcinada durante una hora a temperaturas de 1100 °C, 1200 °C, 1300 °C y 1400 °C, muestra en las figuras 4 y 5 lo siguiente:

A 1100 °C, aparecen los primeros picos que indican la formación y crecimiento de cristales de mullita, de poca amplitud. Se observa además, el aumento del contenido y grado de cristalinidad de gama alúmina.

A 1200 °C, el pico de cuarzo se mantiene de la misma magnitud que a 1100 °C, pero disminuye la intensidad de los picos que caracterizan a la gama alúmina; se incrementan los picos de mullita a expensas de la sílice amorfa y parte de gama alúmina.

A 1300 °C, desaparecen completamente los picos de cuarzo y gama alúmina y aparecen bien desarrollados los de cristobalita y mullita. Además, la línea de fondo del dilatograma resulta más baja, sin los pequeños picos de compuestos no identificados en los diagramas anteriores y atribuibles a silicatos complejos intermedios.

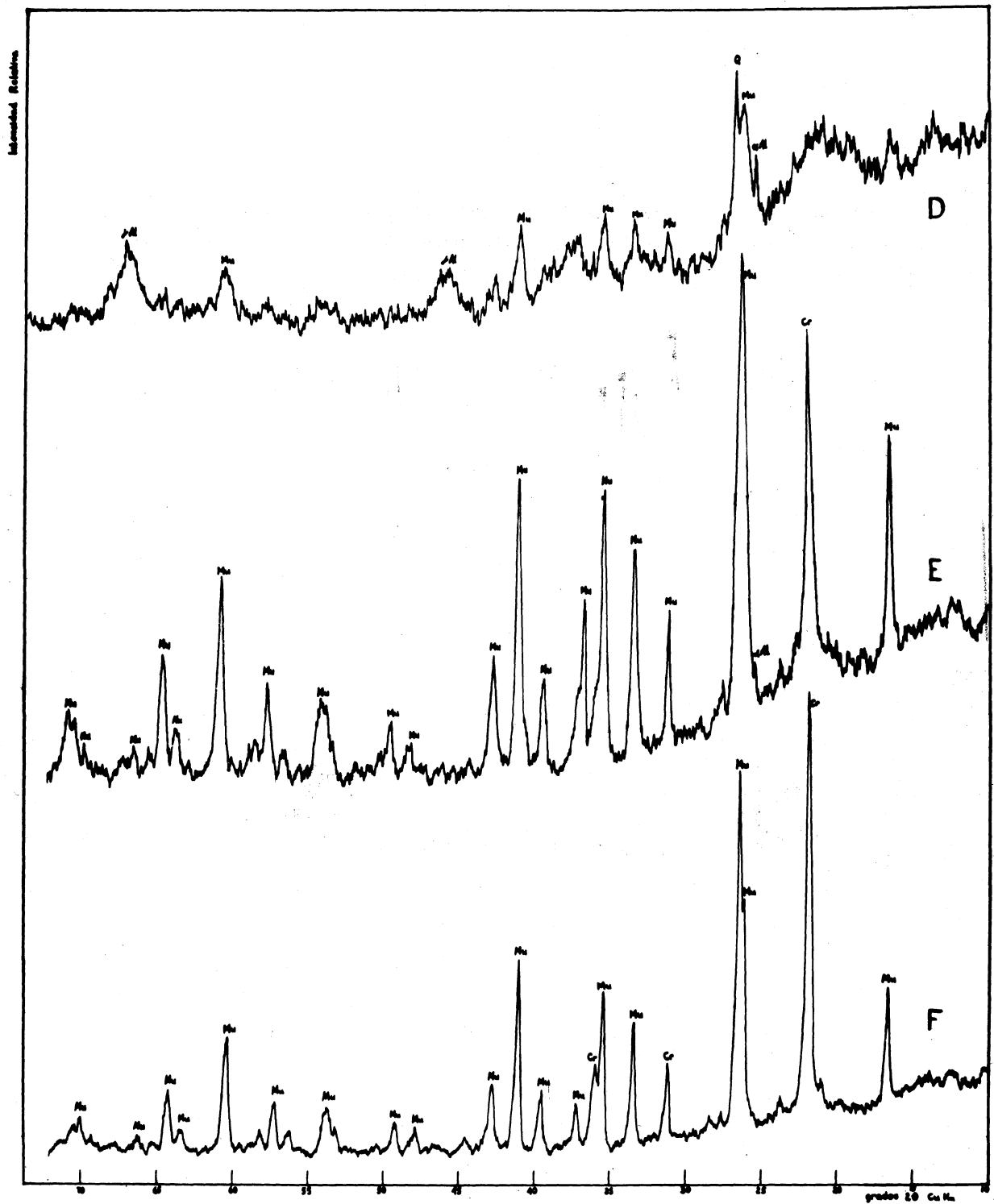


Fig. 5

Muestra n° 2 - Arcilla "SONIA", calcinada durante una hora

Difractogramas: (D) a 1200 C, (E) a 1300 C, (F) a 1400 C.

Referencias: Q-cuarzo; Cr-cristobalita; Al-gama alúmina;

Al-alfa alúmina; Mu-mullita

Equipo: Philips P.W. 1010-40 Kvolt, 20 mA

Registro: 200 - - - - -

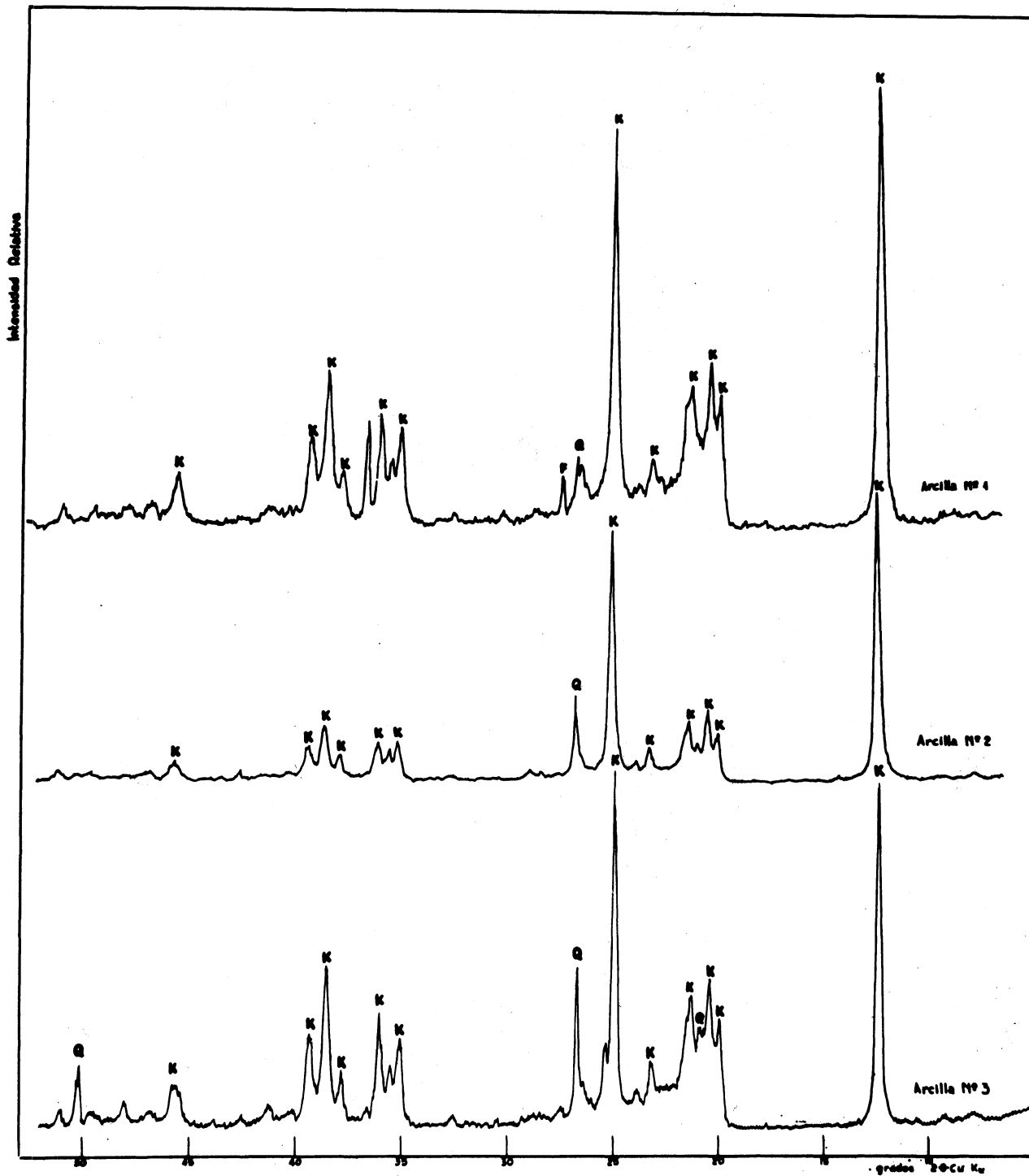


Fig. 7

Difractometría: Arcilla n° 1 "AMANA"; arcilla n° 2 "SONIA"
arcilla n° 3 "CLARAZ"

Referencias: K-caolinita; Q-cuarzo; F-feldespato; Mu-muscovita;
Mo-montmorillonita; P-pirofilita

Equipo: Philips P.W.1010-40 Kvolt, 20 mA.

Registro: 200 c.p.s.

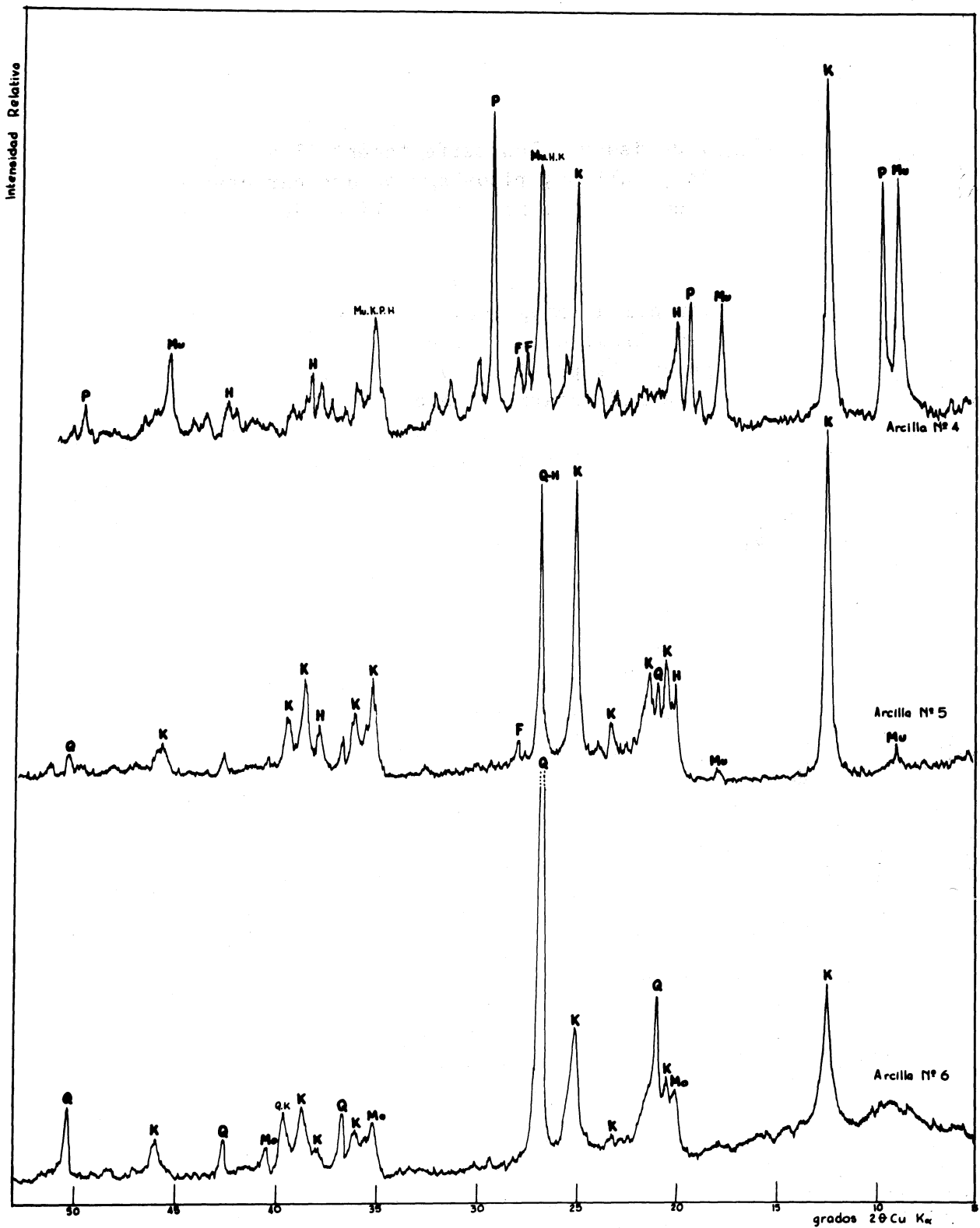


Fig. 8

Difractometría: Arcilla nº 4 "BARKER"; arcilla nº 5 "NORQUINCO"
arcilla nº 6 "PLASTICA NEUQUEN"

Referencias: K-Caolinita; Q-cuarzo; Mu-muscovita; P-pirofilita;
Mo-Montmotillonita; F-feldespato; H-haloisita

Equipo: Philips P.W.1010-40 Kvolt, 20 mA.

A 1400 °C, se desarrollan perfectamente los cristales de cristobalita y mullita, picos agudos que caracterizan estado cristalino perfeccionado y con línea de fondo sin los pequeños picos.

Los difractogramas descriptos confirman lo expuesto en la interpretación del dilatograma. Sin embargo debemos aclarar, que ello es válido cuando se calcinan arcillas caoliníticas puras, ya que la presencia de otras especies mineralógicas o minerales refractarios, caso de mezclas para la elaboración de productos cerámicos, puede alterar significativamente la curva dilatométrica como es dable observar en la fig. 16, que representa dilatogramas de mezclas crudas destinadas a la elaboración de refractarios, clasificados según norma IRAM 12508 en los Tipos I, II y III.

Después de la segunda meseta que caracteriza la formación de cristobalita, la contracción aumenta nuevamente de velocidad hasta alcanzar la máxima temperatura de ensayo, debido a que el proceso de sinterización prosigue con aumento de fase líquida (estado pirolástico).

En la fig. 3, se muestra también la curva que representa el coeficiente dilatométrico diferencial (C.D.D.) en función de la temperatura. Este coeficiente, no es más que la variación de longitud, expresada en por ciento ($\Delta L\%$), para incrementos constantes de temperaturas (ΔT) y en función de la temperatura de calcinación; expresa los cambios de pendiente del dilatograma.

Las inflexiones indican variaciones de velocidad de: contracción (debajo de la línea del cero), o expansión (por encima de la línea del cero), y originándose picos, cuando las mismas son bruscas y ondas cuando son suaves.

Cuando el C.D.D. se aproxima a la línea del cero el material no experimenta variaciones significativas de volumen, dentro de ese intervalo de temperatura. Puede observarse que los picos descendentes, de alta velocidad de contracción, coinciden con la primera y segunda gran contracción; mientras que los ascendentes, con las zonas de estabilización de dimensiones (meseta del dilatograma) o rangos de temperatura donde la velocidad de contracción o expansión disminuyen o se anulan.

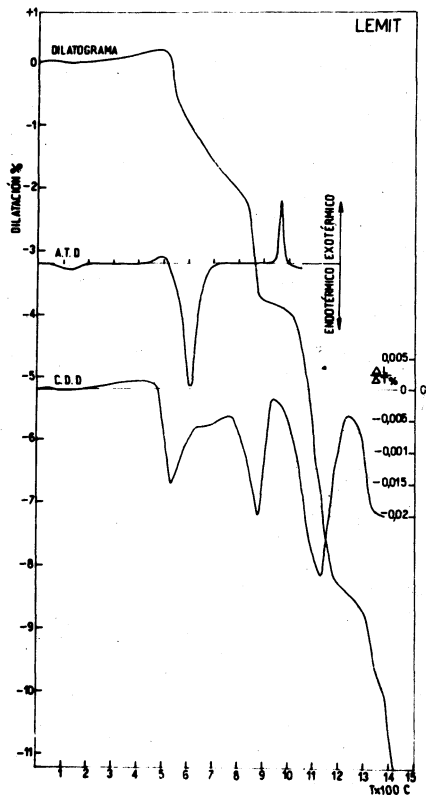


Fig. 3

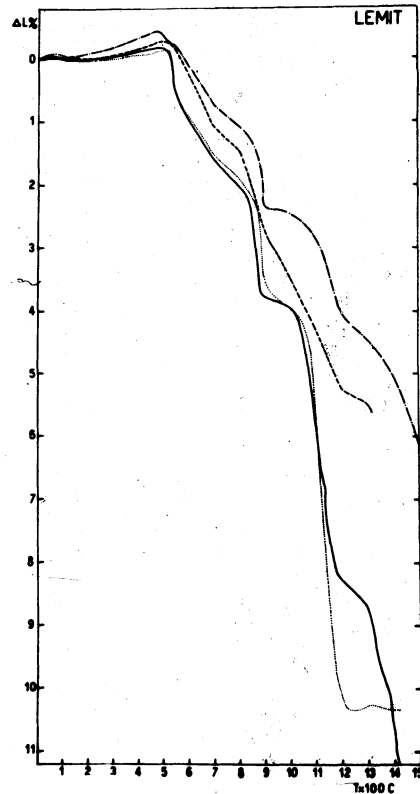


Fig. 6 Arcilla 1 - "Amaná" : _____
 Arcilla 2 - "Sonia" : - - - - -
 Arcilla 3 - "Claráz" : - · - · - · -
 Arcilla 4 - "Norquincó" : ·····

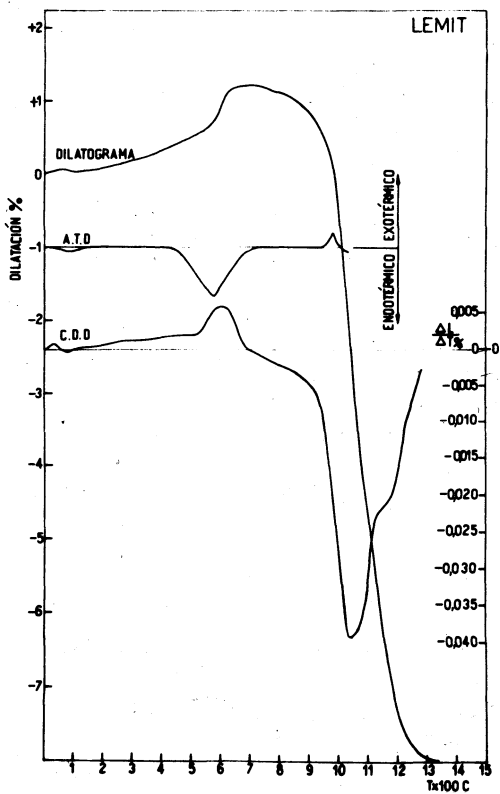


Fig. 9

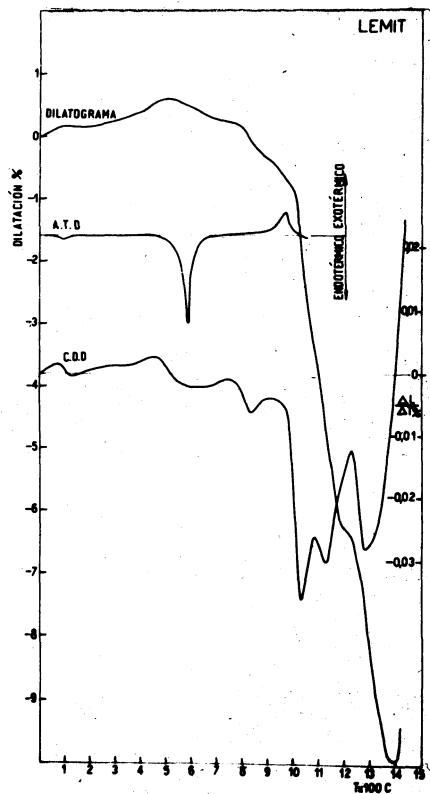


Fig. 10

COMPOSICION QUIMICA, C.P.E., INDICE PLASTICO DE LAS ARCILLAS ESTUDIADAS

TABLA I

Identificación	Provincia	Denominación	Pérdida por calcinación a 960 C, o/o	Si O ₂ o/o	Al ₂ O ₃ o/o	Fe ₂ O ₃ o/o	TiO ₂ o/o	Ca O o/o	Mg O o/o	Na ₂ O o/o	K ₂ O o/o	C.P.E.	Temperatura Equivalente C	Indice plastico	Límite Líquido	Límite Plástico
1	La Rioja	"Amaná"	14,20	42,00	38,90	1,10	1,40	0,50	0,30	0,35	0,50	33/34	1743/1763	5/7	22/23	16/18
2	La Rioja	"Sonia"	13,70	45,00	38,50	1,30	0,50	--	--	0,30	0,52	32/35	1724/1785	3/4	18/19	15/17
3	Bs. Aires	"Claréz"	13,20	43,50	37,00	1,20	3,10	0,40	0,20	0,10	1,40	32/33	1717/1743	4/6	17/20	13/40
4	Bs. Aires	"Barker"	8,00	46,40	35,50	1,60	1,40	0,80	0,40	0,50	4,50	31/32	1683/1717	14/15	35/38	20/24
5	Río Negro	"Norquincó"	13,30	44,00	36,00	1,50	1,80	2,50	--	0,50	0,20	32/33	1724/1743	7/13	25/33	17/20
6	Neuquén	"R. Castro"	9,50	58,40	25,20	3,20	0,60	0,50	0,30	0,40	1,40	26/27	1621/1640	22/25	42/50	20/25
7	Neuquén	"Zapala"	13,40	46,80	36,80	1,50	0,60	--	--	0,10	0,80	34	1763	14/16	35/37	20/23
8	Neuquén	"Zapala"	11,50	53,60	27,40	1,90	1,10	1,40	--	0,10	1,30	31	1683	29/31	56/58	25/27
9	Neuquén	"Zapala"	11,40	52,90	27,10	3,45	1,00	1,00	--	0,10	1,10	30	1665	32/34	58/60	25/27

En esta curva se hace más nítida las muy ligeras inflexiones o cambios de la pendiente del dilatograma y los picos y ondas coinciden con las que se producen en las curvas dilatométricas y A.T.D. Según Forbes (3) el pequeño pico endotérmico que aparece entre 100 °C a 200 °C en el A.T.D., se atribuye a la eliminación del agua "mecánica" residual utilizada en el moldeo de la pieza cerámica y que resiste el secado a 100 °C. La parte de la curva, ligeramente ascendente entre 600 °C a 750 °C corresponde a la oxidación de la materia orgánica que contiene la arcilla.

Muestra N^o 2: Arcilla "Sonia"

Las características químicas y físicas de esta arcilla no difieren mayormente de la muestra N^o 1 (Tabla I). Se diferencia en el mayor contenido de impureza de cuarzo y no se detecta por D.R.X la presencia de feldespatos.

La fig. 6 muestra los dilatogramas correspondientes a las arcillas N^o 1, 2, 3 y 5, todas del tipo caolinítico.

La N^o 2 presenta un dilatograma semejante a la N^o 1 con ligeras diferencias debido al mayor contenido de cuarzo (curva ligeramente más ascendente entre 500 °C a 600 °C) y de menor pendiente al comienzo de la primera gran contracción.

La segunda gran contracción se inicia a igual temperatura que en el caso anterior, pero la primera meseta aparece con una ligera inflexión debido a que los procesos de contracción, por formación de cuarzo y sinterización son de mayor amplitud que los de mullitización y cristalización de gamma alúmina. La segunda meseta que caracteriza la formación de cristobalita, se produce dentro del mismo rango de temperatura.

La máxima contracción alcanzada a 1300 °C es de aproximadamente 5,5 %, mientras que en la arcilla N^o 1 es de 8,6 %, ello es debido a la acción expansiva del mayor contenido de cuarzo que posee; como consecuencia se densifica en menor grado, cuando se calcina en rango de temperatura de ese orden.

Muestra N^o 3: Arcilla "Claráz"

Mediante A.T.D. y D.R.X, se identifica como una arcilla caolinítica con mayor contenido de cuarzo que en las muestras anteriores (fig. 7).

El dilatograma (fig. 6), debido al mayor contenido de cuarzo que posee, es ascendente entre 200 °C a 500 °C, y más pronunciado, desplazándose la zona de la primera gran contracción a mayores temperaturas y con una menor pendiente en su comienzo. Las demás características se producen como en el caso de la muestra N^o 1, pero con la diferencia que la máxima contracción alcanzada a 1300 °C es de 4 %, valor mucho menor que en las arcillas anteriores.

Muestra N^o 5: Arcilla "Norquincó"

El A.T.D. y D.R.X muestran termogramas y difractogramas que revelan una arcilla con alta proporción de la especie mineralógica caolinita, menor cantidad de haloisita, poco cuarzo y ligeras impurezas de feldespato y muscovita (fig. 8).

El dilatograma de esta arcilla (fig. 6) muestra un comportamiento semejante a la arcilla N^o 1. La segunda meseta, característica de formación de cristobalita, se produce a la misma temperatura, pero con la diferencia que se alcanza una contracción de 10,6 %, valor este mucho mayor que en los casos anteriores y manteniéndose constante hasta los 1450 °C. Esta mayor densificación es debida a la presencia de haloisita o impurezas menores de muscovita.

Muestra N^o 4: Arcilla "Barker".

La difracción de rayos X revela la presencia de caolinita, muscovita y pirofilita, impurificada con muy poco cuarzo y feldespato. El A.T.D., muestra un termograma característico de caolinita, pero muy impurificada y de bajo desarrollo cristalino. (fig. 8 y 9)

El dilatograma de esta arcilla (fig. 9) se diferencia notablemente de los correspondientes a las arcillas caoliníticas de cierto grado de pureza (arcillas 1, 2, 3 y 5).

Por la presencia de muscovita o illita y pirofilita, origina una curva ligeramente ascendente hasta aproximadamente 550 °C, interrumpida por una pequeña contracción en el rango de temperaturas de 100 a 200 °C, que, como se ha señalado anteriormente, es debida en todos los casos, a la eliminación del agua residual de moldeo.

La máxima expansión alcanzada a 550 °C es de aproximadamente 0,6 %, y por la presencia de pirofilita y muscovita o illita se produce un cambio brusco en la expansión que llega a 1,2 %, cuando la temperatura alcanza los 650 °C. Esta expansión supera a la contracción producida por la pérdida del agua constitucional de la arcilla, dando origen a valores positivos del C.D.D., en el mismo rango de temperatura que corresponde al pico endotérmico del A.T.D.

Entre 650 y 800 °C se produce una meseta u onda en la curva dilatométrica, característica de las especies mineralógicas illita-muscovita y pirofilita. A partir de 800 °C, la contracción comienza a predominar sobre la expansión y origina una lenta y gradual disminución de las dimensiones del material hasta los 950 °C a 1000 °C.

La primera gran contracción, de rápida velocidad, se inicia entre 950 °C a 1000 °C y se continúa hasta los 1200 °C donde se produce la zona de estabilización de volumen (segunda meseta) o zona de disminución de la velocidad de contracción, que caracteriza la formación de cristobalita.

La primera meseta observada en las arcillas caoliniticas en el rango de temperaturas de 900 °C a 1000 °C, que como se ha indicado, caracteriza a los procesos expansivos de formación de mullita y gama alúmina, no se produce en esta arcilla debido al bajo contenido de caolinita (pico exotérmico a 880 °C de poca magnitud en el A.T.D.), y al mayor contenido de óxidos fundentes que posee la arcilla, especialmente de sodio y de potasio, los cuales aceleran el proceso de sinterización con aumento de la fase líquida en el rango de temperaturas de 1000 °C a 1200 °C. Sin embargo, la pendiente del dilatograma sufre cambios que muestran disminución progresiva de la velocidad de contracción, desde aproximadamente 1025 °C en adelante, como lo revela el pico entre 950 °C a 1300 °C de la curva del C.D.D..

Muestra Nº 6: Arcilla "Neuquén"

El A.T.D. muestra el pico agudo endotérmico de 600 °C, característico de caolinitas y el exotérmico de 980 °C de poca amplitud, lo cual indica en cierta medida la presencia de impurezas no detectadas por esta técnica. La D.R.X revela cuarzo, caolinita y montmorillinita (fig. 8).

El dilatograma (fig. 10) muestra ligera expansión entre la temperatura ambiente y hasta los 400 °C, interrumpido por una débil contracción, entre 100 °C y 150 °C, por la eliminación del agua residual de moldeo (agua "mecánica" o agua "superficial"). A partir de 400 °C y por la presencia de cuarzo, se produce un cambio en la pendiente con aumento de la expansión que llega a un máximo de 0,6 % a 525 °C. Luego comienza a predominar la contracción sobre la expansión del cuarzo, por eliminación del agua constitucional de la arcilla, originando una gradual y lenta contracción hasta los 1000 °C; en consecuencia, se anula la primera gran contracción que caracteriza a las arcillas con predominio de la especie caolinita.

Las ligeras inflexiones o cambios de pendiente que se observan en el dilatograma, entre 600-625 °C, 750-800 °C y 925-1000 °C, se atribuyen, las dos primeras, a la impureza de montmorillonita, y la última al proceso de formación de mullita y gama alúmina. Esta última coincide con el pico exotérmico de 900 °C a 1000 °C del A.T.D.

La segunda gran contracción, de rápida velocidad, se inicia aproximadamente en los 1000 °C y se continúa hasta 1370 °C, interrumpida por una zona de menor velocidad entre 1175 °C a 1225 °C (zona que hemos denominado segunda meseta) y que caracteriza la formación de cristobalita.

A 1100 °C, se produce una muy ligera inflexión, apenas perceptible, atribuida a la acción expansiva del crecimiento de los núcleos cristalinos de mullita. Todas estas ligeras inflexiones o cambios de la pendiente del dilatograma, se magnifican en la curva que representa la variación del C.D.D. en función de la temperatura.

Una de las principales características de esta arcilla, que la diferencia de las restantes, es la rápida ex-

pansión que se produce en el rango de temperaturas comprendido entre 1300 °C a 1400 °C, como se muestra en el dilatograma y atribuida a la eliminación de compuestos gaseosos de composición química desconocida, eliminación que es favorecida por el estado pirolástico que adquiere el material a esas temperaturas. Esta brusca dilatación se atribuye a la presencia de montmorillonita, illitas estratificadas con montmorillonita o bravaisitas impuras, como lo mencionan Munnier y Meneret (5).

La arcilla calcinada en el rango de temperaturas antes mencionado presenta una textura alveolar porosa, de baja densidad aparente; esta característica se conoce generalmente con el nombre de "arcilla expandida". Cuando se utiliza en la dosificación de mezclas refractarias, produce materiales cerámicos poco densos si se someten a temperaturas de coochura de ese orden y en sus usos a mayores temperaturas, expanden con aumento de la porosidad, como se muestra en las figuras 11 y 12. Las mismas corresponden a ladrillos refractarios elaborados con un 25 % de esta arcilla, mezclada con otros materiales refractarios y sometidos al ensayo de variación lineal permanente por recalentamiento a 1600 °C, según norma IRAM 12516.

Muestras 7, 8 y 9. Arcillas de la provincia de Neuquén

Estas arcillas, provenientes de las canteras denominadas "Chita" e "Iris", Departamento Zapala, de acuerdo a sus dilatogramas (fig. 13) responden a las siguientes características:

Arcilla Nº 7

Caolinita de muy buena pureza, impurificada con muy poco cuarzo (curva ligeramente ascendente hasta los 450 °C a 500 °C); luego presenta las mismas zonas de contracción y mesetas de estabilización de dimensiones o de menor velocidad de contracción que en los casos analizados anteriormente, dando origen a un dilatograma escalonado que caracteriza a las arcillas del tipo caoliníticas.

Cuando se calcina en rango de temperaturas de 1300°C a 1350 °C, zona de formación de cristobalita, produce un

chamote de buena densificación ya que la máxima contracción lineal alcanzada es de 13,8 %.

Arcilla N^o 8

Su dilatograma revela una arcilla que contiene: caolinita, muy poco cuarzo y montmorillonita, ésta se caracteriza por la pequeña inflexión que se observa a 800 °C y sobre todo, la expansión que se produce entre 1250 °C a 1400 °C, como lo muestra también la arcilla plástica N^o 6.

Cuando se calcina entre 1200 °C a 1300 °C, origina un chamote de buena densificación (máxima contracción lineal 11,4 %), pero a mayores temperaturas expande con aumento de la porosidad.

Arcilla N^o 9

El dilatograma revela, como en el caso de la muestra N^o 8, una arcilla que contiene caolinita y mayores cantidades de cuarzo y montmorillonita, por la mayor amplitud de las inflexiones ascendentes que aparecen en la curva dilatométrica: a 550 °C (transformación de cuarzo alfa a cuarzo beta); 800 °C y expansión brusca entre 1200 °C a 1300 °C, que caracteriza especialmente a la montmorillonita.

La máxima densificación de la arcilla (9,5 % de contracción lineal) que se obtiene a 1200 °C, es inferior al de la muestra N^o 8, debido al mayor contenido de cuarzo.

En la fig. 14, se muestran los dilatogramas correspondientes a las arcillas 4 y 6, que difieren notablemente de las arcillas del tipo caoliníticas. Ambas contienen caolinita, pero en la primera predominan las especies, muscovita y pirofilita y en la segunda, cuarzo y montmorillonita. Esta última se caracteriza por su buena plasticidad y acción expansiva cuando se calcina en rango de temperaturas de 1200 °C a 1400 °C.

Estas arcillas poseen la característica común de tener una zona de rápida e intensa contracción, que se inicia a temperaturas del orden de los 900 °C a 1000 °C y se continúa hasta los 1200 °C a 1400 °C, y no producen dilatogramas escalonados como en el caso de las caolinitas.

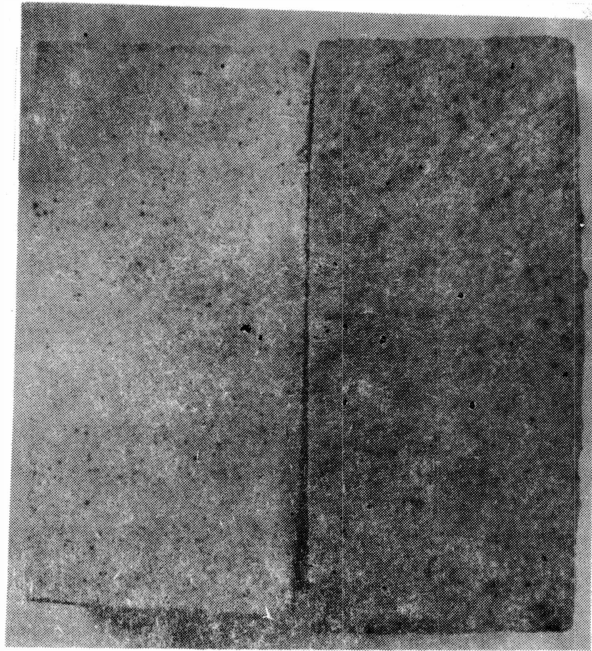


Fig. 11

Ladrillo antes del ensayo Ladrillo después del ensayo (expandido)

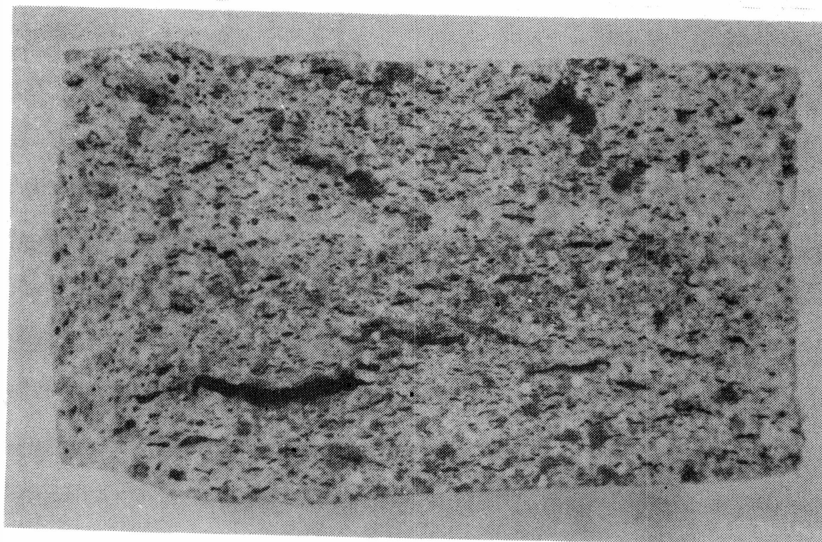


Fig. 12 Corte transversal del ladrillo expandido

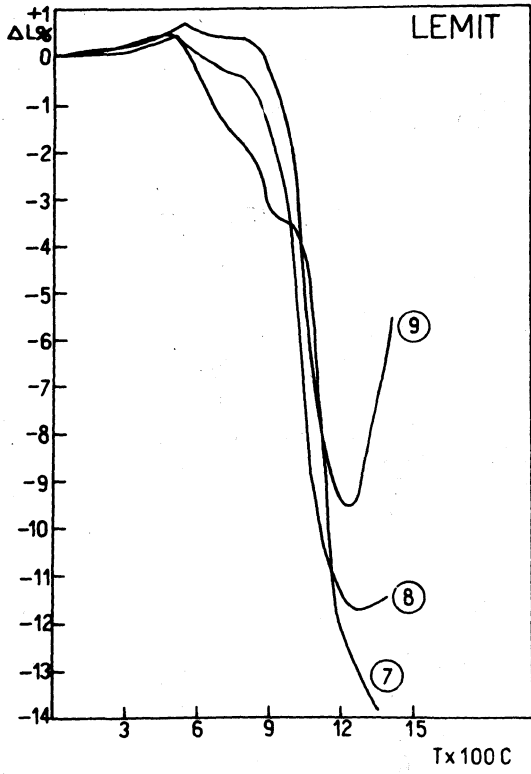


Fig. 13

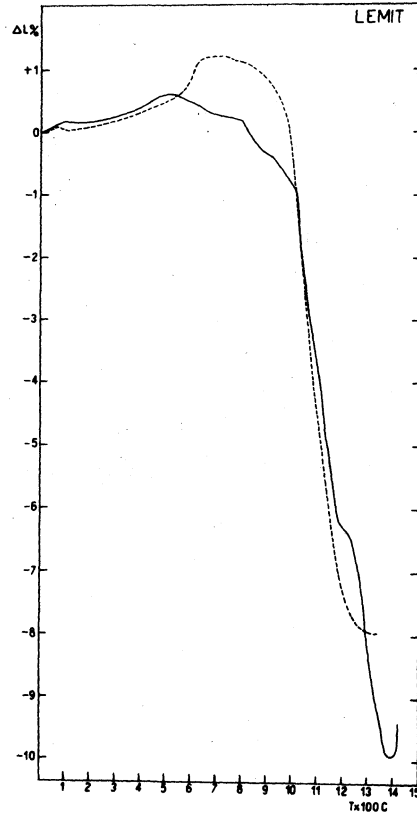


Fig. 14

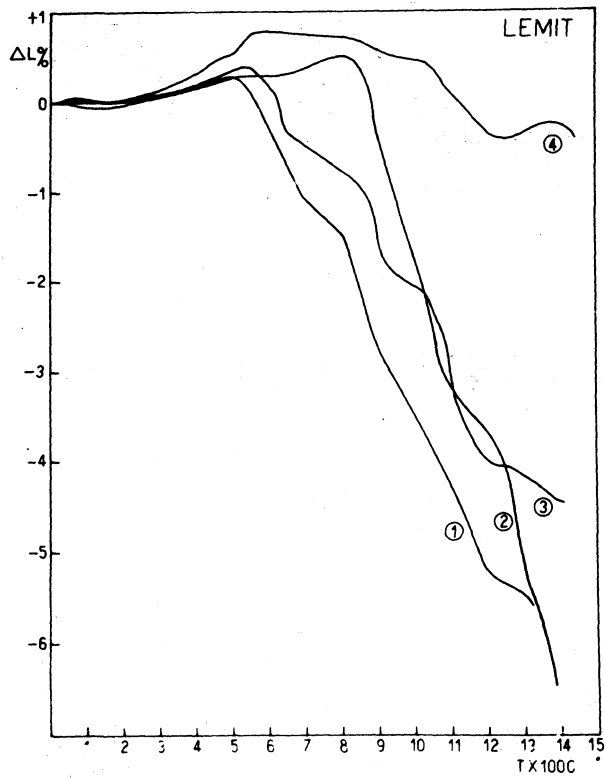


Fig. 15

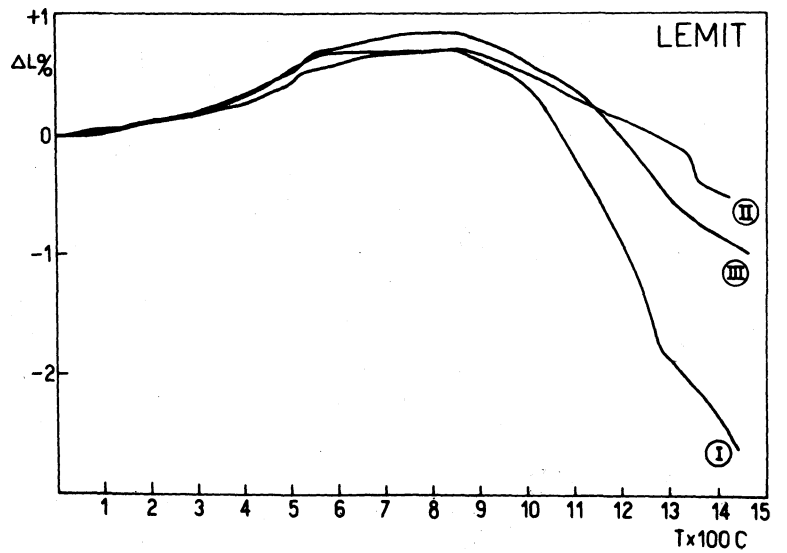


Fig. 16

INFLUENCIA DE COMPONENTES MENORES

En las experiencias que se exponen a continuación, se estudia la influencia del cuarzo, muscovita-illita, y montmorillonita, en el dilatograma de una arcilla caolinítica, componentes estos, que generalmente y en variadas proporciones pueden encontrarse presentes en las arcillas refractarias. La arcilla caolinítica utilizada en las mezclas es la N^o 2 "Sonia". Los dilatogramas se muestran en la fig. 15.

Influencia del cuarzo

Se emplea cuarzo de alta pureza, molido hasta que pasa la malla A.S.T.M. N^o 200.

a) Con agregado de 10 %: La presencia del 10 % altera ligeramente el dilatograma escalonado de la arcilla original (curvas N^o 1 y N^o 3). Se obtiene una mayor expansión entre 500 °C a 550 °C, que de 0,3 % a 500 °C en la arcilla pura, pasa a 0,4 % a 550 °C en la mezcla. Esta mayor expansión se antepone a la contracción producida por la eliminación de agua del retículo cristalino de la arcilla, desplazándose a mayores temperaturas la primera contracción rápida, que generalmente se observa en las arcillas caoliníticas con poco o sin contenido de cuarzo.

La primera zona de estabilización de dimensiones o de menor velocidad de contracción (primera meseta), que como se ha señalado, se atribuye al proceso de formación de mullita y cristalización de γ alumina, se hace más nítida que en la muestra original, debido a que el cuarzo presente disminuye el proceso de sinterización, predominando así las reacciones expansivas de mullitización y formación de γ alumina. Igualmente, por el mayor contenido de cuarzo, la segunda zona de menor velocidad de contracción (segunda meseta), se desarrolla dentro del mismo rango de temperaturas, pero de mayor amplitud e insinuándose una ligera expansión a 1250 °C debida a que la formación de cristobalita se hace más intensa. Además, la máxima contracción que

se obtiene a 1325 °C es de 4,2 % y en consecuencia la densificación del material es menor.

b) Con agregado de 25 %: El agregado de 25 % p/p de cuarzo de la misma finura que en el caso anterior, altera completamente el dilatograma correspondiente a la arcilla original (curvas N= 1 y N= 4). Se produce una gradual y más pronunciada expansión, en el rango de temperaturas comprendido entre 300 °C a 550 °C, con cambio brusco entre 500 °C a 550 °C, debido a la transformación de cuarzo alfa a cuarzo beta.

El mayor contenido de cuarzo anula completamente la primera y segunda zona de contracción, dando origen a C.D. D. positivos entre 600 °C a los 1000 °C. A partir de los 600 °C, se produce una lenta y gradual contracción hasta los 1050 °C, para continuar luego a mayor velocidad (mayor pendiente del dilatograma) hasta los 1200 °C, zona de formación de cristobalita, de mayor extensión y con tendencia a una más pronunciada dilatación que el caso anterior. La máxima contracción obtenida entre 1250 °C a 1350 °C es de 0,4 %, valor mucho menor que en la mezcla anterior y debida al mayor contenido de cuarzo.

Influencia de muscovita

La presencia de 25 % p/p de muscovita en la arcilla caolinitica origina un dilatograma semejante al de la arcilla N= 4 (curva 2 de la fig. 15), pero con la diferencia que no expande en el rango de temperaturas que va de la ambiente hasta los 500 °C y no se observa la brusca dilatación entre 500 °C a 600 °C, debido a la ausencia de pirofilita y regular cantidad de cuarzo. Por el contrario, dentro de ese rango de temperaturas, se insinúa una ligera contracción por eliminación del agua de constitución de la caolinita.

La gradual y lenta dilatación se prolonga hasta los 800 °C, con un máximo valor de 0,45 %, siendo esta zona del dilatograma una de las principales características de arcillas que contienen regular cantidad de muscovita. A partir de esta temperatura, se inicia la primera gran contracción

de rápida velocidad con ligeros cambios, entre 1100 °C a 1200 °C y entre 1300 °C a 1350 °C, zonas que corresponden, la primera, a la formación de mullita y cristalización de gama alúmina, y la segunda, a la transformación de cuarzo en cristobálita, ambas desplazadas a mayores rangos de temperaturas.

La máxima contracción a 1400 °C de 6,5 %, es superior a las mezclas con cuarzo, en consecuencia, esta especie mineralógica provoca una mayor densificación del material cuando se calcina dentro de ese rango de temperatura y sin expandir posteriormente por desprendimiento gaseoso.

Influencia de montmorillonita

Como no se ha podido conseguir en nuestro medio la especie mineralógica montmorillonita de cierto grado de pureza, las mezclas se preparan utilizando bentonita de procedencia argentina y de regular contenido en montmorillonita, con la arcilla caolínica N^o 2 ("Sonia").

Con 10 % p/p y 25 % p/p de bentonita, los dilatogramas que se obtienen no difieren mayormente del obtenido con la arcilla original y ni se observa la expansión, por desprendimiento gaseoso, en el rango de temperaturas comprendido entre 1200 °C a 1400 °C. Esto ha hecho pensar que no todas las variedades del tipo montmorillonítico, poseen la propiedad expansiva, como ha sido observado en las arcillas refractarias plásticas analizadas, y en los trabajos de Munier y Meneret (5).

Para revelar esta incógnita será necesario proseguir esta parte del estudio con otras bentonitas, cuyo contenido de montmorillonita sea variable y con bases de intercambio iónico diferentes, como así también, bentonitas estratificadas con illita o illitas en vía de transformación a montmorillonita, presencia de sulfuros, óxido de hierro hidratados, etc.

Mezclas refractarias

En la fig. 16 se presentan los dilatogramas corres-

pondientes a mezclas refractarias crudas destinadas a la elaboración de refractarios del tipo Alta alúmina (60 % en óxido de aluminio), Super-refractarios y Altamente refractarios (Norma IRAM 12508).

En el caso de los refractarios tipo Alta alúmina (dilatograma II), las mezclas contienen en proporciones adecuadas, bauxita calcinada, arcilla plástica de Neuquén (muestra N^o 6), arcilla Barker (muestra N^o 4) y arcilla Claraz (muestra N^o 3). Los super refractarios, con 45 % de óxido de aluminio (dilatograma III), contienen arcillas plásticas Barker y Claraz, con chamote de la arcilla Amaná, y bauxita. Los altamente refractarios con 38 % de óxido de aluminio (dilatograma I), contienen arcillas plásticas, Barker y Claraz, con chamote de arcilla Amaná.

El análisis de los dilatogramas permite, en todos los casos, revelar la presencia de cuarzo por su inflexión ascendente en el rango de temperaturas comprendido entre 500 a 600 °C y la zona con C.D.D. positivos, pero con poca variación de dimensiones, entre 600 °C a 1050 °C, como consecuencia de la presencia, en las mezclas, de arcillas que contienen muscovita-illita, pirofilita y montmorillonita que anulan la primera gran contracción correspondiente a la arcilla del tipo caolinítica. A partir de 1050 °C aproximadamente, se inicia la segunda gran contracción, siendo más rápida (mayor pendiente del dilatograma) y de mayor magnitud la que corresponde a la mezcla de menor refractariedad, como consecuencia de que los procesos de sinterización y formación de cuarzo, son más intensos (Dilatograma I).

La importancia de orden tecnológico que adquiere el dilatograma, en zonas de temperatura comprendidas entre 1000 °C y las que se utilizan corrientemente para la elaboración de estos materiales, 1300 °C a 1500 °C, es el de revelar las zonas de rápida contracción y de estabilización de dimensiones (mesetas) o de menor velocidad de contracción, y sobre todo la máxima contracción alcanzada en cada caso.

La segunda meseta o zona de formación de cristobalita, se produce en todos los casos entre 1200 °C a

1350 °C, pero su mayor amplitud muestra el mayor contenido de cuarzo libre que queda sin reaccionar para formar mullita y que a esas temperaturas se transforma en cristobalita, como es dable observar en las mezclas cuyos dilatogramas I, III y II representan, en ese orden, el menor contenido de cuarzo y el mayor de óxido de aluminio.

CONCLUSIONES

a) La dilatometría de arcillas y de sus mezclas resulta una técnica de análisis que permite identificar la especie mineralógica que predomina y componentes menores tales como cuarzo, muscovita, pirofilita y montmorillonita.

b) Como método de identificación, el trazado de la curva que representa el C.D.D. a partir del dilatograma obtenido, es más demostrativo por su mayor sensibilidad.

c) De acuerdo a la sensibilidad de registro del dilatómetro empleado en este trabajo, dilatogramas escalonados con tres o cuatro zonas de rápida contracción comprendidas entre aproximadamente: 450 °C a 650 °C, 850 °C a 900 °C, 1050 °C a 1150 °C y 1300 °C a 1500 °C, y tres zonas de menor velocidad de contracción o zonas de estabilización de dimensiones (mesetas), comprendidas: 650 °C a 850 °C, 900 °C a 1050 °C, 1150 °C a 1300 °C, caracterizan a las arcillas con predominio de caolinita.

d) Dilatogramas con onda expansiva o sin la primera zona de rápida velocidad de contracción en el rango de temperaturas comprendido entre 500 °C a 900 °C aproximadamente, caracteriza a las arcillas de bajo contenido en caolinita, pero con regular cantidad de muscovita-illita y/o pirofilita. Además, estas arcillas poseen una zona de rápida contracción que se inicia a temperaturas del orden de los 900 °C a 1000 °C.

e) La expansión observada en algunas arcillas entre 1200 °C y 1400 °C, se debe probablemente a montmorillonitas estratificadas con illita o a illitas impuras o en vía de

transformación en montmorillonita. Al respecto, algunas bentonitas de regular contenido en montmorillonita, agregada hasta un 25 % p/p a las arcillas del tipo caolínico, no expanden en el rango de temperatura mencionado.

f) La dilatometría hasta temperaturas de 1450 °C a 1500 °C, resulta de interés para la tecnología de materiales cerámicos, por cuanto permite establecer curvas óptimas de cocción e identificar las zonas de rápida variación de dimensiones (contracciones o expansiones). Permite también conocer en forma rápida la máxima densificación en la cocción para la obtención de chamote o materiales refractarios.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Davis H.E. - J. Am. Ceram. Soc., 16, n° 5, 229-31 (1933).
- 2) Forbes D.W.A. - J. Can. Ceram. Soc., 22, 77-92 (1959).
- 3) Forbes D.W.A. - Ceramic Age, 38-41, September(1965).
- 4) Holdridge D.A. - Clay Min. Bull. 4, n° 22, 94-105 (1959).
- 5) Munier P. y Meneret J. - Bull. Soc. Franc. Ceram., Partie II, n° 7, 6-17 (1959).
- 6) Paquin P. - Bull. Groupe Franc. Argiles, 14, n° 99, 3-35 (1964).
- 7) Renault P. - L'Ind. Ceram., n° 591, 1040-1045 (1966).
- 8) Mennucci L.A. y Timpone F. - Cerámica y Cristal, 4, n° 7, 32-53 (1965).
- 9) Norma IRAM 12 508: Clasificación de Refractarios Sílico-aluminosos.

Agradecimiento: Al Dr. Teodoro Krenkel, Profesor titular del Departamento de Tecnología Química, Fac. de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, por la colaboración prestada en el estudio de difracción con Rayos X.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACION DE UN SUELO
PLASTICO CON CAL Y/O CEMENTO PORTLAND

Ing. Luis M. Fossa
Ing. Carlos A. Alemán
Sr. Oscar Arrechea

INTRODUCCION

Entre los muchos problemas a que se encuentra enfrentado el técnico vial, para dar adecuada y económica solución al proyecto de un pavimento, se encuentra la carencia de materiales de alta calidad para ser utilizados como sub-base o base del perfil resistente y a la distancia de transporte no siempre conveniente.

Dicha circunstancia obliga a contemplar la posibilidad de utilizar los disponibles en el lugar. Estos, en la mayoría de los casos, no reúnen por sí solos las condiciones mínimas indispensables para ser tomados en consideración, ya que por su textura fina, características de plasticidad y reducida resistencia al corte en condiciones normales de servicio, no soportarían con eficiencia las sollicitaciones y frecuencias debidas a la carga del tránsito.

Se plantea así la necesidad de aportar medios y elementos necesarios para mejorar o cambiar sus características, aumentando su poder de sustentación para las condiciones más desfavorables o dicho en otros términos, estudiar su estabilización.

En los últimos tiempos se ha intensificado la investigación de este problema, que sin lugar a dudas representa un factor importante en la economía de la obra vial, utilizando para ello, productos asfálticos, cal, cemento portland, etc, o la combinación de los mismos, para mencionar sólo a los más ampliamente conocidos y de factible utilización.

No entraremos a considerar en esta oportunidad, la eficiencia y posibilidades de cada uno de ellos, en cuanto a la condición de agente estabilizante se refiere, sino que nos limitaremos a los dos mencionados en último término.

En cuanto a la estabilización de suelos con cemento

portland, es mucho lo reslizado tanto en escala de laboratorio como de obra, en el país como en el extranjero. No ocurre lo mismo en lo referente a la cal, ya que recién en los últimos años, ha recibido entre nosotros cierta consideración, quizás mucho menor de lo que pueden ofrecer sus posibilidades.

Los procedimientos de estabilización de suelos con cal, resultan en cierto modo similares a los empleados en la estabilización de suelos con cemento portland, aunque pueden ser consideradas algunas variantes, debido al efecto distinto de la cal y del cemento sobre el suelo.

En el proceso de estabilización de suelos con cemento portland, la hidratación de éste produce compuestos cementantes independientes del suelo. Esta resultaría la etapa primaria de la estabilización, mientras que la cal dejada libre en el proceso de hidratación del cemento puede reaccionar con la arcilla presente en el suelo.

En el caso de suelos estabilizados con cal hidratada, el elemento fundamental de la resistencia del suelo estabilizado con el cemento estaría ausente, debido a que la acción de los componentes es débil. La resistencia en el caso de la cal sería consecuencia directa de la reacción entre ésta y la fracción arcillosa del suelo.

Hay diversas reacciones químicas que tienen lugar en este proceso de por sí complejo. En una primera etapa se produce un intercambio de bases: los iones calcio, en una concentración mayor a la estrictamente necesaria teóricamente, desplazan a los otros cationes adsorbidos por la fracción arcillosa del suelo, cambiando la densidad de la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcilla, las que en consecuencia se atraen, originando el proceso de floculación, con reducción de la plasticidad, haciendo a los suelos plásticos menos cohesivos y más trabajables.

En el caso de que el suelo sea compactado, se favorecería el desarrollo de cohesión, por las reacciones del calcio con la sílice y la alúmina que puede estar presente en la fracción coloidal del suelo, para formarse compuestos derivados de las combinaciones entre la alúmina hidratada ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), el óxido férrico hidratado ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$),

la sílice soluble y el calcio aportado por la cal. Esta acción es conocida como reacción puzolánica, de carácter lento y que proporcionaría resistencia a la mezcla, que continuaría incrementándose por las reacciones lentas entre las superficies de las partículas del suelo y el medio alcalino que lo rodea.

Por último, la absorción por el suelo del bióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera del suelo, provoca la reacción con el calcio, para formar carbonato de calcio o magnesio, de acción cementante relativamente débil. Por esta circunstancia si se desea incrementar la resistencia, deben tomarse las providencias necesarias en obra para reducir en lo posible este último proceso.

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

A los efectos de estudiar en forma comparativa la estabilización de un suelo plástico, con cal aérea hidratada en polvo, con cemento portland y con ambos productos a la vez, se utilizó un suelo de tercer horizonte, de textura fina, altamente plástico, cuyas características se indican en la planilla n.º 1.

Planilla n.º 1 (suelo de tercer horizonte)

Suelo	A
Horizonte	C
Profundidad, cm	60-100
Límite líquido	49,4
Límite plástico	23,8
Índice de plasticidad	25,6
Materia orgánica (C), %	0,097
CO_2 (como CaCO_3), %	0,3
Pasa tamiz 200, %	97,5
Clasificación	A 7-6
Índice de grupo	17

Análisis granulométrico:

Arena (mayor de 50 micrones), %	30,5
Limo (entre 50 y 5 micrones), %	60,8
Arcilla (entre 5 y 1 micrón), %	7,9
Coloides (menor de 1 micrón), %	1,0
Textura	Limo Arcilloso

Ensayo de compactación Proctor:

P.U.V.S., kg/l	1,480
Humedad óptima, %	24,8

Tipo mineralógico de la arcilla:

La determinación se realizó sobre la fracción arcilla de la muestra de sedimento, dispersada en NaOH. Se utilizó para la identificación el método de goniometría en difracción de rayos X, radiación de Cu. Se constató como único mineral del grupo de las arcillas, la presencia de illita.

Las características de la cal y del cemento portland empleados en los estudios realizados, se indican a continuación:

Planilla n° 2 (Características de la cal)

Expansión en autoclave, %	0,05
Sutileza:	
Retenido sobre tamiz n° 30	Restos
Retenido sobre tamiz n° 100, %	1,0
Retenido sobre tamiz n° 200, %	6,2
Análisis químico:	
Residuo insoluble, %	4,1
Anhidrido carbónico (CO ₂), %	3,5
Sílice soluble, %	2,2
Suma de óxidos (R ₂ O ₃), %	0,5
Cal útil, en CaO, %	61,7
Oxido de magnesio (MgO), %	0,2
Oxido de calcio (CaO), %	68,5
Pérdida por calcinación, %	23,6

Planilla nº 3 (características del cemento portland)

Fineza:	
Retenido sobre tamiz 900 mallas/cm ² , %	0,2
Retenido sobre tamiz 4900 mallas/cm ² , %	7,0
Expansión en autoclave, %	0,06
Tiempo de fraguado (Vicat):	
Iniciación	3 h 50 m
Final	5 h 50 m
Agua para pasta normal, %	26,5
Análisis químico:	
Residuo insoluble, %	0,4
Pérdida por calcinación, %	1,4
Anhídrido sulfúrico, %	1,8
Oxido de magnesio (MgO), %	1,5
Sílice soluble (SiO ₂), %	23,4
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃), %	2,8
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃), %	4,7
Oxido de calcio (CaO), %	63,3
Cal libre (en CaO), %	0,0
Oxido de sodio (Na ₂ O), %	0,67
Oxido de potasio (K ₂ O), %	0,36
Resistencia a la tracción del mortero:	
A 7 días, kg/cm ²	25,5
A 28 días, kg/cm ²	31,5
Resistencia a la compresión del mortero:	
A 7 días, kg/cm ²	320
A 28 días, kg/cm ²	450

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se inició preparando mezclas del suelo con porcentajes del 8, 10 y 12 de cemento portland, expresado éste en peso de suelo seco. Con estas mezclas, inmediatamente de preparadas, se confeccionaron probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, compactadas a la densidad y con la humedad óptima correspondiente al ensayo Proc-

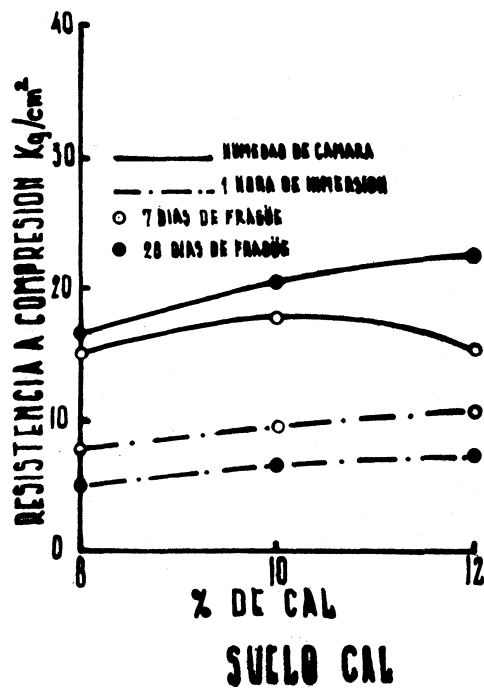
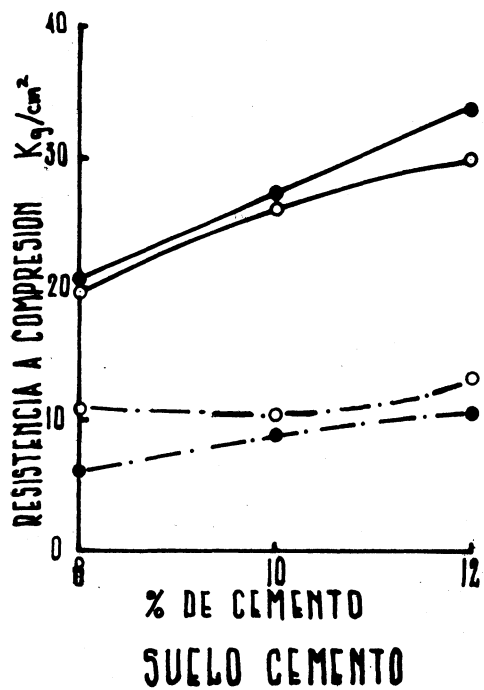
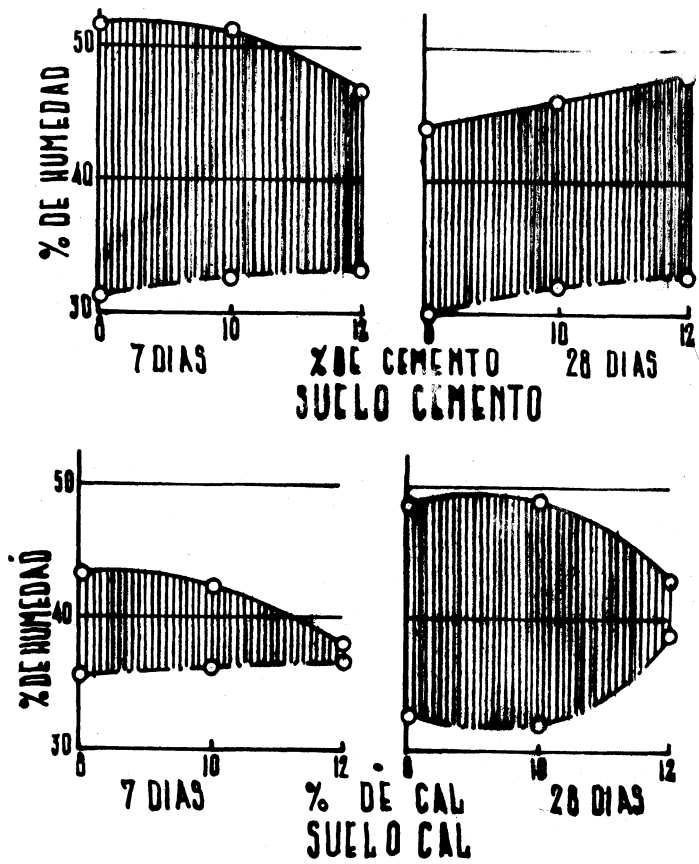
tor Normal del suelo solo. Las probetas fueron llevadas a cámara húmeda para su fragüe durante 7 y 28 días. Cumplidos dichos períodos, se las ensayó a la compresión sin confinar, en los dos estados siguientes: como eran retiradas de cámara y previa una hora de inmersión en agua. Al propio tiempo se determinó el índice plástico, aprovechando para ello el material de las probetas que ya habían sido ensayadas a la compresión.

En idéntica forma se prepararon probetas con mezclas de suelo y cal aérea hidratada con los porcentajes antes expresados, que fueron compactadas de inmediato y sometidas a idénticos ensayos y en las mismas condiciones que las indicadas para suelo cemento.

En las figuras 1 y 2 se indica la variación del índice de plasticidad de las mezclas compactadas de suelo cemento y suelo cal, para 7 y 28 días de curado y en las figuras 3 y 4 las resistencias a compresión sin confinar para las mismas mezclas compactadas y para idénticos períodos de fragüe.

De la observación de las figuras anteriores se puede deducir que, en lo que respecta a la reducción del índice de plasticidad, la cal resulta mucho más efectiva que el cemento portland a los siete días. Para veintiocho días, la corrección del índice continuó para el suelo cemento; en cambio con el suelo cal ocurrió lo contrario, es decir, se constató un aumento del índice en relación con el correspondiente a siete días. En lo que a resistencia a compresión se refiere, el cemento resulta más efectivo, tanto para siete como para veintiocho días de fragüe. Cabe hacer notar que los valores de resistencia a compresión con una hora de inmersión en agua, correspondientes a las probetas de suelo cemento para siete días de fragüe y a las de suelo cal para veintiocho días, son relativos por cuanto algunas de ellas experimentaron efectos de disgregación en agua, en todos los porcentajes para las estabilizadas con cemento y para los porcentajes menores en las estabilizadas con cal.

Para proceder a la estabilización del suelo utilizando simultáneamente cal y cemento portland, se siguieron dos criterios que pasamos a comentar. El primero consistió



Resistencia a compresión de mezclas de suelo cemento y suelo cal respectivamente.

en preparar mezclas de suelo con 2 y 4 % de cal aérea hidratada en polvo. Estas mezclas se dejaron en estado suelto, en corrección, durante siete días al ambiente, con un contenido de humedad cuatro puntos sobre la óptima de compactación Proctor del suelo solo. Cumplido dicho tiempo, se efectuó el ensayo Proctor Normal y se determinó el índice de plasticidad. Los gráficos que indican la variación de la densidad máxima y humedad óptima de los suelos corregidos, se indican en la figura 5. En ella se observa, como es lógico, un descenso de la densidad y un aumento de la humedad óptima para aumento del contenido de cal.

Cumplido el período fijado de corrección del suelo con cal, se le adicionó a cada mezcla porcentajes de cemento portland, de modo que juntamente con el porcentaje de cal que ya tenía agregado se completara el 8, 10 y 12 %, para preparar de inmediato probetas cilíndricas idénticas a las ya descritas, con la densidad y la humedad óptima correspondiente al suelo corregido con cal. Dichas probetas fueron llevadas a cámara húmeda para cumplir períodos de fragüe de siete y veintiocho días, determinándose el índice plástico y la resistencia a compresión sin confinar en los dos estados ya mencionados. Los resultados se encuentran graficados en las figuras 6 y 7 y 8 y 9 respectivamente.

En este caso, las mezclas del suelo corregido con 2 % de cal y porcentajes crecientes de cemento portland, experimentaron una reducción del índice de plasticidad más efectiva que la correspondiente a la de las mezclas de suelo corregido con 4 % de cal.

En los gráficos de las figuras 8 y 9 se verifica que la resistencia a compresión resulta, en general, un poco mayor para el suelo corregido con 2 % de cal, para las distintas condiciones en que fueron ensayadas.

Como complemento de lo anteriormente comentado, debe agregarse que se efectuaron también determinaciones de índice y resistencia a compresión, sobre el suelo solo y sobre las mezclas de suelo luego de siete días de corrección con 2 y 4 % de cal, en probetas preparadas con la densidad y humedad óptima del Proctor Normal correspondiente a cada caso, ensayadas de inmediato. Los resultados obteni-

dos fueron los siguientes:

	% de Cal		
	0	2	4
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	3,1	3,4	3,3
Índice plástico	25,6	25,8	16,2

Las probetas que debían ensayarse previa una hora de inmersión, se disgregaron, en todos los casos, al poco tiempo de sumergidas en agua.

El segundo criterio adoptado, consistió en mezclar al mismo tiempo el suelo con 2 y 4 % de cal y porcentajes crecientes de cemento portland, hasta completar con ambos, el 8, 10 y 12 %, preparando de inmediato las probetas a la densidad y con la humedad óptima correspondiente al Proctor Normal del suelo solo.

Los ensayos efectuados sobre estas probetas después de períodos de fragüe de siete y veintiocho días, fueron los mismos ya comentados para el primer criterio adoptado.

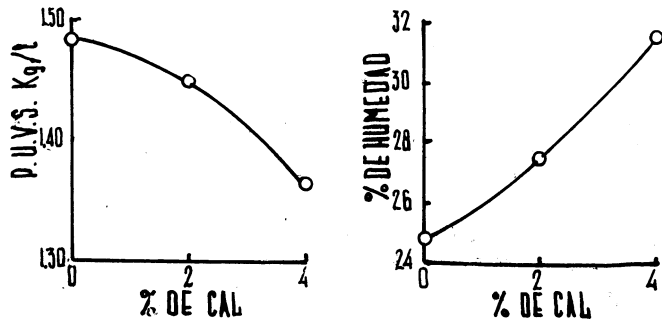
Los resultados de índice están indicados en los gráficos de las figuras 10 y 11 y los de resistencia a compresión en las figuras 12 y 13.

Los índices de plasticidad determinados para ambas mezclas, decrecen con el aumento del porcentaje de cemento utilizado, tanto para siete como para veintiocho días de fragüe, aunque los valores correspondientes a veintiocho días resultaron en ambos casos, algo superiores a los de siete días, siendo esto más manifiesto en las mezclas con 4 % de cal.

En cuanto a resistencia a compresión sin confinar, los resultados más favorables se obtuvieron para las mezclas a las que se incorporó el 2 % de cal, conjuntamente con los porcentajes de cemento, como puede observarse claramente en los gráficos correspondientes (figuras 12 y 13).

Como resumen final de todos los resultados obtenidos, se incluye la planilla n^o 4 y el gráfico de la figura 14, correspondiente a límites líquidos e índices de plasticidad.

De su observación se desprende que los resultados



	% DE CAL		
	0	2	4
P.U.V.S.	1.480	1.450	1.368
Hum. Optima	24.8	27.5	31.6

Fig. 5

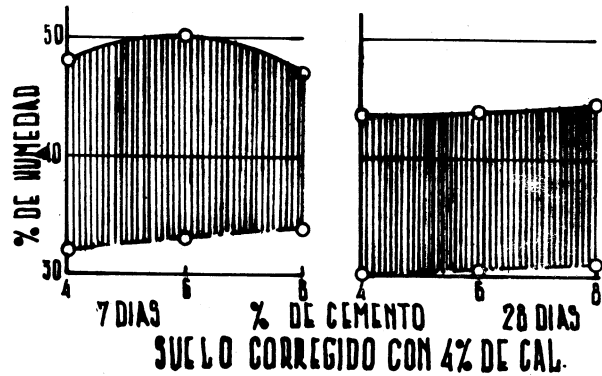
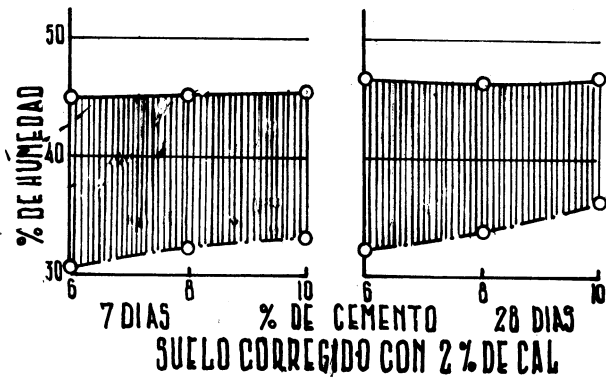


Fig. 6

Fig. 7

Indice plástico. Límite líquido en línea llena y límite plástico en línea punteada.

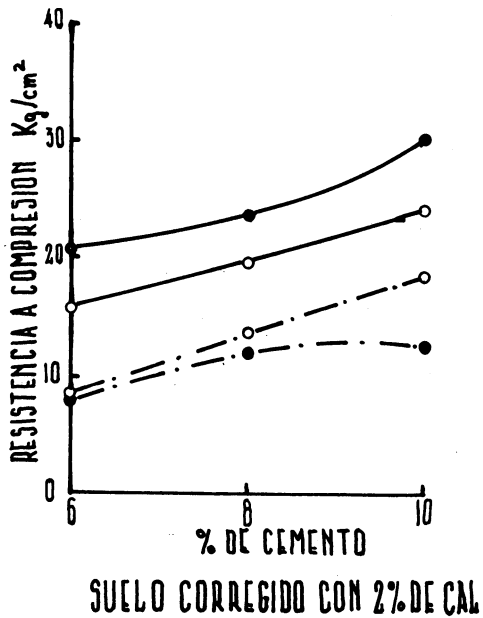


Fig. 8

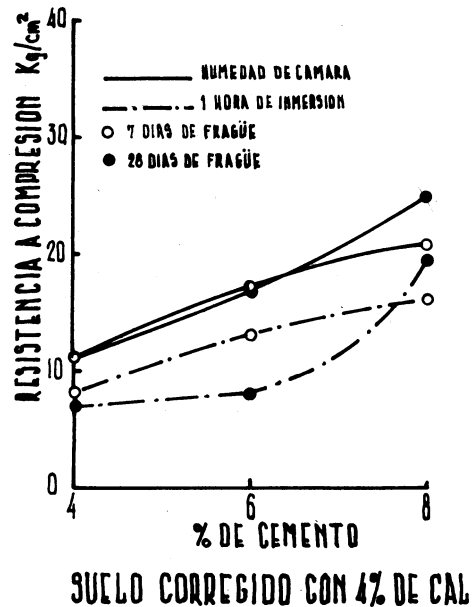


Fig. 9

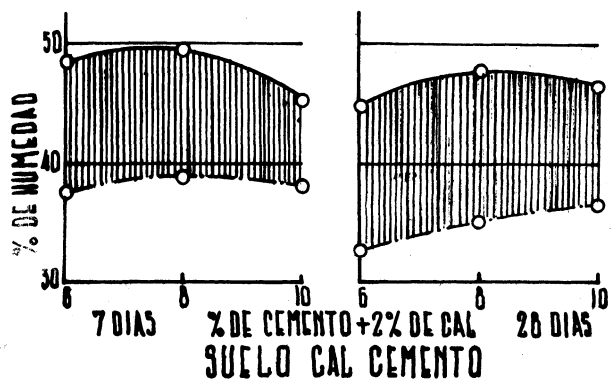


Fig. 10

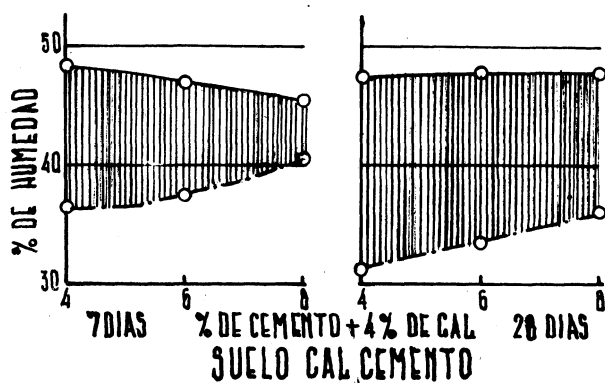


Fig. 11

Indice plástico. La línea llena indica el límite líquido, y la punteada, el límite plástico.

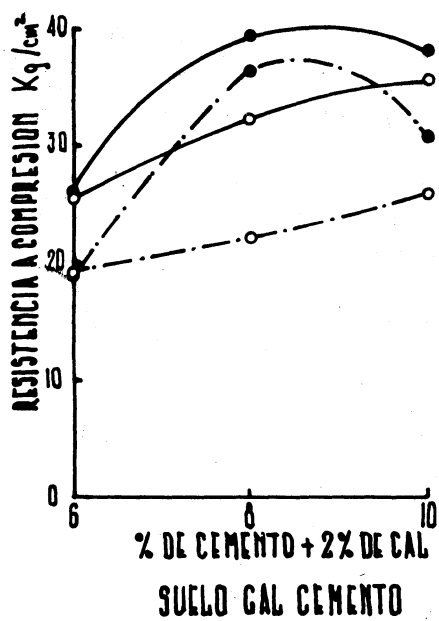


Fig. 12

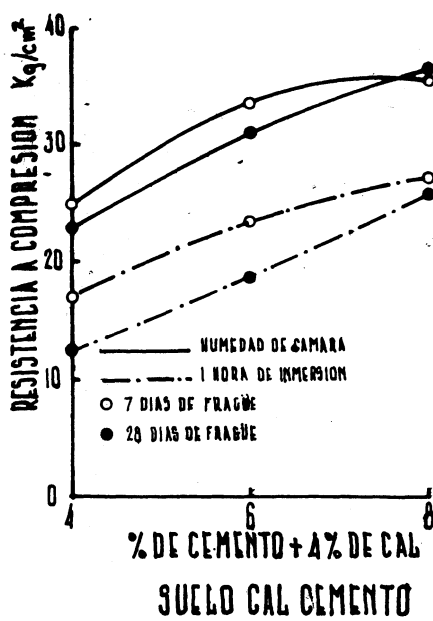
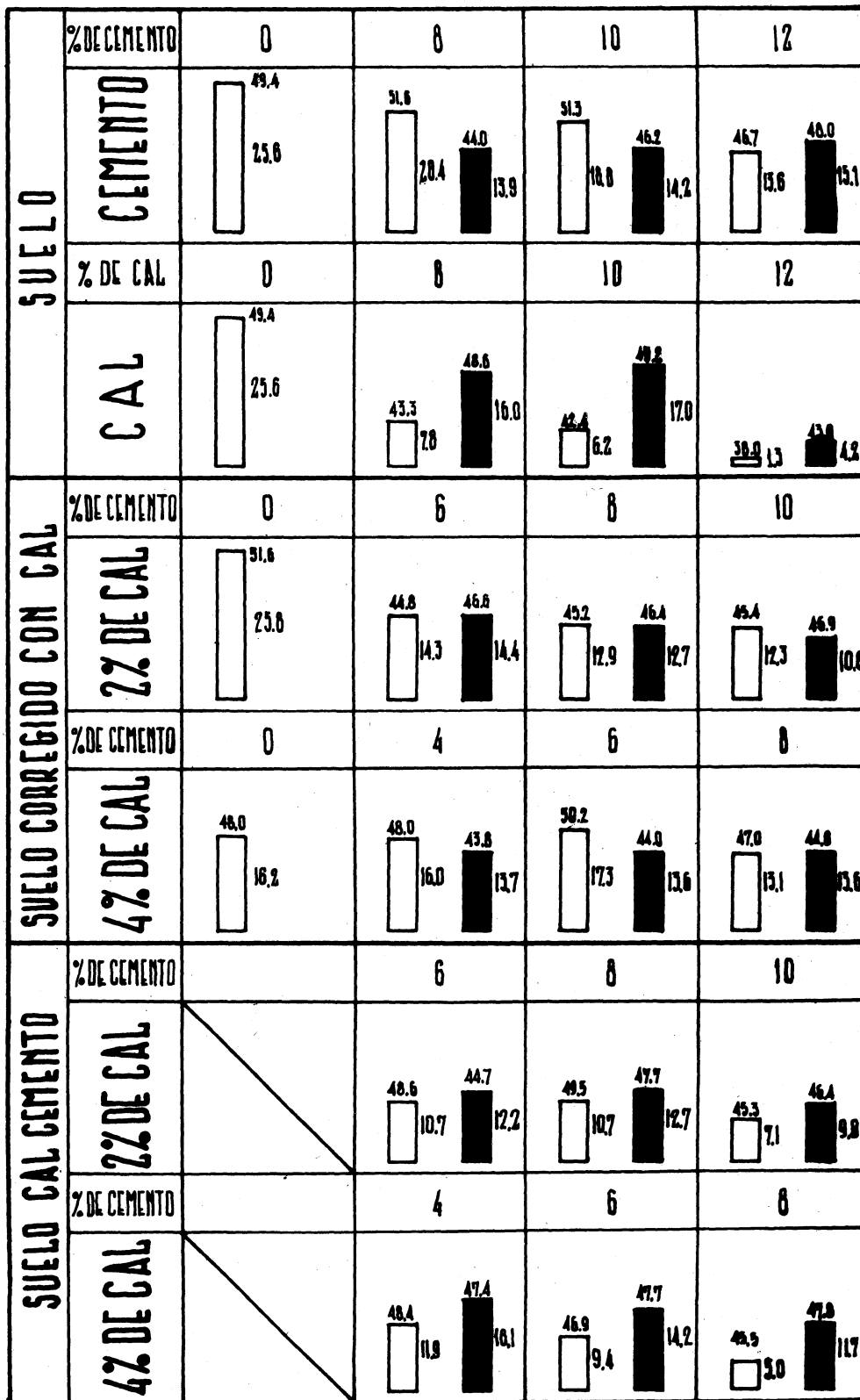


Fig. 13



□ 7 DIAS

■ 28 DIAS

Fig. 14

		7 D I A S D E F R A G Ü E RESISTENCIAS					2 8 D I A S D E F R A G Ü E RESISTENCIAS				
Suelo		Hum.de 1 hora		L.L.	I.P.	Absr.	Hum.de 1 hora		L.L.	I.P.	Abs.
		cámara	inmer.				cámara	inmer.			
Suelo cemento	8%	19.8	10.9	51.6	20.4	6.0	20.7	6.1	44.0	13.9	4.5
	10%	26.2	10.4	51.3	20.4	6.5	27.4	8.8	46.2	14.2	4.2
	12%	30.0	13.2	46.7	13.6	6.5	33.9	10.5	48.0	15.1	4.7
Suelo cal	8%	15.0	7.9	43.3	7.8	3.7	16.6	5.0	48.6	16.0	5.6
	10%	17.7	9.5	42.2	6.2	3.9	20.4	6.6	49.2	17.0	4.9
	12%	15.4	10.7	38.0	1.5	3.9	22.5	7.3	43.0	4.2	4.0
Suelo corregido con cal	6% Cem.	15.8	8.5	44.8	14.3	3.5	20.8	7.8	46.6	14.4	3.0
	8% Cem.	19.6	13.6	45.2	12.9	4.6	23.6	11.9	46.4	12.7	4.3
	10% Cem.	24.0	18.5	45.4	12.3	3.6	30.2	12.4	46.9	10.6	4.6
	4% Cem.	11.2	8.2	48.0	16.0	2.2	11.2	7.1	43.8	13.7	2.3
	6% Cem.	17.2	13.1	50.2	17.3	2.8	16.8	8.1	44.0	13.6	2.4
	8% Cem.	20.9	16.2	47.0	13.1	2.7	24.8	19.5	46.6	13.6	3.4
Suelo cal cemento	6% Cem.	25.5	19.0	48.6	10.7	3.9	26.2	18.9	44.7	12.2	4.2
	8% Cem.	32.3	22.1	49.5	10.7	4.6	39.4	36.5	47.7	12.7	4.9
	10% Cem.	35.6	25.8	45.3	7.1	4.0	35.7	30.7	46.4	9.9	4.1
	4% Cem.	25.0	17.2	48.4	11.9	3.9	22.9	12.5	47.4	16.1	4.0
	6% Cem.	33.5	23.5	46.9	9.4	3.9	31.1	18.6	47.7	14.2	3.9
	8% Cem.	35.5	27.2	45.5	5.0	3.3	36.5	25.8	47.8	11.7	3.2
Suelo solo		3.1	rotas	49.4	24.3						

Las resistencias están expresadas en kg/cm². La absorción está expresada en % de peso de suelo seco tomada a partir de la humedad de compactación.-

más favorables, en cuanto a índice de plasticidad y resistencia, se obtuvieron para las mezclas con adición conjunta de 2 % de cal y cemento portland, compactadas de inmediato.

La caída de resistencia observada en las probetas que tuvieron un período de fragüe de veintiocho días y ensayadas en las mismas condiciones, así como también el aumento del índice plástico en algunos casos, demuestra que se han producido modificaciones en sentido inverso al previsto. Esto pone en evidencia que la acción primordial de la cal y del cemento portland, no es solamente la de saturar de calcio el colóide del suelo y favorecer la formación de una matriz estructural de cohesión, sino que deben existir algunos otros fenómenos que desvían el incremento de la resistencia del suelo tratado.

Sospechamos que la calidad alcalina del medio estabilizante es un factor agresivo para las partículas del suelo y que debe seguir actuando a velocidad proporcional a la alcalinidad y cuyas consecuencias son las que expresan los resultados de las experiencias de índice y resistencia en las muestras estacionadas en cámara húmeda a veintiocho días, con respecto a las de siete días. Ensayos con mayor tiempo de fragüe, como así también verificaciones de orden químico y experimental, permitirán posiblemente, determinar a posteriori la naturaleza de este fenómeno y su continuación o estancamiento con el correr del tiempo.

Conclusiones

1.- El índice plástico de las mezclas de suelo con cemento, decrece con el aumento del porcentaje de cemento incorporado y continúa con el tiempo. Este decrecimiento es más marcado para porcentajes equivalentes de cal aérea, pero en este último caso el índice tiende a aumentar nuevamente con el tiempo.

2.- En el caso de suelos plásticos, la incorporación a los mismos de cal o de cemento portland, en porcentajes económicos, no conduciría a la obtención de valores adecuados.

3.- Para la dosificación de suelo plástico-cal-ce-

mento, sería necesario determinar además de los porcentajes convenientes de cemento portland, el porcentaje de cal más beneficioso, ya que en el caso estudiado el incremento de ésta resultó desfavorable en cierta medida.

4.- La estabilización con cemento del suelo que ha sido previamente corregido con cal, ofrece mayor constancia del valor del índice para siete y veintiocho días, que las correspondientes a las de las mezclas preparadas con la incorporación de cal y cemento al mismo tiempo. En cambio la resistencia, por el contrario, resulta mayor en este último caso.

5.- En la prosecución de los estudios iniciados en este trabajo, entendemos que resultaría conveniente complementar los mismos, con los estudios químicos que permitan explicar la razón de algunos valores hallados y que orienten en las técnicas a seguir, haciendo a la vez extensivas las determinaciones a otros suelos.

BIBLIGRAFIA

- 1.- Davidson D. T., Mateos M. y Barnes H. F.: Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soil with chemical additives. Highway Research Board, boletín 262, 1960.
- 2.- Eales J. L. and Grimm R. E.: Reaction of hidrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board, Bull. 262, 1960.
- 3.- Ladd G. C., Mohand E. C. and Lambe T. W.: Recent soil lime research at the Massachusetts Institute of Tecnology. Highway Research Board, Bull. 262, 1960.
- 4.- Dumbleton D. J.: Lime stabilized soil for road construction in Great Britain. Road and Road Construction, 1962.
- 5.- Remus M. D. and Davidson D. T.: Relation of strength to composition and density of lime treated clayed soil. High-

way Research Board, Bull. 304, 1961.

- 6.- Lilli Felix J.: La estabilización de suelos con cal en el Estado de Texas. Sus posibilidades en la Pcia. de Buenos Aires. Revista de la Direc. de Vialidad de la Prov. de Bs. As., nº 17, oct. 1961.
- 7.- Duarte R. A. y Marchetti C. F.: Influencia del agregado de cal en las mezclas de suelo cemento. Revista de la Direc. de Vialidad de la Prov. de Bs. As., nº 17, oct. 1961.

NUEVOS CRITERIOS SOBRE ESPECIFICACIONES DE
ASFALTOS PARA USO VIAL

Dr. Alfredo Pinilla

Serie II, n° 143

Nota.- Trabajo presentado al I Simposio sobre Pesquisas Rodoviarias, Rio de Janeiro, 16/21 de agosto de 1965. Ha sido publicado anteriormente por el Instituto de Pesquisas Rodoviarias (Conselho Nacional de Pesquisas, Brasil).

INTRODUCCION

El comportamiento en servicio de una mezcla asfáltica está vinculado a gran número de factores que dependen del tipo de superficie de rodamiento, es decir, del sistema agregado pétreo-asfalto y para un sistema dado, de las condiciones locales de tránsito, acciones climáticas, etc., y de la durabilidad del medio ligante, es decir, del betún en sí.

Entenderemos por durabilidad del betún, la característica del mismo de conservar por largos períodos sus propiedades ligantes, impermeables y cohesivas, de modo que la permanencia de las mismas, asegure un buen comportamiento útil de la mezcla en condiciones normales de servicio (1, 2, 3).

En consecuencia, el problema de encarar el estudio de la calidad de un betún para una mezcla asfáltica debe vincularse a dos aspectos:

- 1ª) Que el betún sea adecuado a la mezcla que se proyecta o construye en lo referente a sus propiedades reológicas.
- 2ª) Que el betún conserve sus propiedades específicas durante la preparación, colocación y compactación de la mezcla y posteriormente en las condiciones de servicio.

La diversa variedad de mezclas asfálticas empleadas en la actualidad hace que el tipo de betún y sobre todo su consistencia, sea muy variable, así por ejemplo, en una mezcla tipo mastic asfáltico, se emplea un betún de penetración 20/30, en ciertas bases y carpetas de penetración 40/50 y en los concretos asfálticos convencionales 70/85 o 85/100. En otras mezclas como los macadams se emplea asfalto de penetración 150, similar a la utilizada en las mezclas Damman.

Uno de los problemas planteados al técnico del Laboratorio vial, es la selección de los ensayos y especifica-

ciones más convenientes que garanticen la durabilidad del betón en servicio.

Para una mezcla de composición definida, el betón se seleccionará entre los disponibles en el mercado y dentro de las especificaciones vigentes; para ello dicha especificación y las normas de ensayos deberán calificar un material garantizando su comportamiento en las condiciones de uso. Al establecer las especificaciones, éstas deberán reunir las siguientes condiciones básicas:

- 1a) será útil a los propósitos buscados y completa en si
- 2a) los ensayos o técnicas serán adecuados y de fácil realización
- 3a) será suficientemente amplia contemplando ciertas tolerancias

Examinando estos requisitos, diremos que el primero parecería obvio comentarlo, pero frecuentemente se observa en ciertas especificaciones la inclusión y repetición de ensayos que no tienen un propósito definido y que con frecuencia confunden o dificultan la interpretación del análisis. Por otra parte, deberán estar incluidas todas aquellas determinaciones de real importancia; pero no incluirá ensayos sin significado ni excluirá otros necesarios.

La incorporación en las especificaciones de técnicas de ensayos sencillas, permitirá obtener los valores más rápidamente, sin equipo costoso y que se encuentre disponible en la mayoría de los laboratorios. Ello no significa que se propugne el empleo de métodos o técnicas rutinarias sin un significado físico o químico claro, pero sí aquellas que permitan eliminar materiales de comportamiento anormal.

La tercera condición referente a la amplitud en la especificación, se vincula al ámbito permisible de variación de las características del material; evitando caer en una limitación exagerada en los valores que puedan alterar los procesos de elaboración, a veces dificultar las técnicas de ensayo y, en ciertos casos, aumentar los costos de producción.

Si se estudia a través del tiempo, el origen y desa-

rollo de las especificaciones y métodos de ensayo de los materiales asfálticos para uso vial, se encuentra que hace 50 años el número de ensayos propuestos era comparativamente pequeño y seguramente dicho número y tipo de ensayo bastó para el contralor en esa época. En efecto, el número de asfaltos naturales y de residuos de petróleo disponibles en esa época era reducido y el buen comportamiento de los mismos no exigió otros requisitos que los especificados entonces exigibles. La expansión de la construcción bituminosa a través de los últimos 35 años, determinó la aparición en el mercado mundial de nuevos tipos de asfaltos derivados de petróleos, cuyo comportamiento no era conocido y que caían fuera de los tradicionales de Méjico, California y Venezuela (1) (2). Ello determinó a muchos laboratorios viales a exigir nuevos ensayos, que permitieran seleccionar los asfaltos más aptos por su durabilidad. Esto dió origen a especificaciones que no sólo consideraban determinados ensayos que enumeraremos más adelante, sino a incluir requisitos vinculados al origen del asfalto referido a la base del petróleo del cual derivan sino que algunas especificaciones, como la de nuestro país (3), exigen se indique que han sido elaborados por determinado proceso de fabricación. Tal requisito fue incluido en su oportunidad ante la imposibilidad de determinar el método de elaboración por las técnicas de laboratorio corrientes y por nuestra experiencia argentina sobre el problema. En la actualidad, la mayor parte de las especificaciones vigentes en distintos países de Europa y EE. UU. y también en Sud América, Africa y Australia, comprenden una serie de ensayos, algunos tradicionales que miden o pretenden medir ciertas propiedades físicas, así como el cambio de dichas propiedades durante la elaboración de la mezcla y otras características vinculadas a la composición química, adhesión, etc. (4) (5) (6).

Dichos ensayos podrían ser agrupados así:

a) Ensayos físicos.

Penetración (a varias temperaturas y tiempos)
Punto de ablandamiento (según distintas técnicas)
Viscosidad (a varias temperaturas)
Ductilidad (a varias temperaturas y velocidades)
Punto de rotura (Fraas y otros)

Ensayos reológicos

Peso específico

- b) Ensayos de permanencia de las propiedades después de calentamiento.

Pérdida por calentamiento (ASTM D 6-39)

Pérdida por calentamiento en película delgada (Bureau of Public Roads)

Ensayos de envejecimiento en microfilm

Características mecánicas luego del calentamiento (penetración, ductilidad, viscosidad, punto de ablandamiento)

- c) Ensayos de caracterización de la susceptibilidad térmica.

Índice de penetración (Pfeiffer)

Relación de penetración (a diferentes temperaturas y tiempos)

- d) Ensayos químicos

Solubilidad en tetracloruro de carbono

Solubilidad en sulfuro de carbono

Solubilidad en otros solventes

Asfaltenos

Cenizas

Ensayo de Oliensis

Equivalente heptano-xileno

Contenido de agua

Parafina

- e) Otros ensayos.

Punto de inflamación

Tendencia a formar espuma

El examen del número total de ensayos que se incluyen en el cuadro da una idea de la gran cantidad y diversidad de los mismos. Sin embargo, solamente un número determinado de ellos aparecen en la mayoría de las especificaciones (7) (8) (9).

Dentro de los ensayos físicos (medidas de consistencia y de propiedades mecánicas) en general, el ensayo de per-

netración aparece en todas las especificaciones europeas y norteamericanas así como también en las de Sud América (Venezuela - Perú, Brasil, Uruguay, Chile, Argentina); en cambio otro ensayo de gran uso como el de punto de ablandamiento, es incluido en gran número de especificaciones, pero no se incluye en otras como en Canadá, Rusia y Venezuela.

La ductilidad y el punto de rotura Fraas, aparecen en especificaciones de gran número de estados, sobre todo el primero, pero no se incluyen en la especificación de Holanda (10) ni en la de Nueva Zelandia; pero el segundo o ensayo de Fraas sólo es exigido en ciertos países.

En la misma forma podría ser comentada la inclusión de los ensayos de pérdida por calentamiento (ASTM D 6-39 T) que se encuentra en gran número de especificaciones; en tanto que la modificación del Bureau of Public Roads (11, 12) ahora incluida como norma AASHTO tentativa y ASTM D 1754-63 T sólo se indica en limitado número de países. Este ensayo permite medir el grado de alteración experimentado por el betún durante el mezclado en usina (16, 17).

Los ensayos de susceptibilidad como el índice de penetración o las relaciones de penetración, solamente han sido incluidos en ciertos países y en general tienen poca difusión, aunque han sido considerados en Brasil y Argentina (3).

A su vez, de los ensayos químicos el más difundido en las especificaciones, es el de solubilidad en sulfuro de carbono, siguiéndole en orden de importancia el de solubilidad en tetracloruro de carbono y el de contenido de parafina.

El ensayo de heterogeneidad de la mancha de Oliensis (14) y el de heptano-xileno se encuentran en un número limitado de especificaciones, pese a su importancia. En EE.UU. las especificaciones Federales, las de los estados de New York, New Jersey y del Cuerpo de Ingenieros los incluyen como una exigencia en las mismas (13). A su vez, ensayos de reducida significación en lo referente a calidad, como el punto de inflamación, se encuentran incluidos en un número apreciable de especificaciones (15).

Si se estudia el origen de las especificaciones vigentes en muchos países, se encuentra que gran número de ellas han sido transcritas de la ASTM no sólo por la autoridad técnica de ese Instituto sino por la vasta difusión dada a sus técnicas y métodos. Así se explica la difusión de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento (anillo y esfera) en las especificaciones y en la comercialización de los productos. Estos ensayos tuvieron su origen cuando la técnica de los laboratorios era aún precaria e incipiente.

La necesidad de estudiar y rever las especificaciones vigentes sobre asfaltos en EE.UU. en los últimos años determinó la formación de comisiones especiales que por iniciativa del Highway Research Board y con la colaboración del Asphalt Institute, AASHO, U.S. Bureau of Public Roads y otras organizaciones, se abocaron al estudio de este tema. Como consecuencia de esos estudios, Griffith (31) recientemente ha destacado la importancia de la necesidad de una especificación racional para los asfaltos, proponiendo una como tentativa, que será comentada más adelante. Opiniones similares se encuentran en publicaciones de Europa, aparecidas en los últimos años ya sea en Holanda, como en Alemania y Francia.

El objeto de este estudio, es informar sobre las nuevas tendencias y criterios en la preparación de normas y especificaciones de materiales asfálticos empleados en la preparación de mezclas en caliente. Mediante el estudio de los factores que afectan el comportamiento del betún durante su mezcla en usina y en el camino, con criterio racional y con base científica, se propenderá a lograr materiales que brinden estructuras de adecuadas condiciones de fluencia y de durabilidad.

Las presentes recomendaciones se encuentran en estudio adelantado en el LEMIT y los resultados de las mismas, que en parte se adelantan en este trabajo, servirán de base para la preparación de las futuras normas y especificaciones.

RELACION ENTRE LAS ESPECIFICACIONES DE MATERIALES ASFALTICOS Y SU COMPORTAMIENTO EN CONDICIONES DE SERVICIO Y PREPARACION DE LA MEZCLA ASFALTICA

Si consideramos que la función primordial del betón en las mezclas asfálticas es actuar como ligante impermeable que cementa los agregados pétreos, las propiedades de ese adhesivo estarán relacionadas con sus propiedades físico-mecánicas que regulan su comportamiento bajo esfuerzos. Las condiciones básicas a estudiar en el caso de un betón asfáltico que se emplea en una mezcla asfáltica, han sido enunciadas por Lee and Nicholas (18) y se refieren a tres aspectos del problema:

- 1a) Características reológicas
- 2a) Durabilidad en las condiciones de servicio
- 3a) Adhesión en presencia de agua

Es evidente que los tres factores tienen notable influencia en la vida útil de la estructura, pero si consideramos que el fenómeno de la adherencia en presencia de agua está fundamentalmente gobernado por la naturaleza del agregado pétreo, aunque la consistencia del ligante influya en ciertos casos en el fenómeno (19, 20), es evidente que los factores más importantes a considerar se refieren al comportamiento mecánico y a la durabilidad.

Pasaremos ahora a examinar las propiedades reológicas y su relación con las especificaciones y más adelante, las relacionaremos con la durabilidad.

CARACTERISTICAS REOLOGICAS

Los betunes asfálticos derivados del petróleo se consideran como cuerpos visco-elásticos, es decir, materiales cuyo comportamiento varía desde el sólido elástico al líquido viscoso, de acuerdo al tiempo de aplicación del esfuerzo y a las condiciones en que el mismo se aplica en lo referente a temperatura.

A bajas temperaturas, 0°C o menores, y reducidos

tiempos de aplicación del esfuerzo, los betunes de pavimentación se asemejan a un sólido elástico; a altas temperaturas (50-60°C) y grandes tiempos de aplicación de la carga, se asemejan a un líquido viscoso newtoniano. Las condiciones normales de servicio caen en una zona intermedia y entonces, el comportamiento es más complejo y existen efectos superpuestos del comportamiento elástico y del viscoso.

La vinculación de esfuerzo a deformación en estos materiales, ha sido estudiada por van der Poel (21) (22) y esos estudios, han permitido la definición de un módulo de rigidez (Stiffness) que vendría a ser un módulo de Young generalizado, para el caso de los betunes asfálticos, es decir, la relación esfuerzo-deformación.

El módulo de rigidez aplicado a betunes es independiente de la magnitud del esfuerzo, pero a diferencia de otros módulos varía con la temperatura y con el tiempo de aplicación de la carga. Si el betún se encuentra en el campo elástico, se cumplirá la relación:

$$(1) S = E \text{ (a bajas temperaturas)}$$

donde S es el módulo de rigidez (Stiffness)

E es el módulo de elasticidad

se observa que S es independiente del tiempo de aplicación del esfuerzo. Al aumentar la temperatura y si el material bituminoso escurre como un líquido newtoniano, se cumplirá la relación:

$$(2) S = \frac{3 \eta}{t} \text{ (a altas temperaturas)}$$

en la cual:

η es la viscosidad del material a la temperatura considerada

t es el tiempo de aplicación del esfuerzo

se observará pues, que en un gráfico $\log S - \log t$, a cada temperatura le corresponderá una curva distinta; en la región elástica (baja temperatura, reducido tiempo de aplicación del esfuerzo) se tendrá una recta paralela a las abscisas; en el campo viscoso, una recta con una inclinación de 45°.

La medida de S se puede determinar por dos tipos de aparatos; en el campo viscoso se emplea el microviscosímetro, desarrollado por Griffin y colaboradores (23) (24) u otros, En el campo elástico, por medio del microelastómetro, desarrollado por Labout (25) y por otros métodos similares. En este aparato, que opera con pequeñas cantidades de muestra y reducidos tiempos de aplicación de la carga; la máxima amplitud de la vibración ocurre a la frecuencia de resonancia; el módulo de rigidez será:

$$(3) S = \frac{N^2}{c} \quad (\text{a temperatura constante})$$

donde N : es la frecuencia de resonancia

c : es la constante del aparato

Un ábaco desarrollado por van der Poel en base a numerosos ensayos experimentales, permite calcular en base a la penetración y el punto de ablandamiento para una temperatura dada y un tiempo determinado el valor S y también la viscosidad.

Desde el punto de vista práctico y considerando el comportamiento mecánico en servicio, dos son los aspectos que interesan en un asfalto para caminos: que tenga una reducida o escasa deformabilidad y que no quiebre o fracture a baja temperatura. A su vez, como muchos otros materiales, las mezclas asfálticas sufren efectos de fatiga. Esta última estaría relacionada con la composición de la mezcla y también con la rigidez del betún en las condiciones de temperatura y tiempo de aplicación del esfuerzo (26).

A su vez, desde el punto de vista de la preparación de la mezcla, colocación y compactación en obra, así como de su riego (en los casos que se aplica en esta forma), el betún asfáltico deberá tener consistencia adecuada que permita la realización normal de las operaciones enunciadas. En resumen, las propiedades reológicas del betún interesan en las siguientes condiciones:

- a) Durante el mezclado en usina
- b) Durante el riego
- c) Durante la compactación
- d) Durante las condiciones de servicio

Características reológicas durante la mezcla o riego y la compactación

Consideremos primeramente la viscosidad o consistencia del material en las condiciones de mezclado en usina. Según recomendaciones del Instituto del Asfalto (27) la viscosidad óptima en la mezcla sería de 75 a 150 segundos Saybolt Furol y las temperaturas óptimas del betún serían aquellas a las cuales les correspondieran esas viscosidades. Similares consideraciones hace la norma canadiense, pero otras normas como la británica (28) u otros autores como Abrahams (29), no mencionan viscosidades, sino intervalos de temperatura. Para Dormon y Krom dicho valor de viscosidad óptimo sería de 200 C Stokes.

Es evidente que el betún en el mezclador debe estar lo suficientemente flúido como para que la mezcla se realice correctamente y además que la temperatura alcanzada, no altere en forma sensible las características del asfalto. A su vez la mezcla será correcta y estará a una temperatura que permita su traslado a la obra, sin que se produzca drenado o segregación del agregado pétreo.

Es evidente que no puede existir una temperatura fija de mezclado en usina, sino un intervalo de viscosidades, lo cual deriva del hecho de que todos los betunes tienen distinta susceptibilidad térmica y que betunes de igual penetración, tienen distinta consistencia a altas temperaturas.

A continuación, damos los valores de variación de la viscosidad de tres asfaltos entre las temperaturas de 130 y 160°C, para materiales de penetración 75 a 25°C, ensayados en el LEMIT:

CUADRO Nº 1

Temperatura °C	Viscosidad cinemática,		Stokes
	Asfalto GB	Asfalto CR	Asfalto V
130	5,7	14,0	6,2
140	3,4	7,6	3,9
150	2,3	5,2	2,7
160	1,5	3,4	1,7

La medida de S se puede determinar por dos tipos de aparatos; en el campo viscoso se emplea el microviscosímetro, desarrollado por Griffin y colaboradores (23) (24) u otros, En el campo elástico, por medio del microelastómetro, desarrollado por Labout (25) y por otros métodos similares. En este aparato, que opera con pequeñas cantidades de muestra y reducidos tiempos de aplicación de la carga; la máxima amplitud de la vibración ocurre a la frecuencia de resonancia; el módulo de rigidez será:

$$(3) S = \frac{\nu^2}{c} \quad (\text{a temperatura constante})$$

donde ν : es la frecuencia de resonancia

c : es la constante del aparato

Un ábaco desarrollado por van der Poel en base a numerosos ensayos experimentales, permite calcular en base a la penetración y el punto de ablandamiento para una temperatura dada y un tiempo determinado el valor S y también la viscosidad.

Desde el punto de vista práctico y considerando el comportamiento mecánico en servicio, dos son los aspectos que interesan en un asfalto para caminos: que tenga una reducida o escasa deformabilidad y que no quiebre o fracture a baja temperatura. A su vez, como muchos otros materiales, las mezclas asfálticas sufren efectos de fatiga. Esta última estaría relacionada con la composición de la mezcla y también con la rigidez del betún en las condiciones de temperatura y tiempo de aplicación del esfuerzo (26).

A su vez, desde el punto de vista de la preparación de la mezcla, colocación y compactación en obra, así como de su riego (en los casos que se aplica en esta forma), el betún asfáltico deberá tener consistencia adecuada que permita la realización normal de las operaciones enunciadas. En resumen, las propiedades reológicas del betún interesan en las siguientes condiciones:

- a) Durante el mezclado en usina *
- b) Durante el riego
- c) Durante la compactación
- d) Durante las condiciones de servicio

Características reológicas durante la mezcla o riego y la compactación

Consideremos primeramente la viscosidad o consistencia del material en las condiciones de mezclado en usina. Según recomendaciones del Instituto del Asfalto (27) la viscosidad óptima en la mezcla sería de 75 a 150 segundos Saybolt Furol y las temperaturas óptimas del betún serían aquellas a las cuales les correspondieran esas viscosidades. Similares consideraciones hace la norma canadiense, pero otras normas como la británica (28) u otros autores como Abrahams (29), no mencionan viscosidades, sino intervalos de temperatura. Para Dormon y Krom dicho valor de viscosidad óptimo sería de 200 C Stokes.

Es evidente que el betún en el mezclador debe estar lo suficientemente flúido como para que la mezcla se realice correctamente y además que la temperatura alcanzada, no altere en forma sensible las características del asfalto. A su vez la mezcla será correcta y estará a una temperatura que permita su traslado a la obra, sin que se produzca drenado o segregación del agregado pétreo.

Es evidente que no puede existir una temperatura fija de mezclado en usina, sino un intervalo de viscosidades, lo cual deriva del hecho de que todos los betunes tienen distinta susceptibilidad térmica y que betunes de igual penetración, tienen distinta consistencia a altas temperaturas.

A continuación, damos los valores de variación de la viscosidad de tres asfaltos entre las temperaturas de 130 y 160°C, para materiales de penetración 75 a 25°C, ensayados en el LEMIT:

CUADRO N° 1

Temperatura °C	Viscosidad cinemática,		Stokes
	Asfalto CB	Asfalto CR	Asfalto V
130	5,7	14,0	6,2
140	3,4	7,6	3,9
150	2,3	5,2	2,7
160	1,5	3,4	1,7

Este cuadro muestra dos aspectos importantes del problema:

- 1º) que asfaltos de igual penetración a 25°C tienen muy distinta consistencia a temperaturas elevadas.
- 2º) que la fijación de una temperatura de mezclado, sólo puede hacerse si se conoce la curva de susceptibilidad térmica del material en el rango que se considera.

Lo expuesto hasta el presente, indica la necesidad de incluir en las especificaciones un valor que exprese la viscosidad del material a altas temperaturas. Este hecho ha sido considerado por el Instituto del Asfalto de EE.UU. hace algún tiempo y ha motivado la inclusión en algunas especificaciones como la del Estado de California (32) y deberá estudiarse su inclusión por ser de verdadera importancia.

Consideraciones similares son válidas si el betún se emplea en riegos, habrá que fijar una viscosidad o medida de consistencia que garantice que el material tenga la fluidez adecuada en las condiciones de trabajo.

Otro aspecto importante del problema es conocer la viscosidad que debe tener el betún en el momento de la compactación y la colocación. Si la temperatura de mezclado ha sido correcta y el material se aplica con los medios mecánicos adecuados en la distribución de la mezcla, no existen problemas relacionados con la viscosidad del betún, salvo que el pastón se haya enfriado considerablemente.

En el aspecto de la compactación el problema puede ser distinto; bajo la acción del cilindrado la densidad de la mezcla se incrementa hasta el valor deseado, acercándose al valor teórico.

Como el contenido de vacíos finales, depende en buena parte de la compactación alcanzada y los vacíos están relacionados estrechamente con la durabilidad (30), es evidente que la compactación es una operación de importancia fundamental en la futura vida útil del pavimento.

Frecuentemente los manuales o pliegos de condiciones indican temperaturas óptimas de compactación, hecho que infie-

re un error de concepto, ya que si no se conoce la susceptibilidad térmica no puede recomendarse una misma temperatura para betunes de distinto origen y proceso de elaboración, aunque tengan la misma penetración a 25°C.

Dormon y Krom estiman que la viscosidad del betún a la temperatura de compactación estará en un valor del orden de 20 000 C Stokes. En nuestros ensayos sobre betunes argentinos y extranjeros de tipo newtoniano y penetración a 25°C comprendida entre 62 y 85, las temperaturas para lograr una viscosidad de 20 000 C Stokes estaban en el límite estrecho de 78 y 88°C.

Por lo expuesto, se encuentra que siguiendo el criterio de Dormon y Krom, la temperatura de compactación es variable de un betún a otro, a pesar de tener igual penetración a 25°C. Este factor de la viscosidad será otra de las variables a considerar en el estudio de la compactación, que está regida también por varios factores, como la rugosidad superficial de las fracciones finas, que influye en las propiedades friccionales de la mezcla.

Características reológicas durante el servicio en el camino

Pasemos a examinar ahora los requisitos a exigir en las condiciones de servicio en el camino, en las mezclas asfálticas densas.

Si las temperaturas son bajas y la velocidad de aplicación de la carga son las que corresponden al tránsito dinámico o rápido (más de 80 km/h), el material de la mezcla sometido a estos esfuerzos puede quebrarse, rajándose o bien puede fisurarse por fatiga. A su vez, como las mezclas bituminosas al enfriarse sufren una contracción, si ésta es de cierta magnitud, dichos esfuerzos pueden provocar la rotura de las mismas. Esto es particularmente importante en zonas donde los cambios climáticos, entre el día y la noche, son muy apreciables.

A su vez, la mezcla asfáltica puede fallar por deformación plástica, ya sea, por acciones-deformantes del tránsito en aceleradas bruscas del vehículo o en paradas o frenadas en las zonas de pase de peatones o en paradas de ómnibus y a

su vez, en casos de cargas estáticas de vehículos en reposo.

Si por causas de aplicación repetida de esfuerzos se disminuyen los vacíos de la mezcla y hay aumento progresivo de la densidad de la misma, el sistema filler betún tenderá a fluir a la superficie con mayor o menor facilidad según la temperatura y se producirán mezclas de tipo graso con el grave inconveniente de una excepcional lisura que le confiere una superficie de tipo resbaladizo.

Según Dormon, el efecto acumulativo residual de gran número de cargas de pequeña duración, se puede considerar como similar en el comportamiento de la mezcla a una carga estática durante un tiempo prolongado.

Es evidente que un número considerable de técnicas se han propuesto para la medida de las propiedades mecánicas de los betunes y buena parte de ellas se encuentran en las especificaciones de distintos países. Ya hemos mencionado que gran parte de las mismas tienen un fundamento empírico y no poseen base científica; aunque otras parecen tener relación con ensayos fundamentales vinculados, por ejemplo, al módulo de rigidez de van der Poel (21). Tal es el caso del ensayo de penetración que parece tener una estrecha vinculación con la viscosidad de acuerdo a la fórmula de Saal (35); pero este autor indica que la misma es sólo aplicable a betunes newtonianos puros, lo cual limita su aplicación.

Dormon estima que los valores de penetración no pueden ser comparables con los de viscosidad, ya que en las condiciones del ensayo no se ha alcanzado el equilibrio, especialmente en betunes parafínicos. Traxler (34); numerosos autores (35) y nuestra propia experiencia (33), revelan que la penetración no es una medida de viscosidad como lo indica el cuadro siguiente, en el que se informan valores de betunes de destilación directa, del tipo usado en pavimentación.

CUADRO N° 2

Betún	Penetración a 25°C 100 g, 5 seg	Viscosidad a 25°C megapoises
Cerro Bandera (Argentina)	76	1,0
C. Rivadavia (Argentina)	75	6,2
Tía Juana (Venezuela)	75	1,8

Los valores indicados de viscosidad se han realizado a esfuerzo de corte constante en el microviscosímetro de placas paralelas. Vemos aquí evidentemente que betunes de distinta procedencia tienen consistencias similares, medidas por el ensayo de penetración a 25°C; pero viscosidades hasta seis veces mayores a la misma temperatura.

El hecho de que el ensayo de penetración no mida la consistencia real del betún ha sido demostrado en varios trabajos de Griffith, Lee y otros. Por tal razón, se debe buscar el empleo de un método, que no sólo sea sencillo sino que mida la consistencia real del material, especialmente a temperaturas similares a las que se encuentran en el camino, es decir, de 60°C aproximadamente. Esta temperatura ha sido considerada por Griffith como la más conveniente; hecho también puntualizado por Krom y en cierta forma por Meskill (36).

El problema de determinar la consistencia del betún a 60°C hizo necesaria la creación de nuevos tipos de viscosímetros capilares, llamados de vacío, desarrollados especialmente en EE.UU. buscando soluciones que significaran el empleo de un equipo sencillo. Dichas técnicas han sido incluidas en la ASTM como tentativas (métodos D 2171-63 T y D 2170-63 T) y permiten determinar la viscosidad cinemática a 135°C (C. Stokes) y la viscosidad dinámica a 60°C (Poises).

En estos métodos se determina el tiempo para que un volumen dado de líquido fluya a cierta temperatura por un capilar, por acción de una diferencia de presión que ha sido determinada con toda precisión y el cálculo de la viscosidad se realiza multiplicando dicho tiempo por la constante del aparato. El método es aplicable tanto para betunes viscosos puros como para no newtonianos y los aparatos para la determinación son sencillos de construir y económicos. Los modelos desarrollados por Cannon-Manning, Koppers y el Instituto del Asfalto son los recomendados por ASTM en los métodos mencionados a baja temperatura y el de Cannon Fenske y Zeitfuchs para altas temperaturas ya que permiten operar en intervalos entre 30 y 6 000 C. Stokes.

A continuación se dan algunos valores de la viscosidad a 60°C de betunes de igual penetración a 25°C, determinados en el LEMIT por el método ASTM 2170-63 T, que se anticipa

pan sobre un trabajo actualmente en ejecución:

CUADRO N° 3

Betón	Penetración a 25°C 100 g, 5 seg	Viscosidad a 60°C, poises (a presión constante)
Venezuela I	80	2368
Venezuela II	82	1348
Venezuela III	97	1687
Argentina IV	84	3032
Argentina V	83	1280
Argentina VI	95	3800

Estos resultados muestran la importancia de determinar la viscosidad a 60°C como una medida de la consistencia real del material a altas temperaturas, que corresponden aproximadamente a las máximas de servicio en el camino.

La vinculación entre estos valores y los obtenidos con mezclas asfálticas tipo, ensayadas por métodos convencionales, están actualmente en estudio en el LEMIT y permiten extraer interesantes conclusiones al respecto.

Si las condiciones climáticas a que está sometida la mezcla son de bajas temperaturas y tiempos de aplicación de la carga del orden de 10^{-2} a 10^{-3} de segundo, no existen al presente ensayos que permitan determinar el módulo de rigidez a bajas temperaturas y que puedan ser usados como ensayos de rutina con suficiente sensibilidad.

Se están ensayando actualmente distintos métodos, algunos empleando el microviscosímetro a bajas y altas velocidades de corte, así como el penetrómetro a 10°C y temperaturas menores. El ensayo de Fraas también ha sido estudiado con este fin. Este es un campo para futuras investigaciones que permitan encontrar un método sencillo y suficientemente preciso para medir el módulo de rigidez en esas condiciones.

PERMANENCIA DE LAS PROPIEDADES DESPUES DEL CALENTAMIENTO

Ya hemos indicado que el asfalto aumenta su consistencia durante el mezclado en usina y continúa incrementando la misma después de haberse puesto en servicio. Hemos hecho re-

ferencia como ensayo de importancia en ese ámbito, el de pérdida en película delgada del Bureau of Public Roads. Este ensayo, destinado a medir cambio de consistencia, similar al experimentado en usina, está incluido en gran número de especificaciones. El mismo limita el valor de la pérdida porcentual a 163°C y también la disminución de la penetración después del calentamiento a no más de 60 % de la original o valores similares.

La experiencia muestra que medir el grado de endurecimiento del betún después de la pérdida por el ensayo de penetración, tiene el mismo error básico conceptual que esta última como medida de consistencia.

Por tal razón, se ha recomendado (31) la medida de la consistencia del betún original y del sometido a pérdida a una temperatura dada y con dichos valores calcular el índice de envejecimiento. Esta técnica consiste pues, en determinar la consistencia del betún a 60°C (pipeta), someterlo al ensayo de pérdida en película de 3 mm, 5 horas a 163°C y luego determinar su consistencia a 60°C. El cociente entre la viscosidad del material sometido a pérdida y del betún original se llamaría índice de incremento de consistencia. Además de esta técnica existe el método del microviscosímetro de Griffin y Simpson, que mide también el incremento de consistencia del betún en película delgada de 5 micrones durante 2 horas a 105°C, que fuera estudiado en un trabajo realizado en colaboración con Agnusdei (37), llamado también índice de envejecimiento de Griffin.

En general, no parece existir una completa correlación entre la retención de la penetración a 25°C después de pérdida y la relación de incremento de viscosidad entre el material original y el calentado a 163°C en película delgada.

A continuación se detallan los valores obtenidos determinando el incremento de viscosidad de muestras de asfaltos de distintas procedencias, sometidas al ensayo de pérdida en película delgada:

CUADRO N^o 4

	% de retención de penetración después de pérdida, 5 horas a 163°C.	Relación entre la viscosidad después del ensayo de pérdida y la original
Asfalto 1, penet. 80	52	2,3
Asfalto 2, penet. 82	77	2,3
Asfalto 3, penet. 97	53	1,5
Asfalto 4, penet. 84	58	2,6

Los ensayos de viscosidad fueron realizados por el método de la pipeta del Instituto del Asfalto.

Los valores del cuadro anterior muestran que betunes de igual consistencia a 25°C (por el ensayo de penetración) tienen una retención diferente de penetración luego de ser sometidos al ensayo de pérdida por calentamiento, ya que ésta depende de varios factores. A su vez, asfaltos que tienen una diferente retención de penetración en este ensayo, poseen un índice de incremento de consistencia del mismo orden, es decir, que sus consistencias reales han sufrido una variación similar.

Dado sus fundamentos, la determinación del índice de incremento de consistencia brinda un valor de mayor base científica que el ensayo de penetración y por ello, debería incluirse en las técnicas a proponerse en las nuevas especificaciones.

Un aspecto a considerar para el futuro es la técnica de determinación de las viscosidades; puede optarse por el empleo del microviscosímetro operando a una temperatura adecuada (por ejemplo: 25 o 30°C) o bien realizar las determinaciones en la pipeta a 60°C. Este tema, en estos momentos, está siendo objeto de estudio en el LEMIT.

Seleccionada la técnica más conveniente, habrá que fijar los valores máximos de la relación de viscosidades, luego de un estudio experimental sobre muestras especialmente preparadas en el laboratorio y tomadas de obra.

ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

Dentro de estos ensayos tenemos algunos de naturaleza química, como la solubilidad en sulfuro de carbono y tetracloruro de carbono. La solubilidad en sulfuro de carbono permite determinar la presencia de materiales extraños al betún asfáltico y que son insolubles en ese solvente; es decir, materia mineral y compuestos no bituminosos. El tetracloruro de carbono permite determinar los carbenos (solubles en sulfuro de carbono e insolubles en tetracloruro de carbono) que generalmente se encuentran en cantidades muy pequeñas, del orden de 0,1 a 0,2 % en asfaltos procesados correctamente, y que pueden aumentar hasta 0,5 % o más, en materiales anormalmente calentados. Sin embargo, la evidencia de que un asfalto se ha sobrecalentado se revela mejor, a nuestro juicio, por el ensayo de la mancha de Oliensis.

Por las razones expuestas, dichas determinaciones en lo referente a su valor para estimar el contenido de materia mineral, pueden ser sustituidas por el ensayo de cenizas, de sencilla realización, según las técnicas clásicas o las de ASTM, opinión que también comparte Krom (5).

Puede admitirse aún, como alternativa, la posibilidad de incluir cualquiera de las dos determinaciones, ya que algunos autores como Griffith, estiman todavía de cierta importancia, la determinación de carbenos con tetracloruro de carbono (31).

En cuanto al ensayo de punto de inflamación en el aparato Cleveland, se recomienda mantener su inclusión por razones de seguridad y para poner en evidencia la contaminación con fracciones volátiles livianas o medianas. Algunos autores como Hveem, estimaban que en ciertos casos, el valor del punto de inflamación tenía estrecha relación con la durabilidad, hecho que no está plenamente probado.

El peso específico es un factor de moderada impor-

tancia en el juzgamiento de la calidad de un betún para uso vial, sino se juzga su valor en conjunto con otras determinaciones, entre ellas la susceptibilidad térmica y el comportamiento reológico, de modo que su inclusión estará condicionada a la naturaleza de los ensayos y los requerimientos exigibles.

En lo referente al ensayo de Oliensis, que permite revelar la homogeneidad o heterogeneidad de los betunes asfálticos y poner en evidencia el grado de alteración y cambio de la estructura coloidal por fenómenos de sobrecalentamiento o de cracking térmico, se considera de importancia incluirlo en las especificaciones. En sustitución del mismo podría emplearse el ensayo de heptano-xileno (38).

Con referencia a la ductilidad a 25°C, estimamos que dicho ensayo debe ser incluido en las especificaciones, aunque los valores obtenidos con el mismo han sido motivo de controversias (5, 38, 39, 40). En general, altos valores de la ductilidad a 25°C, corresponden a asfaltos directos de gran susceptibilidad térmica y buenas propiedades adhesivas; pero varios autores como Saal, Krom y Gotolski, consideran este ensayo de difícil interpretación. Estimamos que tal vez resultara más significativo, un ensayo de ductilidad a bajas temperaturas como el mencionado por Krenkler (6); y la realización de un estudio completo sobre el tema, ayudaría a fijar el criterio a seguir, que permita estimar los verdaderos valores de ductilidad exigibles a bajas temperaturas.

ESQUEMA DE RECOMENDACIONES PARA EL ESTUDIO DE NUEVAS ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS PARA USO VIAL

Recapitulando lo expuesto y teniendo en cuenta los nuevos criterios sobre el tema, podemos agrupar los ensayos a incluir en la especificación de betunes asfálticos viales, preparada con criterio racional, en tres grupos, de acuerdo al esquema que se desarrolla más abajo. Los valores de la consistencia de los betunes, permitirán luego clasificarlos en distintos tipos de acuerdo a la misma.

CUADRO N° 5

Anteproyecto para el estudio de nuevas especificaciones

	Método	Tolerancias
1.- Ensayos de características de flujo:		
Viscosidad absoluta a 60°C, Poises.....	ASTM D-2171-63 T	Máximo y mínimo.
Viscosidad cinemática a 135°C, C. Stokes.....	ASTM D-2170-63 T	Máximo y mínimo.
Módulo de rigidez a 0 y -10°C.....	a determinar	---
2.- Ensayos de permanencia de las propiedades después del calentamiento:		
Indice de incremento de la consistencia basado en la viscosidad a 60°C.....	ASTM D-1754-63 T D-2171-63 T	Máximo
Indice de envejecimiento por el microviscosímetro basado en la viscosidad a 25°C (alternativa del en- sayo anterior).....	Griffin y ASTM	Máximo
3.- Ensayos complementarios:		
Cenizas.....	ASTM D-271	Máximo
Punto de inflamación.....	ASTM D-92-57	Mínimo
Peso específico.....	ASTM D-70-52	Mínimo
Ensayo de Oliensis.....	AASHO T 48	Homogéneo
Ductilidad a 25°C.....	ASTM D-113-44	Mínimo
Solubilidad en tetracloruro de carbono (alternativa de la determinación de cenizas)	ASTM D-165-42	Mínimo

En oportunidad de preparar la correspondiente especificación se clasificarán los betunes en distintos tipos, en base a su viscosidad a 60°C. Como recomendación para betunes de aplicación vial que integran mezclas bituminosas convencionales, las viscosidades absolutas oscilarían para los distintos tipos entre 300 y 9000 Poises (35) (33-31) (36).

Las viscosidades a 135°C se podrían limitar a las recomendaciones del Instituto del Asfalto de EE.UU. en valores oscilantes entre 150 y 500 C. Stokes (según la consistencia del betún), que son coincidentes con los indicados por la técnica europea (32).

En lo referente al módulo de rigidez, no se podrá abrir juicio al respecto, hasta tanto no se haya desarrollado un método que permita su determinación rápida con suficiente exactitud. Este tema tiene especial significado y será motivo de próximos estudios del LEMIT.

En cuanto hace a los ensayos de durabilidad, determinada por el incremento de la consistencia después del calentamiento, la técnica a seleccionar será la del ensayo en película delgada ASTM con la relación de viscosidades (índice de incremento de consistencia) a la temperatura de 60°C, o en su defecto la técnica de Griffin ya conocida (34). En un trabajo del autor (37) y colaboradores, se dan algunos valores de betunes argentinos empleando el método del microviscosímetro, así como la bibliografía correspondiente.

Referente a los ensayos complementarios, las limitaciones corrientes de las especificaciones vigentes, servirán de base para la preparación de los valores exigibles, que se adecuarán, con las limitaciones correspondientes, a los obtenidos en los ensayos de permanencia de propiedades después del calentamiento y de características de flujo.

La información sobre el tema expuesta en este estudio, permite orientar al técnico sobre las normas y métodos más convenientes para el ensayo y estudio de betunes para uso vial, dentro de los numerosos métodos y técnicas aparecidas en los últimos años en diferentes países. Los estudios sobre nuevos métodos prosiguen en el LEMIT y serán motivo de próximas publicaciones del Laboratorio, especialmente los relacionados con el módulo de rigidez y la durabilidad.

CONCLUSIONES

La presente exposición resume los conceptos básicos y fundamentales de los requisitos a exigir, en los materiales para uso vial, a la luz de criterios modernos basados en métodos científicos que serán de indudable valor para mejorar la tecnología de las mezclas asfálticas, librándola del empirismo que caracteriza a muchas determinaciones y ensayos de materiales bituminosos.

Algunos de estos conceptos son conocidos desde hace algún tiempo, sin que hasta el presente se hayan concretado en especificaciones oficializadas, aunque varios técnicos, entre ellos miembros de prestigiosas organizaciones norteamericanas y europeas, se encuentran abocados a su estudio.

En el trabajo se exponen algunas ideas básicas que pueden dar origen a las recomendaciones que se detallan a continuación en forma resumida, con miras a su empleo en la preparación de normas y especificaciones de asfaltos para pavimentación, empleando, dentro de los conocimientos disponibles, técnicas basadas en métodos científicos fundamentales.

Dichos juicios, a manera de conclusión, son los siguientes:

- 1º) Los ensayos de consistencia determinados por métodos empíricos como la penetración, punto de ablandamiento, etc., deberían ser sustituidos por otros ensayos que midan con base científica esa propiedad, empleando técnicas sencillas.

Dichos ensayos propuestos son: la determinación de la viscosidad por el método de la pipeta ASTM D 2171-63 T para la temperatura de 60°C y el ASTM D 2170-63 T para la temperatura de 135°C; que corresponden aproximadamente, a la temperatura máxima de servicio la primera y a la temperatura de mezclado la segunda.

2º) El ensayo convencional de pérdida en película delgada (5 h a 163°C) y la determinación de la penetración del residuo después del calentamiento, como medida del grado de alteración que puede experimentar el betún (porcentaje de penetración residual), debería ser sustituido, en lo referente a la medida de la consistencia, por el método de la pipeta ASTM D 2171-63 T. La relación de la consistencia del betún envejecido a la del betún original, resulta una medida bastante aproximada del grado de alteración.

Como alternativa, se puede determinar la durabilidad, es decir, la permanencia de las propiedades después del calentamiento, por una técnica como el envejecimiento en microfilm (5 micrones, 2 h, 105°C), determinando el índice de envejecimiento de Griffin, basado también, en el cociente de viscosidades entre el material envejecido y el betún original.

3º) Se estima que, como ensayos complementarios se deben incluir: la determinación de cenizas, ensayo de Oliensis, el peso específico, el punto de inflamación y la ductilidad a 25°C, que permiten conjuntamente con las determinaciones mencionadas más arriba, caracterizar el material en forma completa.

4º) Se considera que deben proseguirse los estudios tendientes a encontrar métodos que permitan determinar el módulo de rigidez del betún a bajas temperaturas y pequeños tiempos de aplicación y del esfuerzo, para así cubrir el intervalo de tiempo y temperatura, en que el material se comporta como sólido elástico y que es donde presumiblemente, pueden aparecer fenómenos que afectan la durabilidad del material sometido a esas condiciones.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Pfeiffer, J. - The Properties of Asphaltic Bitumen (1950).
- 2) Barth, E. - Asphalt, 590, (1962).
- 3) I.R.A.M. - Norma 6604 - Asfaltos para pavimentación(1957).
- 4) Ludling, W. - Strasse und autobahn. May (1961).
- 5) Krom, C. and Dormon, G. - Sixth W.P.C. (1963). Frankfurt.
Sect. VI, nº 14.
- 6) Krenkler, K. - Asphalte und Peche, 11, (1964).
- 7) A.S.T.M. - Method D 946-63 T, Part 11 (1964).
- 8) B.S.I. 594 (1961).
- 9) D.I.N. nº 1955 (1960).
- 10) Eisen Wegenbouw. Artikel 3 (1962).
- 11) A.S.T.M. - Method D 1764-60 T; A.A.S.H.O. - Method T 179.
- 12) Halstead, W. and Zenewitz, J. - Public Roads. Vol. 31,
nº 11, (1961).
- 13) F.S.B. - Method SS-A-706.
- 14) A.A.S.H.O. - Method T 102-42.
- 15) A.S.T.M. - Method D 92-57.
- 16) Galli, C. - Primera Reunión del Asfalto (1946).
- 17) Lewis, R. and Welborn, J. - Public Roads. Vol. 22, nº 2,
22, (1941).
- 18) Lee, A. and Nicholas, J. H. - J. Inst. Pet. 43, 235 (1957).
- 19) Mathews, D. - J. Inst. Pet. 44, 420 (1958).
- 20) Pinilla, A. y Agnusdei, J. - Estudio del LEMIT no publicado. (1964).
- 21) Van der Poel, C. - Journal of Applied Chemistry, 4, 221,
(1954).

- 22) Van del Poel, C. - Building Materials. Chap. IX (1954).
- 23) Griffin, R. L., Miles, T. and Penther, C. - Proc. Ass. Asph. Pav. Tech., 24, 31, (1955).
- 24) Griffin, R. L. and Simpson, W. C. - A.S.T.M. S. Tech. Pub. 277, 52 (1959).
- 25) Labout, J. - Rheological Acta, 186, (1958).
- 26) Dormon, G. and Jarman, A. - J. App. Chemistry, 8, (1958).
- 27) The Asphalt Institute. Manual Series, nº 4, (1960).
- 28) B.S.I. - Method 594 (1961).
- 29) Abrahams, H. - Asphalt and allied substances (1962).
- 30) Mc Loughlin, J. and Goetz, W. - Highway Res. Board Proc. 34,274, (1955).
- 31) Griffith, J. M. - A.A.S.H.O. Materials Committee Meeting. November 9 (1964).
- 32) State of California - Standard Specification. Sec. 93 (1960).
- 33) Pinilla, A.; Gainza, J. y Agnusdei, J. - Pub. LEMIT. Serie II, nº 95 (1962).
- 34) Traxler, R. N. - Asphalt (1961).
- 35) Carré M. - Conference A.F.T.P. (1963).
- 36) Meskill, R. - N. Jersey Asphalt Pav. Conf. 13 March (1961).
- 37) Pinilla, A. y Agnusdei, J. - Estudio de la durabilidad de asfaltos argentinos, I parte. XIII Reunión del Asfalto (en prensa) (1965).
- 38) Woods, K. - Highway Eng. Handbook, 18-26 (1960).
- 39) Gotolski, W. and others - Proc. Ass. Asph. Pav. Tech., 285, Vol. 33, (1964).
- 40) Saal, R. N. - Journal of App. Chemistry. 5, 663, (1955).

ENSAYOS DE MEZCIAS ASFALTICAS PARA EL SELLA DO DE JUNTAS EN
PAVIMENTOS DE HORMIGON

Ing. Duilio D. Massacoesi
Ing. Juan F. Rocco

Serie II, n° 144

INTRODUCCION

En los pavimentos de hormigón de cemento portland, es necesario dejar regularmente "juntas" a los efectos de romper la continuidad de la estructura y permitir su libre movimiento bajo los efectos de las variaciones de temperatura y cambios de humedad. Ambas circunstancias pueden provocar tensiones de "compresión", por efecto de la dilatación de la losa, de "tracción" por contracción de la misma, o de "flexión" al no existir una variación uniforme de temperatura entre las caras superior e inferior del pavimento.

En cada caso es necesario que estas tensiones, juntamente con las producidas por las cargas del tránsito, den una resultante que esté dentro de los límites de trabajo del material.

Este equilibrio se logra precisamente con la interposición de juntas, las cuales se clasifican por su ubicación, en longitudinales y transversales.

Las primeras dividen la calzada a lo largo en dos zonas cuyo ancho puede variar entre 3 m y 5 m, aunque se recomienda para evitar la aparición de grietas longitudinales, que este valor no exceda los 3,80 m (2). Son las que soportan menos esfuerzos y dado que se encuentran en el punto más alto del perfil transversal, son las menos expuestas a filtraciones.

Las segundas o sea las transversales, se construyen en forma perpendicular al eje del camino, y por la función que cumplen se las designa como de "contracción" y "dilatación".

Las de contracción consisten en cortes continuos de aproximadamente uno a dos centímetros de ancho, hechos en la cara superior del pavimento con profundidades que varían entre 3 cm y un tercio del espesor de la losa.

Si como consecuencia de la desigual contracción de las dos caras de la placa, ésta debe fisurarse, lo hará precisamente en la zona debajo del corte, que es el punto más débil. La parte superior de la junta se sella con una mezcla bituminosa a los efectos de proveer hermetismo y estanqueidad.

Las características convenientes que deben reunir estas mezclas y la adopción de los ensayos apropiados para medirlas constituyen parte del objetivo del presente trabajo, el cual, se completará con la verificación en campaña de los resultados a que se arribe.

Las juntas de dilatación que se intercalan a fin de reducir o anular las tensiones producidas por los cambios de volumen del hormigón, tienen aproximadamente dos centímetros de ancho y cortan a las losas en toda su profundidad.

La frecuencia con que se colocan estas juntas depende del criterio adoptado por el proyectista; serán más próximas si la finalidad perseguida es la anulación total de las tensiones debidas a la variación volúmetrica, y más espaciadas si se quiere restringir la libertad de movimiento de la losa, y provocar tensiones de compresión - lógicamente sin exceder la tensión de trabajo del material -, que reduzcan las tensiones provocadas por las cargas del tránsito.

No obstante la distancia entre juntas suelen fundamentarse, en los distintos países, en bases empíricas que varían con las condiciones locales.

En el informe al XIII Congreso de Tokio (1967) (1), Gran Bretaña condiciona el espaciamiento de juntas de dilatación a la temperatura, (normal o fría) y al número de vehículos diarios, variando la distancia entre un máximo de 36,6 m y un mínimo de 18,3 m. El espaciamiento medio de las juntas de contracción es de 4,6 m. Para este último espaciamiento, Rusia fija un máximo de 5 m cuando existen diferencias de temperaturas considerables y espesores de losa de 22 a 24 cm y de 4 m a 4,5 m para espesores de 18 a 20 cm.

Francia en general, ha suprimido las juntas de dilatación, ejecutando juntas de contracción a distancias medias de 5 m y en profundidades de 5 a 6 cm.

La determinación del espacio para la expansión puede hacerse calculando el alargamiento -suponiendo a la losa con libre movimiento-, disminuído de las deformaciones elásticas y plásticas (2).

En las juntas de dilatación suelen colocarse pasadores de acero, pintados con asfalto y lubricados, que vinculan las dos losas contiguas sin impedir su libre contracción o dilatación.

La función de estos pasadores es evitar las diferencias de rasante y transferir las cargas de una placa a otra. Su colocación debe ser muy cuidadosa y correcta pues de lo contrario pueden provocar en el hormigón esfuerzos de tracción perjudiciales.

En general los materiales empleados en el llenado de juntas deben poseer ciertas características, que en muchos casos suelen ser antagónicas. Para subsanar la dificultad de poder reunir en un solo material todas las condiciones favorables para su correcto funcionamiento es que en la actualidad (en los casos de juntas de dilatación) se tiende a sistemas combinados.

En estos sistemas constructivos, la parte inferior de la junta se rellena con un material fibrobituminoso, madera compresible, etc. que sirve de soporte al producto generalmente asfáltico que se coloca en la ranura superior para sellar la junta. La finalidad es evitar la introducción del agua o materiales extraños que impidan la libre dilatación y contracción del hormigón, lo cual podría dar lugar al pandeo o a la rotura de las losas del pavimento.

CUALIDADES Y ENSAYOS

Este informe se refiere exclusivamente a mezclas bituminosas para sellado, de aplicación en caliente; las cualidades que debe poseer el material están vinculadas con sus funciones, siendo las más importantes las que se comentan a continuación:

1^a) Debe permitir ser vertido fácil y uniformemente en grietas de aproximadamente 10 mm de ancho, a temperaturas compatibles con las condiciones prácticas de trabajo y con la inalterabilidad físico-química del material.

2^a) Debe producir un sellado total a fin de que no se introduzca el agua en la junta, para ello es necesario que su adherencia con el hormigón sea perfecta incluso en las condiciones más severas, es decir cuando la junta trabaja sumergida.

3^a) Debe poseer suficiente deformabilidad, en un rango elevado de temperaturas, como para admitir el movimiento del pavimento sin agrietarse ni despegarse del hormigón.

4^a) Debe tener suficiente consistencia como para resistir las exigencias del tránsito, y no fluir por gravedad hacia el fondo de la junta o hacia los costados, ni aún a las más altas temperaturas que puede adquirir el pavimento.

5^a) Debe ser resistente al impacto a bajas temperaturas (0°C).

6^a) No debe presentar tendencia a la sedimentación o separación, en el caso de poseer materiales inertes.

7^a) Debe tener baja susceptibilidad a los cambios de temperaturas.

Existe un número considerable de ensayos que permiten medir la mayoría de las cualidades señaladas. Las normas A.S.T.M., B.S., A.A.S.H.O. y D.I.N. (3), (4), (5), (6) tratan en lo posible de encuadrar sus ensayos a las condiciones prácticas, relacionándolos con las sollicitaciones a que se verá sujeto el material en su vida útil.

Entre estas normas de diferentes procedencias, existen algunas que se adaptan más satisfactoriamente a nuestro medio, otras que presentan ensayos de ejecución más sencilla y práctica, y unas terceras que controlan algunos aspectos no encarados por las anteriores.

En virtud de reiteradas consultas hechas al LEMIT, por diferentes organismos viales, se ha tratado de seleccionar entre los ensayos especificados por las normas citadas, un grupo que permita tener una idea lo más completa posible

del comportamiento del material para juntas, dándole preferencia a aquellos ensayos que dentro de los más prácticos tuvieran mayor sensibilidad o significación para medir una determinada característica. Se comentan a continuación algunos de estos ensayos:

El punto 1^a) de las condiciones físicas que debe cumplir el material de relleno, puede ser analizado -aunque con criterio algo subjetivo- con el auxilio de la norma ASTM 1191-52. Mediante la misma se puede determinar la mínima temperatura a que el material puede ser vertido sin dificultad. Existe también una relación (7) determinada en forma experimental que permite hallar en forma bastante aproximada, la temperatura de vertido en función del punto de ablandamiento (P.A.) y el Índice de Pfeiffer (I):

$$\text{Temp. vertido} = 66 \text{ } ^\circ\text{C} + \text{P.A.} + 3,4 \text{ I}$$

La norma ASTM establece como complemento, la determinación de la "temperatura de seguridad" la cual limita el máximo calentamiento a que puede ser sometido el material sin que éste sufra alteraciones perjudiciales.

Esta última condición está vinculada con el ensayo de fluencia ASTM, y es particularmente importante en el caso de emplearse betunes con caucho incorporado, dado que si bien este último disminuye notablemente la susceptibilidad térmica del betún, puede llegar a alterarse bajo un excesivo calentamiento (+200°C).

La experiencia extranjera indica que la temperatura de vertido de la mezcla de junta, debe ser como mínimo, menor en 11°C a la temperatura de seguridad, y la fluencia (ASTM) menor de 0,5 cm.

En los análisis que figuran en este informe, practicados a algunas mezclas para juntas, se ha adoptado el ensayo de fluencia establecido por la norma British Standard por ser de realización sumamente práctica y rápida para no presentar ninguna indeterminación su interpretación. Esta norma fija como tolerancia máxima un 15 % de escurrimiento.

Las condiciones 2) y 3) referentes a deformabilidad a baja temperatura y adherencia al hormigón, son valoradas con suficiente rigurosidad por el ensayo de "Extensión" de

B.S. 2499-66 (4). Dado lo moderado de nuestro clima se ha estimado razonable analizar las mezclas a utilizar en nuestras zonas de acuerdo con las condiciones establecidas para el material "Tipo A₂" de la citada norma, realizando el ensayo a temperatura de 0°C.

De acuerdo con los requerimientos de esta norma el "área despegada" de las caras de los prismas de hormigón después del ensayo debe ser menor de 1,6 cm²; el área de las fisuras que se puedan producir en el material será menor de 40 mm²; y las profundidades de estas fisuras no deben exceder los 6,35 mm.

La consistencia del material y su resistencia a fluir bajo los efectos de la temperatura, pueden ser estudiadas mediante varios ensayos; es de rápida realización el ensayo de "penetración" recomendado por la norma B.S. 2499-66 la cual fija como índice de calidad para la determinación realizada a 25°C, una penetración no mayor de 10 mm.

Para tener una idea de la susceptibilidad térmica del material y poder asimismo comparar diferentes mezclas entre sí, es útil la determinación del "factor de susceptibilidad" (5) mediante la siguiente relación:

$$F = \frac{\text{Penetración a } 25^{\circ}\text{C (100 g, 5 seg)}}{\text{Penetración a } 0^{\circ}\text{C (200 g, 60 seg)}}$$

La norma AASHO .M.89-42 especifica para mezclas bituminosas fillerizadas a emplear en rellenos de juntas, la determinación del "Punto de ablandamiento", el cual se realiza con el mismo procedimiento que para asfaltos solos, no obstante se ha comprobado que en el caso de mezclas fillerizadas, se obtienen resultados más exactos con el empleo de la norma DIN-1996 (método Wilhelmi) en la que se especifica un anillo de 31,8 mm de diámetro interior por 7,4 mm de alto; la temperatura debe leerse cuando la deformación bajo la carga de una esfera de acero de 15 mm de diámetro y 13,9 g de peso es de 50 mm. Se establece que el punto de ablandamiento medido en esta forma no debe ser inferior a 60°C.

Es de suma practicidad como medida para relacionar la consistencia de diversos materiales para juntas coladas, la determinación del "coeficiente de deformación" (según

Nüssel) preceptuado por la norma DIN 1996. La experiencia alemana indica que este valor no debe exceder de 8 para asegurar un comportamiento aceptable.

Si bien un producto bituminoso para el llenado de juntas, puede presentar determinadas características de resistencia y deformabilidad bajo una aplicación lenta de las cargas a baja temperatura, dichas características pueden variar notablemente ante cargas aplicadas en forma instantánea. Si se considera que el material puede estar sujeto en la práctica a este último tipo de sollicitaciones sobre todo al producirse resaltos entre losas, se desprende la necesidad de introducir en la gama de ensayos que se han seleccionado, un ensayo de "impacto". Este ensayo ya fue adoptado en nuestro medio hace algún tiempo (8) como eficaz sustituto del ensayo de adherencia (Bond Test).

La norma DIN 1996, establece para distintos tipos de mezclas la altura de caída sobre una placa de acero, que debe admitir una esfera moldeada con 50 gramos de material, realizando el ensayo a baja temperatura. Estímase que en nuestro medio es suficiente que la probeta resista sin romperse la menor altura especificada por la norma, es decir 120 ± 1 cm, a una temperatura de 0°C.

Es importante analizar también la tendencia a sedimentar la parte mineral que pueda presentar el producto; la norma DIN, es la que sugiere el ensayo más sencillo, y basa su determinación en el análisis de las cenizas residuales que presentan la parte superior e inferior de una probeta, luego de su respectiva calcinación. Se especifica que esta diferencia no debe ser superior a 5 % en peso.

Los ensayos que se comentan han sido reunidos en la tabla N^o 1, donde se indican además los resultados obtenidos sobre diferentes mezclas, así como las normas seguidas para su análisis. En lo que respecta a las mezclas analizadas se debe mencionar que forman parte de un programa más amplio solicitado al LEMIT por la Municipalidad de La Plata a los efectos de una selección para su empleo en toma de juntas de pavimentos urbanos.

Por otra parte, en virtud del ofrecimiento hecho por dicha comuna, una vez concluido el estudio se realizarán ve-

rificaciones prácticas en diferentes tipos de pavimentos de hormigón (es decir, nuevos o viejos, con mayor o menor grado de deterioro).

Como base, se ha aprovechado la experiencia transmitida por publicaciones nacionales (8), (9), (10), (11), (12) y extranjeras.

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

a) ASFALTO, Asfasol "H"

Penetración a 25°C (100 g, 5 s).....	40
Punto de ablandamiento (A y E), (°C).....	55
Peso específico a 25°C/25°C.....	1,003
Punto de inflamación Cleveland V. Ab. (°C)....	327
Ductilidad a 25°C (cm).....	70
Oliensis.....	Neg.
Indice de penetración (Pfeiffer).....	-0,5

b) FILLER CALCAREO

SiO ₂ (%).....	0,6
Residuo insoluble (%).....	23,4
K ₂ O ₃ (%).....	1,7
CaO (%).....	39,6
MgO (%).....	1,9
P por calcinación (%).....	32,0
CO ₂ (en CaCO ₃), (%).....	71,0
<u>Peso específico</u> (g/cm ³).....	2,72

Granulometría:

Pasa tamiz N ^o 40.....	100
" " " 80.....	99
" " " 200.....	81

c) AMIANTO

Constitución.....	Antigorita
Long. fibra.....	Entre 1,050mm y 0,010 mm
SiO ₂ (%).....	37,2
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%).....	9,4
CaO (%).....	1,8
MgO. (%).....	36,7
Pérd. por calcinación (%).....	14,1
Humedad (a 100°C) (%).....	1,6
Residuo en ácido (%).....	23,4

d) ARENA SILICEA (Proveniente del Río Paraná)

Granulometría (%):

Pasa tamiz N ^o 10.....	100
" " " 40.....	83
" " " 80.....	7
" " " 200.....	0,3
Peso específico (g/cm ³).....	2,64

COMENTARIOS SOBRE LAS MEZCLAS ENSAYADAS

1) Mezcla de Arena silícea - Asfasol "H":

Esta mezcla ha sido incluida dentro de las series ensayadas, debido a que aún figura en algunos pliegos de especificaciones -posiblemente por dársele más peso al aspecto económico que al técnico-. Adolece del grave inconveniente de presentar un excesivo asentamiento del material inerte, haciendo que la mezcla carezca de homogeneidad. (Ver columna de Asentamiento de la Tabla I).

En la Tabla I también puede observarse que las cinco mezclas ejecutadas con arena silícea del Paraná y Asfasol "H" presentan en general características muy semejantes. Cumplen solamente con la tolerancia de penetración establecida en forma excesivamente benévola por la norma British Standard, y tienen fallas diametralmente opuestas, es decir fallan ba-

jo la acción de la temperatura, ya que los resultados de "fluencia" y "coef. de deformación" son muy elevados y adolecen de defectos a bajas temperaturas ya que no pasan el ensayo de "impacto" (las mezclas rompen como vidrio cuando caen desde 1,20 m).

Tampoco cumplen el ensayo de "extensión" ya que despegan totalmente de las caras de los prismas de hormigón en el primer ciclo de estiramiento a cero grado centígrados, poniendo en evidencia su falta de adherencia.

No se creyó conveniente mejorar esta característica con la incorporación de aditivos, pues de cualquier manera las mezclas adolecen de una falla importante que es su excesivo escurrimiento.

Mezclas con porcentajes de arena mayores del 60 % son prácticamente irrealizables dada la dificultad del mezclado y del mantenimiento de las características de uniformidad, en virtud del asentamiento de la arena, lo cual dificulta también el vertido de la mezcla.

El costo total de esta junta puede oscilar entre \$ 18 y \$ 25 el metro lineal. (Materiales, mano de obra y beneficios).

Conclusión: Estas mezclas no son recomendables para el sellado de juntas pues si bien son de relativamente bajo costo, no cumplen en laboratorio con las exigencias fundamentales.

2) Mezcla de Filler Calcáreo - Asfasol "H"

Estas mezclas son de fácil elaboración aún con los porcentajes mayores de filler; las temperaturas de vertido oscilan en los 130°C y son posibles de mantener en la práctica sin mucha dificultad, conservándose las características de trabajabilidad en un rango amplio de temperaturas. En cuanto a la dispersión de filler en el betún, ésta es perfecta y no se observa asentamiento (menos del 1 %).

Se ensayaron mezclas de Asfasol "H" con el 15 %, 25 %, 35 % y 45 % de filler calcáreo. En la Tabla I se observa que la "Fluencia" es alta en las mezclas con menores

porcentajes de filler, y disminuye hasta aproximarse a los valores especificados cuando tienen el 35 % y 45 % de filler.

Por otra parte el ensayo de Extensión arroja valores totalmente satisfactorios en estas mezclas con 35 y 45 % de filler, aunque con porcentajes menores (15 % y 25 %), si bien los resultados no son totalmente satisfactorios, son muchísimo más aceptables que los obtenidos en las anteriores mezclas con arena silíceas. En efecto, recién al final del último ciclo de extensión a 0°C, después de haber pasado el primer ciclo de tracción y el siguiente, de compresión, las mezclas presentaron despegues de las caras de los prismas de hormigón, del orden de 4 cm² y 5,8 cm² respectivamente, no observándose fisuras en el seno de la mezcla.

Las penetraciones disminuyen con el aumento del porcentaje de filler, estando todas comprendidas dentro de lo especificado.

El punto de Ablandamiento aumenta con el incremento de filler; sobrepasan los 60°C las ejecutadas con 35 % y 45%. Con este último porcentaje de filler se logra también alcanzar el valor admisible de 8, del coeficiente de deformabilidad (según Nüssel).

Todos los resultados del ensayo de impacto sobrepasan la altura mínima de caída (1,20 m), pero los realizados con los porcentajes mayores de filler, dan resultados notables, pues resisten alturas de caída de 3 m y 4 m.

El costo aproximado de esta mezcla oscila en los \$ 45 por metro lineal.

Conclusión: Las mezclas elaboradas con asfasol "H" y 35 % y 45 % de filler, son de fácil elaboración y vertido, poseen un costo razonablemente bajo y cumplen en laboratorio con la mayoría de las exigencias (sobre todo con las del ensayo de extensión que es el más riguroso).

3) Mezcla de Talco Industrial - Asfasol "H"

En lo que respecta a la facilidad de mezclado y vertido, esta mezcla se comporta tan bien como la elaborada con filler calcáreo. El ensayo de asentamiento arrojó valo-

res sumamente bajos, y por consiguiente dentro de la tolerancia; también son admisibles todos los resultados de impacto a 0°C.

A pesar de esto, se observa en la Tabla I, que es muy difícil en las diferentes mezclas elaboradas con talco industrial, lograr el cumplimiento simultáneo de todas las condiciones. Por ejemplo las mezclas elaboradas con 35 % de talco cumplen con las especificaciones en lo que respecta a fluencia y coeficiente de deformación, pero no satisfacen el ensayo de extensión pues el área despegada, el área de fisuras y la profundidad de las mismas, superan los valores máximos admitidos.

Por otra parte la mezcla que arroja valores satisfactorios de extensión, como ser la elaborada con 10 % de talco, tiene elevados valores de fluencia y coeficientes de deformación.

Conclusión: Ninguna de las mezclas elaboradas con talco y asfisol "H" cumplió en forma total en laboratorio con los valores límites fijados. No obstante sería interesante verificar en obra el comportamiento práctico de la elaborada con el 25% de talco ya que el resultado del ensayo de extensión fue relativamente bueno y la fluencia y coeficiente de deformabilidad no son excesivamente elevados. Teniendo en cuenta que es una mezcla económica (aproximadamente \$ 40 el metro lineal) podría llegar a sustituir desde ese punto de vista a otra mezcla de mejor comportamiento pero de mayor costo.

4) Mezcla de Amianto - Asfisol "H"

La incorporación de amianto (fibra corta) al asfisol "H" tiene la propiedad de reducir notablemente su fluir a relativamente alta temperatura, como puede deducirse de la Tabla I. En efecto, en lo que respecta a consistencia basta sólo un 3 % de amianto para conseguir un efecto semejante al producido por el 35 % de talco industrial o el 45 % de filler; las mezclas con amianto son las que en promedio han dado puntos de ablandamiento más elevados.

Con el 2 % de amianto se obtienen valores satisfacto-

TABLA I

MEZCLAS ANALIZADAS

DEFERMINACIONES REALIZADAS

Betón Asfalc "H" %	Arena sílica %	Filler calórico industr. %	Talco %	Amianto F. coora %	Caucho %	Aceite %	Peso especí. floc (gr/cm3)	Temperatura de vertido (ASTM-1191-2499-66) °C	Fluor oia (B.S. 2499-66) %	Extensión (B.S. 2499-66)			Penetración		Factor de masa específica	Punto de abland. (DIN-1996-66) °C	Coef. Deform. (DIN-1996-66)	Impacto 0 °C (DIN-1996-66)	Asentam. (DIN-1996-66) %
										Area despegada cm2	Area de fibras mm2	Profundidad de fibras mm	B.S. 2499 mm	ASTM D-5-65 mm					
90	10						1,022	110	70	Despegada totalmente (1er. ciclo)		3,0	4,0	2,0	2,0	10,3	1,20	+10,0	
75	25						1,117	118	66	"	"	2,9	4,0	2,0	2,0	10,0	"	+15,0	
65	35						1,222	130	64	"	"	2,9	3,9	1,9	1,9	10,0	"	+25,0	
55	45						1,537	135	58	"	"	2,2	3,2	1,7	1,7	10,5	"	+20,0	
40	60						1,555	140	50	"	"	2,2	2,9	1,7	1,7	10,0	"	+25,0	
85		15					1,105	125	55	4,0 (3er. ciclo)	0	3,2	4,2	2,4	1,7	11,0	1,50	- 1,0	
75		25					1,198	130	33	5,8 (3er. ciclo)	0	2,8	3,6	2,0	1,8	10,5	2,50	- 1,0	
65		35					1,302	130	18	0	0	2,3	2,5	1,8	1,4	10,0	3,00	- 1,0	
55		45					1,336	135	14	0	0	2,1	2,5	1,8	1,4	8,0	4,00	- 1,0	
90			10				1,072	125	56	1,4	0	3,2	4,2	2,1	2,0	12,0	2,00	- 0,2	
85			15				1,102	130	35	2,0	0	3,2	4,0	2,0	2,0	9,9	2,20	- 0,1	
75			25				1,223	135	20	4,0	0	3,2	3,9	2,0	1,9	8,6	2,80	- 0,6	
65			35				1,225	140	13,4	6,0 (3er. ciclo)	100	1,5	2,3	1,3	1,8	7,8	2,80	- 0,6	
98				2			1,009	135	15,5	0	0	2,0	2,9	1,7	1,7	7,6	2,50	- 0,5	
97				3			1,013	140	13,7	0	0	1,9	2,9	1,7	1,7	6,8	2,50	- 0,5	
95				5			1,028	140	9	0	0	1,9	2,9	1,7	1,7	5,5	3,00	- 0,5	
90				10			1,028	155	5	9,0 (3er. ciclo)	25	1,9	2,8	1,5	1,9	4,0	4,00	- 0,5	
96					2		1,004	140	15	0	0	2,1	2,9	1,5	1,9	8,2	2,00	- 0,2	
96					4		1,006	145	10	0	0	2,0	2,8	1,5	1,9	7,4	2,50	- 0,2	
94					6		1,009	150	9	0	0	2,0	2,8	1,6	1,7	5,6	2,80	- 0,2	
90					10		1,014	150	6	0	0	1,9	2,7	1,5	1,8	5,0	4,00	- 0,2	
96					4	1	1,006	140	19	0	0	2,3	3,5	1,7	2,0	7,6	2,50	- 0,2	
92					8	1	1,009	145	13	0	0	2,1	3,5	1,7	2,0	5,5	3,00	- 0,2	
88					12	1	1,016	148	8,3	0	0	2,1	3,4	1,7	2,0	5,0	4,00	- 0,2	
83					2	1	1,068	140	18	0	0	2,4	3,4	1,7	2,0	8,0	3,00	- 0,5	
79					6	1	1,088	140	17,2	0	0	2,4	3,6	1,6	2,2	5,6	3,50	- 0,5	
74					6	1	1,100	145	17,0	0	0	2,4	3,6	1,8	2,0	5,6	3,50	- 0,5	
67					8	1	1,100	150	10	3	10	2,0	3,1	1,8	1,7	5,8	3,50	- 0,5	

MEJORES :
 MENOR de 15%
 MENOR de 1,6 cm2.
 MENOR de 40 mm2.
 MENOR de 6,35 mm
 MAYOR de 60°C
 MAX. 8
 MENOR de 1,20 m. (en 21 segundos)
 MAX. 1,56

rios de fluencia, extensión, coeficiente de deformación, impacto, penetración, etc.

Estas características se mantienen aceptables hasta porcentajes del orden de 5 %, mayores cantidades no son convenientes pues dan mezclas más frágiles y desde el punto de vista económico resultan también más caras.

El empleo de amianto con asfalto más duro, es también inconveniente ya que si bien las mezclas que se obtienen cumplen con los límites establecidos para fluencia y punto de ablandamiento, en general dada su escasa deformabilidad a bajas temperaturas no cumplen con el ensayo de "extensión", que se considera fundamental para prever un buen comportamiento de la junta.

Conclusión: Las mezclas elaboradas con Asfasol "H" y porcentajes de amianto entre el 2 % y 5 % responden en forma correcta a todas las determinaciones realizadas. No es conveniente el empleo de cantidades de amianto mayores, ya que la mezcla se torna quebradiza y por otra parte resulta antieconómica.

El costo aproximado por metro lineal de esta mezcla es de \$ 65, colocada.

5) Mezcla de Caucho vulcanizado - Asfasol "H"

El caucho empleado proviene de la peladura de cubiertas en desuso. La mezcla ha sido encarado ~~dado que una~~ ^{comuna} interesada podría disponer de un stock suficientemente grande ~~comp~~ para realizar mezclas de este tipo.

En base a la experiencia recogida (12) se trabajó con la fracción de caucho vulcanizado que pasó el tamiz n° 20. La temperatura de mezclado con el asfasol "H" fue de 180°C y el proceso se mantuvo durante aproximadamente 4 horas con agitación permanente. Durante dicho período los componentes volátiles del betún son absorbidos por las partículas de caucho las cuales aumentan notablemente de volumen.

Esto trae aparejado cambios en las características originales del asfalto, que se traducen en general en aumentos del punto de ablandamiento, de la temperatura de vertido,

de la viscosidad y de la resistencia al impacto. Precisamente esas eran algunas de las propiedades que se querían mejorar, persiguiéndose también la finalidad de que la mezcla conservara su capacidad de estiramiento a baja temperatura.

Ello se consiguió como puede observarse en la Tabla I con porcentajes de caucho comprendidos prácticamente entre el 2 % y el 10 % los cuales permiten encuadrar perfectamente las mezclas dentro de los límites especificados.

El uso de caucho vulcanizado, aún en porcentajes muy bajos, con asfaltos más duros, transmite a la mezcla una excesiva indeformabilidad a baja temperatura que la hace inapropiada para resistir con eficacia las sollicitaciones a que se vería sujeta en la práctica.

Conclusión: Hasta porcentajes máximos de caucho vulcanizado, del orden de 10 %, la elaboración de la mezcla y su vertido no ofrece extrema dificultad, no obstante conviene aclarar que de todas las mezclas ensayadas es la que requiere mayor tiempo de preparación y la que pierde más rápidamente las características de vertibilidad. Estas circunstancias hacen que presenten menor practicidad en campaña. Hecha esta salvedad, puede decirse que en general las mezclas realizadas con porcentajes de caucho entre 2 % y 10 % tienen buen comportamiento en laboratorio.

6) Mezcla de Caucho - Aceite - Asfasol "H"

Con el objeto de favorecer la preparación de las mezclas caucho-betún, se realizaron algunas, incorporándoles cantidades variables de aceite S.A.E 60 provisto por Y.P.F.

Se observó en primer término que el aceite, si bien favorecía la incorporación del caucho al asfalto producía un elevado descenso de la consistencia de la mezcla final. Por consiguiente se ensayó con diferentes cantidades de aceite, hasta obtener un porcentaje que permitiera encuadrar en forma aproximada a la mezcla dentro de las exigencias de fluencia. Este porcentaje fue del orden de 1 % y los resultados obtenidos sobre las diferentes mezclas ensayadas son los que se informan en la Tabla I.

Mayores porcentajes de aceite empleados con caucho

vulcanizado y Asfasol "H" dieron como resultado mezclas que si bien pasaron satisfactoriamente el ensayo de extensión a baja temperatura poseían un elevadísimo coeficiente de deformabilidad.

En una próxima etapa se investigarán mezclas con asfaltos de menor penetración.

A simple título informativo se incluye también en la Tabla I el resultado de mezclas con Betún - Filler - Caucho - Aceite.

CONCLUSIONES FINALES

La Tabla I nos presenta una visión de conjunto de los valores obtenidos en el ensayo de mezclas para juntas. En la misma se observa que existen algunas que se comportan en el laboratorio en forma más satisfactoria que otras.

Una primera selección nos permite descartar las mezclas elaboradas con arena silíceas y asfasol "H" ya que poseen exceso de "fluencia" y no cumplen con el ensayo de "extensión", los cuales se consideran fundamentales para prever un buen comportamiento de la junta. Tampoco cumplen con el ensayo de "impacto", poseen excesivo "asentamiento de inertes" y tienen además elevado "coeficiente de deformación".

El resto de las mezclas ensayadas, de asfasol "H" con filler calcáreo, talco industrial, amianto y caucho vulcanizado respectivamente, cumplen en mayor o en menor grado con los ensayos programados, según sea la dosificación empleada.

En este informe comienza a vislumbrarse una cierta correlación entre el resultado satisfactorio del ensayo de extensión y los límites máximos y mínimos en que deberían estar comprendidos los resultados de fluencia, punto de ablandamiento y coeficiente de deformabilidad.

En general se estima que los límites superiores están bien establecidos, solamente faltarían ajustar los topes in-

feriores de cada ensayo.

Cuando se tengan valores fundamentados en un mayor número de determinaciones y en la experiencia práctica, se elaborará un proyecto de especificación a fin de poder considerarlo en una futura reunión técnica.

Se observa también en la Tabla I la poca sensibilidad que en general poseen los ensayos de penetración para valorar la calidad de las mezclas, ello sugiere que pueda llegar a prescindirse de estos ensayos al redactar las especificaciones.

A los efectos de comprobar el comportamiento práctico de algunas mezclas ensayadas y su relación con las exigencias establecidas en cada ensayo se seleccionaron dos grupos, uno que responde bien a los requerimientos de laboratorio y otro que no lo hace. Estos grupos de mezclas, gracias a la gentileza de la Municipalidad de La Plata, serán ensayadas en pavimentos de la ciudad expuestas a condiciones semejantes, a fin de poder comparar resultados y extraer las correspondientes conclusiones.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Asociación Internacional Permanente de Congresos de Caminos. XIII Congreso de Tokio 1967 - Calzadas rígidas.
- 2.- El hormigón de cemento portland en la Ingeniería Vial. Instituto del Cemento Portland nº 34 A-13.
- 3.- A.S.T.M. - 1 191-52.
- 4.- British Standard 2 499-66.
- 5.- AASHO M-89-42.
- 6.- D.I.N. 1 996-66.
- 7.- Ortega J. - Juntas en pavimentos de hormigón.
- 8.- Petroni E. e Hita P. S. - Comunicación previa sobre el estudio de mezclas caucho-asfalto para el sellado de

juntas de pavimentos de hormigón. 3a. Reunión Anual del Asfalto, 1948.

- 9.- Alvarez M. J. - Comportamiento de juntas asfálticas para pavimentos de hormigón. 3a. Reunión Anual del Asfalto, 1948.
- 10.- Rial O. - Nota sobre el ablandamiento de juntas asfálticas. 2a. Reunión Anual del Asfalto, 1947.
- 11.- Alvarez M. J. - Nuevas mezclas para el relleno de juntas de los pavimentos de hormigón. 2a. Reunión Anual del Asfalto, 1947.
- 12.- Petroni E. e Hita P. S. - Fabricación de mezcla caucho-asfalto y su aplicación para el sellado de juntas de pavimentos de hormigón. 4a. Reunión Anual del Asfalto, 1949.
- 13.- Stojadinovich I. - Mezclas para el relleno de juntas de dilatación. 4a. Reunión Anual del Asfalto, 1949.

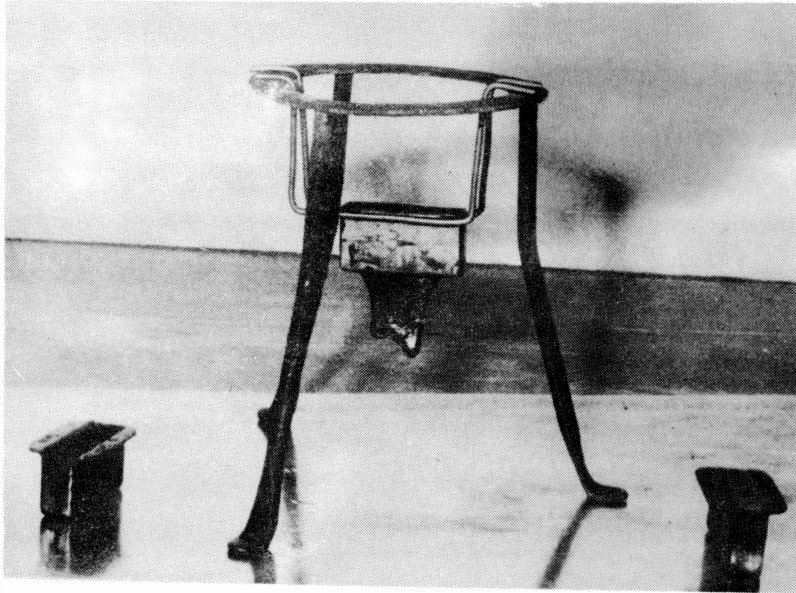


Fig. 1.- Ensayo de Fluencia: Aspecto de una muestra luego de permanecer 5 h en estufa a 45°C

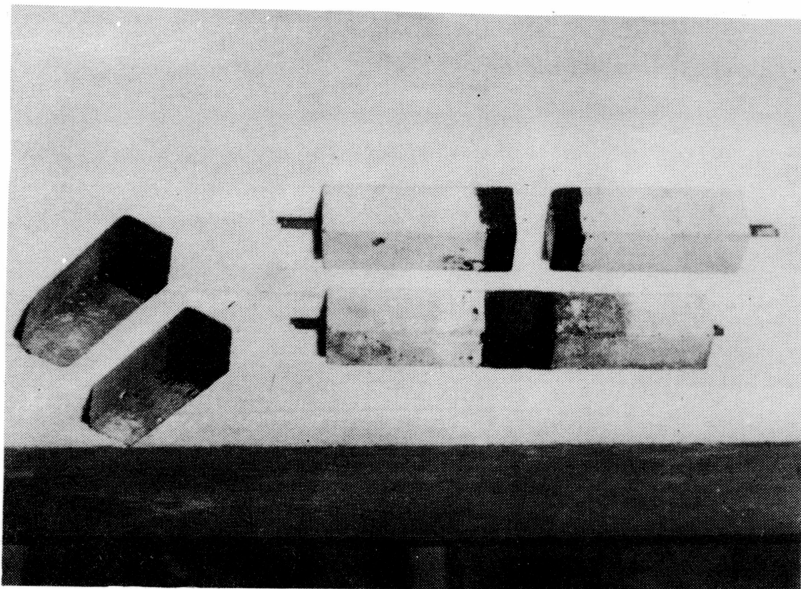


Fig. 2.- Prismas con caras imprimadas y probetas preparadas para el ensayo de extensión

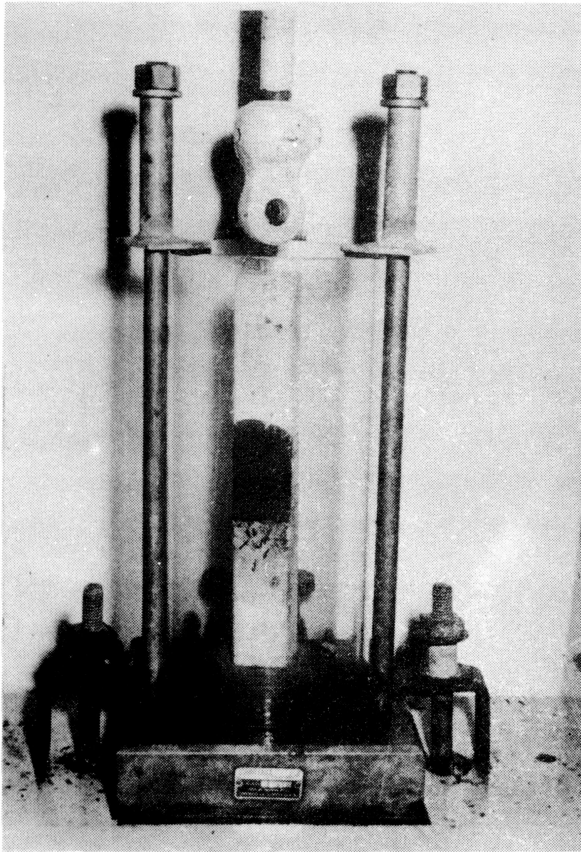


Fig. 3.- Armado del equipo para realizar el ensayo de extensión a 0°C (2 ciclos de tracción y 1 de compresión)

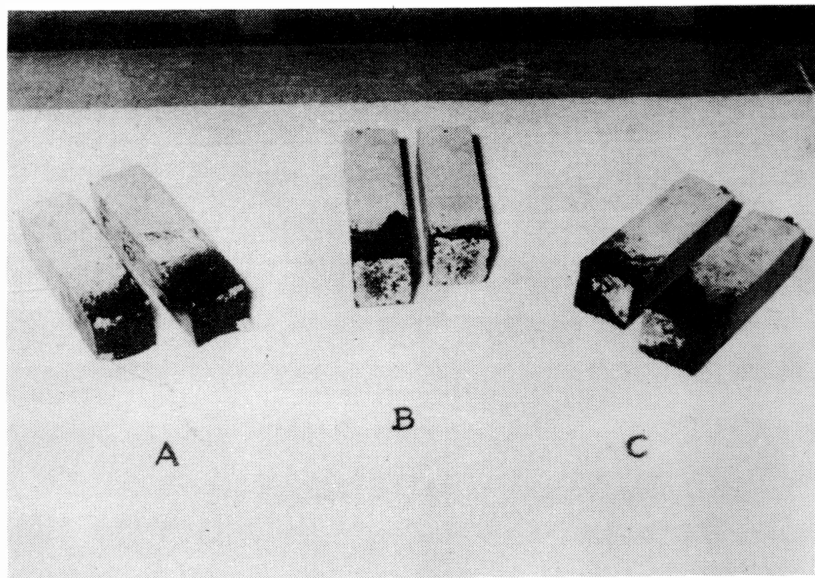


Fig. 4.- A: Probeta fallada por rotura de la mezcla
B: Falla por despegue de la mezcla de las caras de los prismas
C: Falla por rotura y despegue de la mezcla

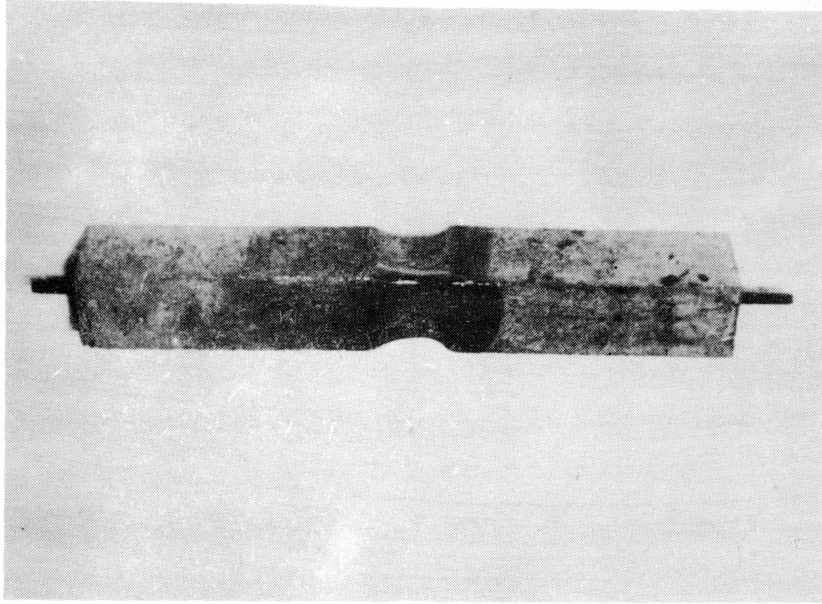


Fig. 5.- Aspecto de la probeta que cumple perfectamente los 3 ciclos del ensayo de "Extensión" a 0°C

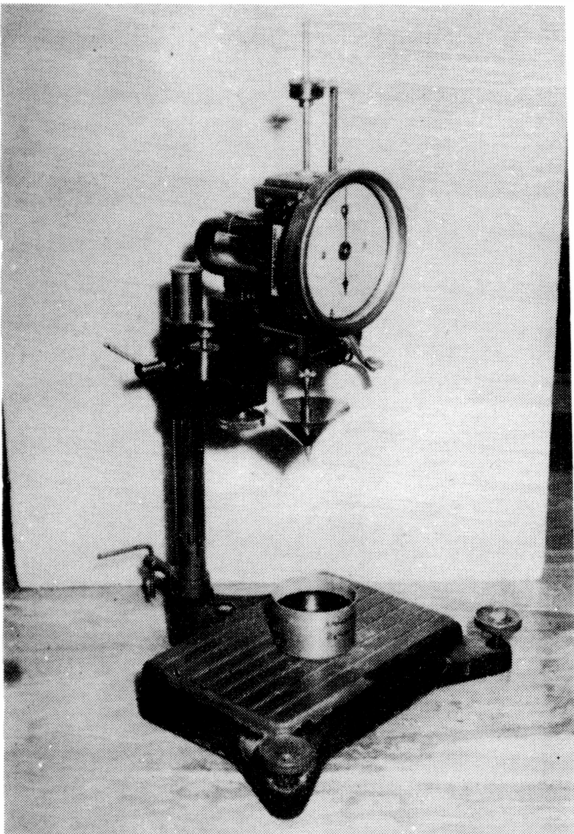


Fig. 6.- Penetrómetro empleado en el ensayo establecido por la norma B.S. 2499/66

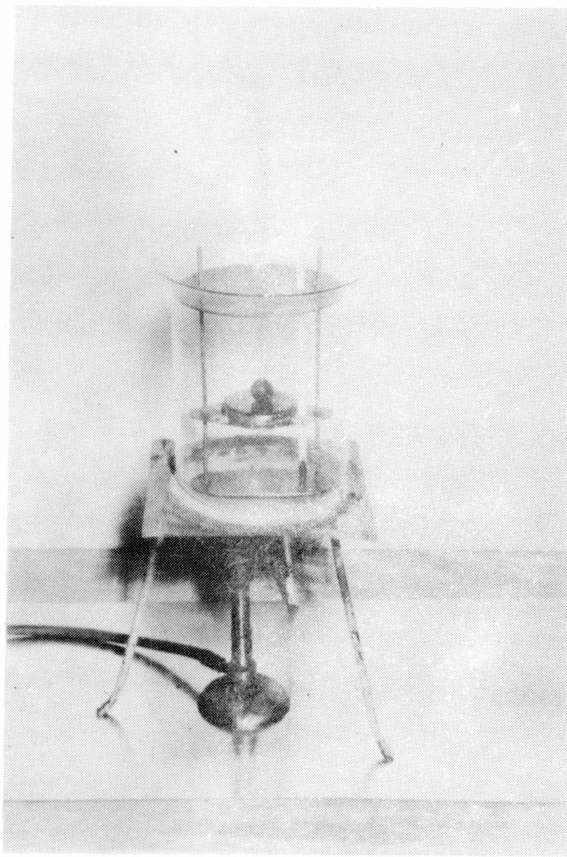


Fig. 7.- Punto de Ablandamiento (Método de Wilhelmi)

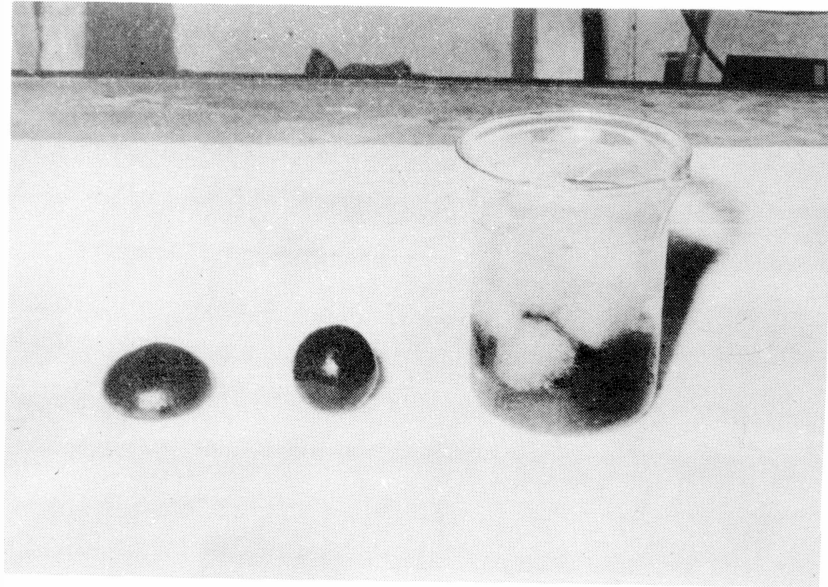


Fig. 8.- Centro: esfera moldeada para la determinación del coeficiente de deformación; Izquierda: Probeta luego del ensayo; Derecha: Esferas mantenidas en agua a 0°C durante 4 horas para ensayo de impacto

ELECTRONIC COMPUTERS APPLIED TO THE SELECTION OF STEELS

LEMIT, 3-1969, 1/30 (Serie II, n° 140). C. A. Carreras and S. Mitidieri.

The purpose of the present report is to demonstrate how employing an electronic computer and certain technical-scientific principles, it is possible to establish an equivalence between carbon and alloy steels used in mechanical constructions. To accomplish this objective it was adopted the criterium of three fundamental parameters: (DI) ideal critical diameter, (Ms) transformation temperature austenite martensite and (Hr) hardness corresponding to different temperatures and tempering times.

After a critical study of the equivalence system, tables and values obtained by electronic computer are shown and the importance of these determinations are analyzed.

DILATOMETRIC BEHAVIOUR OF SOME NATIONAL REFRACTORY CLAYS

LEMIT, 3-1969, 31/68 (Serie II, n° 141). A. Rossini, L. A. Mennucci and R. Figueras.

The dilatometric behaviour of some national refractory clays was determined in order to identify the prevailing mineralogical species as well as impurities (quartz, muscovite-illite and montmorillonite).

The dilatometric curves found in experiments performed between room temperature and 1500°C, show temperature ranges within volumetric changes takes place. The interpretation of those dilatograms enables programming optimum fire curves for clays or their mixtures in order to obtain well densified chamote or silico-aluminous refractories.

LA COMPUTACION ELECTRONICA APLICADA A LA SELECCION DE ACEROS

LEMIT, 3-1969, 1/30 (Serie II, nº 140). C. A. Carreras y S. Mitidieri.

El presente trabajo tiene por objeto demostrar cómo, mediante la utilización de una computadora electrónica, y aplicando ciertos principios técnico-científicos, se puede llegar a establecer una equivalencia entre los aceros al carbono y aleados destinados a la construcción mecánica. Para ello se ha adoptado el criterio de tres parámetros fundamentales: (DI) diámetro crítico ideal, (Ms) temperatura de transformación austenítica-martensítica, y (Hr) dureza a distintas temperaturas y tiempos de revenido.

Luego de un estudio crítico del sistema de equivalencia, se presentan las tablas de valores obtenidas por la computadora electrónica y se analiza la trascendencia de estas determinaciones.

DILATOMETRIA DE ARCILLAS REFRACTARIAS NACIONALES

LEMIT, 3-1969, 31/68 (Serie II, nº 141). A. Rossini, L. A. Mennucci y R. Figueras.

El comportamiento dilatométrico de algunas arcillas refractarias nacionales fue determinado, con el fin de establecer la especie mineralógica predominante y las impurezas que la acompañan (cuarzo, muscovita-illita y montmorillonita).

Los dilatogramas obtenidos muestran las zonas de temperatura donde ocurren cambios volumétricos, entre temperatura ambiente y 1500°C. La interpretación de los mismos permite programar curvas óptimas de cochura de arcillas o de sus mezclas, con el objeto de obtener chamote o refractarios sílico-aluminosos bien densificados.

COMPARATIVE STUDY OF STABILITATION OF A PLASTIC SOIL WITH PORTLAND CEMENT AND WITH HIDRATED LIME

LEMIT, 3-1969, 69/87 (Serie II, n° 142). L. M. Fossa, C. A. Alemán and O. Arrechea.

The present report refers to the determinations made over one plastic soil, estabilized with portland cement and with hidrated lime, as soon as the stabilization of the same soil with portland cement, foregoing corrected with hidrated lime.

The graphs includes the results obtained in these determinations.

The work contains some ideas on the physicochemical processes that would explains the mentioned stabilization.

A NEW CRITERIA ABOUT SPECIFICATIONS FOR HIGHWAYS ASPHALTS

LEMIT, 3-1969, 89/117 (Serie II, n° 143). A. Pinilla.

Performance required for an asphaltic bitumen to be used in hot-asphaltic mixtures, after compared with specifications used in Europe, United States and Argentine, are presented in this paper.

Is steemed that a rational specification must cover: testing of flow characteristics (absolute viscosity at 60°C, cinematic viscosity at 135°C and stiffness modulus at 0 and -10°C); testing of performance of properties after heating (index of increased consistence based in the viscosity at 60 or 25°C, depending of the equipment used); and at last, complementary testing (ashes, flash point, specific gravity, Oliensis test and ductibility).

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACION DE UN SUELO PLASTICO
CON CAL Y/O CEMENTO PORTLAND

LEMIT, 3-1969, 69/87 (Serie II, nº 142). L. M. Fossa, C. A.
Alemán y O. Arrechea.

En este trabajo se comentan las determinaciones practicadas en la estabilización de un suelo plástico con cemento portland y con cal hidratada en polvo, así como la estabilización de dicho suelo con cemento portland, previa corrección con cal.

Los gráficos muestran los resultados obtenidos en dicha estabilización.

Se comentan los posibles procesos físico-químicos que tendrían lugar entre el suelo y los estabilizantes, para dar lugar a la mencionada estabilización.

NUEVOS CRITERIOS SOBRE ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS PARA USO VIAL

LEMIT, 3-1969, 89/117 (Serie II, nº 143). A. Pinilla.

En este trabajo se examinan los requisitos que debe cumplir un betún asfáltico, para ser empleado en mezclas preparadas y aplicadas en caliente. Se han tenido en cuenta las especificaciones de varios países europeos, de los Estados Unidos de Norteamérica y argentinas.

Se estima que una especificación racional debe comprender: ensayos de características de flujo (viscosidad absoluta a 60°C, viscosidad cinemática a 135°C y una forma de módulo de rigidez a 0 y -10°C); ensayos de permanencia de propiedades después del calentamiento (índice de incremento de consistencia basado en la viscosidad a 60 o 25°C, según el aparato empleado); y ensayos complementarios, tales como cenizas, punto de inflamación, peso específico, ensayo de Oliensis y ductilidad.

TESTING OF ASPHALTIC MIXTURES FOR CONCRETE JOINT SEALER

LEMIT, 3-1969, 119/139 (Serie II, n° 144). D. D. Massaccesi and J. F. Rocco.

The present paper tray to establish the basis for standards of asphaltic mixtures that will be used as joint sealer in concrete pavements.

The possibilities to complete specifications based on ASTM, B.S., AASHO and DIN methods have been studied. The object is to obtain series of tests to establish the efficiency of the asphaltic mixtures to admit without any troublesome the applied loading in service conditions.

We esteem that the tests studies are sufficient - some of them were adapted to our enviroment conditions - for to do the measurements of the properties in laboratory conditions.

ENSAYO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA EL SELLAO DE JUNTAS EN PAVI-
MENTOS DE HORMIGÓN

LEMIT, 3-1969, 119/139 (Serie II, n° 144). D. D. Massaccesi y J. F. Rocco.

En el presente trabajo se intenta establecer las bases para la medida de la calidad de mezclas asfálticas destinadas a ser empleadas en el sellado de juntas de pavimentos de hormigón.

Se estudió la posibilidad de complementar entre sí ensayos establecidos en las normas ASTM, B.S., AASHO y DIN, a fin de disponer de una serie de determinaciones que permitan juzgar en forma suficiente la capacidad de las mezclas asfálticas para admitir sin inconvenientes las solicitaciones a que se van sometidas en servicio.

Se estima que se dispone del número de ensayos necesario - algunos de ellos adaptados a nuestras condiciones ambientales - como para medir, en condiciones de laboratorio, las propiedades citadas.

Este número se terminó de impr
mir en la Sección Publicaciones
del LEMIT, calle 52 entre 121 y
122, La Plata, el día 10 de oc-
tubre de 1969

Se permite la publicación parcial o total de estos trabajos
siempre que se deje constancia de la fuente de origen