

LEMIT

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES
E INVESTIGACIONES TECNOLOGICAS DE LA
PROVINCIA DE BUENOS AIRES

LA PLATA - ARGENTINA

4-1971

LEMIT

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

4-1971

AUTORIDADES DEL MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

Ministro, Ing. Leonardo D. Bertoni

Subsecretario de Obras Públicas, Ing. Rodolfo A. Montalvo

Subsecretario de Urbanismo y Vivienda, Ing. Raúl R. Ronco

Subsecretario de Programación, Dr. Carlos A. Coloma

L E M I T

Director, Dr. Pedro J. Carriquiriborde

Subdirector, Ing. Mecánico y Electricista Américo O. Boero

Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Mecánica e Hidráulica,
Ing. Mecánico y Electricista Héctor P. Alcalde

Jefe del Departamento de Ingeniería Civil y Tecnología de la Construcción,
Ing. Civil Luis M. Fossa

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

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

Dirección de la Revista: Dr. Vicente J. D. Rascio

Diagramación: Sra. Elba D. Ardenghi de Lacabe

Fotografía: Tco. Qco. Sr. Francisco Da Cruz

Impresión: Talleres Gráficos del M. O. P.

Compaginación: Sr. Carlos Sosa

L. E. M. I. T.

52, entre 121 y 122

LA PLATA - ARGENTINA

I N D I C E

- pág. 1 ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL DE KANDITAS ARGENTINAS
- Dr. A. R. Rossini
Dr. E. Pereira
Dr. L. A. Mennucci
- pág. 25 DEFORMACION BAJO CARGA A ELEVADAS TEMPERATURAS DE MATERIALES REFRACTARIOS
- Dr. A. R. Rossini
Dr. L. A. Mennucci
Tco. Qco. J. Devoto Ramos
- pág. 43 ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS DURANTE EL MEZCLADO
- Dr. J. O. Agnusdei
Lic. P. O. Frezzini
Lic. A. A. Comai
- pág. 75 CUALIDADES FISICOMECAICAS DE LAS ORTOCUARCITAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES. SU EMPLEO EN OBRAS VIALES Y CIVILES. 1a. SECCION: CHAPADMALAL
- Ing. H. Añón Suárez
Dr. V. E. Mauriño
Ing. D. D. Massaccesi
- pág. 115 REOLOGIA DE ASFALTOS ARGENTINOS A BAJAS TEMPERATURAS
- Dr. J. O. Agnusdei
Lic. O. Anvaria

APENDICE

Resúmenes de los trabajos

ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL
DE KANDITAS ARGENTINAS

Dr. Angel R. Rossini

Dr. Enrique Pereira*

Dr. Luis A. Mennucci

Facultad de Ciencias Exactas, U.N.L.P.

OBJETO

El presente trabajo forma parte de un estudio general de identificación, medida y correlación de propiedades, de minerales arcillosos argentinos, pertenecientes al grupo de las kanditas, de actual empleo en la industria argentina.

En esta etapa se ensayaron, mediante la técnica del Análisis Térmico Diferencial (A.T.D.), sesenta muestras de minerales "caoliníticos" de origen nacional, provenientes de yacimientos en explotación o de stock de fabricantes de productos refractarios. Las diferentes muestras han sido sometidas a ensayo en su condición original, sin otros tratamientos que los de molienda y tamizado necesarios para su homogeneización, con el fin de no alterar su comportamiento térmico.

INTRODUCCION

Los minerales del "caolín" (kanditas)

El término "kanditas" ha sido adoptado por "The Nomenclature Sub-Committee of the clay minerals group", de la Mineralogical Society, Londres, en el año 1955 (1), para designar genéricamente a los minerales hasta ese entonces denominados caoliníticos o del grupo del caolín.

Estos minerales son conocidos como:

Nacrita

Dickita

Caolinita: caolinita T
caolinita pM

Halloysita: Halloysita
Metahalloysita

Anauxita

Alofane

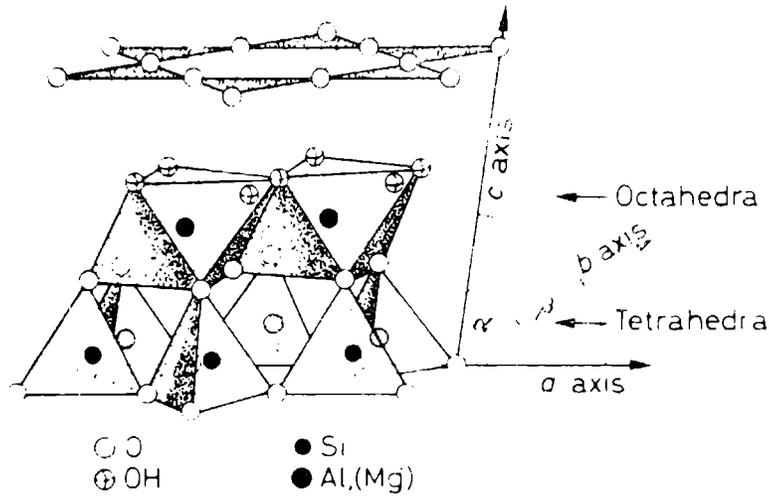


Fig. 1

Estructura cristalina de una caolinita cuando no hay reemplazo de aluminio por magnesio

Estructura

La disposición estructural de los sílico-aluminatos arcillosos está dada por láminas bidimensionales compuestas de tetraedros de SiO_2 y octaedros de Al_2O_3 .

En el caso de las kanditas, la unión de dos láminas, una de sílice y otra de alúmina, produce una capa; la repetición de capas, con un espacio intercrystalino, brinda el edificio total (Fig. 1).

La fórmula química $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ cubre aproximadamente a todos los minerales citados anteriormente, con excepción de halloysita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), anauxita (aprox. $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y alofane, este último de estructura no cristalina, constituido por soluciones mutuas de sílice, alúmina y agua.

El A.T.D. de kanditas

De entre los numerosos métodos empleados para la investigación de los minerales arcillosos, el A.T.D. es quizás la técnica más sencilla, aunque su empleo no brinda, en algunos casos, resultados lo suficiente claros como para una total interpretación. Resulta así, de relevante utilidad por su rapidez y, en especial, cuando se la emplea paralelamente con otra técnica (rayos X, petrografía, microscopía electrónica, etc.).

El método de A.T.D. consiste en ubicar a la muestra de material en ensayo, en un block o dispositivo que permita la comparación térmica con otro material, inerte, situado a su lado y sometido el conjunto a un calentamiento o enfriamiento gradual. El registro de la diferencia de temperatura entre las muestras (desconocida e inerte), en función de la temperatura de esta última, brinda un termograma característico, en la mayoría de los casos, indicando el tipo, grado y temperatura de los procesos térmicos sufridos por la muestra en cuestión.

Numerosísima bibliografía puede encontrarse sobre el tema, ya que la citada técnica ha sido empleada en campos tan diversos como el análisis orgánico e inorgánico, metalurgia, físicoquímica (cinética, estructura cristalina, relaciones interfaciales), etc. En algunos casos el tema es tratado de manera general con amplitud (2), en otros, específicamente (3).

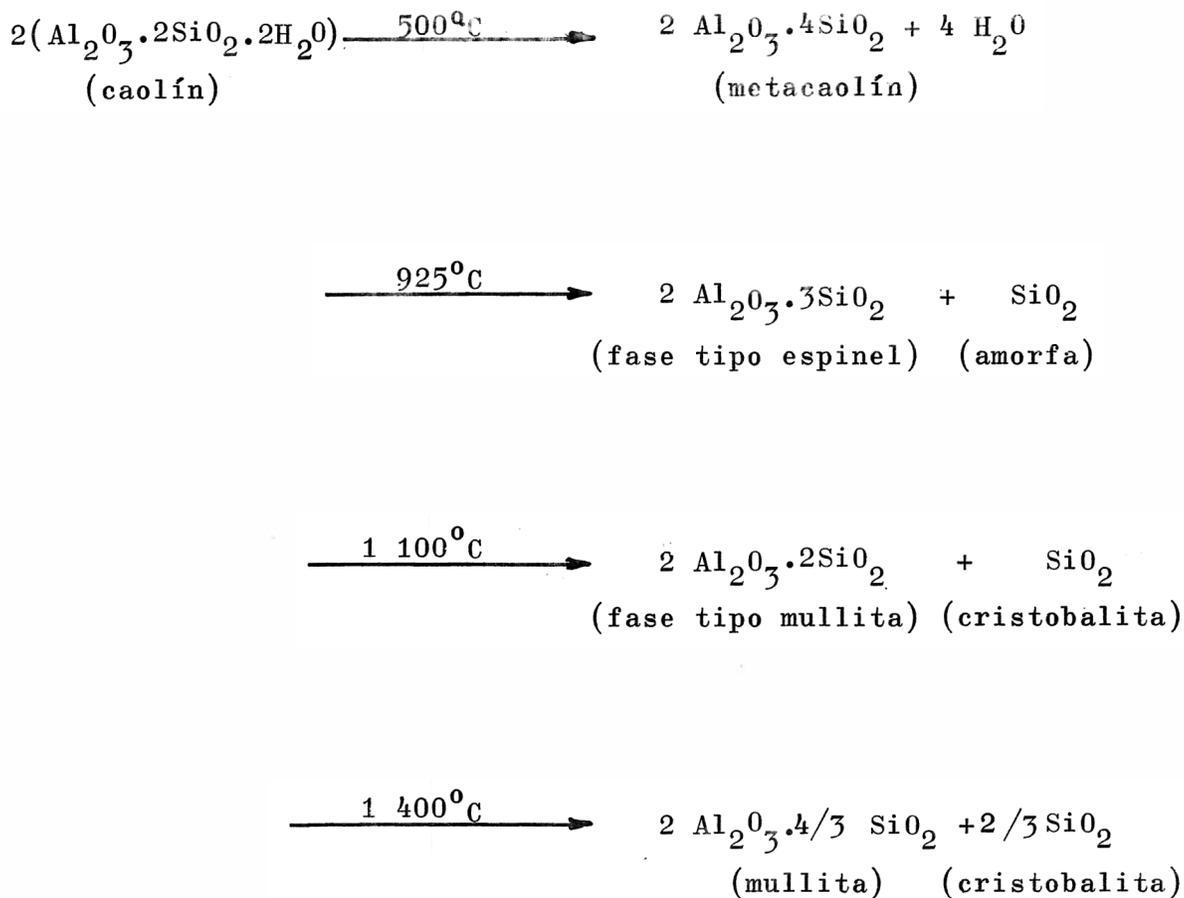
El termograma logrado, notablemente influenciado por las variables del equipo (horno, portamuestras, termoelementos), registrador, y de operación (velocidad de calentamiento, grado de compactación, granulometría, atmósfera, dilución, inerte, etc.), puede ser empleado, después de obtenido en condiciones preestablecidas, y por estudio comparativo, como criterio tanto cuali como cuantitativo. En ambos aspectos, el ajuste de la técnica puede resultar de suma utilidad especialmente, como en el caso presente, cuando sus resultados han de ir a una correlación general de propiedades y comportamientos.

El termograma de las kanditas

Estos minerales sufren por efecto del calor una secuen-

cia de reacciones, con la intervención de compuestos intermedios no totalmente reconocidos. Tal secuencia, así como las temperaturas a las que normalmente se producen los procesos, han sido interpretadas por varios autores, destacándose el siguiente esquema:

Según Brindley y Nakahira (4):



La imposibilidad actual de la interpretación única, reside en el hecho de que la observación mediante rayos X, indica presencia de sustancias de estructura cúbica (a la cual pertenecen los espineles y la γ Al_2O_3), como así también la de tipo cadena, característica de mullita. Es posible la simultánea ocurrencia de todos los procesos citados.

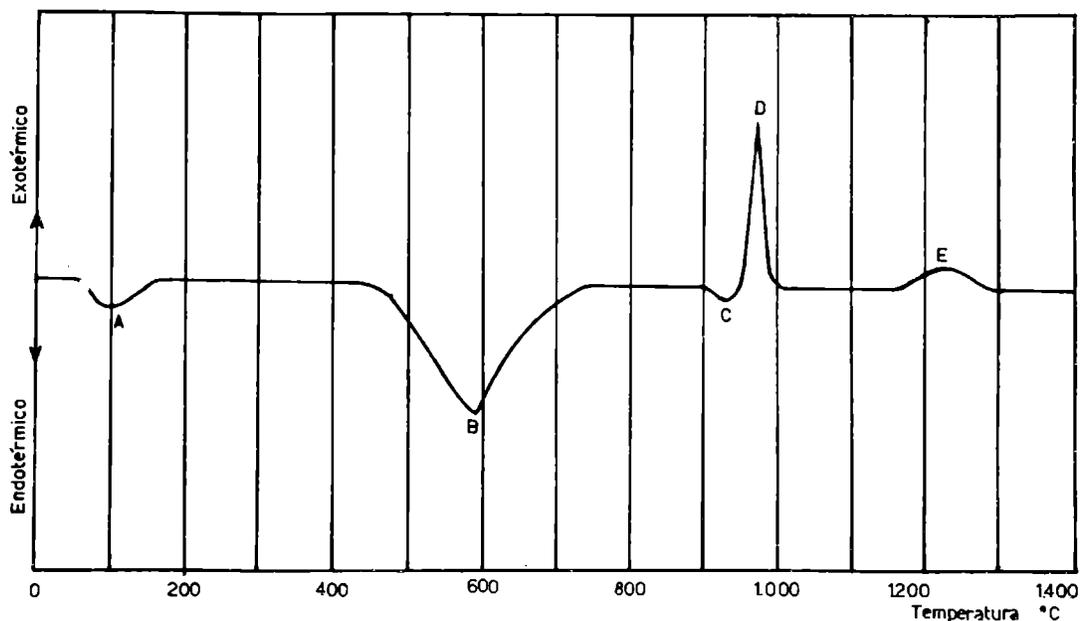


Fig. 2

Curva diferencial idealizada de los minerales
del grupo de las kanditas

Una curva diferencial idealizada de los minerales kandí-
ticos y que interpreta los procesos mencionados, posee las in-
flexiones endo y exotérmicas indicadas en la fig. 2.

El análisis de las inflexiones, realizado en base a nu-
merosos antecedentes, permite establecer que:

Pico A, primer endotérmico: ocurre a temperaturas meno-
res de 200°C; corresponde a la eliminación de agua no ligada
químicamente (absorbida superficialmente sobre las partículas
finas, interlaminar o asociada a geles de alúmina y/o sílice).

Pico B, segundo endotérmico: el principal de los que sig-
nifican absorción de calor; corresponde a la eliminación de agua
de estructura (-OH), y lo muestran todas las kanditas con ex-
cepción del alofane. Se lo halla entre los 500 y 700°C. La tem-
peratura de pico, su simetría y magnitud, son factores que per-
miten la identificación de las kanditas entre otros minerales
y, entre ellas, a los componentes del grupo.

Pico C, tercer endotérmico: se produce entre los 900 y 950°C y asociado, según citas bibliográficas, a un elevado estado de cristalinidad del mineral arcilloso. Solamente muestras de caolinita T (triclínico) y algunas halloysitas ofrecen esta inflexión, ligada a la remoción de trazas de agua retenida fuertemente en el retículo o bien a un cambio de entropía, como consecuencia de una transición desde un sistema más ordenado a otro con menor orden.

Pico D, primer exotérmico: el más característico del grupo de las kanditas, aparece entre 930 y 980°C; está asociado a la síntesis de mullita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) y/o cristalización de gamma alúmina (γAl_2O_3).

La magnitud del pico D es afectada, notablemente por el grado de ordenamiento de las capas estructurales; y la presencia de partículas arcillosas de tamaño muy fino,

Pico E, segundo exotérmico: se presenta alrededor de los 1200°C y está asociado a la formación de cristobalita (por cristalización de la sílice amorfa segregada durante la descomposición térmica de la estructura kandítica). La nucleación de mullita parece ser el otro factor que contribuye al desarrollo del citado pico.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Condiciones de operación

Siendo la técnica de A.T.D. de tipo comparativo, su empleo exige el cumplimiento de condiciones normalizadas de ensayo. Se han elegido, para nuestro trabajo, las aconsejadas como óptimas por el D.T.A. Sub-Committee of C.I.P.E.A. (5), que son descriptas a continuación:

VARIABLES DE EQUIPO

a) Horno: de tipo cilíndrico, vertical, con desplazamiento en

se sentido; calefaccionado mediante resistencia metálica de tipo Kanthal A; con termocupla de control de Pt-Pr/Rh apoyada en el calefactor. Diseñado y construido en el LE-MIT.

- b) Programador de calentamiento: a disco recortado, de velocidad de giro variable a voluntad, con autotransformador acoplado con servomotor y control tipo "rückführung"; marca Hartmann & Braun.
- c) Registrador: potenciométrico, tipo X_1-X_6/T , con escala de 12 cm de ancho y registro cada 12 segundos; sensibilidad de doble rango simultáneo, por puntos, entre 10,0 a 0,025 mv en mitad de escala, con contratensión graduable y regulada por puntos, marca Hartmann & Braun.
- d) Portamuestras: tipo block; de níquel, con cinco crisoles de 6 mm de diámetro y 10 mm de profundidad (uno central, para la temperatura de referencia y los restantes, radiales y concéntricos, para dos muestras y dos materiales de referencia). El portamuestras se apoya en un tubo de porcelana, el que a su vez se sujeta firmemente a una base metálica.
- e) Termoelementos: de platino-platino con 10 % de radio, de 0,5 mm de diámetro.

El equipo completo puede observarse en la figura 3.

Variables de operación

- a) Velocidad de calentamiento: 10°C por minuto, $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- b) Material de referencia: caolín lavado, calcinado a 1100°C .
- c) Granulometría: tanto para las muestras en ensayo, como para el inerte, todo el material debe pasar tamiz IRAM nº 70.
- d) Compactación: empaquetamiento natural, sin presión exterior.
- e) Dilución: sin diluir.
- f) Atmósfera: a presión ambiente; oxidante.
- g) Acondicionamiento: las muestras fueron acondicionadas en ambiente de 55% de humedad relativa, previo vacío, durante 90-100 h.

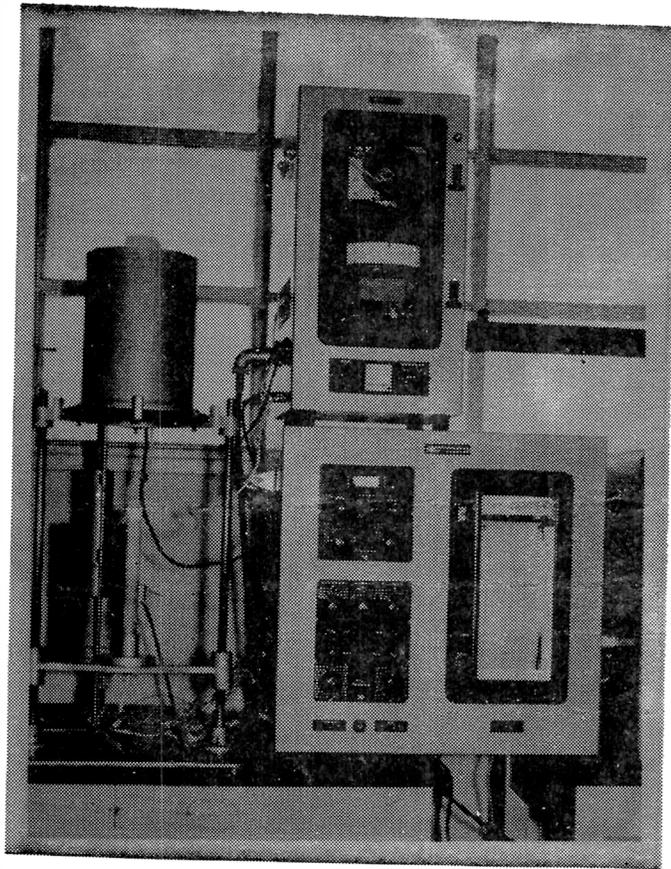


Fig. 5

Vista del equipo utilizado

Datos experimentales

Con el equipo y condiciones de operación citadas anteriormente, se llevaron a cabo los ensayos de análisis térmico diferencial; en una primera etapa, con minerales de estructura conocida y en una segunda con materiales arcillosos nacionales.

Obtención de termogramas de kanditas "patrones"

Se contó con materiales arcillosos de procedencia norteamericana, perfectamente identificados, en su aspecto mineralógico. Los citados minerales fueron:

Kaolinita, de Murfreesbore, Arkansas.

Dickita, de Curay, Colorado.

Halloysita, de Wagon Wheel, Colorado.

Halloysita, Indiana.

Ball Clay, de Atwood.

Los termogramas se observan en la figura 4.

En la figura 5, se ofrecen las curvas de materiales kaolíticos no obtenidos en la oportunidad. Sus efectos térmicos han sido extraídos, para condiciones similares de tratamiento y equipo, de la bibliografía (6).

El examen de los termogramas permite establecer diferencias y similitudes de comportamiento, elementos que en suma han de servir para la identificación, por comparación, de dichos minerales, en materiales arcillosos de diversa procedencia.

Kaolinita

Toda la pérdida de agua, prácticamente ocurre sobre los 600°C en una inflexión simétrica y bien desarrollada. La presencia de alto grado de cristalinidad (buen ordenamiento estructural y de capas) ofrece un pequeño pico (C) endotérmico en los 950°C ; luego, entre 950 y 980°C se desarrolla un gran pico exotérmico, muy agudo. La presencia de material de tamaño muy fino está indicada por la aparición de un pequeño pico (A) entre 100 y 200°C , debido al agua adsorbida por tales partículas.

Dentro de las Kaolinitas, es posible diferenciar, mediante el A.T.D. (y corroborarlo por rayos X) la existencia mineralógica de dos especies:

Kaolinita T: de elevado orden estructural, con cristales de gran desarrollo, pertenecientes al sistema triclinico; su termograma muestra el principal pico endotérmico (B) con gran simetría.

Kaolinita pM: con menor ordenamiento cristalino, con cristales de hábito tendiendo al monoclinico, más pequeños que los del caso anterior; presenta un pico A a causa del tamaño fino de sus partículas, y el pico B asimétrico y a más baja temperatura que el de la T.

El término Kaolinita se emplea cuando no es posible discernir sobre cual de las dos especies mineralógicas se trata.

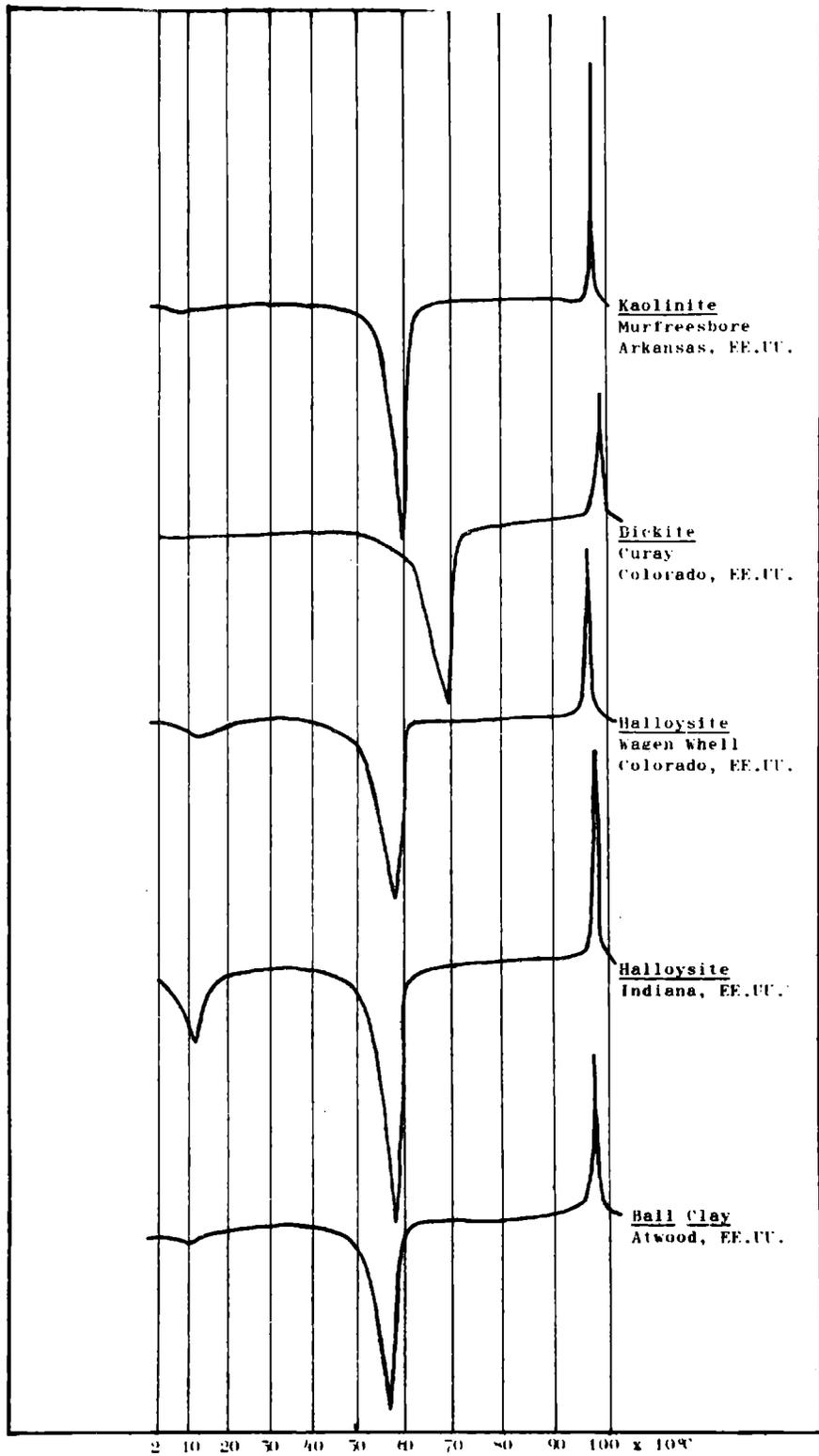


Fig. 4.- Diagramas patrones obtenidos de muestras de arcillas norteamericanas

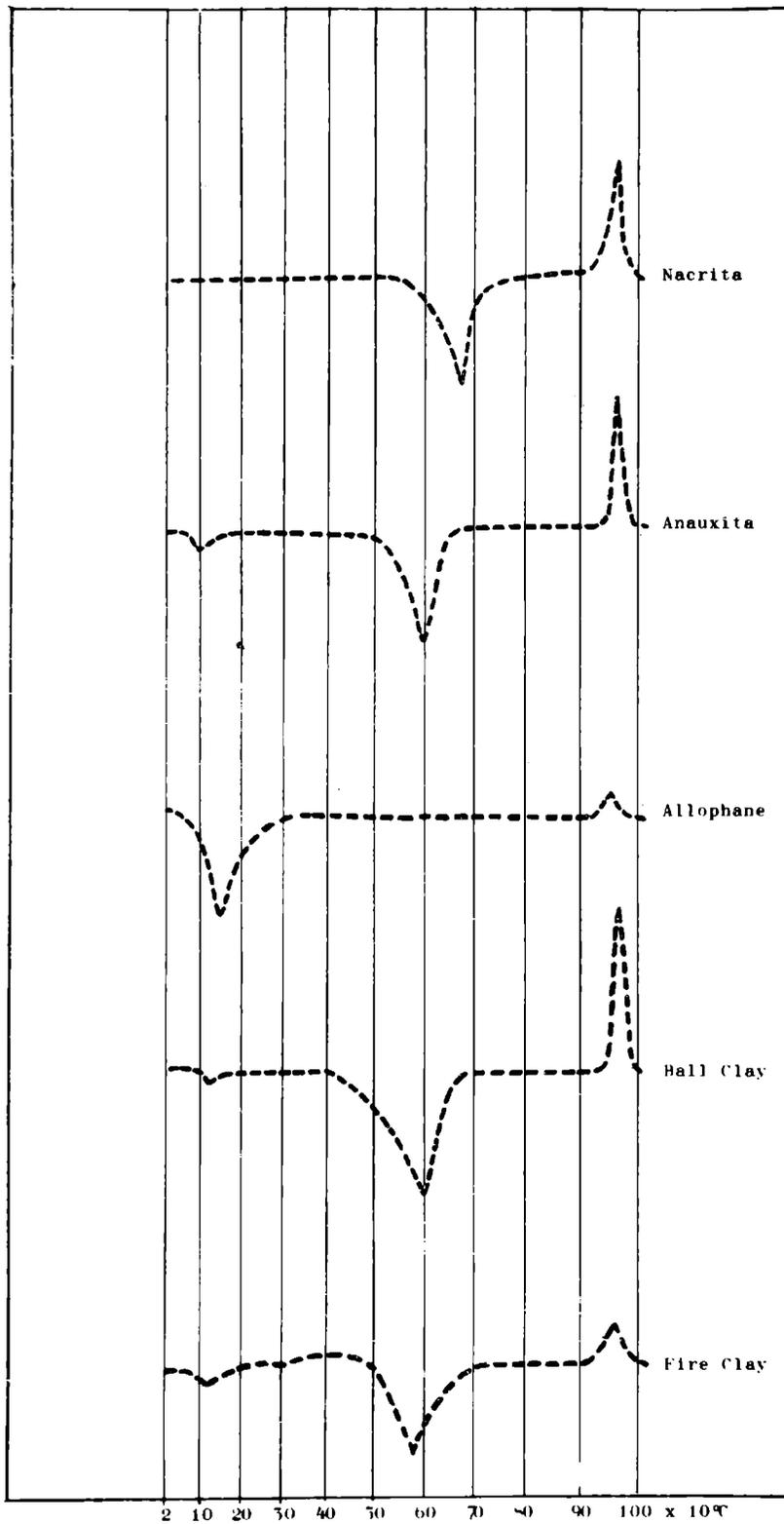


Fig. 5.- Diagramas patrones obtenidos de la bibliografía

Dickita

Se presenta con cristales enormemente desarroliados, de contorno hexagonal, perfectamente diferenciables de los de Kaolinita que también poseen dicho hábito. Térmicamente no presenta el pico A, en razón de no poseer partículas finas; en cambio, es posible notar, respecto a la Kaolinita, una elevación de la temperatura y falta de simetría del pico B. Esto se debe a que la célula unitaria de la Dickita posee un mayor número de láminas en su apilamiento, ya que la Kaolinita sólo lo hace con una. (7).

Halloysita

Ofrece un pico A, que en oportunidades se presenta con magnitud similar al principal B; éste, está normalmente ubicado entre 10 y 20°C más bajo que el correspondiente de la kaolinita. Como en todas las kanditas, el exotérmico D se manifiesta claramente.

Según el grado de hidratación, la halloysita puede presentarse como:

Halloysita, con 4 moléculas de agua, dos de las cuales pueden ser eliminadas a temperaturas tan bajas como los 40°C, lo que da lugar a la formación de Metahalloysita.

Metahalloysita, con 2 moléculas de agua y una notable reducción del pico A.

Ha podido verificarse la influencia del agua interlaminar (pico A), en las propiedades y comportamiento plástico, trabajabilidad y contracción durante el secado de las halloysitas.

Ball Clay

Se trata de una asociación natural de kanditas, con predominio de kaolinitas T y pM sobre halloysitas. Normalmente se presentan impurificadas con mica, cuarzo y materia orgánica. Eventualmente con sulfuros de hierro. Poseen buenas propiedades ligantes.

El termograma correspondiente presenta una forma intermedia entre kaolinita y halloysita, con las características de éstas, pero con mayor anchura de picos, como consecuencia de

la imperfección del material.

Nacrita

Asociada mineralógica y térmicamente a la dickita, aunque el pico B ocurre a unos 20⁰C antes que el de aquélla.

Anauxita

Según algunos autores, la anauxita es una mezcla de kaolinita y sílice amorfa. El pico A que aparece en la anuxita, se lo encuentra frecuentemente en kaolinitas de grano muy fino y en minerales, con desórdenes laminares, de este grupo.

Alofane

Es el mineral del grupo que contiene mayor cantidad de agua y su pérdida ocurre casi totalmente entre 100 y 200⁰C, lo que indica un mecanismo de deshidratación en un sistema coloidal amorfo. No posee el pico B, por no contar con estructura cristalina, lo que ha sido confirmado por análisis con rayos X. Se encuentra generalmente asociado a halloysita metahalloysita.

Fire clay

Se denominan así a aquellas kanditas que ocupan una posición intermedia entre la estructura ordenada de la kaolinita por un lado y la de menor orden de la halloysita por el otro. A diferencia de las ball clay, el pico D se presenta disminuído en altura y de mayor amplitud.

Obtención de termogramas de arcillas nacionales, tipo kanditas

En los termogramas que siguen se muestran los efectos térmicos diferenciales de kanditas nacionales, utilizadas en la actualidad por la industria refractaria.

Las muestras ensayadas, tienen procedencia variada, contándose con minerales de la provincia de Buenos Aires (Claraz, López, Tandil, Balcarce, Mar del Plata, Chapadmalal, Barker);

Neuquén (Ramón Castro, Comallo, Pilcaniyeu, Zapala); La Rioja (La Rioja, Patquia, El Dique, Los Mogotes) y Río Negro.

Los termogramas pertenecen a lo más representativo del yacimiento, aunque, como se verá más adelante, es posible encontrar una marcada variación del tipo de material arcilloso, en una misma mina. De cualquier manera, la observación rápida de las curvas permitirá establecer las diferencias notables existentes entre las materias extraídas de distintas canteras.

Identificación de las muestras

En la figura 6 se muestran los termogramas ofrecidos por arcillas que, desde las más puras a las más impurificadas, se pueden ordenar en base a su contenido predominante del tipo kandítico. En cada caso es posible establecer que:

1. Arcilla Claraz, (Prov. de Buenos Aires). Procedente de un yacimiento caracterizado por la elevada pureza del mineral, con predominio de kaolinita T:
 - a) no presenta el pico A de hidratación, lo que significa tamaño grande de cristales y baja plasticidad;
 - b) con pico B a 600^oC de gran desarrollo y simétrico;
 - c) un elevado ordenamiento estructural, evidenciado por la presencia del pico C;
 - d) un agudo pico D, de gran magnitud, característico de tokanditas, pero muy desarrollado en las kaolinitas y halloysitas.
2. Arcilla López, (Prov. de Buenos Aires). De características similares a la anterior, pero con menor orden estructural (no hay desarrollo del pico C).
3. Arcilla Ramón Castro, (blanca), (Prov. de Neuquén). Muy similar a la arcilla Claraz, pero con partículas de tamaño fino; con buena estructura cristalina.
4. Arcilla de Tandil, (Prov. Buenos Aires). De comportamiento térmico similar a la última de las citadas, aunque por la inflexión ofrecida a 100^oC, se trata de un mineral con ele-

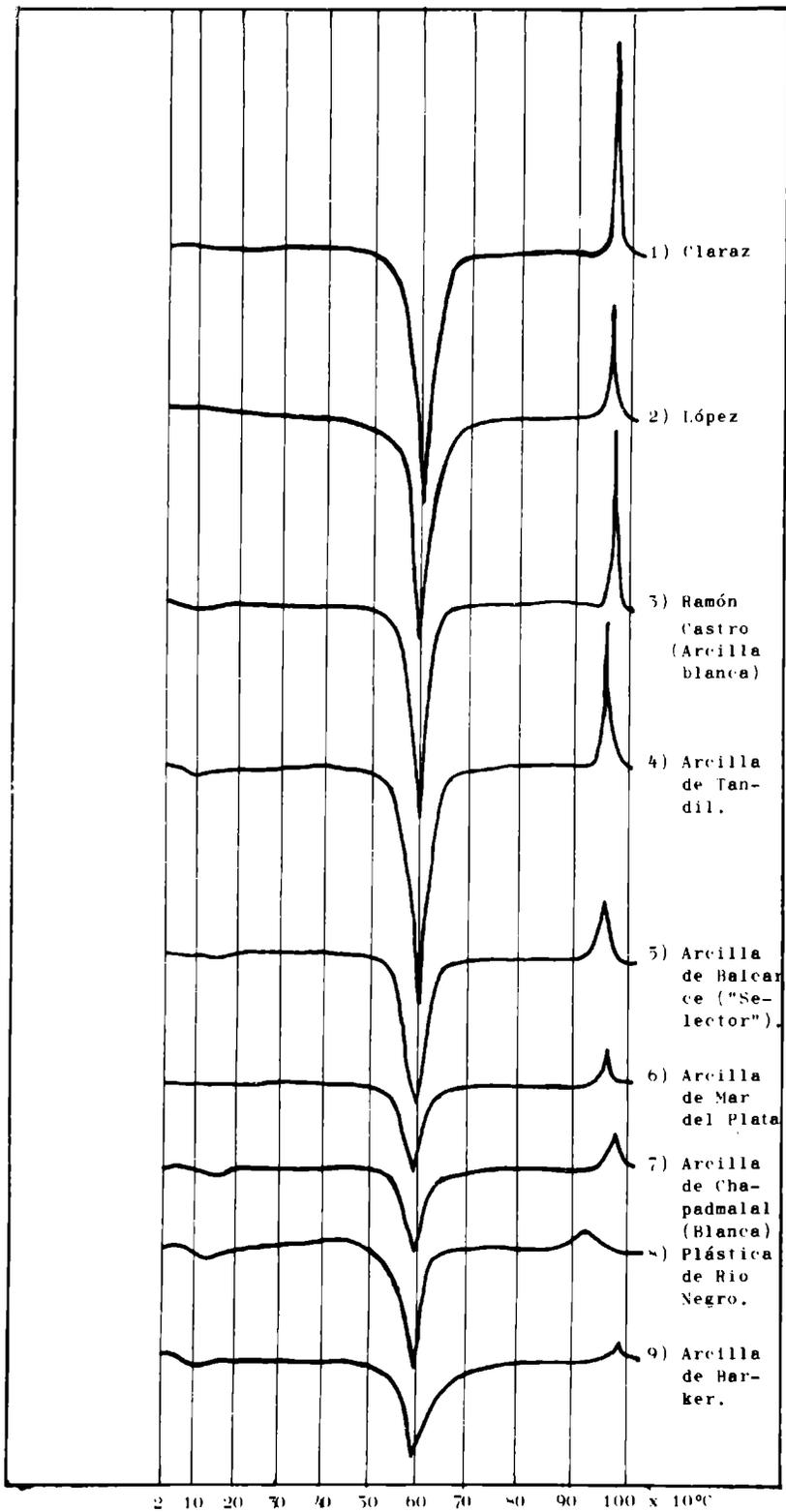


Fig. 6.- Diagramas obtenidos sobre arcillas argentinas

vado contenido de partículas finas y como consecuencia, respecto a aquella un más pronunciado comportamiento plástico.

5. Arcilla de Balcarce, (Prov. de Buenos Aires). Kaolinita, diluída con materiales inertes al A.T.D. o no visibles durante el calentamiento (cuarzo).
- 6 y 7. Arcillas de Mar del Plata y Chapadmalal, (Prov. de Buenos Aires). De características semejantes, kaolinitas diluídas, con tamaño pequeño de partículas, especialmente la última de las mencionadas. El pico D poco desarrollado evidencia desorden estructural.
8. Plástica de Río Negro, (Prov. de Río Negro). Tipo Ball Clay, con materia orgánica de tipo húmico; presumiblemente con notables propiedades ligantes.
9. Arcilla de Barker, (Prov. de Buenos Aires). Tipo Fire Clay, sin materia orgánica, con gran desorden cristalino.

Los termogramas de la figura 7, pertenecen a arcillas de diversa procedencia, con la característica común del elevado contenido en materia orgánica. Esta se presenta en dos tipos, perfectamente diferenciados: la de macropartículas, de aspecto carbonoso, y la húmica, asociada físicoquímicamente a las partículas de arcilla.

- 10, 11, 12 y 13. Arcillas La Riojana, (Prov. de La Rioja). Con elevado contenido en materia orgánica del tipo carbonoso, el que afecta notablemente los termogramas enmascarando picos. En este caso, el más afectado es el B, de deshidratación, pues es superado por el efecto exotérmico provocado por la combustión de la mencionada impureza.

No obstante el enmascaramiento, es posible verificar que el mineral arcilloso predominante en estas cuatro muestras es de tipo caolinítico, siendo la muestra nº 10 Patquia, la que lo contiene en mayor cantidad y en mayor orden estructural. Es de suponer, además, la baja plasticidad de dichas muestras.

- 14 y 15. El Dique y Los Mogotes, (Prov. de La Rioja). Representantes del mismo grupo anterior, aunque con menor contenido de material orgánico, y el que evidencia estar en

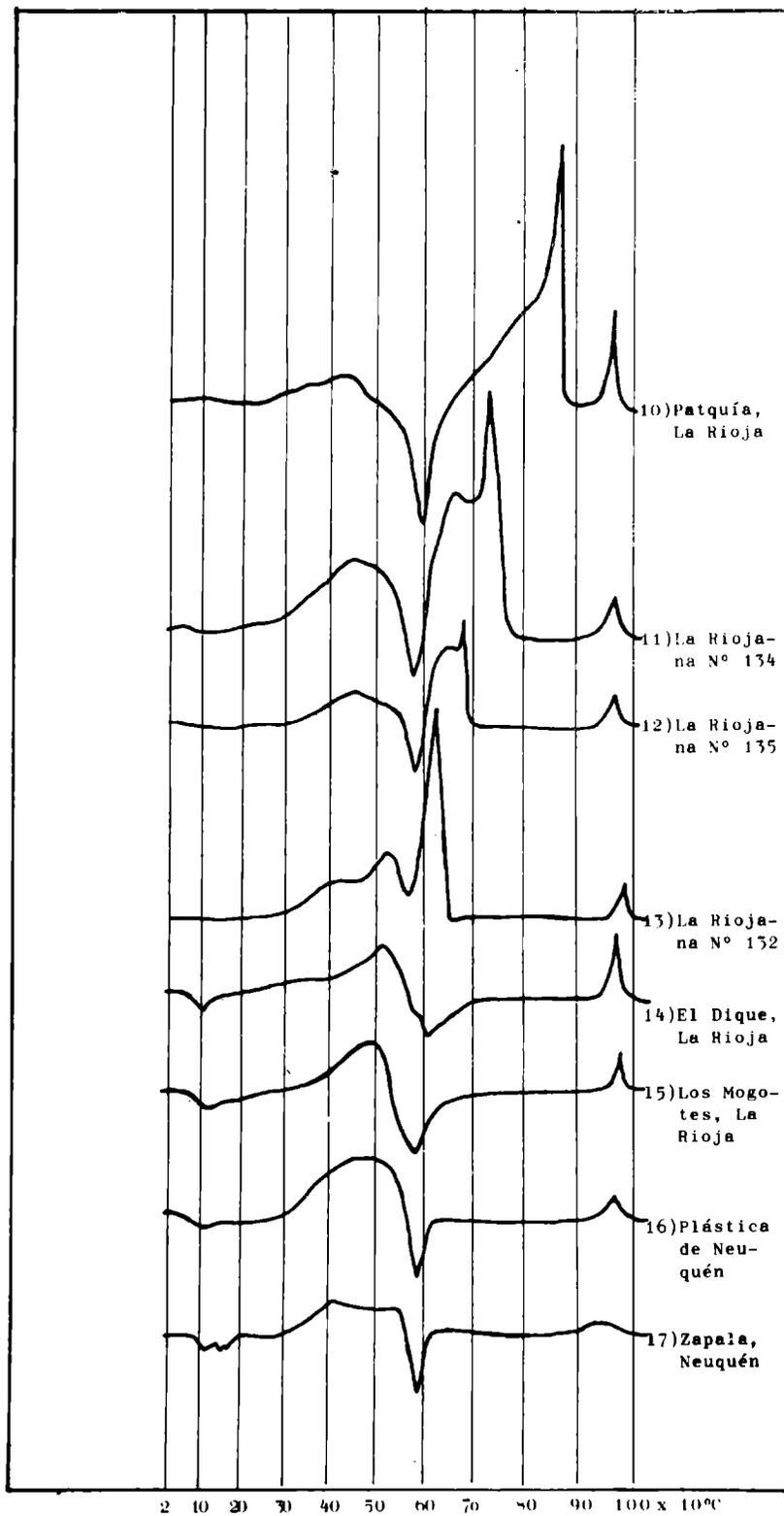


Fig. 7.- Diagramas obtenidos sobre arcillas argentinas

un estado intermedio entre el típicamente carbonoso y el húmico. Es posible anotar también la presencia de mineral halloysítico, en razón de la aparición del pico A y en ensanchamiento del B.

16 y 17. Plástica y Zapala, (Prov. de Neuquén). Con materia orgánica de tipo húmico, con descomposición térmica anterior a los 600^oC y contribuyente al desarrollo de propiedades ligantes. Se trata en este caso, de dos arcillas del tipo Ball Clay, con aporte de material arcilloso caolinítico y halloysítico, con muy poco ordenamiento estructural y elevado contenido en partículas de muy pequeño tamaño. El corto desarrollo de los picos evidencia, además, una contaminación con sustancias no arcillosas que, lógicamente, han de afectar la refractariedad del material.

En los termogramas de la fig. 8 es posible observar los efectos térmicos diferenciales de seis arcillas Claraz, provenientes de una misma cantera.

Como ya se mencionó antes, al analizar la Arcilla Claraz, ésta era una representante típica de kaolinita T.

Es posible verificar, por la observación de las curvas que el yacimiento posee una homogeneidad bastante pronunciada, en razón del mantenimiento de la estructura y tipo del material arcilloso, en las diferentes muestras observadas. En todos los casos se mantiene el orden estructural, tamaño de partícula relativamente grande y pureza mineralógica, lo que hace preveer una elevada refractariedad.

En la figura 9 se han graficado los termogramas de nueve muestras procedentes de yacimientos de Estación Comallo, Departamento Pilcaniyeu, Provincia de Neuquén y conocidos comercialmente como "Arcillas Comallo" y/o "Arcillas Pilcaniyeu".

Estos yacimientos se caracterizan por el predominio de mineral halloysítico, evidenciado por un notable pico A de agua interlamilar, que aparece en todos los termogramas.

Existe una variación bastante amplia en la pureza de las diferentes muestras. En las numeradas 14, 25, 26, 27 y 28 el mineral halloysita constituye la totalidad de las muestras;

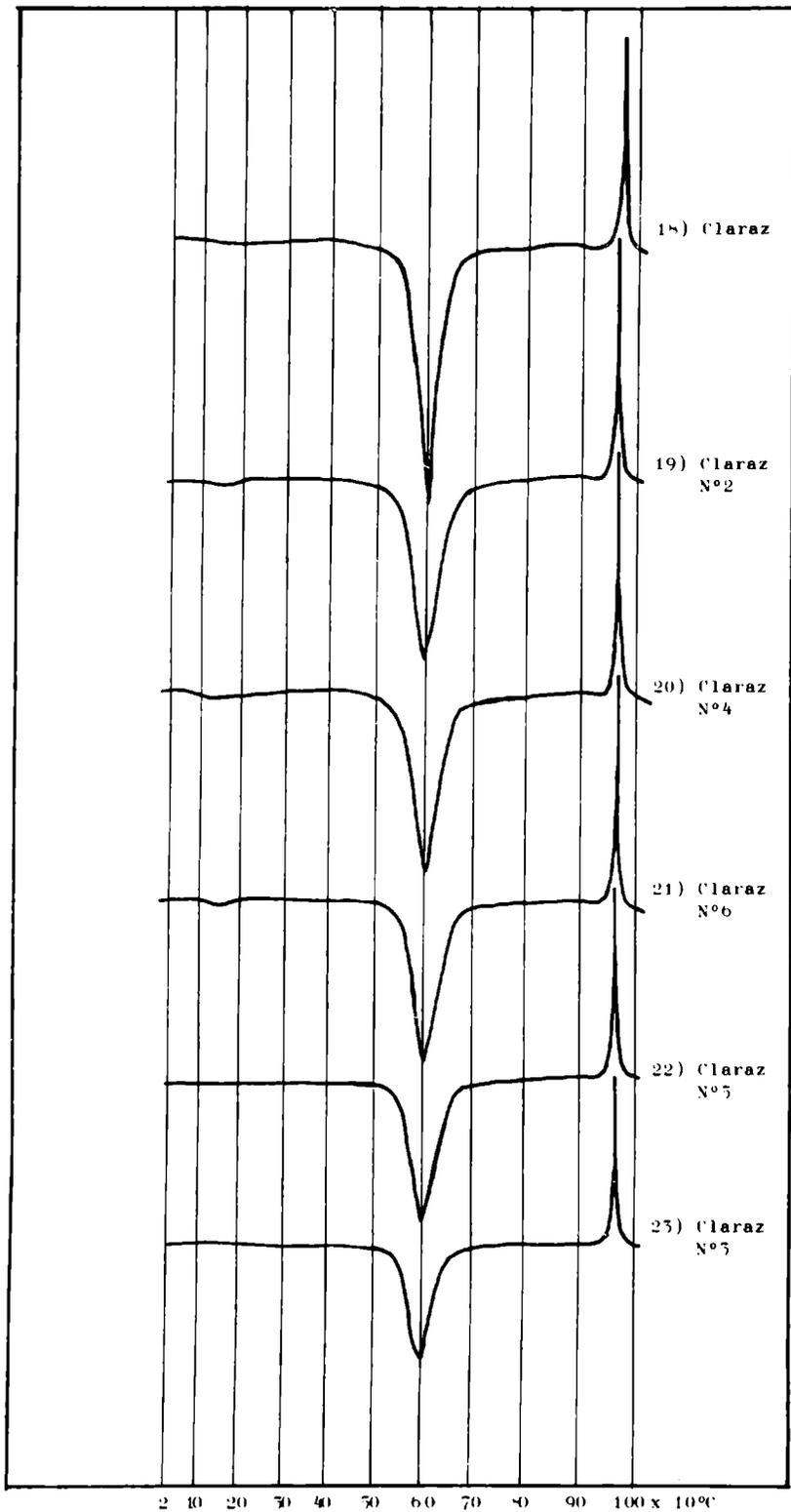


Fig. 8.- Diagramas obtenidos sobre arcillas argentinas

en las 29 y 30 existe una ligera dilución con material inerte, aunque dicho material posee aparentemente menor tamaño de partícula; finalmente, las dos últimas dan sus termogramas indicios de la presencia de otra kandita, presumiblemente kaolinita, en razón de la doble inflexión esbozada en el pico B.

Es posible deducir la elevada refractariedad de los minerales de los yacimientos Comallo-Pilcaniyeu, así como su habilidad para ligar en pastas con inertes refractarios.

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el estudio, mediante la técnica de Análisis Térmico Diferencial, de minerales arcillosos argentinos, empleados actualmente por la industria refractaria nacional.

Las muestras, obtenidas de usuarios, y provenientes de diferentes puntos del país, presentan características térmicas diferenciales, cuyo análisis permite establecer:

1. Los yacimientos de la Provincia de Buenos Aires, brindan minerales arcillosos de tipo kaolinítico, en algunos casos, de elevada pureza (Claraz, López y Tandil); en otros, variada impurificación (Chapadmalal, Mar del Plata, Barker).

2. Los yacimientos riojanos también poseen material kaolinítico, pero normalmente acompañado de materia orgánica carbonosa.

3. Las Provincias de Neuquén y Río Negro se caracterizan por poseer yacimientos arcillosos de tipo halloysítico, de elevada pureza en el caso de Comallo-Pilcaniyeu, donde es posible encontrar muestras con el mineral tipo. También posee Neuquén, junto a Río Negro, arcillas Ball, plásticas, de notable poder ligante.

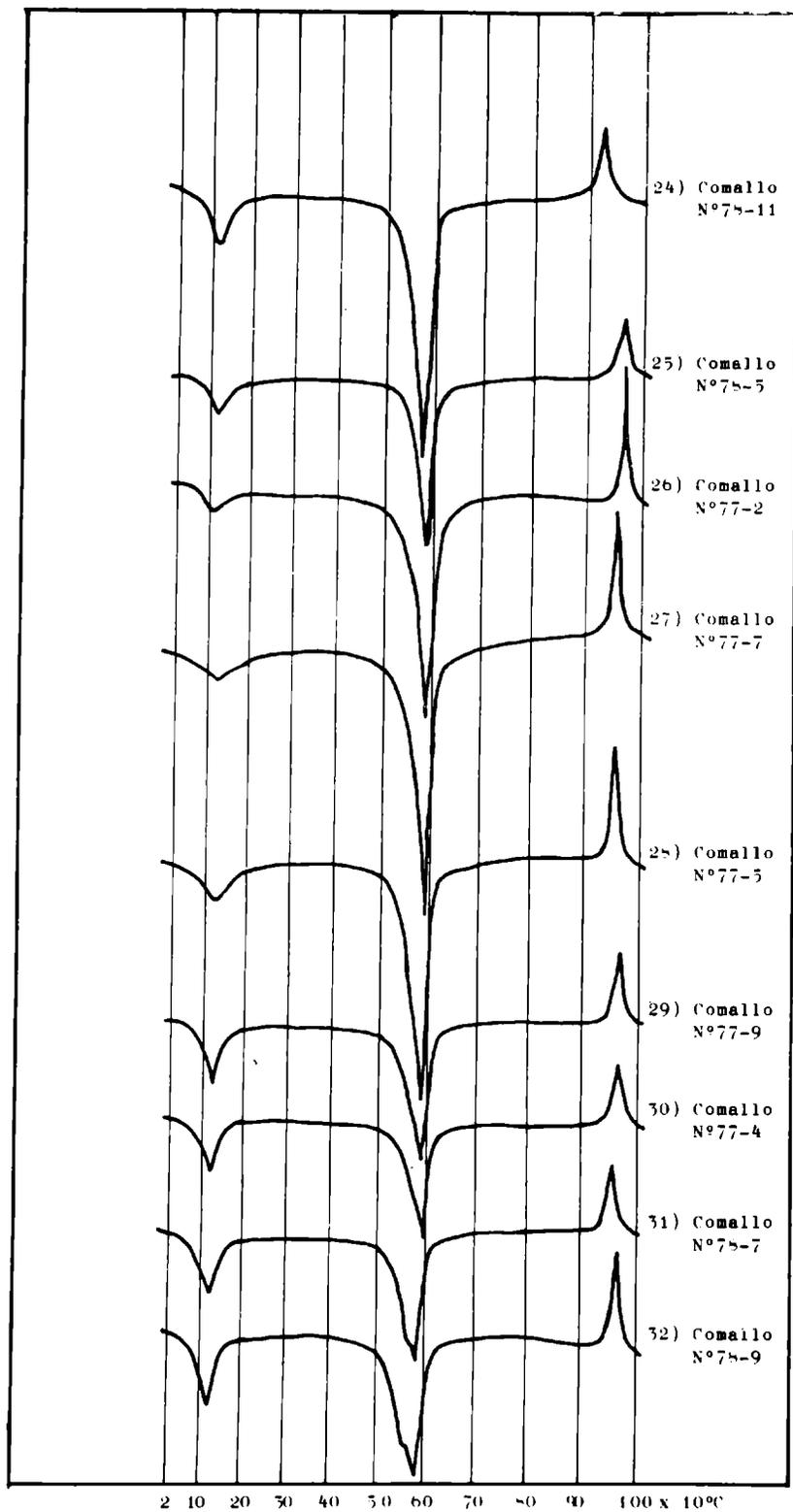


Fig. 9.- Diagramas obtenidos sobre arcillas argentinas

CONSIDERACIONES FINALES

Las conclusiones establecidas han de encontrar lógicamente una mayor amplitud y corroboración con el análisis de otros factores, características y comportamientos, de los citados minerales.

De esa manera, el enfoque global permitirá poseer un panorama amplio respecto a la actual riqueza minera arcillosa, así como la potencialización de nuevos yacimientos, no desarrollados aún.

BIBLIOGRAFIA

1. Brown G. - Report of the Clay Minerals Group Sub-Committee on Nomenclature of Clay Minerals. Clay Min. Bull., 2, 294, (1955).
2. Smothers W. J. and Chiang Yao. - Differential Thermal Analysis: Theory and practice. Ohem. Publ. Co., N.Y. (1958).
3. Mackenzie R. C. - The Differential Thermal Investigation of Clays. Min. Soc. of London, (1957).
4. Brindley G. W. and Nakahira M. - New concept of the transformation sequence of Kaolinite to Mullite. Nature, 181, 1333, (1958).
5. Mackenzie R. C. and Farquharson K. R. - Standardization of d.t.a. technique. Citado en (3), página 48.
6. Mackenzie R. - Citado en (3), página 124.
7. Salmang H. - Ceramics, Physical and Chemical Fundamentals; 31, Londres (1961).

DEFORMACION BAJO CARGA A ELEVADAS TEMPERATURAS
DE MATERIALES REFRACTARIOS

Dr. Angel R. Rossini

Dr. Luis A. Mennucci

Tco. Qco. Juan Devoto Ramos

INTRODUCCION

La refractoriedad bajo carga, denominación con que también se conoce este ensayo, es una medida de la resistencia a la deformación que presenta un material refractario, cuando se lo somete a una carga constante y se va elevando progresivamente la temperatura. Es un ensayo tecnológico que permite conocer la temperatura a la cual el material refractario pierde su valor soporte. Este tipo de ensayo, descrito originalmente en la norma alemana DIN 1 064, tiene gran difusión en el continente europeo y ha sido adoptado, utilizando un sistema de medida diferencial, por la "International Organization for Standardization" (ISO), en su proyecto ISO/TC 33/WG2, del mes de octubre de 1967. La técnica de ensayo desarrollada en el LEMIT, permite obtener datos de deformación bajo carga similares a los de la norma ISO utilizando los antiguos equipos diseñados de acuerdo con la norma DIN 1 064.

OBJETO DEL TRABAJO

Debido a la necesidad de obtener valores de refractoriedad bajo carga, similares a los sugeridos por el proyecto ISO/TC 33/WG2, utilizando los equipos diseñados según norma DIN 1 064, se ha desarrollado un método de trabajo que permite adaptar, dentro de ciertos límites, los antiguos equipos a las exigencias de las normas ISO.

Con el método de ensayo propuesto, se han obtenido valores de aplastamiento bajo carga, en algunas arcillas refractorias argentinas y en los chamotes elaborados con ellas, con el objeto de conocer sus temperaturas de deformación.

También se realizaron ensayos sobre ladrillos sílico-

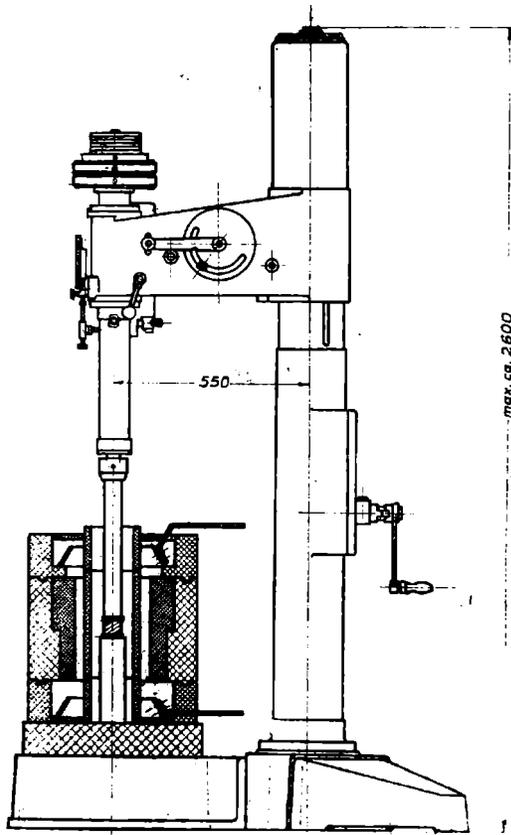


Fig. 1

Esquema del equipo
utilizado

aluminosos de fabricación nacional. Se presentan los resultados obtenidos con ambas técnicas para hacer notar sus diferencias.

PARTE EXPERIMENTAL

El equipo empleado es de fabricación alemana y ha sido construido de acuerdo a la norma DIN 1 064, por "Chemisches Laboratorium für Tonindustrie". Se utilizó sin modificaciones; pero se efectuó una calibración para conocer la dilatación que sufren las barras de carbón (grafito) durante el ensayo. En la figura 1, se observa un corte del horno de ensayo.

El horno se calienta eléctricamente, mediante una re-

sistencia de carbón granulado, a una velocidad de 8 a 10 °C/min, mediante control manual del transformador.

La probeta, es un cilindro de 50 mm de altura por 50 mm de diámetro, cortado mediante barreno diamantado de una pieza refractaria, o bien moldeada por prensado en semi-seco de una arcilla o mezcla refractaria cruda.

La carga de deformación es de 2 kg/cm^2 , transmitida directamente por el juego de pesas, a través de la barra de carbón superior, la probeta queda ubicada en la zona central del horno, apoyada sobre una columna inferior, también de carbón. Solidario a la columna de transmisión de la carga existe un mecanismo que transmite los movimientos de la misma a un dilatómetro de lectura directa y a un sistema registrador del movimiento en función del tiempo.

La temperatura del interior del horno y de la probeta se miden mediante una termocupla de Pt-Rh 18 %-Pt, que conectada a un registrador milivoltimétrico sincronizado con el registrador de movimiento permite automatizar el sistema de lecturas del equipo. La termocupla se coloca en la parte central de la probeta y lo más próxima posible a su superficie.

CALIBRACION DEL EQUIPO

Con el objeto de conocer las variaciones de longitud que sufre la probeta, independientemente de las elongaciones de las barras de carbón, cuando se mide el conjunto de ambos movimientos provocados por la elevación de la temperatura y la carga soportada, es necesario realizar una calibración con una probeta de dilatación conocida, que no experimente aplastamiento durante el ensayo. Para ello se empleó una probeta de ladrillo sílico, marca "Star" procedente de los Estados Unidos de Norteamérica, cuya dilatación absoluta fue medida hasta 1500°C mediante un dilatómetro automático (1).

En la figura 2, se graficaron el dilatograma de la

probeta de calibración (curva A) y la curva de deformación (B), del conjunto probeta-barras de carbón obtenida, en las condiciones de ensayo, con el equipo de deformación bajo carga. La diferencia entre las curvas A y B, expresada en dilatación por ciento a cada temperatura, es el valor de la dilatación de las barras de carbón en las condiciones de trabajo. Estos valores se restarán a los gráficos de aplastamiento obtenidos con el equipo según norma DIN 1 064, para obtener el valor real de aplastamiento de la probeta.

La tabla I, expresa en forma comparativa las principales variables de las técnicas de ensayo DIN, ISO y LEMIT, presentada en este trabajo.

Durante el ensayo se obtienen una serie de medidas de dilatación o aplastamiento y sus temperaturas correspondientes, con estos datos se calculan en por ciento los movimientos experimentados por el conjunto probeta-barras de carbón, a los que se les restan los valores respectivos de calibración. Con los resultados se traza un gráfico como el de la figura 3, sobre el que se marcan los puntos correspondientes a 600 y 900°C, los que se unen por una línea recta, que se tomará como base para los cálculos de los porcentajes de aplastamiento. Si alguna parte de la curva de aplastamiento supérase esta línea, la línea de base definitiva será una paralela a ella que pase por el punto máximo de dicha curva. De la misma manera que en la norma ISO indicaremos tres temperaturas en las cuales el aplastamiento alcanza el 0,5, el 2 y el 5 % del valor original de la probeta.

En la figura 4, puede observarse el gráfico de aplastamiento de un ladrillo sílico aluminoso, obtenido según norma DIN 1 064, del mismo, transformando la deformación expresada en milímetros a por ciento, y restando para cada temperatura los valores de calibración se obtiene la figura 3. La comparación de ellas demuestra inmediatamente el error sistemático que se comete, al no considerar la dilatación de las barras de carbón.

T. A. B. L. A. I

CUADRO COMPARATIVO DE LAS DISTINTAS TÉCNICAS DE ENSAYO

Técnica	Medida de la deformación	El aplastamiento se expresa en:	Carga (kg/cm ²)	Veloc. de calentamiento (°C/min)	Se indican tempe- raturas a aplas- tamientos de:	Transmisión de la carga mediante:	Medida de la temperatura en la probeta
DIN	Total	mm	2	8	0,5 y 20 mm	Barras de Carbón	Exterior
ISO	Diferencial	%	2	4	0,5-2 y 5 %	Tubos de Alúmina	Interior
LEMIT	Diferencial Indirecta	%	2	8-10	0,5-2 y 5 %	Barras de Carbón	Exterior

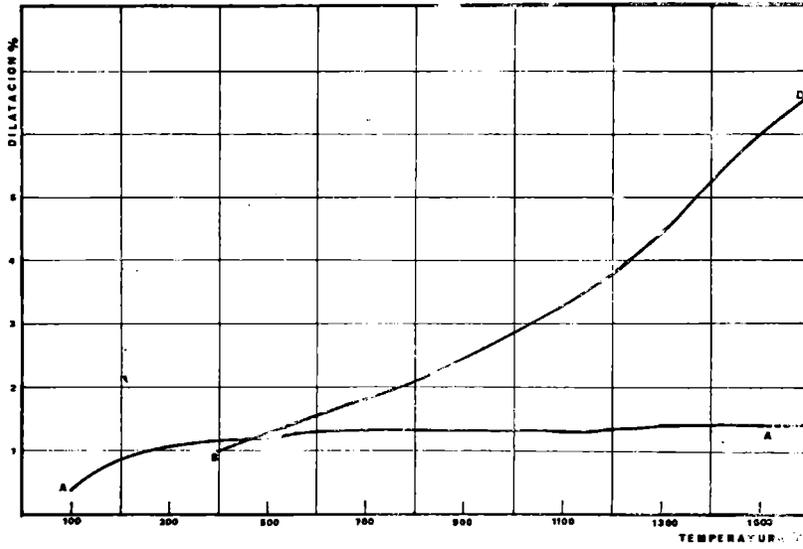


Fig. 2
Gráficos de calibración

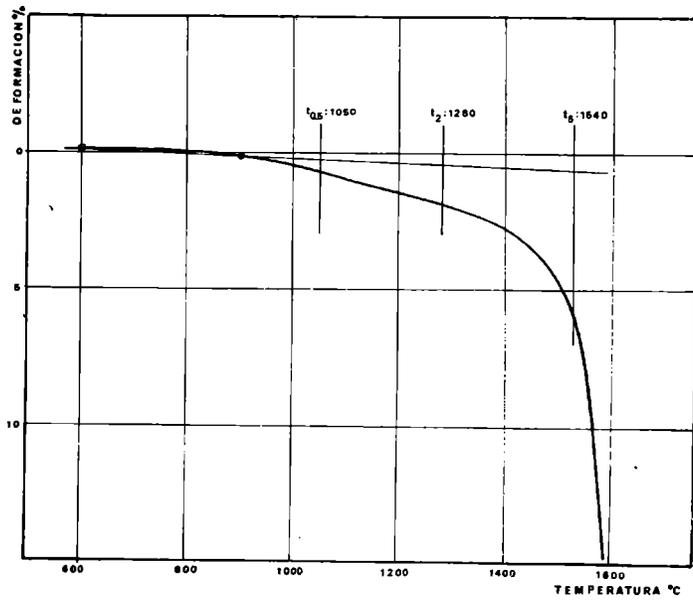


Fig. 3
Curva de aplastamiento según norma ISO
adaptada por LEMIT

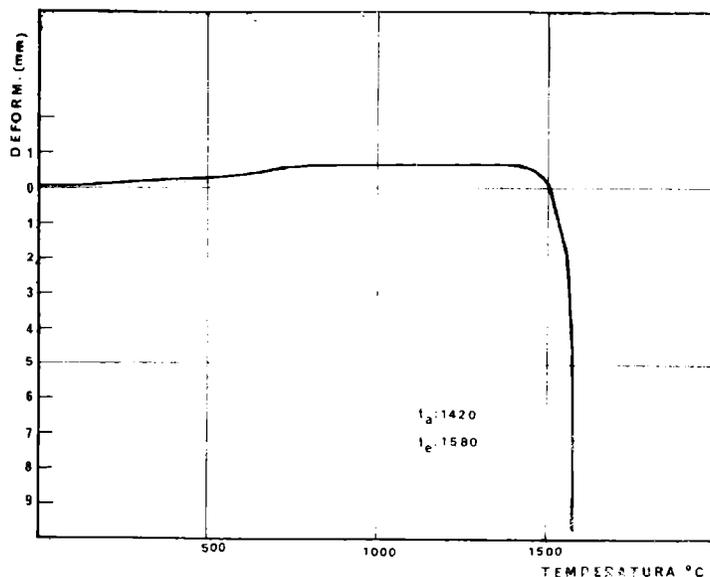


Fig. 4

Curva de aplastamiento según norma DIN 1 064

APLICACION DE LA TECNICA PROPUESTA

a) Sobre arcillas refractarias

La arcilla refractaria generalmente está constituida por caolinita, cuarzo e impurezas. La calcinación de este material a temperaturas superiores a 1 200⁰C da un producto, conocido industrialmente como chamote, que está formada por mullita, cristobalita y fase vítrea. Las impurezas en la mayoría de los casos son silicatos poco refractarios que contienen cantidades variables de cationes Fe⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, Ti⁺⁺⁺⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺, los que durante el tratamiento térmico funden o reaccionan total o parcialmente dando origen a una fase vítrea, que aglomera los componentes cristalinos del chamote, de la viscosidad y cantidad de esta fase vítrea dependerá la resistencia a la deformación bajo carga a alta temperatura, del material en estudio.

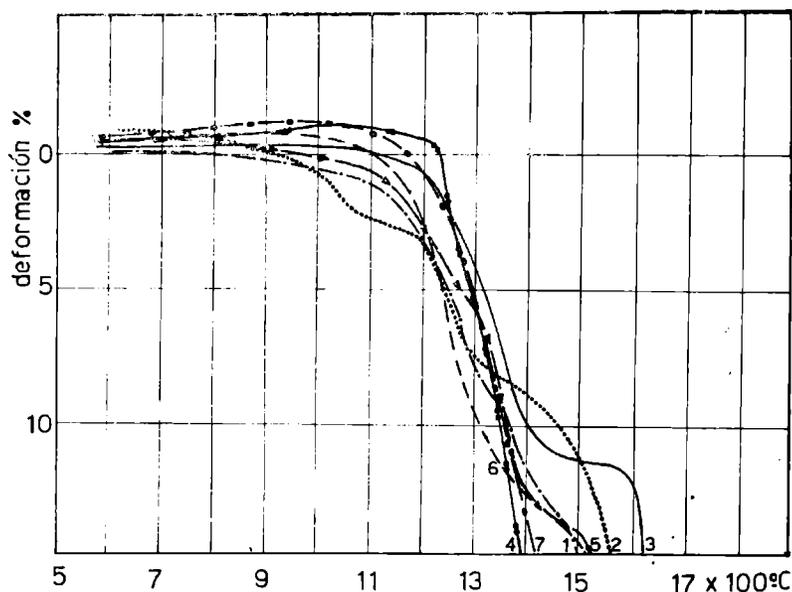


Fig. 5

Curvas de aplastamiento de arcillas refractarias crudas

Todos los chamotes refractarios, elaborados a partir de arcillas, contienen cristobalita, aunque se utilicen arcillas libres de cuarzo, debido a la liberación de sílice que se produce durante el proceso de mullitización (2 - 3).

Se estudiaron siete arcillas refractarias argentinas, seleccionadas entre las más representativas de las actualmente en uso, las características físico-químicas de las mismas se encuentran en las tablas II y III.

Las muestras se molieron hasta pasar malla ASTM nº 70, y se elaboraron probetas por prensado a 400 kg/cm^2 , con una humedad del 8 % (4), las medidas normalizadas corresponden a un cilindro de 5 cm de diámetro por 5 cm de altura.

Se prepararon 4 probetas de cada arcilla, dos de las cuales fueron secadas a 100°C (muestras crudas) y las otras dos se calcinaron a 1450°C durante 5 h (muestras calcinadas). Los resultados de estas dos series de ensayos permiten comparar la resistencia a la deformación bajo carga del material crudo y cocido (chamote).

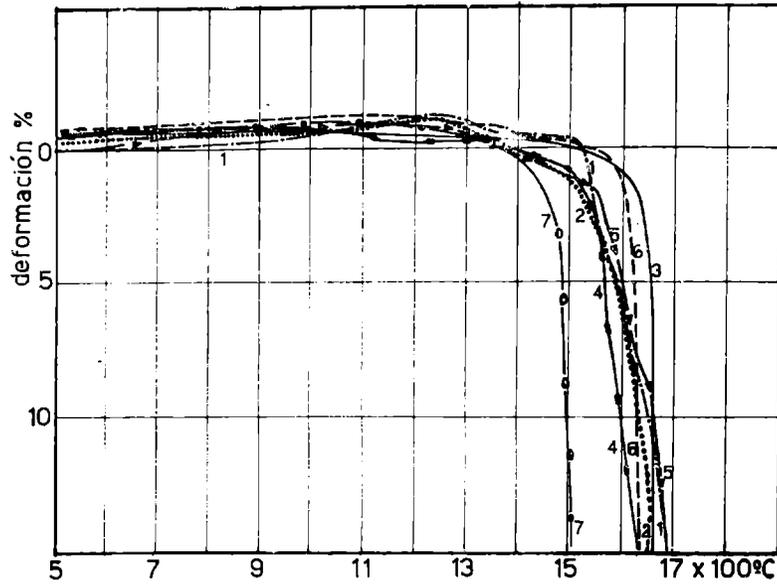


Fig. 6

Curvas de aplastamiento de arcillas calcinadas

REFERENCIAS. Fig. 5 y 6

Amaná Gris	-----	1
Claraz	2
López	————	3
Barker	—•••••	4
Norquinco	—▷▷▷▷▷	5
Plástica de Neuquén	— — — —	6
Chapadmalal	—○—○—○—○—○—○—	7

La figura 5 permite observar el comportamiento de las arcillas crudas, y la figura 6 el de las arcillas calcinadas.

En la tabla IV se dan las temperaturas correspondientes de acuerdo con la norma ISO adaptada por el LEMIT.

b) Sobre ladrillos sílico-aluminosos:

Se ensayaron cinco ladrillos refractarios sílico-alu-

T A B L A II

COMPOSICION QUIMICA Y C.P.E. DE LAS ARCILLAS ESTUDIADAS

Arcilla Nº	Denominación	Pérdida por cal- cinación a 960°C - %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	C.P.E.	Temperatura Equivalente °C
1	Amaná	14,20	42,00	38,90	1,10	1,40	0,50	0,30	0,35	0,50	33/34	1743/1755
2	Claraz	13,20	43,50	37,00	1,20	3,10	0,40	0,20	0,10	1,40	32/33	1717/1743
3	López	11,30	49,00	35,40	1,80	1,30	----	----	0,32	1,80	32/32½	1717/1724
4	Barker	8,00	46,40	35,50	1,60	1,40	0,80	0,40	0,50	4,50	31/32	1685/1717
5	Norquincó	13,30	44,00	36,00	1,50	1,80	2,50	----	0,50	0,20	32½/33	1724/1743
6	Plástica de Neuquén	9,50	58,40	25,00	3,20	0,60	0,50	0,30	0,40	1,40	26/27	1621/1640
7	Chapadmalal	6,80	65,00	23,20	0,50	1,20	----	----	0,32	2,30	26/27	1621/1640

T A B L A III

COMPOSICION MINERALOGICA ESTIMADA POR DIFRACCION DE RAYOS X

Arcilla Nº	Denominación	Caolinita %	Halloisita %	Illita %	Pirofilita %	Montmorillonita %	Cuarzo %	Feldespatos %	Observaciones
1	Amaná	90-95	---	---	---	---	Rastros	Rastros	Contiene material carbonoso
2	Claraz	85-90	---	---	---	---	5-10	---	---
3	López	85-90	---	5-10	---	---	5-7	---	---
4	Barker	50-60	---	20-25	15-20	---	---	---	---
5	Norquincó	40-60	30-50	Rastros	---	---	---	Rastros	---
6	Plástica de Neuquén	40-50	---	---	---	15-20	Rastros	---	Elevado contenido de material amorfo.
7	Chapadmalal	40-50	---	20-30	---	---	10-15	---	---

T A B L a . IV

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE ARCILLAS

Arcilla Nº	Denominación	Arcilla Cruda			Arcilla Calcinada a 1 450° C		
		Temperaturas de aplastamiento en °C 0,5 %	2 %	5 %	Temperaturas de Aplastamiento en °C 0,5 %	2 %	5 %
1	Amaná	1 075	1 175	1 265	1 325	1 515	1 565
2	Claráz	975	1 060	1 130	1 310	1 480	1 575
3	López	1 135	1 235	1 315	1 530	1 635	1 660
4	Barker	1 165	1 235	1 280	1 375	1 530	1 570
5	Marquincó	1 075	1 190	1 290	1 290	1 475	1 580
6	Plástica de Neuquén	1 075	1 175	1 235	1 300	1 520	1 625
7	Chapadmalal	1 060	1 180	1 265	1 225	1 420	1 480

T A B L A V

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LADRILLOS REFRACTARIOS LITICO-ALUMINOSOS

Ladrillo	Norma DIN 1 064		Norma ISO adaptada :		LEMIT	C.P.E.	Temperatura Equivalente °C	Módulo kg/cm ²	Porosidad %
	t _a = 0,3 mm (0,6%)	t _b = 20 mm (40%)	0,5 %	2 %					
A	1 510	1 660	1 000	1 225	1 530	33	1 743	68,7	21,8
B	1 410	1 585	1 165	1 415	1 480	33	1 743	57,7	23,6
C	1 420	1 580	1 050	1 280	1 540	33	1 743	102,1	20,3
D	1 410	1 570	1 150	1 385	1 495	32	1 710	65,5	18,9
E	1 320	1 450	1 075	1 310	1 405	31	1 683	98,0	20,0

NOTA: El ladrillo C corresponde a las figuras 3 y 4.

minosos para observar las diferencias entre las temperaturas de aplastamiento según norma DIN e ISO adaptada por LEMIT. En la tabla V pueden observarse los resultados obtenidos, con ciertas características físicas de los ladrillos experimentados.

DISCUSION DE RESULTADOS

a) El método propuesto permite utilizar los hornos de deformación bajo carga DIN 1 064, para obtener valores más exactos de temperaturas de aplastamiento, similares a los de la norma ISO/TC 33/WG2, ver tabla I.

b) Comparando las temperaturas de aplastamiento de un mismo ladrillo, expresadas de acuerdo a una u otra técnica se observan importantes diferencias, por lo que en todos los resultados deberá dejarse indicaca la técnica de ensayo empleada y el porcentaje de aplastamiento correspondiente a cada temperatura.

c) La calibración propuesta es válida únivamente si la probeta utilizada como patrón no sufre ningún aplastamiento durante el ensayo y si la dilatación de la misma es igual con cargas de 40 g/cm^2 , como la utilizada en el dilatómetro, o de $2\ 000 \text{ g/cm}^2$ como la empleada en el ensayo de deformación bajo carga. Estas condiciones pueden lograrse con probetas de materiales cristalinos que contengan solamente pequenísimas cantidades de fase vítrea, como en el caso del ladrillo de sílice utilizado.

d) El sistema de calentamiento, a resistencia de carbón granulado, presenta los inconvenientes que se enumeran a continuación:

- 1) Dificil regulación de la temperatura.
- 2) Poca uniformidad de calentamiento, por formación de arcos dentro de la resistencia de carbón granulado.
- 3) Atención continúa de la resistencia de carbón gra-

nulado, para evitar en lo posible la formación de arcos.

- 4) Excesivo consumo de las barras de carbón que transmiten la carga.
- 5) Atmósfera con elevado contenido de monóxido de carbono.

e) Los porcentajes de aplastamiento expresados según norma ISO, se ven influenciados por la forma de la curva entre 600 y 900°C, por lo que pueden apreciarse discrepancias entre los valores tabulados en la tabla IV y las lecturas obtenidas directamente de las figuras 5 y 6.

f) En las muestras de arcillas crudas las manifestaciones observadas son similares a las obtenidas en dilatometría (1) ya que este ensayo es en realidad una dilatometría bajo carga. Los resultados son influenciados por la composición mineralógica, como puede apreciarse en la muestra nº 4, constituida por 20-25 % de illita que es un componente expansivo en el rango de temperaturas que va de 600 a 1 000°C.

g) Analizando las curvas obtenidas sobre materiales cocidos, se observa que las temperaturas correspondientes al 0,5 - 2 y 5 % de aplastamiento no tienen relación con las composiciones químico-mineralógicas de las arcillas. Para aplastamientos superiores al 10 % comienza a existir cierta relación entre valores de temperatura soporte y composición, como se observa en las arcillas 1-2-3 y 5, que son las más refractarias y de menor contenido en óxidos fundentes.

h) Debido a la complejidad de la fase vítrea existente en los materiales sílico-aluminosos, la cual va variando en calidad y cantidad durante el ensayo, resulta arriesgado intentar correlacionar temperaturas de aplastamiento y composición química o cristalográfica de los materiales estudiados.

BIBLIOGRAFIA

1. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Figueras R. - Dilatometría de arcillas refractarias nacionales. LEMIT, 3-1969 (Se-

rie II, nº 141), p. 31.

2. Rossini A. R., Cohen Arazzi S. y Krenkel T. G. - Mullitización de mezclas de arcilla caolinítica e hidróxido de aluminio. Bol. Soc. Esp. Cerámica, Vol. 9, nº 5, p. 581, 1970.
3. Brindley G. W. and NaKahira. - Kaolinite-Mullite Reaction Series. J. Am. Ceram. Soc. 42 (7) 1959, p. 311.
4. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Figueras R. - Estudio de algunas variables en la densificación de arcillas refractarias nacionales. LEMIT, 3-1970 (Serie II, nº 163), p. 3.

**ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS
DURANTE EL MEZCLADO**

Dr. Jorge O. Agnusdei

Lic. Pascual O. Frezzini

Lic. Angel A. Conai

Serie II, nº 197

INTRODUCCION

Cuando se estudian los factores que afectan la durabilidad de una mezcla asfáltica, hay que considerar aquellos que inciden directamente sobre la mezcla o sobre los componentes de la misma, en forma separada.

Comencemos por definir que se entiende por durabilidad en sus distintos aspectos:

Durabilidad de una mezcla asfáltica es la capacidad de resistir sin fisurarse, deformarse o desintegrarse durante largo tiempo y en condiciones de servicio.

Durabilidad de un betún asfáltico es la capacidad de mantener sus propiedades ligantes y cohesivas durante la vida útil del pavimento.

En cuanto al agregado pétreo, la durabilidad está íntimamente ligada con su resistencia a la degradación.

Es difícil evaluar la durabilidad de una mezcla asfáltica en base a la del agregado pétreo y a la del betún en forma aislada, ya que hay factores que inciden directamente sobre la mezcla, como ser el contenido de ligante, vacíos, grado de compactación, condiciones climatológicas y el tránsito. Estos factores actúan en conjunto, llegando a superponerse en su accionar.

Son numerosos los trabajos de laboratorio que han estudiado el envejecimiento de asfaltos utilizados en mezclas asfálticas en caliente. Una buena recopilación se encuentra descripta en el trabajo de Neppe (1) y uno de los autores (2). Entre los ensayos que se destacan está el de pérdida en película fina del Bureau of Public Roads, el desarrollado por Griffin y colaboradores que hace uso del microviscosímetro de placas deslizantes y recientemente el de la película fina rotativa normalizado por el Departamento de Caminos del estado de California (3).

Si bien todas estas técnicas tienden a predecir mediante ensayos de laboratorio el endurecimiento que sufrirá el betún durante el proceso de mezclado en usina y durante la vida útil en servicio, no dicen mucho en cuanto a las posibles causas que motivan la alteración del asfalto.

Es de particular importancia evitar que el betún se altere en demasía durante la operación de mezclado ya que hay experiencias que ponen de manifiesto que se puede inferir un daño equivalente a más de 10 años de vida útil, por un excesivo endurecimiento durante el mezclado.

La consecuencia de un elevado grado de alteración ya sea en usina o en servicio, medida por un incremento considerable en la consistencia del betún, redundará en una mayor tendencia del mismo hacia la fractura. A bajas temperaturas, especialmente en invierno, y a elevada velocidad de aplicación de la carga, producida por los vehículos en movimiento, el fenómeno de fragilidad se hace más pronunciado con el consiguiente deterioro de la estructura.

CAUSAS Y FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ALTERACION DE LOS ASFALTOS

Los betunes asfálticos pueden alterarse bajo dos circunstancias bien definidas. En primer término, durante la operación de mezclado, proceso de corta duración pero crítico, dado lo elevado de la temperatura y el pequeño espesor de la película de asfalto que recubre al agregado. Segundo, durante su vida útil ya que una vez colocada la mezcla asfáltica en el camino, el factor de mayor incidencia es el tiempo, dado que las temperaturas son bajas.

Según Weetman (4) el 75 por ciento del endurecimiento de un asfalto se produce durante la operación de mezclado.

En cuanto a las posibles causas que producen el endurecimiento del asfalto, debemos citar en primer término a la oxidación y a la pérdida de componentes volátiles, fenómenos

que se producen principalmente durante la operación de mezclado. En segundo término la polimerización y formación de estructuras en el transcurso del tiempo, fundamentalmente durante su vida en servicio. Si bien es cierto que el asfalto sigue oxidándose en esta etapa, la velocidad con que lo hace es muy baja.

Blooker y van Hoorn (5) estudiando profundamente el proceso de oxidación de asfaltos, llegan a la conclusión de que cuando un betún se oxida se forman grupos polares conteniendo oxígeno. Estos grupos tienden a asociarse, incrementando la viscosidad del betún. Según estos autores el oxígeno que se consume durante la oxidación estaría presente en el asfalto alterado bajo la forma de grupos carbonilos y sulfóxidos, dependiendo la mayor o menor formación de uno u otro grupo de si la oxidación se realizó en presencia o ausencia de luz y además del tiempo de exposición. El resto del oxígeno consumido desaparecería en gran parte como CO_2 y H_2O , como consecuencia de esto se produciría un aumento en el contenido de asfaltenos.

En cuanto a la pérdida de componentes volátiles la magnitud de esta alteración depende de la temperatura, las condiciones de mezclado y la naturaleza del betún, ya que como se sabe la evaporación se realiza a expensas de la fracción liviana de los maltenos. También incide la forma en que el betún haya sido procesado en usina.

La formación de estructuras en los asfaltos con el correr del tiempo o tixotropía fue estudiado por Traxler (6) quien manifiesta que el poder ligante de algunos asfaltos puede disminuir en gran parte por el desarrollo de estructuras como consecuencia de asociación o agregación de asfaltenos con aumento de viscosidad. Este fenómeno se pone de manifiesto a temperaturas por debajo del punto de ablandamiento y a diferencias de los demás procesos, este es del tipo reversible ya que por acción del calor esta estructura puede ser destruída.

Finalmente un factor que hay que tener en cuenta, es el tipo de agregado pétreo constituyente de la mezcla asfáltica ya que hay evidencias que la absorción de componentes aceitosos del asfalto por parte de agregados porosos pueden incrementar notablemente la viscosidad del mismo.

Como vimos, gran parte del incremento de viscosidad se produce durante la operación de mezclado en usina y a este aspecto pondremos especial énfasis: Muchas son las opiniones en cuanto a las posibles causas que producen el endurecimiento de un asfalto durante esta operación y de por sí muy encontradas. Para Brown (7) el principal proceso en el envejecimiento de un asfalto es la oxidación, mientras que Clark (8) sostiene que es la evaporación o pérdida de compuestos volátiles la causa principal, asumiendo la oxidación sólo un papel secundario.

Traxler (6) trabajando sobre películas de asfalto de 15 micrones de espesor, calentadas durante 4 horas a 107°C en ambiente de aire y de nitrógeno establece que en asfaltos con un contenido de asfaltenos del orden del 20 por ciento, el incremento de viscosidad debido a oxidación es del 65 por ciento y el 57 por ciento restante es debido a volatilización.

En asfaltos con bajo contenido de asfaltenos, el 55 por ciento del endurecimiento se debe a oxidación y el 45 por ciento a volatilización.

Durante el mezclado hay que tener en cuenta la temperatura y el tiempo de mezcla. Ciertas especificaciones de reparticiones viales establecen temperaturas máximas de mezclado, cuando lo razonable sería establecer una viscosidad óptima de mezclado, tal como lo hace el Instituto del Asfalto de EE. UU. (9). Es conocido el hecho de que asfaltos de penetraciones similares pueden tener viscosidades muy distintas a una temperatura determinada.

El tiempo de mezclado juega un papel importante en la alteración de los asfaltos. Serafín (10) sostiene que el mayor aumento de consistencia se produce durante los primeros 50 segundos nivelándose con el transcurso del tiempo. Las especificaciones del Estado de Michigan establecen un tiempo de mezcla entre 50 y 65 segundos para mezclas tipo concreto asfáltico y 55 a 50 segundos para mezclas más gruesas, tipo grava. En general el tiempo establecido por las distintas organizaciones viales oscila entre 50 y 60 segundos.

Kari (11) manifiesta la necesidad de contar con asfal-

tos más durables para incrementar la vida útil de los pavimentos ya que con las nuevas técnicas de manipuleo de mezclas asfálticas, éstas pueden llegar a permanecer almacenadas a temperaturas superiores a los 120°C , por espacio de varias horas, esto por razones de producción y operación de las plantas asfálticas. De ahí la necesidad de prevenir el endurecimiento excesivo de los betunes asfálticos durante el mezclado en usina.

Finalmente en lo que respecta al aumento de consistencia durante la vida útil, la experiencia de algunos investigadores (12) ha llegado a establecer que un pavimento está en el límite de servicio cuando la penetración del betún recuperado es menor de 20. Hablando en términos de viscosidad, Simpson y colaboradores (13) encontraron pavimentos con serias fallas en los que la viscosidad del asfalto a 25°C , era superior a 10^8 poises.

FORMAS EN QUE PODRIA SER ATENUADA LA ALTERACION PRODUCIDA EN USINA

En primer lugar un control estricto de la temperatura podría disminuir el grado de endurecimiento, esto puede lograrse con relativa facilidad dada la evolución alcanzada en la construcción de las plantas asfálticas.

En el caso de la oxidación el problema es más complejo y difícil y uno de los medios más conocidos, es mediante el uso de aditivos inhibidores de oxidación.

Varios son los investigadores que se han ocupado de este tema (14) (15) (16), etc., aunque la mayoría ha puesto especial empeño en ensayos practicados directamente sobre el par betún-aditivo y no sobre la mezcla betún-aditivo-agregado pétreo. La importancia de realizar los ensayos en presencia del agregado pétreo, radica en el hecho como se dijo anteriormente de que el endurecimiento de un asfalto puede variar en forma notable por la mayor o menor absorción de com-

ponentes livianos del betún por parte del agregado.

Para tener una idea del mecanismo de inhibición por parte de los aditivos, veremos en primer lugar, como podría explicarse el proceso de oxidación de los betunes asfálticos. Para ello recurriremos a lo propuesto por Bolland (17) para autooxidación de hidrocarburos puros: Se supone que durante el proceso de oxidación ocurren una serie de reacciones en cadena favorecidas por la presencia de ciertos catalizadores que provocan la reacción con el oxígeno. Los productos de oxidación primaria son hidroperóxidos, reacciones secundarias conducen a la formación de peróxidos, los que finalmente se descomponen en aldehidos y cetonas.

En ausencia de antioxidantes, la formación de hidroperóxidos se iniciaría con la pérdida de un átomo de hidrógeno de una molécula hidrocarbonada constituyente del asfalto con formación de un radical libre. Este radical libre es extremadamente inestable y tiene gran afinidad por el oxígeno, al cual adiciona. Para completar su estructura electrónica reacciona con una nueva molécula hidrocarbonada quitando otro átomo de hidrógeno y como consecuencia se forma un nuevo radical libre y así sucesivamente dando origen a una reacción en cadena.

Los aditivos inhibidores de oxidación pueden actuar de dos maneras diferentes: una, como donantes de un átomo de hidrógeno, para completar la estructura electrónica del radical libre y terminar la reacción en cadena; la reacción es retardada o inhibida hasta que el aditivo es consumido. Si bien el aditivo al donar un átomo de hidrógeno también originaría un radical libre, se cree que este adoptaría una configuración electrónica más estable y por lo tanto no dispondría de la energía necesaria para quitar un nuevo átomo de hidrógeno de los hidrocarburos. A estos aditivos se los conoce como atrapa radicales libres.

La otra forma de actuar de los aditivos es acelerando la destrucción de los peróxidos en productos inactivos para iniciar o propagar una reacción del tipo radical libre. El mecanismo involucrado sería una redistribución iónica (18). A esta clase de aditivos se los conoce como destructores de peróxidos.

OBJETO DEL TRABAJO

De acuerdo a lo antedicho, la discrepancia existente entre los distintos investigadores acerca de los diversos mecanismos de alteración de los asfaltos durante el mezclado en usina es muy grande. En este trabajo se pretende estudiar dicha alteración mediante medidas de viscosidad de los asfaltos recuperados de las mezclas sometidas a distintos procesos de calentamiento. Esta medida nos dará la sumatoria de la alteración producida por la pérdida de componentes volátiles y por la oxidación.

Mediante espectrofotometría infrarroja se cuantificarán los cambios estructurales que sufren los asfaltos durante el mezclado, principalmente aquellos causados por la oxidación.

Finalmente se estudiará la acción de ciertos aditivos recomendados como inhibidores de oxidación, verificando si su efectividad, medida por una disminución en la consistencia de los asfaltos recuperados respecto al original sin aditivo, es debido a su acción inhibidora o bien simplemente a una acción fluxante.

PARTE EXPERIMENTAL

Para proceder al estudio de la alteración de los asfaltos durante el mezclado, se prepararon mezclas asfálticas bajo diversas condiciones. El equipo mezclador es similar al descrito por Shattuck (22) con la única diferencia que se le ha adosado una camisa de aceite para poder mantener la temperatura con mayor precisión.

TABLA I

GRANULOMETRIA DEL AGREGADO PETREO

<u>TAMIZ</u>	<u>%</u>
Pasa 8 Ret. 10	0
Pasa 10 Ret. 40	28
Pasa 40 Ret. 80	34
Pasa 80 Ret. 200	24
Pasa 200	14

La mezcla empleada es del tipo "Sheet asphalt" constituida por arena oriental y filler calcáreo cuya granulometría se indica en la tabla I.

Las mezclas fueron siempre preparadas de la misma manera. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

Cantidad de agregado pétreo.....	1 880 g
Cantidad de asfalto solo o con aditivos..	120 g
Temperatura del agregado pétreo.....	185 °C
Temperatura del asfalto.....	150 °C
Temperatura del mezclador.....	150 °C
Tiempo de mezclado.....	60 seg
Velocidad de agitación.....	70-75 r.p.m.

La temperatura del asfalto coincidía con la recomendada por el Instituto del Asfalto ya que los valores de viscosidad están dentro del ámbito de 75-150 segundos como puede apreciarse en la tabla II. De acuerdo a las cantidades empleadas, el contenido de betún de esta mezcla es de 6 por ciento.

La temperatura final de la mezcla oscilaba entre 152 - 155°C.

TABLA II

CARACTERISTICAS DE LOS ASFALTOS EMPLEADOS

	M	CH
Peso específico a 25/25 °C	1,000	1,007
Penetración a 25°C (100 g - 5 seg)	76	81
Punto de ablandamiento (A y E), °C	46,9	46,6
Ductilidad a 25°C, cm	+ 150	+ 150
Punto de inflamación, Cleveland, °C	336	332
Ensayo de Oliensis	Neg.	Neg.
Solubilidad en S ₂ C, %	99,7	99,8
Viscosidad Saybolt Furol a 150°C, seg	114	110
Viscosidad absoluta a 60°C (ASTM D-2171) poises	1 918	1 512
Indice de penetración Pfeiffer	- 1,0	- 1,0

Las mezclas así preparadas se las trataba de diferentes formas, a saber:

- a) La mezcla que salía del mezclador era inmediatamente enfriada mediante un rociado con nieve carbónica. De esta manera se pudo ver cual es la influencia del mezclado en las condiciones de trabajo impuestas.
- b) La mezcla se recibía en una bandeja de metal de 31 x 16 x 5 centímetros y era colocada en una estufa a 150°C durante 30 minutos. El objeto de esta operación es estudiar el efecto de un tiempo prolongado de calentamiento de la mezcla a temperatura elevada.
- c) La mezcla colocada en la bandeja descripta anteriormente se la introducía en la estufa calentada inicialmente a 150°C, disminuyendo la temperatura en forma paulatina has-

ta los 120°C en un intervalo de 30 minutos. Con esto se pretendió simular el proceso que sufre la mezcla desde la salida del mezclador hasta su posterior colocación en obra. Las mezclas se prepararon con los asfaltos solos y con aditivos.

Una vez las mezclas frías se recuperaba el betún mediante el método de Abson (23) y en los asfaltos así obtenidos se practicaban ensayos de viscosidad y análisis infrarrojo.

Las determinaciones de viscosidad se efectuaron, siguiendo la técnica A.S.T.M. D-2171, mediante viscosímetros capilares de vacío a 60°C. Para el caso del estudio infrarrojo tomamos como base lo realizado por Beitchman (19) y otros (20), (21) quienes estudiando la durabilidad de asfaltos de alta consistencia encontraron un aumento en la absorción a longitudes de onda de 2,91, 5,88 y 9,71 micrones (grupos OH, C=O y C-O) en asfaltos oxidados artificialmente.

Además concluyeron que el aumento en la absorción era inversamente proporcional a la durabilidad.

Para el análisis de infrarrojo se empleó un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo 125, exponiendo películas del asfalto en estudio preparados de acuerdo a la técnica descrita por Beitchman con algunas modificaciones a saber:

Sobre una hoja de papel celofán de 25 micrones de espesor, verter una gota del asfalto fundido, colocar inmediatamente una segunda hoja de celofán. El conjunto de las dos hojas y el asfalto se coloca entre dos placas de metal perfectamente pulidas y calentadas a aproximadamente 80°C, las cuales son sometidas a la acción de una prensa hidráulica a una presión de aproximadamente 250 kg/cm² mantenida durante 10 segundos.

De esta manera se forman películas de asfalto con un espesor que oscila entre los 20 y 30 micrones, los cuales son verificados con un tornillo micrométrico. Estas variaciones en el espesor están dentro de las tolerancias establecidas por otros autores (20) quienes demuestran que el efecto del espesor de la película sobre la transmitancia es muy pequeño en

el rango comprendido entre 20 y 30 micrones. La película así formada es humedecida con agua procediéndose a separar una de las hojas de celofán, quedando la segunda hoja con la película de asfalto adherido. Para separar esta segunda hoja, se adhiere por simple contacto, la parte del betún, a un soporte plástico con un pequeño orificio en su centro, humedeciendo nuevamente el conjunto se retira la segunda hoja quitando cuidadosamente las gotas de agua que puedan quedar adheridas y de esta manera tener la película de asfalto en condiciones de ser ensayada. Los soportes con las películas una vez colocadas en el aparato se refrigeran mediante una corriente de aire para evitar su rotura, debido a la baja consistencia que adquiere el asfalto al incidir la radiación infrarroja.

Las características de registro empleadas fueron las siguientes:

Zona de registro	:	2 000 - 900 cm^{-1}
Detector	:	Golay
Programa de ranura:		5

MATERIALES EMPLEADOS

En el trabajo se emplearon dos asfaltos argentinos provenientes de crudos de la zona de Challacó y Medanitos identificados con las letras CH y M. Ambos son asfaltos de destilación directa encuadrados dentro del rango de penetración 70-100. Las características se muestran en la tabla II.

Los aditivos empleados fueron: 2-6 di-ter-butyl p-cre-sol ($\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$) identificado con la letra I, fenotiazina ($\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_5$) con la letra F y sulfanilamida ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$) con la letra S. Los dos primeros se emplearon en concentraciones de 1 y 2 % en peso, mientras que el tercero al 0,2 %. Al primero de los inhibidores podríamos ubicarlo dentro del grupo atrapa radical libre, mientras que a los dos restantes

T A B L A IIITRATAMIENTO A QUE FUE SOMETIDA LA MEZCLA ASFALTICA

Asfalto original		Enfriada con nieve carbónica	30 min de 150 a 120 °C*	Calentada 30 min a 150°C			
Material	Viscosidad poises	Viscosidad poises	R.V. R.V.	Viscosidad % R.V.			
Medanitos	1 918	3 033	1,58	4 016	2,09	4 841	2,52
Challacó	1 512	1 609	1,06	2 030	1,34	2 844	1,88

R.V. : Relación de viscosidad, tomada entre la viscosidad a 60°C del asfalto recuperado luego de someter la mezcla a alguno de los tres tratamientos indicados y la viscosidad a 60°C del asfalto original.

* Durante los 30 minutos la temperatura descendió gradualmente de 150 a 120°C.

T A B L A IV

TRATAMIENTO A QUE FUE SOMETIDA LA MEZCLA ASFALTICA

Material	Enfriada con		30 min de		Calentada 30 min	
	Viscosidad poises	Viscosidad poises	R.V.	Viscosidad poises	R.V.	Viscosidad poises
Asfalto original	1 918	3 033	1,58	4 016	2,09	4 841
	1 870	2 643	1,38	2 826	1,47	3 960
M + S (0,2)	1 709	2 720	1,42	3 211	1,67	4 644
M + F (1)	1 291	1 866	0,97	2 468	1,29	3 609
M + F (2)	1 571	2 101	1,10	2 359	1,23	3 014
M + I (1)	1 485	1 794	0,94	2 213	1,15	2 417
M + I (2)						

R.V. : Relación de viscosidad, tomada entre la viscosidad a 60°C del asfalto recuperado luego de someter la mezcla a alguno de los tres tratamientos indicados y la viscosidad a 60°C del asfalto original sin aditivo.

Los números entre paréntesis indican la concentración de aditivo en % en peso sobre el asfalto.

* Durante los 30 minutos la temperatura descendió gradualmente de 150 a 120°C.

T A B L A V

TRATAMIENTO A QUE FUE SOMETIDA LA MEZCLA ASFALTICA

Material	Enfriada con		30 min de		Calentada 30 min	
	Viscosidad poises	R.V.	Viscosidad poises	R.V.	Viscosidad poises	R.V.
Asfalto original						
		nieve carbónica		150 a 120 °C*		a 150 °C
CH (sin aditivo)	1 512	1 609	1 06	1,54	2 050	1,88
CH + S (0,2)	1 488	1 600	1,06	1,14	1 727	1,26
CH + F (1)	1 215	1 373	0,91	1,58	2 393	2,18
CH + F (2)	917	1 050	0,69	1,28	1 939	2,01
CH + I (1)	1 303	1 380	0,91	1,11	1 684	1,42
CH + I (2)	1 007	1 100	0,73	0,90	1 360	1,07

R.V. : Relación viscosidad, tomada entre la viscosidad a 60°C del asfalto recuperado luego de someter la mezcla a alguno de los tres tratamientos indicados y la viscosidad a 60°C del asfalto original sin aditivo.

Los números entre paréntesis indican la concentración de aditivo en %.

*Durante los 30 minutos la temperatura descendió gradualmente de 150 a 110

cómo destructores de peróxidos.

Los aditivos fueron incorporados al asfalto por agitación mecánica durante 15 minutos a una temperatura de 130-140°C.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Determinaciones de viscosidad

En primer lugar analizaremos los valores obtenidos de viscosidad a 60°C en los asfaltos recuperados de las mezclas sometidas a los distintos tratamientos citados anteriormente. Dichos valores se muestran en la tabla III. En la misma se incluye la relación entre la viscosidad a 60°C del asfalto recuperado de acuerdo al proceso a que fue sometido y la viscosidad del asfalto original. Se nota que la mayor alteración, tal como era de esperar, se produce con las mezclas calentadas, luego de salir del mezclador, 30 minutos a 150°C. Siguiéndole en orden decreciente las mezclas en que la temperatura desciende gradualmente desde 150 a 120°C en el intervalo de 30 minutos. En el caso de las mezclas enfriadas inmediatamente con nieve carbónica la alteración es pequeña. De los asfaltos estudiados el que mejor se comporta es el de Challacó por presentar los valores más bajos de relación de viscosidad. Estos resultados ponen en evidencia la importancia del tiempo y la temperatura a que la mezcla es mantenida, luego de preparada, asumiendo el tiempo un papel más importante con respecto a la temperatura.

Como se dijo anteriormente, el aumento de consistencia sería causado principalmente por pérdida de componentes volátiles y por oxidación del asfalto. Este efecto se trató de disminuirlo mediante el empleo de aditivos. La elección de estos aditivos se basó en trabajos de otros investigadores y en el uso que algunos tienen como inhibidores de oxidación de ciertos derivados del petróleo. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas IV y V. En las mismas la columna

T A B L A VI

CAMBIOS PRODUCIDOS EN LA BANDA CORRESPONDIENTE AL GRUPO CARBONILO DEL LOG I_o/I
(medido a 1 692 cm⁻¹)

Material	Enfriada con nieve carbónica	30 min de	
		150 a 120°C*	Calentada 30 min a 150°C
Medanitos	0,033	0,044	0,048
Challacó	0,017	0,028	0,048

T A B L A VII

CAMBIOS PRODUCIDOS EN LA BANDA CORRESPONDIENTE AL GRUPO CARBONILO DEL LOG I_o/I
(medido a 1 692 cm⁻¹)

Material	Enfriada con nieve carbónica	30 min de	
		150 a 120°C*	Calentada 30 min a 150°C
M (sin aditivo)	0,033	0,044	0,048
M + S (0,2)	0,011	0,013	0,022
M + F (1)	0,015	0,033	0,085
M + F (2)	0,010	0,013	0,039
M + I (1)	0,016	0,025	0,025
M + I (2)	0,012	0,014	0,020

* Durante los 30 minutos la temperatura descendió de 150 a 120°C

que se refiere a asfalto original corresponde a los asfaltos solos o con aditivo, es decir que no han sufrido ninguna alteración previa, salvo el calentamiento para la incorporación del aditivo.

En cuanto a la relación de viscosidad se ha tomado en todos los casos en base a la viscosidad del asfalto recuperado de las mezclas sometidas a algunos de los tratamientos indicados y la viscosidad del asfalto original sin aditivo.

Se nota en la columna correspondiente a asfalto original, un ablandamiento en la mayoría de los betunes por parte de los aditivos. Esta acción fluxante también encontrada por Martín (24), podría atribuirse a un efecto dispersante sobre los asfaltenos del betún por parte de los aditivos. Para el betún de Medanitos podríamos considerar que no ejercen acción fluxante la sulfanilamida al 0,2 % y la fenotiazina al 1 %, mientras que para el betún de Challacó solamente la sulfanilamida. En la mayoría de los casos estudiados, la relación de viscosidad disminuye con la incorporación de aditivos. La disminución de consistencia en los asfaltos aditivados, luego de ser sometidos a calentamiento según los distintos tratamientos, podría atribuirse a la acción fluxante de los aditivos, a la inhibición de oxidación o bien a la acción combinada de ambos. En los casos en que la relación de viscosidad es menor que la unidad, se pone en evidencia que predomina el efecto de flux. Este caso se pone de manifiesto en los betunes enfriados con nieve carbónica, tal vez debido a que el tiempo de calentamiento está dado solamente por el de mezclado, es decir, 60 segundos y éste es muy pequeño frente a los 30 minutos de los otros tratamientos.

Análisis infrarrojo

Una de las principales aplicaciones de la espectrofotometría infrarroja, como bien es sabido, es la diagnosis estructural, es decir, la determinación de las características estructurales más salientes de una molécula.

Ciertos grupos de átomos tienen frecuencia de vibración características en el infrarrojo.

T A B L A VIII

CAMBIOS PRODUCIDOS EN LA BANDA CORRESPONDIENTE AL GRUPO CARBONILO DEL LOG I₀/I
(medido a 1 692 cm⁻¹)

Material	Enfriada con nieve carbónica	30 min de		Calentada 30 min a 150°C
		150 a 120 oc*		
CH (sin aditivo)	0,017		0,028	0,048
CH + S (0,2)	0,011		0,016	0,025
CH + F (1)	0,010		0,049	0,062
CH + F (2)	0,017		0,058	0,074
CH + I (1)	0,013		0,042	0,057
CH + I (2)	0,009		0,024	0,036

* Durante los 30 minutos, la temperatura descendió gradualmente de 150 a 120°C.

El conocimiento de la frecuencia proporciona en cada caso información valiosa acerca de la naturaleza del grupo funcional.

En nuestro caso particular se midieron los cambios que experimentan ciertas agrupaciones de los asfaltos, cuando éstos son sometidos a distintos procesos de calentamiento.

Las modificaciones de los grupos funcionales conteniendo oxígeno en los asfaltos recuperados de las mezclas calentadas en las condiciones ya mencionadas, con respecto a los asfaltos sin calentar fueron las siguientes:

- 1) Incremento (en algunos casos aparición) de la banda de absorción a los $1\ 692\ \text{cm}^{-1}$ correspondiente al grupo carbonilo, atribuido según Campbell (25) a la presencia de aldehidos, cetonas y ácidos.
- 2) Aumento general de absorción para la zona de $1\ 340$ a $900\ \text{cm}^{-1}$ atribuida al incremento en el contenido de asfaltenos (26).
- 3) Incremento en la banda de absorción hacia los $1\ 030\ \text{cm}^{-1}$ correspondiente según Valero (27) a grupos sulfóxidos.

El incremento de las bandas mencionadas pone en evidencia que estos grupos oxigenados son consecuencia del proceso de oxidación que han sufrido los asfaltos durante el mezclado y posterior calentamiento. Cambios similares fueron observados por Campbell y otros (25) al estudiar el endurecimiento de asfaltos por acción de oxidantes gaseosos.

En otras regiones del espectro también se producen cambios, por razones de trabajo, nuestro estudio se remite a los picos de absorción ya mencionados.

En las figuras 1 y 2 se observa lo aquí expuesto para los asfaltos de Medanitos y Challacó.

La incorporación de aditivos con el objeto de disminuir la alteración durante el calentamiento nos revela por medio de los espectros obtenidos en la misma zona de registro la aparición de las mismas bandas de absorción que los asfaltos sin aditivos, pero la magnitud de los mismos, en la mayoría de los

casos, es menor. Esto pone en evidencia, en los casos donde hay disminución de absorción que los aditivos han inhibido en cierto grado la formación de grupos funcionales conteniendo oxígeno, es decir han actuado efectivamente como inhibidores de oxidación, si bien en ningún caso su acción es tal como para que el espectro obtenido sea igual al del asfalto sin aditivo y sin calentar. En las figuras 3 y 4 se observa la acción de la sulfanilamida al 0,2 % con los asfaltos estudiados.

Dado que la absorción de la banda correspondiente al grupo carbonilo es una de las que más se acentúa como consecuencia de la oxidación, se ha procedido a medir el incremento que se produce en la mencionada banda por efecto del mezclado y el posterior calentamiento, efectuando medidas de absorbancia.

Como es costumbre en las determinaciones espectrofotométricas (28) la absorbancia se determinó como el logaritmo decimal de la relación de intensidades I_0/I , siendo I_0 la intensidad medida a 1692 cm^{-1} correspondiente a la banda del carbonilo del asfalto sin calentar y como I la intensidad medida a la misma frecuencia, correspondiente a los asfaltos sometidos a los distintos procesos de calentamiento.

En la tabla VI se muestran los valores de absorbancia correspondientes a los asfaltos estudiados sin aditivo, recuperados de las mezclas y luego de sometidas a los distintos tratamientos. Tal cual como ocurre con los datos de viscosidad, los valores de absorbancia aumentan a medida que las condiciones de los tratamientos se hacen más severas. También en este caso el asfalto de Challacó se comporta mejor que el de Medanitos por ser los valores de absorbancia más bajos, como consecuencia de un menor grado de oxidación.

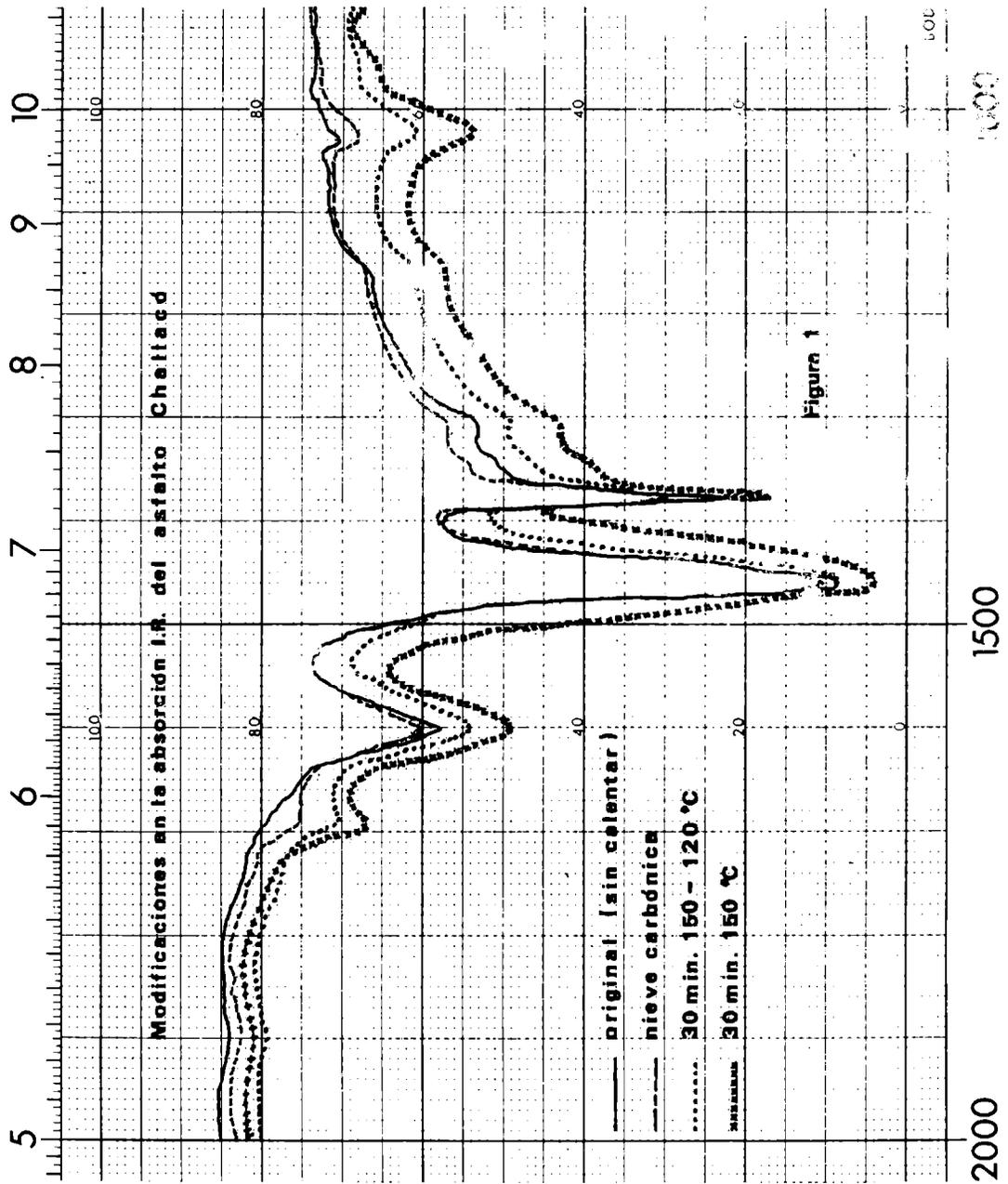
Nuevamente vemos la importancia del tiempo en que la mezcla una vez preparada permanece caliente. Como puede apreciarse en la tabla VI, los valores de absorbancia correspondientes a las mezclas enfriadas inmediatamente con nieve carbónica, son mucho más bajos que los que corresponden a los que se mantienen calientes durante 30 minutos.

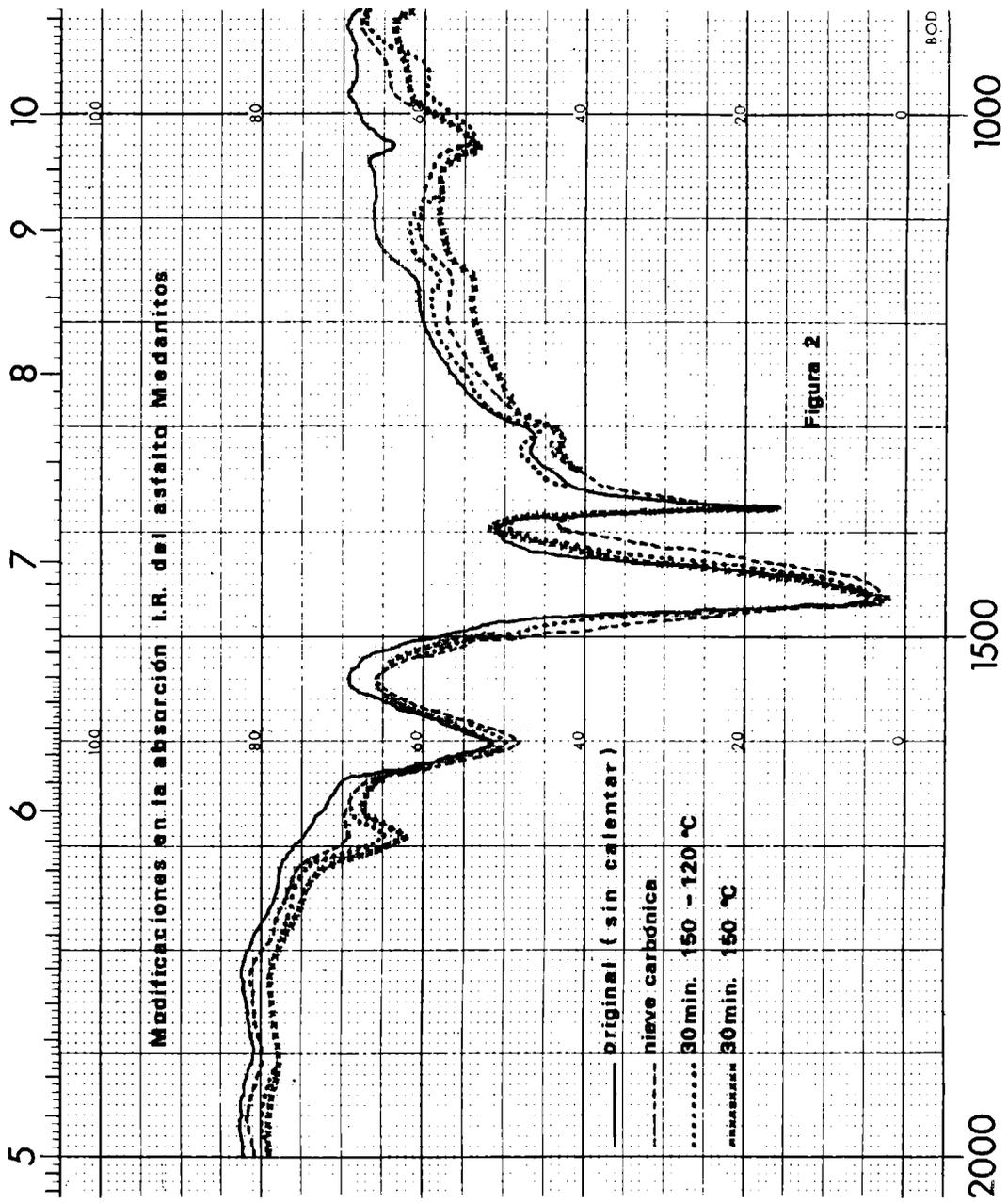
En las tablas VII y VIII se presentan los resultados de absorbancia obtenidos correspondiente al grupo carbonilo para los asfaltos con aditivos, recuperados de las mezclas.

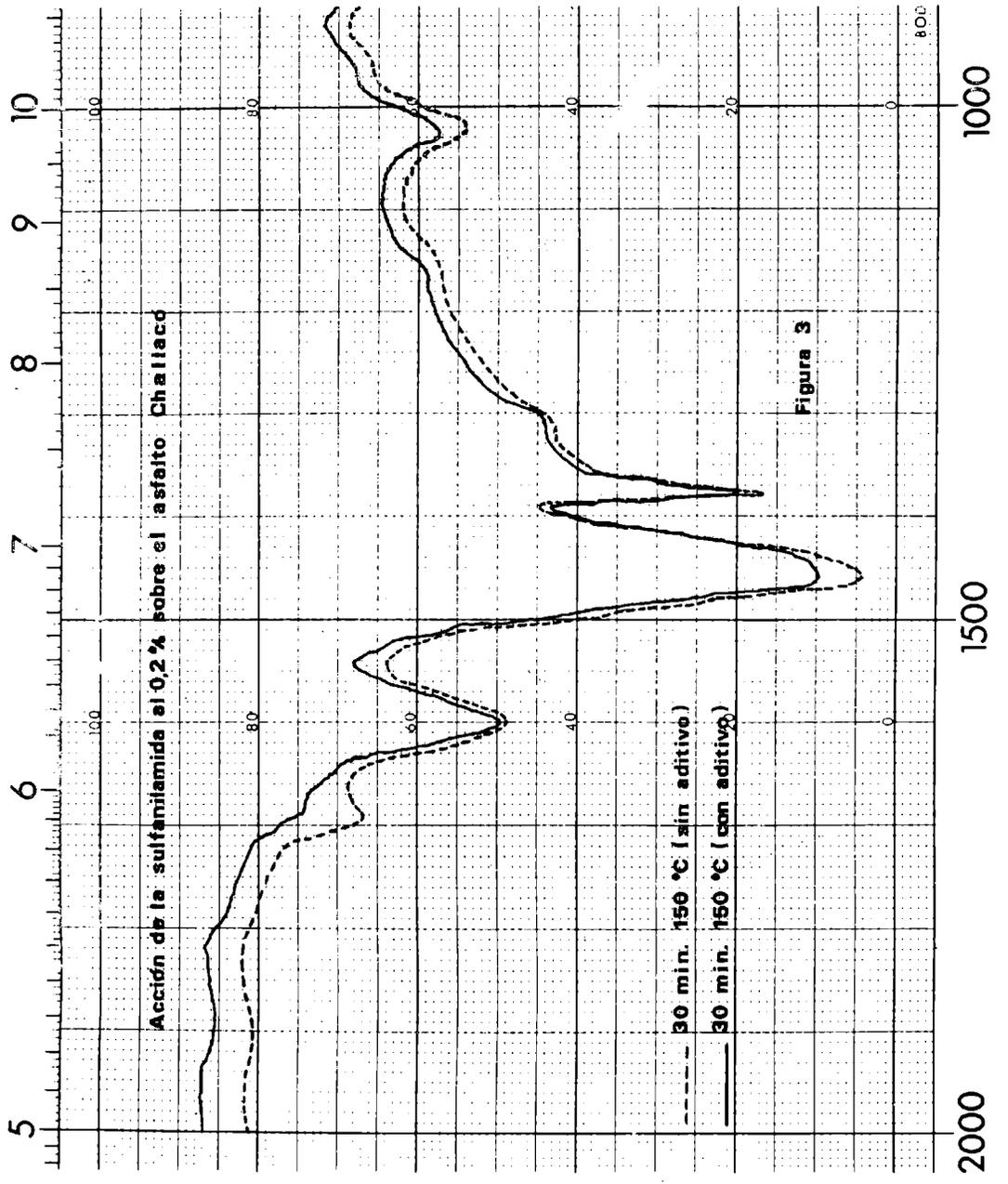
Los resultados de la tabla VII, correspondientes al asfalto de Medanitos y sus distintas mezclas con aditivos, ponen en evidencia que en general los aditivos disminuyen la absorbancia de la banda del grupo carbonilo, lo cual demuestra siempre refiriéndose a esta banda, que los mismos inhiben la oxidación, si bien en ningún caso esta disminución llega a ser total. De los tres aditivos estudiados, la sulfanilamida y el 2-6 di-ter-butil p-cresol al 2 % son los que mejor se comportan, llegando a producir una disminución casi igual a la tercera parte, respecto al asfalto sin aditivo. En el caso de la fenotiazina, en las mezclas mantenidas durante 30 minutos a 150°C, el valor de absorbancia llega a ser mayor que para el asfalto sin aditivo. Algo similar ocurre con la viscosidad como se ve en la tabla IV, cuyo valor, es parecido al del asfalto original. Este comportamiento también fue encontrado por Martín, y hay antecedentes de que ciertos compuestos y a determinadas concentraciones, en lugar de actuar inhibiendo, lo hacen acelerando la reacción, con el consiguiente incremento de la viscosidad y absorbancia.

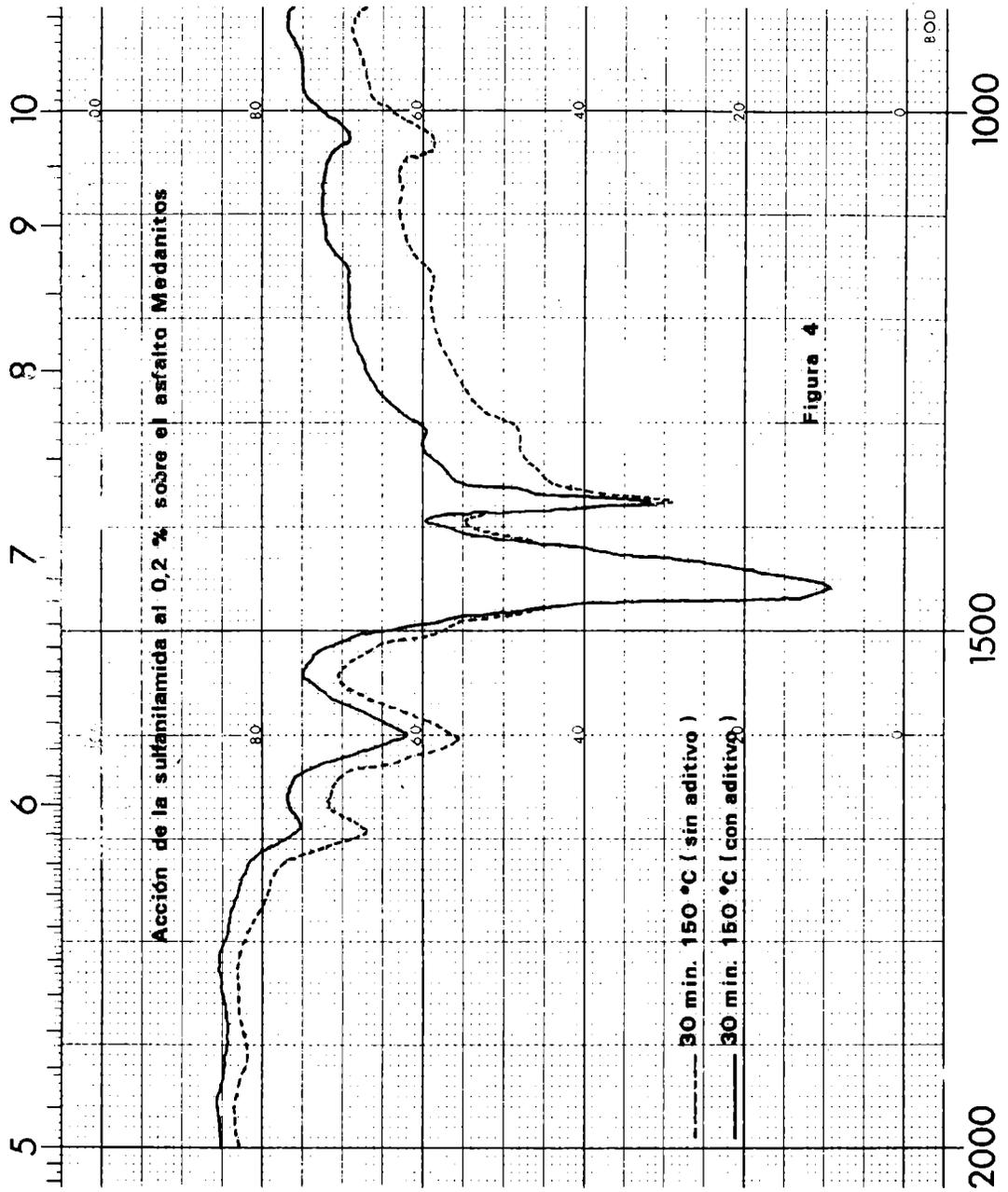
En la tabla VIII pueden observarse los resultados correspondientes al asfalto de Challacó y sus distintas mezclas. En este caso el comportamiento de los aditivos es algo diferente de acuerdo a los distintos tratamientos. Para las mezclas enfriadas con nieve carbónica, todos los aditivos actúan disminuyendo la absorbancia. En cambio para las mezclas calentadas durante 30 minutos, solamente la sulfanilamida y el 2-6 di-ter-butil p-cresol al 2 %, actúan eficientemente, no así los restantes que muestran absorbancias mayores que las correspondientes al asfalto original. La explicación a este comportamiento sería similar a lo dicho anteriormente para el asfalto de Medanitos.

Los resultados de las tablas VII y VIII ponen en evidencia que los aditivos actúan en forma diferente según el tipo de asfalto, correspondiéndole a la sulfanilamida el mejor comportamiento en los dos asfaltos estudiados. Aquí tam-









bién se pone en evidencia la importancia del tiempo de calentamiento posterior al mezclado, ya que un aditivo puede actuar eficazmente para tiempos cortos, como lo revelan las muestras enfriadas con nieve carbónica, y ser poco efectivos para tiempos mayores ya sea porque el aditivo se ha consumido o bien porque algún otro tipo de reacción se ha producido.

CONCLUSIONES

La alteración que sufren los asfaltos durante la operación de mezclado en usina, trató de reproducirse mediante la preparación de mezclas en un equipo de laboratorio, en condiciones similares a las operadas en la realidad. La alteración que se produce en los asfaltos, redundaba en un aumento de consistencia como consecuencia fundamental, de pérdida de compuestos volátiles y oxidación.

Se evidencia que, además de las condiciones de mezclado, es importante el tiempo en que la mezcla es mantenida caliente una vez que ha salido del mezclador. Esto se pone de manifiesto por los valores elevados de viscosidad en los asfaltos recuperados de las mezclas luego de ser mantenidos calientes durante 30 minutos.

Los resultados de viscosidad a 60°C, muestran que el asfalto de Challacó es el que menos se altera de acuerdo con sus bajos valores de relación de viscosidad.

Mediante el análisis espectrofotométrico, pudo ponerse en evidencia la alteración debida a oxidación que sufren los asfaltos durante el mezclado y su posterior calentamiento, por la aparición de una banda de absorción en la zona correspondiente al grupo carbonilo (1692 cm^{-1}).

Las medidas de absorbancia correspondientes a esta banda, muestran que la alteración aumenta con el transcurso del tiempo al igual que como ocurría con los valores de viscosidad. También para este caso el asfalto de Challacó

parece ser menos susceptible a la oxidación, como lo demuestran sus valores bajos de absorbanza, que el asfalto de Medanitos.

Con los datos obtenidos no puede determinarse qué porcentaje de la alteración por calentamiento es atribuible a oxidación y cuál a volatilización, considerando a estas dos causas como las fundamentales en el proceso de alteración, pero sí podemos afirmar que ambos tienen lugar.

Finalmente, se comprobó que la incorporación de aditivos produce, en general, una disminución en el endurecimiento de los asfaltos recuperados de las mezclas. Esto se atribuye, en parte, a la acción fluxante de los aditivos y en parte a una acción inhibidora de oxidación tal cual lo demuestra la disminución de absorbanza en la zona correspondiente al grupo carbonilo. La efectividad de los aditivos fue variada y su acción diferente en los dos asfaltos. Los que mejor se comportaron fueron la sulfanilamida al 0,2 % y el 2-6 di-terbutil p cresol al 2 %.

Tal vez sea necesario para cada tipo de asfalto, seleccionar al antioxidante y la concentración óptima.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Neppe, S. - Trans. South Af. Inst. Civil Engrs., Vol. 1, 1951.
- 2) Agnusdei, J. O. y Pinilla, A. - XIII Reunión Anual del Asfalto, 1964.
- 3) Hveen, F. N., Zube, E. y Skog. J. - Dep. of Public Works, Division of Highways, 1963.
- 4) Weetman, B. - Discusión del trabajo Asphalt Hardening Vs. Composition, Proc. Assoc. Asp. Pavin Tech., V. 30, 1961.
- 5) Blokker, P. C., van Hoorn H. - Fifth World Congress, 1959.
- 6) Traxler, R. N. - Proc. Assoc. Asp. Paving Tech., V. 30, 1961.

- 7) Brown, A. B. - Proc. Assoc. Asp. Paving Tech., V. 27, 1958.
- 8) Clark, R. G. - Proc. Assoc. Asp. Paving Tech., V. 27, 1958.
- 9) The Asphalt Institute, Manual Serie nº 4, 72, 1960.
- 10) Scerafin, P. - Proc. Assoc. Asp. Paving Tech., V. 27, 1958.
- 11) Kari, W. J. - Western Laboratory, Chevron Asphalt Co. 1967.
- 12) Highway Research Board, nº 39, 80, 1967.
- 13) Simpson, W. C., Griffin, R. L. & Miles, T. K. - ASTM, STP 277, 1959.
- 14) Traxler, R., ASTM, Proc. V. 63, 1963.
- 15) Pinilla, A. y Frezzini, P. - XIV Reunión Anual del Asfalto, 1966.
- 16) Martín, K. G. - J. App. Chem. V. 16, 1966.
- 17) Ballard, J. L. - Q. Rev. Chem. Soc. 3, 1, 1949.
- 18) Kannerly, G. W. & Patterson, W. L. - Ind. Engr. Chem. V. 48, 10, 1956.
- 19) Beitchman, B. D. - J. Res. Nat. Bureau Standards, Physics & Chemistry, V. 63 A, nº 2, 1962.
- 20) Greenfeld, S. H. & Wright, J. R. - J. Mat. Res. Stand. V. 2, nº9, 738, 1962.
- 21) Wright, J. R. & Campbell, P. G. - J. Applied Chem. 12, June 256, 1962.
- 22) Shattuck, C. L. - Proc. Assoc. Asp. Pav. Tech., V. 11, 1940.
- 23) A.S.T.M. D 1856-65.
- 24) Martín, K. G. - J. Appl. Chem. V. 16, July, 1966.
- 25) Campbell, P. G. & Wright, J. R. - J. of Material, V. 2, 3, 1967.

- 26) Smith, C. D., Schvets, C. & Hodgson, R. S. - 145th Meeting Am. Chem. Soc., 246, 1963.
- 27) Valero, L. & Hidalgo, A. - Lab. Transp. y Mec. Suelos, nº 23, 1967.
- 28) Pérez Duprat, R., Nardillo, A. - XV Reunión Anual del Asfalto, 309, 1968.

CUALIDADES FISICO-MECANICAS DE LAS
ORTOCUARCITAS DE LA PROV. DE BUENOS AIRES
SU EMPLEO EN OBRAS VIALES Y CIVILES

1a. Sección: Chapadmalal

Ing. Honorio Añón Suárez

Dr. Víctor E. Mauriño

Ing. Duilio D. Massaccesi

Nota.-Este trabajo fue presentado al VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, y publicado en la Revista CARRETERAS, XIV, (51), 12/19, 1969 y (52), 44/47, 1969.

INTRODUCCION

La provincia de Buenos Aires dispone de gran cantidad de rocas del más variado origen, en sus cordones central y sud, denominados de Tandilia y Ventania respectivamente, donde se hallan instaladas varias canteras que producen agregados pétreos en cantidad tal como para convertirla en la primera productora del país de dichos materiales.

En un trabajo anterior (1), se ha indicado la ubicación de las principales canteras de agregados pétreos en explotación en la provincia, como así sus zonas de influencia, extendidas hacia los centros de mayor consumo, con el lógico condicionamiento debido a factores económicos o vías de comunicación (Fig. 1).

El objeto de la presente comunicación es informar sobre un estudio realizado con el fin de establecer las características físico-mecánicas de las ortocuarcitas de la zona de Chapadmalal, a los efectos de verificar su empleo en obras viales y civiles.

Estos materiales han sido empleados desde hace mucho tiempo en diversos tipos de obras con excelentes resultados, aunque podría mencionarse como es lógico algún comportamiento anormal debido a deficiente selección de los materiales utilizados o inadecuado estudio de la estructura, más que a fallas intrínsecas de dichas ortocuarcitas.

Es común medir la calidad que posee un material pétreo, por los resultados que se obtienen en un conjunto de ensayos. Estos resultados sirven para fijar los límites de calidad mínima exigibles a cada uno de ellos, con cierto margen de seguridad, para las diversas aplicaciones de estos ma-

teriales, resultados que deben ser confirmados por un comportamiento aceptable en obra.

Al redactar las especificaciones técnicas para la ejecución de determinada estructura, deberán establecerse esos valores mínimos de calidad con criterio sensato, de modo que resulten rechazados los que se saben de comportamiento no satisfactorio frente a las sollicitaciones a que se verán sometidos. No debe restringirse el uso de materiales disponibles en una zona, que por sus características, plenamente confirmadas por la experimentación y con los controles debidos en obra, puedan ser utilizados en estructuras adecuadas.

Se tienen innumerables ejemplos de muy buenos resultados de obras ejecutadas con materiales que reunían ajustadamente los requisitos establecidos, digamos por caso, de dureza o desgaste y que poseyendo otras cualidades, hicieron posible esos buenos resultados.

La determinación de las propiedades de los agregados pétreos debe comenzar con un conocimiento cabal de la formación geológica, que permita establecer el origen y composición de la roca madre; por esta razón el estudio programado contempló en primera instancia este aspecto (2).

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS REGIONALES

La región de Chapadmalal (Pdo. de General Pueyrredón, Pcia. de Buenos Aires) se halla ubicada casi en el extremo meridional del cordón de sierras de Tandilia, dentro de cuyo ámbito se encuentran las canteras seleccionadas para este estudio.

Geomorfológicamente, se caracteriza por la presencia de ondulaciones de poca pendiente, debidas al modelado de la formación de ortocuarcitas. Estas lomadas suelen estar separadas por áreas más o menos planas, originadas como consecuencia de la erosión y efectos tectónicos.

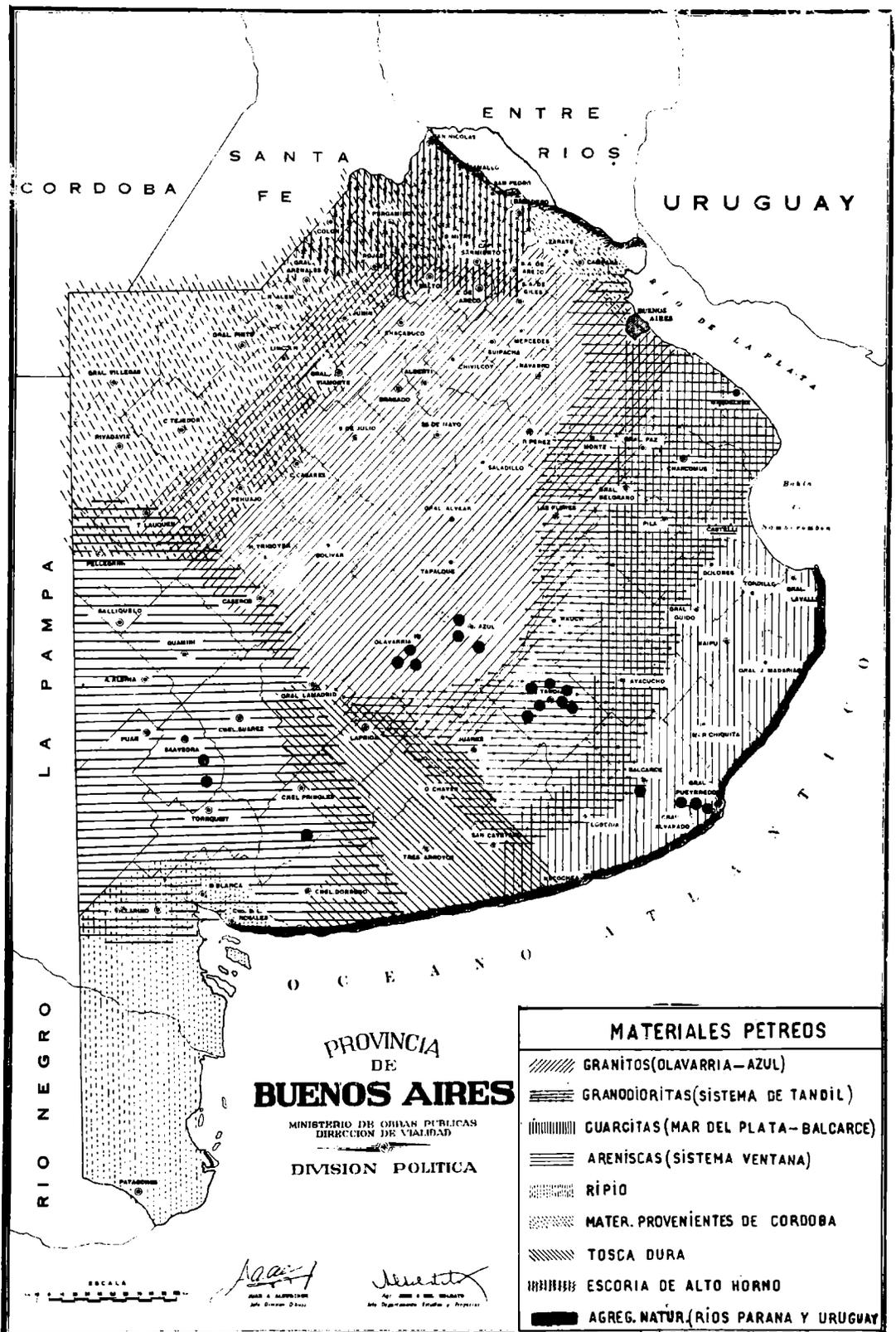


Fig. 1

La geología de la región es simple y la secuencia estratigráfica es la siguiente:

1. Formaciones

Sedimentos loésicos,
limos arenas y
tosca

Cuaternario

Discordancia

Ortocuarcitas y
arcilitas

Paleozoico Medio
(Grupo de la Tinta)

2. Cuaternario

Los sedimentos de esta edad tienen buen desarrollo en la región y tapizan o cubren, nivelando las diferencias, sobre el paleozoico por causas tectónicas o de erosión y apoyándose en discordancia erosiva sobre él. Generalmente las partes culminantes se encuentran cubiertas por tosca, con mantos variables, tanto en potencia como en estado de cementación.

3. Paleozoico

El grupo de "La Tinta", al cual pertenecen las ortocuarcitas y arcilitas, se caracteriza por ser un típico depósito de facies de plataforma (3). En él se han depositado las ortocuarcitas en espesores variables que pueden tener desde 0,30 hasta 3 metros. Los planos de estratificación en general están bien definidos, apareciendo a veces intercalaciones arcillosas con orientación paralela o subparalela.

Es relativamente común, observar ortocuarcitas conglomerádicas y hasta conglomerados oligomícticos, originados como consecuencia de cambios de velocidad en el medio de sedimentación.

La cementación de las ortocuarcitas es debida a varios procesos, tales como consolidación por peso de los estratos superiores, circulación de aguas cargadas de sílice o por procesos diagenéticos. Desde el punto de vista mineralógico son sedimentitas maduras. Estructuralmente, están afectadas por fallas del maciso, diaclasamiento y fisuración.

Se han realizado recientemente estudios (4) tendientes a verificar el grado de afectación de estas rocas en la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta las direcciones en que se han producido las cargas estructurales. Se ha concluído que, la anisotropía adquirida o secundaria, ha afectado más la cohesión de estas rocas que la anisotropía primaria.

Las intercalaciones arcillosas pueden tener desde pocos centímetros de espesor, hasta 1 metro aproximadamente.

UBICACION DE LAS CANTERAS E INVESTIGACIONES DE CAMPO

Se seleccionaron cuatro canteras, que se denominarán en adelante A, B, C y D, por considerárselas como las más representativas de la producción de la zona y por cubrir un área que permitirá sacar conclusiones sobre las cualidades técnicas de estas rocas.

En cada una de ellas se efectuó un análisis detallado de los frentes en explotación, a fin de delimitar con la mayor exactitud la integración litológica de cada uno de los bancos ortocuarcíticos. Para ello, se estudiaron los tipos petrográficos distinguibles, sobre la base de las características siguientes: tamaño de grano, forma de cementación, composición mineralógica, fisuración, diaclasamiento, estratificación, teñido por óxidos, etcétera.

Luego de una preselección de "tipos" y "subtipos" en el campo se determinaron en gabinete los especímenes definitivos, con lo cual se llegó a un número de muestras altamente representativo de cada cantera, como podrá comprobarse en

los capítulos siguientes.

Ubicados los mencionados "tipos", se tomó del banco de procedencia de cada uno de ellos, un prisma orientado de aproximadamente 50x30x30 cm, del cual posteriormente, se cortaron las probetas para realizar los ensayos de compresión simple, abrasión y tenacidad. Asimismo, se tomaron 70 kilos de muestras tipo en trozos, que posteriormente fueron trituradas en laboratorio para utilizarlas en otros ensayos. Además de estas muestras, se prepararon cortes delgados destinados a microscopía.

Por otra parte, de la producción comercial de cada cantera, se extrajeron muestras de silo de todas las granulometrías producidas.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS CANTERAS

Cantera A

Situada sobre la ruta de Chapadmalal a Batán, aproximadamente a 2 km de la estación de ferrocarril mencionada en primer término.

Actualmente se explota en un nivel principal y cuatro secundarios. Los frentes de explotación nuevos se preparan durante el verano y la nivelación de los pisos es controlada permanentemente para permitir el desplazamiento de los tracto-cargadores. El movimiento de equipos se hace coordinándolos desde un punto de concentración, que es el taller de mantenimiento y reparación, contando con suficiente equipo de reserva.

El material de frente se carga, por tracto-cargador, a camiones que lo transportan a la boca de trituración primaria. La clasificación en la planta de trituración se efectúa con zarandas rotativas.

La cantera cuenta con transporte propio y una buena parte de las operaciones de este establecimiento se realizan

con energía eléctrica.

La parte superior del frente principal se halla coronada por tosca y sedimentos finos, debajo de los cuales y con espesores de alrededor de los seis metros, aparece una cuarcita muy diagenizada, que resulta friable y se desmenuza generalmente ante presiones relativamente leves.

Los niveles son, en general, más o menos homogéneos en cuanto a variaciones texturales, pero se distinguen cinco tipos de ortocuarcitas. Estos tipos litológicos componen en diferentes porcentajes, los frentes de cantera. A los fines de la estimación, no se ha tenido en cuenta la parte superior alterada; por otra parte la presencia de un determinado tipo en un frente, no significa que la litología conserve todas las propiedades inalterables a lo largo del afloramiento, sino que, dadas las condiciones genéticas, pueden establecerse variaciones en algunos de sus caracteres, siendo el más variable la textura.

Sobre esta base se ha establecido que los porcentajes de integración de los frentes actuales es el siguiente:

Muestra nº 1:	35 %
Muestra nº 2:	15 %
Muestra nº 3:	20 %
Muestra nº 4:	30 %

La ortocuarcita de la zona superior es de color blanco sucio, en buena parte conglomerádica, con clastos mayores de 5 mm; en baja proporción se observan clastos oscuros, siendo el principal constituyente el cuarzo con 98 %. Exhibe material fino arcilloso, deleznable al tacto, intercalado entre los clastos, que por no ser explotado no se lo ha incluido en los cuadros correspondientes a los ensayos realizados.

Muestra 1: Roca de color blanco grisáceo con planos de estratificación marcados, lo cual conspira contra su comportamiento mecánico. De grano mediano a fino, aunque en algunos planos se observan granos gruesos. Se notan laminillas de mica y algunos clastos oscuros. Pequeñas concentraciones de material arcilloso de color blanco. No es friable. Componente

predominante, cuarzo 99 %.

Muestra 2: Psammita de color blanco sucio, con regular cantidad de granos color verdoso oscuro. Grano predominantemente fino, por lo que la roca posee aspecto homogéneo. Algunos granos aparecen teñidos por óxidos. No es friable, buena cementación, no se observa material arcilloso. Componente principal: cuarzo 99 %.

Muestra 3: Roca de color blanco sucio con bandas de hasta 2 cm teñidas de amarillo por óxidos de hierro. Grano mediano a grueso, con algunos planos francamente conglomerádicos y rodaditos de 3 a 4 mm de diámetro. No es friable, ni tiene material arcilloso. Cuarzo 98,9 %. Escasos granos oscuros.

Muestra 4: Roca de color blanquecino y grano grueso en parte conglomerádico. Presenta en baja proporción material arcilloso alrededor de los granos de mayor tamaño. No es friable. El principal componente es el cuarzo.

Cantera B

Se encuentra situada inmediatamente al NE de la anterior y de la cual es vecina. A pesar de su ubicación y como consecuencia de una variación lateral de las facies de sedimentación, no resultan los mismos tipos, salvo algunas semejanzas litológicas. Por otra parte, topográficamente se encuentra unos 10 metros más alta que la Cantera A; esta razón hace que la capa de alteración mencionada en el caso anterior, tenga un desarrollo vertical mayor, estimándose su espesor entre 10 y 12 metros.

Por su aspecto, los canteristas la llaman "salitrosa", ya que su textura y estructura recuerdan a ciertos agregados de cristales de sales. A diferencia de la Cantera A, ésta cubierta, es explotada, como podrá comprobarse más adelante en la integración del material que se comercializa y es notoria su influencia en los resultados de los ensayos.

Los diferentes tipos de ortocuarzitas componen los frentes, en los siguientes porcentajes estimados:

Muestra nº 1:	7 %
Muestra nº 2:	24 %
Muestra nº 3:	16 %
Muestra nº 4:	29 %
Muestra nº 5:	11 %
Muestra nº 6:	8 %
Muestra nº 7:	5 %

Los demás bancos se trabajan en varios niveles escalonados y de diferente desarrollo, disminuyendo, como es usual, hacia la profundidad. El material de frente se carga a camiones fleteros que alimentan directamente la trituradora primaria. La clasificación del material se realiza con zarandas rotativas.

Muestra nº 1: Alterita de color blanco sucio, en gran parte conglomerádica, con rodados mayores de 5 mm mientras que en baja proporción se observan clastos oscuros. El principal componente es el cuarzo, con un porcentaje del 98,5 %; al tacto se desgrana, exhibiendo regular cantidad de material fino de tipo arcilloso intercalado entre los clastos.

Muestra nº 2: Roca de color gris blanquecino, de grano más o menos uniforme y mediano; la estratificación es marcada lo que parecería influir en el ordenamiento de los clastos, de acuerdo con su diámetro. Se observan en algunos granos la presencia de material muy fino de tipo arcilloso. Hay un bandeado oscuro. El principal componente es cuarzo. No es friable.

Muestra nº 3: Color gris claro con leve tonalidad rosada. Grano fino mediano y bastante uniforme, no es fácilmente distinguible la estratificación. No es friable. No se observa material arcilloso. Principal componente: cuarzo, acompañado por escasos granos oscuros.

Muestra nº 4: Roca color gris blancuzco con leves tonalidades rosadas. Grano mediano a fino en partes conglomerádico. Se observan concentraciones aisladas de material muy fino. No es friable. Principal componente: cuarzo 99 %. Se observan escasos minerales verde oscuro.

Muestra nº 5: Psammita de color gris blanquecino con leve tonalidad amarillenta, de grano bastante uniforme, aunque se distinguen algunos que sobresalen por su mayor diámetro (1 a 1,5 mm). Existe un bandeo determinado por la estratificación, cuyos planos aparecen en algunos casos coloreados por limonita. Cuarzo: 98,8 %. No es friable. Los planos de estratificación pueden conspirar contra su respuesta a tensiones.

Muestra nº 6: De color amarillo fuerte, en algunos planos, que pueden bajar hasta tonos amarillentos débiles. Estos planos separatorios acusan concentraciones de óxidos. El diámetro de los granos es variable, haciéndose en partes la textura conglomerádica. Principal componente: cuarzo 98,5 %. Se advierte algo de material arcilloso, con limonita en los granos de mayor diámetro. Este tipo, al igual que el anterior, bajará su resistencia a tensiones en razón de la forma de sedimentación que acusa.

Muestra nº 7: Roca de color gris claro a rojizo, en bandas que van de 1 mm a 5 mm; la tonalidad tiende a dar a la roca un color morado, este teñido parecería responder a un proceso metasomático. Se observa alternancia en los diámetros de los clastos, que aumentan o disminuyen por bandas. Buena cementación, no se observa material arcilloso y el principal componente es el cuarzo 98,9 %. En este caso la presencia del hierro se atribuye a procesos de reemplazo, por lo que no afectará las cualidades mecánicas.

Cantera C

Esta cantera se encuentra a unos 3 km al SE de la estación Chapadmalal, sobre el camino a Batán.

Se ha comenzado la explotación en dos frentes, de los cuales uno de ellos situado al SE, ha sido más trabajado. La cubierta de alteración es de poca potencia, llegando a medir alrededor de 1 m en algunos puntos.

Los pisos de la cantera son controlados permanentemente y dada la posición estructural de las ortocuarcitas en esta región resulta más fácil el mantenimiento, con menor incidencia

T A B L A I

INTEGRACION DE LAS "MUESTRAS DE SILO"

Cantera	Muestra de Silo	Muestra tipo n°	Integración
A	(1 - 5)	1	6 %
		2	30 %
		3	37 %
		4	27 %
B	(1 - 5)	1	37 %
		2	18 %
		3	5 %
		4	7 %
		5	9 %
		6	17 %
		7	7 %
C	(1 - 3)	1	21 %
		2	42 %
		3	10 %
		4	7 %
		5	20 %
D	(1 - 5)	1	74 %
		2	24 %
		3	2 %

en el rubro correspondiente.

Todo el movimiento de equipos es centralizado en la Cantera A; de la misma firma, por razones de mejor control y facilitada por la proximidad de las dos instalaciones.

El material es transportado por camiones, desde el frente a la planta de trituración, los cuales descargan directamente el material en la boca de la primaria.

Previamente a la explotación de los diferentes bancos de roca, es eliminado el destape, de manera que la parte alterada no compone el producto elaborado por este establecimiento.

Los tipos litológicos, que a continuación se describen, integran con el criterio ya establecido, los frentes de explotación, habiéndose estimado los mismos en los siguientes porcentajes:

Muestra nº 1:	35 %
Muestra nº 2:	25 %
Muestra nº 3:	10 %
Muestra nº 4:	10 %
Muestra nº 5:	20 %

El destape no se ha tenido en cuenta, por las razones ya expuestas.

Muestra nº 1: Roca blanca grisácea, con tonalidades amarillentas debidas a óxidos. De grano muy homogéneo, mediano a fino. Escasos clastos oscuros. Los planos de estratificación, aunque visibles, tienen buena cementación, puede aumentar la coloración en bandeado muy fino. No hay material arcilloso ni es friable. Principal componente: cuarzo 99 %.

Muestra nº 2: Roca de color blanco sucio, de grano algo más grueso que la anterior, pero de aspecto homogéneo. Sin material arcilloso y compuesta por 99 % de cuarzo. Escasos granos oscuros. La presencia de granos gruesos puede influir desfavorablemente en el desgaste.

Muestra nº 3: Fuertemente coloreada con tonalidades amarillentas

tas hasta tonos débiles y desde rosado pálido hasta rojizo. Granos de diámetro variable, a veces abiertamente conglomerádico, con rodaditos de 5 a 6 mm. Cuarzo: 90,8 %. No es friable, ni se observa material arcilloso. La estratificación con hierro podrá afectar eventualmente sus cualidades físicas y mecánicas.

Muestra nº 4: De color rosa violáceo, aspecto conglomerádico, con predominancia de grano mediano a fino y clastos mayores de 4 mm. 99 % de cuarzo y escasos clastos oscuros. No es friable. El teñido de los óxidos se debe a procesos metasomáticos, por lo que no afectará las propiedades mecánicas de estas rocas.

Muestra nº 5: Blanco grisáceo, con líneas de 2 a 5 mm de color rosado o verdoso; de grano fino, bastante uniforme. Cuarzo 99 %. No es friable, ni se observa material arcilloso. La estratificación marcada puede ser causa de debilitamiento en las propiedades de esta roca a la compresión.

Cantera D

Se encuentra situada a unos 2 km al E del camino interior a Miramar. El estado de desarrollo de explotación, en el momento de hacerse el estudio, exhibía un frente principal, con una pequeña profundización en la parte central.

Se realiza una continua verificación del piso de cantera, para mantener los niveles adecuados que permitan un fácil drenaje. Por esta razón el material estéril o de descarte es removido y acumulado en lugares que facilitan la manobra de los equipos de explotación.

El material de frente se carga a vagonetas y éstas transportan el material a la planta de trituración, donde vuelcan el material al alimentador de la primaria. La cantera posee combinación de zarandas vibratorias para clasificación y rotativas para repaso del material.

Litológicamente los frentes de esta cantera son muy homogéneos, pero aún así se han podido determinar tres tipos de

ortocuarzitas, cuyos porcentajes de integración, en los frentes, es el siguiente:

Muestra nº 1: 55 %

Muestra nº 2: 42 %

Muestra nº 3: 3 %

Muestra nº 1: Roca de color blanco grisáceo uniforme, de grano mediano observándose granos de buen desarrollo y aislados. Los cambios de tamaño se efectúan con la existencia de planos marcados de sedimentación. Se ven granos dispersos oscuros. Cuarzo 99 %. Levemente friable. Algunos granos acusan presencia de escaso material muy fino.

Muestra nº 2: La roca es de color blanquecino. Grano mediano y uniforme. Aisladamente se observan granos mayores, no obstante lo cual la muestra no tiene aspecto conglomerádico. Composición eminentemente cuarzosa, baja proporción de granos oscuros y muy subordinados a éstos, láminas de muscovita. No es friable, ni se observa material arcilloso.

Muestra nº 3: Roca de color blanco sucio, de grano fino, homogéneo, con apariencia sacaroides; cuarzo 99 %. No es friable, tiene buena cohesión y no se observa material arcilloso.

ESTUDIOS DE LABORATORIO

Luego del estudio geológico de las canteras, el paso siguiente fue realizar una estimación estadística a efectos de conocer la integración de los materiales de producción comercial en base a muestras orientadas de los diferentes tipos litológicos tomados en los distintos bancos. Estos últimos fueron cotejados con muestras extraídas de silo, de los materiales producidos por cada cantera, en sus respectivos tamaños.

Las muestras fueron tomadas en cantidad suficiente como para considerarlas, luego de un riguroso cuarteo, representativas de la totalidad de los agregados producidos.

T. A. B. L. A. II

ENSAYOS SOBRE MUESTRAS DE SILO

C A N T E R A	A		B		C		D	
	(1-5)	(6-12) Arena	(1-5)	(12-18) (6-12) Arena	(1-5)	(6-12) Arena	(1-5)	(12-18) (6-12) Arena
Muestra de Silo								
Granulometría (%)								
Pasa Tamiz 1"	100	-	93,5	-	93,8	-	94,1	-
Pasa Tamiz 3/4"	47,1	100	28,5	100	41,5	100	59,5	100
Pasa Tamiz 3/8"	3,5	92,5	2,1	46,3	1,5	94,6	8,7	43,1
Pasa Tamiz N° 4	2,5	19,0	0,8	18,5	0,1	17,0	3,2	1,7
Pasa Tamiz N° 10	1,6	3,7	0,5	13,4	-	-	2,6	0,7
Pasa Tamiz N° 40	1,2	2,0	0,3	7,1	-	-	2,0	0,5
Pasa Tamiz N° 80	1,0	1,2	0,2	3,1	-	-	1,2	0,2
Pasa Tamiz N° 200	0,5	0,7	0,1	1,2	-	-	0,5	0,1
		8,0		5,0		8,0		6,0
Peso específico (g/cm³)	2,50	2,52	2,49	2,51	2,55	2,55	2,50	2,52
		2,55		2,55		2,55		2,54
Factor de Cubicidad	0,76	-	0,79	0,63	-	-	0,73	0,63
Desgaste "Los Angeles" (%)	"B" 48,4	-	"B" 55,6	-	-	-	"B" 51,8	"C" 53,1
Absorción de Agua (24 h) (%)	1,4	-	1,7	-	-	-	1,4	-

T A B L A III

PESO ESPECIFICO, ABSORCION

(Norma A.S.T.M. C-127-59)

Cantera	Muestra Tipo	Peso específico (g/cm ³)	Absorción de Agua (%)
A	1	2,43	2,0
	2	2,54	1,1
	3	2,44	1,2
	4	2,43	0,6
B	1	2,30	3,7
	2	2,54	0,8
	3	2,47	1,0
	4	2,45	1,0
	5	2,47	1,9
	6	2,47	1,4
	7	2,56	1,2
C	1	2,52	0,8
	2	2,45	1,3
	3	2,45	1,7
	4	2,51	1,1
	5	2,48	1,7
D	1	2,47	0,8
	2	2,49	1,5
	3	2,50	1,2

En base a un análisis megascópico se llegó a establecer, en forma bastante aproximada, que los agregados pétreos cuarcíticos que las canteras A, B, C y D proveen a la industria de la construcción, se encuentran integrados por "muestras tipo" de las respectivas canteras, en los porcentajes que indica la tabla I.

Las características promedio del producto comercial de cada cantera son las que pueden observarse en la tabla II. Estas características están en general, condicionadas a las propiedades individuales de las muestras tipo que componen los diferentes bancos de cada cantera, lógicamente teniendo en cuenta los porcentajes en que éstas últimas integran las muestras de silo.

Tanto sobre las muestras tipo como sobre las muestras de productos comerciales de cada cantera, se han realizado los ensayos cuyos resultados se consignan en las tablas nº 2 a 10. Las normas seguidas para la ejecución de los mismos son las siguientes:

1. Peso específico y absorción (Norma A.S.T.M. C-127-59).

Estas determinaciones han sido realizadas sobre la fracción gruesa de las muestras de silo (tabla II) y sobre las muestras tipo (tabla III). En el caso de la determinación del peso específico se utilizó la expresión:

$$\frac{A}{A - C} \times 100$$

siendo A el peso seco en el aire y C el peso de la muestra saturada sumergida. En cuanto a la absorción, la expresión utilizada fue:

$$\frac{B - C}{A} \times 100$$

siendo B, el peso de la muestra en el aire saturada y con superficie seca.

2. Compresión simple (Norma IRAM 1 510).

Se realizó sobre probetas cúbicas de 5 cm de lado extraídas de las muestras "tipo" y ensayadas en estado seco, en for-

T A B L A IV

ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE (NORMA IRAM 1 510)

CANTERA	Muestra Tipo		Resistencia a Compresión Simple (kg/cm ²)		
	Nº	Cantidad	Promedio	Máximo	Mínimo
A	1	5	940	980	828
	2	5	1 430	1 580	1 248
	3	5	1 510	1 740	1 108
	4	5	1 495	1 780	988
B	1	5	220	230	200
	2	5	715	850	590
	3	5	1 470	1 884	808
	4	5	1 350	1 656	860
	5	5	1 251	1 504	1 096
	6	5	1 084	1 144	1 044
	7	5	1 530	1 920	1 212
C	1	5	1 130	1 272	868
	2	5	1 275	1 420	1 168
	3	5	1 220	1 440	880
	4	5	1 780	1 808	1 752
	5	5	1 025	1 080	908
D	1	5	820	856	808
	2	5	1 600	1 636	1 512
	3	5	1 482	1 740	1 176

na paralela y perpendicular a la estratificación. La velocidad de aplicación de la carga osciló entre 10 y 15 kg/cm² por segundo.

3. Desgaste "Los Angeles" (Norma A.S.T.M. C-131-66)

Este ensayo se practicó sobre las muestras de silo en su tamaño 1 a 3 y también sobre las muestras tipo, trituradas en laboratorio. Ambas han sido encuadradas en la graduación B, determinándose los desgastes sufridos por el material a las 100 y 500 vueltas, tal como lo aconsejan algunas especificaciones.

Para poner en evidencia la influencia de las partículas lajosas, se practicó en algunos casos el ensayo de desgaste eliminando en forma manual dichas partículas.

4. Desgaste Dorry (Norma IRAM 1 539)

Se practicó esta determinación de dureza por pérdida de peso al frotamiento, únicamente sobre las muestras tipo, empleándose como abrasivo arena fina, (pasando 100 % tamiz n° 30) y con una sobrecarga de 250 g/cm².

5. Ensayo de tenacidad (Norma IRAM 1 538)

Este ensayo, que en la actualidad es poco utilizado, mide la resistencia al impacto por la caída de un pisón de 2 kg de peso desde alturas crecientes en un centímetro. La altura final que produce la rotura del material expresa la tenacidad del mismo. Los ensayos se realizaron sobre probetas cilíndricas, de 25 mm de diámetro y otro tanto de altura, extraídas de las muestras tipo de cada cantera.

6. Ensayos de degradación (Norma B.S. 812)

A los efectos de poder contar con resultados que suministren valores comparativos de la resistencia del agregado a la acción de otros esfuerzos que provocan su degradación, se ha seleccionado el presente ensayo, que a nuestro juicio reproduce en forma bastante exacta, el comportamiento del material

T A B L A V

ENSAYO DE DESGASTE "LOS ANGELES" (NORMA ASTM C-131-66)

CANTERA	Muestra Tipo	Graduación	DESGASTE "LOS ANGELES" (%)		
			100 vueltas	500 vueltas	Eliminando lajas
A	1	B	-	52	45
	2	B	11,6	44	-
	3	B	11,0	46	44
	4	B	-	42	-
B	1	B	-	92	-
	2	B	9,8	38	34
	3	B	8,6	31	-
	4	B	3,7	53	49
	5	B	7,0	28	-
	6	B	10,0	40	-
	7	B	13,0	49	39
C	1	B	10,0	45	-
	2	B	20,0	68	-
	3	B	17,0	60	-
	4	B	8,7	33	-
	5	B	8,4	31	25
D	1	B	-	50	37
	2	B	10,0	45	43
	3	B	6,0	32	29

T A B L A VI
ENSAYO DE DESGASTE "DORRY"
(Norma IRAM 1 539)

CANTERA	Muestra Tipo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Desgaste "Dorry" (%)
A	1	217,3	209,5	17,4
	2	219,0	214,3	18,4
	3	286,5	283,5	19,0
	4	352,0	348,5	18,9
B	1	611,5	596,3	15,0
	2	348,0	345,0	19,0
	3	239,0	237,3	19,4
	4	245,0	242,5	19,2
	5	136,8	130,4	17,9
	6	253,3	248,7	18,5
	7	147,5	140,0	17,5
C	1	278,5	274,5	18,7
	2	307,3	302,6	18,4
	3	238,0	232,5	18,2
	4	271,0	266,3	18,5
	5	271,7	264,5	17,6
D	1	266,5	262,0	18,5
	2	297,7	292,9	18,4
	3	288,5	282,9	18,2

T A B L A VII

ENSAYO DE TENACIDAD

(Norma IRAM 1 538)

Cantera	Muestra Tipo		Tenacidad (cm)		
	Nº	Cantidad	Promedio	Máximo	Mínimo
A	1	4	12	13	11
	2	4	15	16	13
	3	4	11	12	11
	4	4	14	15	12
B	1	4	9	10	9
	2	4	12	13	11
	3	4	16	17	13
	4	4	11	11	9
	5	4	13	15	12
	6	4	11	12	10
	7	4	26	27	25
C	1	4	12	12	11
	2	4	12	12	12
	3	4	13	14	10
	4	4	13	14	11
	5	4	11	11	10
D	1	4	12	12	11
	2	4	12	12	12
	3	4	16	19	13

frente a las solicitaciones más exigentes. Los ensayos realizados sobre las muestras de silo se han practicado de acuerdo a la norma, en dos formas distintas:

a) Estático: El agregado de tamaño menor que 1", previamente pesado, es colocado en un molde de acero de 15 cm de diámetro, en una capa de 10 cm de espesor, aplicándose seguidamente, una carga lenta de 40 toneladas. El porcentaje en peso de finos pasando el tamiz nº 8, referido al peso inicial, se lo conoce como "valor de degradación estática del agregado", estableciéndose que valores menores de 35 indican materiales que pueden ser utilizados sin inconvenientes en estructuras viales.

b) Dinámico: En este caso, el material utilizado, cuya granulometría debe estar comprendida entre 1/2" y 3/8", se coloca en un espesor de 3 cm, en un molde de acero de 10 cm de diámetro, aplicándose 15 golpes con un pisón de 15 kg que cae libremente de una altura de 38 cm.

El material que luego del ensayo pasa por el tamiz nº 8, en porcentaje referido al peso inicial, se conoce como "valor de degradación por impacto", siendo los valores aconsejables para su utilización, similares a los del ensayo anterior.

7. Ensayos de cubicidad (Método V.N.)

Este ensayo consiste en determinar las características de forma de las partículas, relacionando la dimensión mínima de un agregado respecto a su máxima y definiendo la misma por un "factor de cubicidad" que considera el valor 1 para agregados de cubicidad óptima y 0 para las partículas sumamente achatadas o lajosas. Las determinaciones fueron realizadas sobre los materiales de las distintas canteras, en algunos de sus tamaños comerciales y los resultados se indican en la tabla II.

8. Adherencia al betún asfáltico (Norma A.S.T.M. D-1664-64)

Se ensayaron por separado dos muestras tipo de cada cantera, trituradas en laboratorio hasta obtener la fracción:

T A B L A VIIIENSAYOS DE DEGRADACION
(Norma B.S. 812)

Cantera	Muestras de Silo	Degradación bajo carga estática	Degradación bajo carga dinámica
A	(1 - 3) (6 - 12)	25,6 % -	- 31,8 %
B	(1 - 3) (6 - 12)	28,6 % -	- 25,0 %
C	(1 - 3) (6 - 12)	27,2 % -	- 25,0 %
D	(1 - 3) (6 - 12)	27,0 % -	- 31,0 %
Piedra granítica (Tandil)	(1 - 3)	19,2 %	-
Piedra granítica (Tandil)	(6 - 12)	-	12,2 %

T A B L A IX

ENSAYO DE ADHERENCIA
(Norma A.S.T.M. D 1 664/64)

BETUN ASFALTICO: PENETRACION: 70 - 100

Cantera	Muestra Tipo	Superficie cubierta (%)
A	1	Superior a 95
	4	Superior a 95
B	4	Superior a 95
	7	Superior a 95
C	1	Superior a 95
	3	Superior a 95
D	1	Superior a 95
	3	Superior a 95

pasa tamiz 3/8", retenido 1/4". El procedimiento seguido consiste en mezclar el agregado a 140°C con 5,5 % en peso de betún asfáltico, hasta el completo recubrimiento; luego se transfiere el agregado a un recipiente de vidrio que contiene agua destilada a 25°C dejándolo en inmersión de 16 a 18 horas.

Al cabo de dicho período, se observa el porcentaje de superficie que ha permanecido sin descubrir, expresándose el resultado como superior o inferior al 95 % cubierto.

9. Otros ensayos

Para completar el conocimiento de las características de los materiales estudiados, se realizaron otros ensayos sobre las muestras de material de silo, en su tamaño de 1 a 3,

T A B L A X

ENSAYOS VARIOS

Cantera	Muestra	Pérdida por lavado s/t nº 200	C O M P O S I C I O N				Durabilidad (Ataq. SO ₄ Na ₂) (%)	Sodio (%)	Potasio (%)	Residuo soluble (%)
			Trozos friables	Arcilla esquistosa	Trozos cohesivos					
A	SIL0	0,38 %	1,39 %	-	98,60 %	0,4 %	0,002	0,0001	0,005	
B	SIL0	0,49 %	3,72 %	-	96,27 %	2,9 %	0,001	0,0001	0,003	
C	SIL0	0,33 %	1,93 %	1,26 %	96,79 %	0,5 %	0,001	0,0001	0,003	
D	SIL0	0,46 %	1,25 %	1,76 %	96,98 %	2,0 %	0,004	0,0001	0,006	

cuyos resultados figuran en la tabla X.

Estos ensayos se refieren a: pérdida por lavado sobre tamiz nº 200 (A.S.T.M. C-117-67), durabilidad por ataque con sulfato de sodio (A.S.T.M. C-88-63), trozos friables (A.S.T.M. C-142-67), arcilla esquistosa y trozos cohesivos, etc.

10. Ensayos sobre mezclas bituminosas

A efectos de evaluar, en términos generales, la capacidad del agregado cuarcítico de Chapadmalal para integrar mezclas asfálticas y comparar los valores obtenidos en el ensayo de las mismas, con los que es posible lograr con otros materiales pétreos, se ha procedido a la dosificación de una mezcla típica.

Se seleccionó una curva granulométrica bien graduada, encuadrada dentro de la zona establecida por V.N. para concreto asfáltico en caliente, con el objeto de preparar mezclas con agregados cuarcíticos de las canteras estudiadas, y con otro tomado como comparación: piedra granítica de Olavarría. En ambas mezclas se incorporó un material natural, de partículas redondas, arena silíceo, para mejorar la trabajabilidad de las mismas.

La dosificación empleada fue la que sigue, con los porcentajes dados en peso.

Agregado grueso (cuarcítico o granítico)..	63,6 %
Agregado fino (cuarcítico o granítico)....	18,5 %
Arena silíceo de río	9,1 %
Filer calcáreo (Cs = 0,23).....	3,8 %
Betún asfáltico (70 - 100)	5,0 %

Se prepararon mezclas en horno, con baño de aceite a 150°C, moldeándose probetas Marshall con 50 golpes de pisón por cara y ensayadas luego de 24 horas, previa inmersión de una hora en agua a 60°C.

11. Hormigones de cemento portland

En este mismo Congreso, se presenta un trabajo (5) en el cual se reseñan una serie de experiencias que se están

T A B L A X I

MEZCLA TIPO CONCRETO ASFALTICO

E N S A Y O	MEZCLAS CON AGREGADO	
	Cuarcítico	Granfítico
Peso específico de la Probeta Marshall (g/cm ³)	2,27	2,39
Densidad Teórica (g/cm ³)	2,35	2,47
Vacíos (%)	3,4	3,2
Estabilidad Marshall (kg)	1 080	1 100
Fluencia (0,01")	14	15

realizando en el IEMIT sobre características de hormigones sometidos a cargas de corta y larga duración y a la acción de variaciones higrométricas del medio ambiente.

Los hormigones han sido preparados con distintos áridos gruesos de producción o consumo en la Pcia. de Bs. As.: canto rodado, piedra cuarcítica, granítica y arcillas expandidas, de modo que su análisis resulte comparable.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Corresponde ahora estudiar los resultados obtenidos en los ensayos realizados con los materiales producidos por las canteras de ortocuarcitas de Chapadmalal, A, B, C y D, comparando sus características con las exigencias técnicas que condicionan su uso, establecidas por organismos nacionales y provinciales, como asimismo con las recomendaciones efectuadas por autores e instituciones extranjeras.

1. Estudio Geológico

El comportamiento físico-mecánico de toda roca está influido por una serie de factores (6) y está demostrado, por ejemplo, que las tensiones de rotura están directamente vinculadas a la selección de granos (7). En este sentido, parece ser que las areniscas de grano fino, son más resistentes que las de grano grueso (8).

Estas ortocuarcitas se encuentran bastante bien seleccionadas, ya que el 45 % de los bancos estudiados están compuestos por rocas de granos medianos a finos, mientras que el 22 % de los mismos presentan estructuras conglomerádicas.

Es destacable la madurez mineralógica en estas sedimentitas, que están compuestas por más del 98,5 % de cuarzo, lo que representa una ventaja en cuanto a sus propiedades de durabilidad.

La alteración es un punto importante, pues es reconoci-

do que las tensiones de rotura más altas están directamente vinculadas a los estados de mayor frescura en los minerales de una roca (9). En estas ortocuarzitas solamente la cubierta superior, en dos casos, adquiere importancia en ese sentido, mientras que en profundidad la alteración es despreciable.

Los planos de estratificación y el diaclasamiento hacen bajar los valores de resistencia, especialmente en el caso de cargas compresivas. Sin embargo, no siempre estos hechos determinan valores bajos, como puede comprobarse correlacionando la descripción de las rocas y la tabla IV. Se ha observado que cuando los óxidos de hierro, especialmente limonita, están depositados en planos de estratificación, pueden influir algo en la resistencia (caso de la muestra nº 6 de la Cantera B), pero cuando estos óxidos se deben a procesos metasomáticos, no deben esperarse influencias negativas, como en el caso de las muestras nº 7 y 4 de las canteras B y C respectivamente.

2. Características Generales

Con respecto a las características generales de estos materiales, las especificaciones recomiendan que el agregado pétreo grueso esté compuesto por partículas durables, limpias, exentas de polvo, terrones, partículas blandas o laminares, arcillas, álcalis, sales, etc. Por las determinaciones realizadas sobre las muestras tomadas de siló, valores que surgen de la tabla X, se deduce que el material actualmente producido por las canteras estudiadas cumple en muy buena medida con los recaudos exigidos.

La cantidad de finos que aparecen en los lavados sobre tamiz 200 provienen principalmente del polvo originado en el proceso de trituración de la roca y en menor parte del agregado en sí.

En lo que respecta a la durabilidad, medida por el ataque con sulfato de sodio, cabe destacar que la piedra cuarcítica presenta una cierta superioridad respecto a otros agregados, por su elevado contenido de cuarzo. Las especificaciones de V.N. establecen un mínimo de 10 % de pérdida, pudiendo ob-

servarse que los resultados obtenidos se encuentran comprendidos entre 0,4 y 2,9 %.

Dentro de las características generales de los agregados pétreos pueden incluirse las correspondientes a peso específico y absorción de agua. Respecto al primero, es sabido que en general los valores más altos corresponden a materiales de mejor calidad; inversamente ocurre con la absorción de agua, para lo cual las especificaciones fijan máximos de 1,2 %.

Los valores registrados en las cuarcitas, para peso específico y absorción se observan en las tablas II y III para las muestras comerciales y tipo respectivamente, las que en general cumplen los valores mínimos especificados.

3. Granulometría

La graduación exigida a un agregado pétreo varía según sea la clase de obra a ejecutar. Generalmente se establecen los límites granulométricos superior e inferior, que encierran la zona dentro de la cual se deben encontrar las mezclas de inertes.

La condición común para cualquier tipo de estructura es que la curva granulométrica sea razonablemente uniforme, entre los tamaños especificados. Con los materiales producidos por las canteras estudiadas, pueden componerse las graduaciones aptas para ser empleadas en mezclas asfálticas graduadas, tratamientos bituminosos superficiales, estabilizados granulares, hormigones de cementos portland, etc.

4. Cubicidad

La forma de las partículas de los agregados pétreos tiene mucha importancia en lo que se refiere a resistencia, trabajabilidad, durabilidad, etc. de las estructuras o mezclas ejecutadas. Son conocidos los inconvenientes que presenta el uso de materiales con porcentajes elevados de partículas lajosas o alargadas que influyen notablemente en la dosificación y comportamiento de las mezclas.

Para hormigones de cemento portland el número de estas

partículas está limitado a causa de su incidencia negativa en la resistencia a rotura debido al "efecto de puente", sumado a las causas antes mencionadas.

Estos problemas de forma de partículas han sido últimamente estudiados en otros países (10), (11), especificándose ensayos que tienden a medir la relación entre largo, ancho y espesor de las piezas.

En el estudio realizado, se empleó el método de V.N. difundido en nuestro medio. Dicho organismo establece "factores de cubicidad" superiores a 0,4 ó 0,6, según el tipo de estructura que se trate. Las muestras comerciales producidas por las canteras A, B, C y D cumplen con lo especificado, ya que la fracción gruesa posee factores superiores a 0,7. No obstante, debe destacarse que en la cubicidad de un agregado influye, además de las características propias del mismo, el sistema de trituración empleado que en muchos casos puede mejorarse, modificando ese sistema o introduciendo nuevas técnicas, (12).

5. Compresión simple

En lo que respecta a este ensayo, los resultados que se indican en la tabla IV en promedio, consignéndose asimismo los valores máximos y mínimos registrados, superan ampliamente el valor mínimo especificado por V.N. que es de 800 kg/cm², para pedregullo de roca. Sólo aparecen las muestras tipo 1 y 2 de la cantera B, con resistencias inferiores a dicho mínimo.

6. Tenacidad

Para esta propiedad, medida por el ensayo Page, V.N. especifica mínimos de 6 y 12 cm según se trate de pedregullo de canto rodado o roca. Los valores registrados que se indican en la tabla VII, superan en casi todos los casos esos mínimos, aún para las muestras tipo, citadas anteriormente, que en el ensayo de compresión acusan bajas resistencias a rotura.

7. Desgaste

Los ensayos más generalizados para valorar la aptitud de un agregado pétreo son sin duda los que se refieren a desgaste, existiendo diversos métodos para determinar esta propiedad. Cada uno de estos métodos, pretende medir los efectos abrasivos que puede experimentar un material y lo logra en mayor o menor semejanza con las condiciones reales de sollicitación o servicio.

Ya en 1908 apareció el método de desgaste Deval para rocas (ASTM; D-2) que si bien permite establecer una escala en la calidad de estos materiales no ofrece una concordancia con los comportamientos prácticos, realizándose el ensayo sobre trozos seleccionados en tamaño y forma, lo que no se ajusta a las características reales de los agregados comerciales. Posteriormente se adaptó este método para ser aplicado al ensayo de agregados (ASTM; D-289), pero no es muy utilizado entre nosotros.

Indudablemente, el procedimiento que ha tenido mayor difusión es el desarrollado en California, aparecido en 1937 y conocido como el ensayo "Los Angeles" (ASTM C-131), el que ha sido muy experimentado en el exterior y en nuestro medio. Este ensayo demostró ser más aconsejable para determinar la calidad de los agregados gruesos que el método Deval, habiéndose fijado originalmente un desgaste mínimo de 40 % para agregados utilizados en tratamientos bituminosos superficiales.

Es indudable que este tipo de estructura, con las partículas de material pétreo en contacto directo entre sí y poco protegida superficialmente, exigió en un principio valores conservativos; posteriormente un mayor conocimiento de los materiales y adoptados otros tipos de estructura: mezclas graduadas, denominadas genéricamente "concreto asfáltico", hicieron modificar ese límite y en la actualidad muchos organismos (13), (14), (15), especifican valores mayores: desgaste "Los Angeles" máximos de 50 - 55 para estructuras de base y de 45 y aún 50, para carpetas de rodamiento y hormigones.

En un ciclo de reuniones técnicas realizado en Brasil (16) sobre problemas relativos al empleo del ensayo "Los Angeles", Hveen fue categórico al mencionar que en California

se pensaba abandonar este método ante el desigual comportamiento de los agregados pétreos en el ensayo y en la práctica. Más, mencionó el caso de uno de los principales caminos construido en ese estado en 1934, con agregados pétreos de desgaste 80 y cuyo comportamiento resultaba satisfactorio 30 años después.

El Instituto del Asfalto de EE. UU. (17), por otra parte, indica que los resultados del ensayo "Los Angeles" no se relacionan con el efecto de pulido producido por la acción del tránsito.

En lo que respecta a nuestra experiencia, en el LEMIT se realiza este ensayo desde hace casi 20 años, habiéndose registrado desgastes de innumerables muestras de agregados pétreos de la Provincia de Buenos Aires, variables entre 20 y 60 y que han sido utilizados en numerosas obras.

De pavimentos urbanos ejecutados en Santa Rosa, Intendente Alvear y otras localidades de La Pampa, hemos recuperado la tosca empleada como agregado en mezclas asfálticas con emulsión, para constatar la dureza del material utilizado, registrándose valores de 50 a 60. El estado actual de estos pavimentos, algunos con más de 15 años de construídos, es perfecto salvo algunas partículas superficiales de tosca rotas.

Hemos comprobado también que existen agregados pétreos con reducidos valores de desgaste "Los Angeles", pero que sufren una alteración fundamental de su granulometría durante el ensayo, al fracturarse las partículas primitivas en otras de menor tamaño pero que al no ser inferiores al tamiz nº 12, material considerado como polvo, no queda realmente determinado el desgaste resultante.

Los ensayos practicados a las muestras tipo de cada cantera, que figuran en la tabla V, permiten distinguir que existe un número predominante de muestras (aproximadamente 60 %) con desgaste "Los Angeles" menores de 45 y un 30 % con valores menores de 33. Asimismo, se observa que las ortocarcitas de la zona de alteración acusan elevados desgastes.

Si bien este ensayo se realiza luego de 500 vueltas de tambor fue practicado también a 100 vueltas, pues algunas especificaciones (15) exigen que este último valor sea menor de

10, para determinar la homogeneidad de la muestra. En nuestro caso, de 15 muestras ensayadas, 10 cumplieron este requisito.

Otro ensayo de desgaste realizado fue el de abrasión Morry, que figura entre las características exigidas a los agregados pétreos por V.N. Los valores encontrados para las cuarcitas, que se indican en la tabla VI, no superan en promedio al límite de 18 % que aparece en las especificaciones.

Consideremos que todos los ensayos de desgaste especificados por nuestras normas actuales son discutibles en cuanto a su adopción para aceptar o rechazar un material pétreo, estimando sin embargo que las determinaciones exigidas por las normas inglesas, de degradación estática y dinámica son más representativas de lo que ocurre realmente en un pavimento, que un desgaste por choque de partículas o abrasión superficial.

Los resultados que se indican en la tabla VIII resultan siempre mucho menores que el máximo de 35 % especificado por la B.S. para agregados pétreos a utilizar en estructuras viales.

8. Mezclas asfálticas

En lo que respecta a la utilización de las cuarcitas como integrante de mezclas asfálticas, se concluye que las mismas presentan trabajabilidad y características semejantes a las que puedan obtenerse con otros buenos agregados de trituración.

Los resultados promedio obtenidos sobre probetas preparadas con agregados cuarcíticos o graníticos principalmente, se pueden observar en la tabla XI.

Referente a la degradación que sufren los agregados graníticos o cuarcíticos por efecto de la compactación en el molde Marshall, se ha comprobado, según se puede constatar en el gráfico nº 1, que las granulometrías realizadas luego de moldeadas las probetas, previa eliminación del betún, difieren poco de la granulometría original, coincidiendo prácticamente para ambos tipos de agregados.

Para establecer las propiedades de afinidad de los agregados pétreos al producto bituminoso, resulta conveniente practicar algunos de los ensayos de adherencia experimentados a ese

fin. Se ha realizado uno de los diversos procedimientos recomendados, indicándose en la tabla IX los resultados obtenidos y en la fig. 2 el aspecto del agregado recubierto luego del ensayo.

9. Hormigones de Cemento Portland

Se ha mencionado un trabajo que se realiza en el LEMIT sobre experiencias con hormigones de cemento portland elaborados con distintos agregados pétreos.

Resumiendo los resultados a que llegan los autores, diremos que las resistencias a compresión a la edad de 28 días son aproximadamente iguales en todos los hormigones; los módulos de elasticidad de las probetas elaboradas con hormigones de cuarcita o granito aparecen en un punto medio entre los de canto rodado y arcillas expandidas, siendo estos últimos los que dan valores menores o sea registran mayores deformaciones.

Las deformaciones por fluencias en los hormigones de cuarcita, granito o canto rodado son inversamente proporcionales a los módulos de elasticidad. Con la piedra cuarcítica, las deformaciones por fluencia resultan, sin embargo, mayores que con los dos últimos. Las contracciones por secado son proporcionales a las pérdidas de agua y al contenido de agua de mezclado.

CONCLUSIONES

En el estudio realizado, se ha tratado de valorar las propiedades de las ortocuarcitas de Chapadmalal a través de un conjunto de ensayos que miden diferentes características. Opinamos que un estudio de esta naturaleza es el que en definitiva permite conocer si un agregado pétreo es o no apto para un determinado uso.

Insistimos en que no deben especificarse condiciones para la aceptación o rechazo de un material pétreo, imponien-

do como requisito el cumplimiento de algún ensayo poco representativo de la realidad. En este aspecto sugerimos intensificar la aplicación del método de degradación bajo carga estática o dinámica (B.S. 812) de muy fácil realización en cuartera y en obra. Debe tenerse especial cuidado, al medir una determinada cualidad, el adoptar el ensayo que refleje más acertadamente el comportamiento del material en servicio.

En el caso particular de los agregados estudiados puede manifestarse que cumplen en forma satisfactoria con los ensayos a que han sido sometidos. Esta circunstancia avalada por infinidad de obras de todo tipo en las que se ha observado perfecto comportamiento luego de transcurridos muchos años de servicio, hacen de estas cuarcitas un material de calidad apropiada para uso vial y obras civiles. No debe aprovecharse un agregado pétreo que puede abastecer tan amplia región de consumo.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- 1) Añón Suárez, H. - "Uso de materiales locales, ensayos y procedimientos de trabajo en pavimentos asfálticos urbanos en la Provincia de Buenos Aires". Vialidad nº 43-1968.
- 2) Monteverde, A. - "La calidad de las rocas de la Provincia de Buenos Aires a través de los ensayos físicos-mecánicos". Rev. Carreteras, Buenos Aires, año IX, nº 34 y 35-1964.
- 3) Pettijohn, J. - "Sedimentary Rocks", Harper - 1952.
- 4) Mauriño, V. E. y Limousin, T. A. - "Structural conditions of the group of "La Tinta" and their relationship with the mechanical behaviour of the orthoquartzite rocks". I Cong. Int. Mec. Rocas, Portugal, 1966.
- 5) Giovambattista, A. y Klaric, M. E. - "Influencia de las características de los áridos en el módulo de elasticidad, fluencia y contracción por secado del hormigón". - LEMIT (inédito) - 1968.
- 6) Mauriño, V. E. - "Contribución de la Geología a la mecánica

- de rocas". Rev. Inst. Corr. Torrent nº 2 - Pereyra Iraola - 1968.
- 7) Drenver, N. W. - "Grundlageruntersuchungen auf dem Gebiet der Gesteinsmechanik", I Congr. Int. Mec. de Rocas; Portugal, 1966.
 - 8) Boretti-Onyszkiewicz, W. - "Joints in the Flysch Sandstones on the Ground of strength examinations". I Congr. Inter. Mec. Rocas - Portugal - 1966.
 - 9) Iliev, I. C. - "An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties", I Congr. Inter. Mec. de Rocas, Portugal, 1966.
 - 10) Bös A. - "Bestimmung und Einfluss der Kornform von Zuschlagstoffen" - Strasse und Autobahn - 7 - 1968.
 - 11) Woolf, D. O. y Runner, D. G. - "The Los Angeles abrasion machine for determining the quality of course aggregate". A.S.T.M. Proc. 38^o Annual Meeting - II Parte - 1935.
 - 12) Fava, A. S. C. - "Nuevas ideas y tendencias en el campo de la tecnología del hormigón", Carreteras nº 20, 1960.
 - 13) International Road Federation: Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes, en los proyectos federales de carreteras - 1961.
 - 14) Dirección de Vialidad Pcia. de Buenos Aires. - Especificaciones vigentes - 1965.
 - 15) California Especifications, Dep. of Public Works-Div. of Highway; 1964.
 - 16) Instituto de Pesquisas Rodoviaras - Palestra proferidas no Brasil por Francis N. Hveem - 1963.
 - 17) Asphalt Institute, Theasfbalt Handbook - 1960.

REOLOGIA DE ASFALTOS ARGENTINOS

A BAJA TEMPERATURA

(1a. Parte)

Dr. Jorge O. Agnusdei

Lic. Oscar Anvaria

Serie II, nº 199

Trabajo presentado a la 16a. Reunión de la Comisión Permanente del Asfalto, 1969.

INTRODUCCION

Los asfaltos empleados en la construcción de caminos cumplen esencialmente dos funciones: a) la de impermeabilizante, actuando como una película protectora frente al agua y b) como cementante de los agregados pétreos durante la vida útil del pavimento.

La aplicación de los materiales asfálticos y su posterior comportamiento en servicio, exige el empleo de asfaltos de muy distintas características que van desde el sólido duro y frágil hasta el líquido viscoso.

El asfalto en servicio, normalmente durante el verano a temperaturas de 60°C, se comporta como un líquido de fluir simple o Newtoniano. En el caso de los flúidos Newtonianos la viscosidad es la constante que define este tipo de comportamiento. Sin embargo, al adquirir el pavimento la temperatura ambiente y aún más, con el transcurso del tiempo, el asfalto aumenta notablemente su consistencia y por lo tanto su manera de fluir deja de ser simple apartándose del comportamiento Newtoniano. En estos casos el comportamiento es complejo y a las deformaciones elásticas se asocian las viscosas y el grado de incidencia de ambos efectos es función de las temperaturas y de las cargas a las que es sometido el pavimento.

Son muchos los trabajos que se han realizado sobre el comportamiento reológico de los betunes asfálticos, pero gran parte de los mismos se han dedicado a estudiar la medida de la viscosidad como una función de la temperatura (1), envejecimiento (2), etc. Si bien la utilidad que presta esta información es muy grande, los esfuerzos transientes ejercidos por el tráfico sobre los betunes asfálticos, como así también las bajas temperaturas que debe soportar, hacen que la medida de la viscosidad por sí sola, sea inadecuada para especificar el comportamiento mecánico bajo condiciones prácticas de servicio.

Es bien conocida la tendencia a la fractura que se produce en la película de betún, componente de una mezcla asfáltica,

cuando se incrementa la velocidad de aplicación de la carga o bien cuando la temperatura baja, especialmente en invierno. La aparición de fragilidad es un fenómeno que se origina como consecuencia de la superposición de propiedades elásticas sobre las viscosas. Algunos autores (3) opinan que la energía impartida por las fuerzas de los vehículos en movimiento es almacenada por el mecanismo elástico del betún y que es debido a tal acumulación de energía que, sobrecargando rápidamente, se produce la fractura.

Thower (4) afirma que el tiempo de aplicación de la carga sobre los ligantes en un camino es de muy corta duración, del orden de 5×10^{-2} seg. Kühn y Ridgen (5) establecen un tiempo de $1,4 \times 10^{-2}$ seg, como el tiempo de aplicación de la carga de un vehículo circulando a 80 km/h.

Las especificaciones argentinas de asfaltos, como las de muchos países, utilizan para clasificar a sus asfaltos el ensayo de penetración.

Son numerosos los trabajos que hablan de los inconvenientes que trae aparejado este modo de clasificación y entre ellos se destaca el desarrollado por Welborn (6) quien recalca la conveniencia de clasificar los asfaltos mediante ensayos racionales tal como lo es la viscosidad.

Un gran cambio se ha producido en los últimos años en lo que concierne a especificaciones de materiales asfálticos empleados en pavimentación. En EE. UU. los estados de California y Texas han adoptado desde hace un tiempo la viscosidad a 60°C para clasificar a sus asfaltos. Recientemente, Skog (7) propone una modificación a la especificación de California de tal modo que la clasificación se realice mediante el ensayo de viscosidad a 60°C y 135°C , pero luego de envejecer los asfaltos mediante el ensayo de la película fina rotativa (Rolling Film Test) (2).

Si bien estas especificaciones clasifican los asfaltos mediante una medida racional, nada dicen del comportamiento a bajas temperaturas y bajos tiempos de aplicación de la carga (ensayos dinámicos) que como se dijo anteriormente son condiciones críticas en la vida de un pavimento.

Puzinauskas (8) del Asphalt Institute considera la necesidad de realizar determinaciones a baja temperatura y da valores de viscosidad a 4°C obtenidos mediante el viscosímetro de placa y cono.

Krom y Dormon (9), hacen consideraciones sobre lo que debe ser una especificación funcional de betunes, sobre la base de exigencias de comportamiento bajo condiciones críticas. Para estos autores el comportamiento en servicio podría ser controlado por las propiedades del betún, luego de un ensayo de envejecimiento, que simule el endurecimiento que sufre el betún durante el mezclado en usina. Para ello proponen la determinación de un módulo de Stiffness (10) a 0°C y 50 c.p.s. y a -10°C y 10^4 seg. Estas determinaciones son realizadas sobre los asfaltos envejecidos. En esta tentativa de especificación no se dan límites a los distintos ítems ya que solamente menciona una forma general de especificación.

De todo lo dicho se ve la necesidad de contar con especificaciones racionales con ensayos o limitaciones que permitan la utilización de materiales adecuados bajo cualquier circunstancia.

Dado que la mayoría de los materiales asfálticos muestran pronunciados efectos elásticos bajo condiciones críticas (baja temperatura y cargas dinámicas), es interesante estudiar el comportamiento viscoelástico bajo tales condiciones.

El propósito de este trabajo es estudiar el comportamiento viscoelástico a baja temperatura y cargas dinámicas, tanto de los asfaltos en su estado original como en los envejecidos por la técnica de la película fina rotativa (Rolling Thin Film Test), ya que consideramos que esta es la condición que interesa, es decir, al comienzo de la vida útil una vez colocado en el camino.

COMPORTAMIENTO VISCOELASTICO DE LOS ASFALTOS

El comportamiento viscoelástico de los asfaltos ha sido estudiado por numerosos autores (3) (5) (10) (11) (12) (13).-

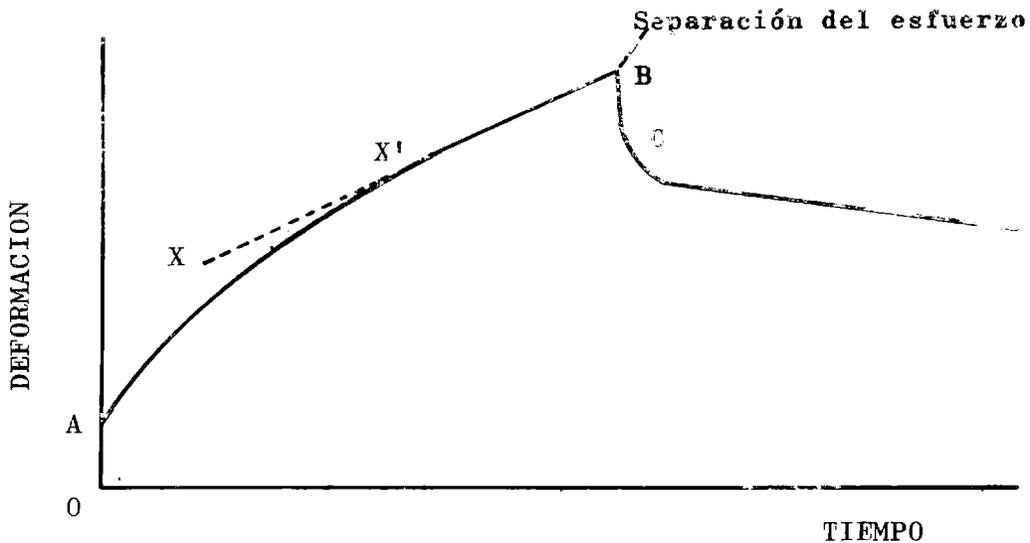


Fig. 1.- Deformación en función del tiempo a esfuerzo constante

La teoría de la viscoelasticidad ha sido discutida entre otros por Leaderman (14) y Gross (15).

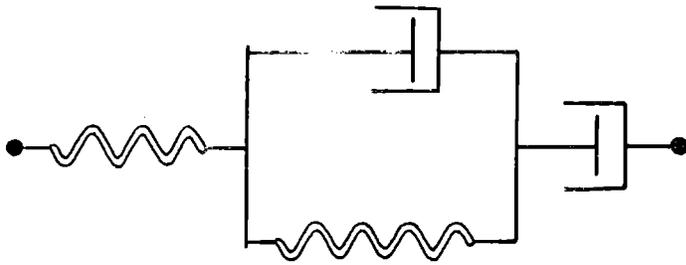
La aplicación de la teoría de la viscoelasticidad a los betunes asfálticos implica suponer que éstos se comportan como materiales lineales, es decir, que bajo un esfuerzo constante la deformación a un tiempo fijo es proporcional al esfuerzo.

La respuesta de un material asfáltico cuando se lo somete a la acción de una carga, es función de la velocidad de aplicación de la carga (cargas estáticas, vehículos estacionados) y alta velocidad de aplicación de la carga equivalente a cargas sinusoidales (vehículos en movimiento).

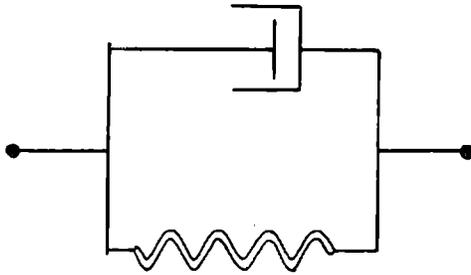
Consideramos a ambos tipos de comportamiento separadamente.

1) Comportamiento a baja velocidad de aplicación de la carga

Cuando un betún asfáltico es deformado bajo la acción de un esfuerzo constante en tensión (ensayo de "creep") y la deformación resultante registrada en función del tiempo, se obtiene una curva del tipo de la figura 1.



Burger



Kelvin



Maxwell

Fig. 2.- Modelos mecánicos

Inicialmente la velocidad de deformación es alta pero va disminuyendo gradualmente hasta alcanzar un valor constante (pendiente límite $x-x'$). Cuando se cesa el esfuerzo, parte de la deformación es recuperada. Un cuerpo idealmente elástico sometido a un tratamiento similar, mostrará una deformación instantánea cuando se aplica el esfuerzo, se mantendrá constante con el tiempo y desaparecerá instantáneamente al suprimir el esfuerzo, parte OA y BC, es un proceso reversible.

En este caso el esfuerzo es proporcional a la deformación y es independiente del tiempo. La constante de proporcionalidad es el módulo elástico.

Cuando se alcanza la pendiente límite (parte $x-x'$) esta parte corresponde al fluir viscoso y es no recuperable.

El rango de la curva AB, combina una componente de la deformación elásticamente recuperable y una componente de la deformación viscosa no recuperable o permanente. En este caso, de comportamiento viscoelástico, la deformación no sólo depende del esfuerzo sino también del tiempo. La relación entre esfuerzo y deformación involucra una ecuación diferencial.

El comportamiento de un material viscoelástico lineal puede ser representado en forma esquemática por modelos mecánicos que exhiben igual comportamiento macroscópico. Un modelo mecánico puede consistir en combinaciones de elementos lineales o sea, un elemento elástico puro, un puramente viscoso y un elemento mostrando elasticidad retardada o amortiguada.

Una simple representación se obtiene de la combinación de un elemento de Maxwell y uno de Kelvin. Estos elementos consisten de un resorte y un amortiguador, acoplados en serie y en paralelo respectivamente.

La combinación de estos elementos da origen al modelo mecánico de Burger (3) (5) (16) (17), figura 2. En el modelo de Burger cuando se aplica al material un esfuerzo a una velocidad infinitamente grande, el elemento elástico reacciona casi instantáneamente con un movimiento de deformación directamente proporcional al esfuerzo, de acuerdo con la ley de Hooke.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_0} \quad (1)$$

donde:

σ = esfuerzo de corte por tensión

ε_1 = deformación elástica

E_0 = módulo de Young

A causa de que los betunes son capaces de fluir indefinidamente bajo la acción de un esfuerzo, el modelo mecánico debe contar con un elemento que pruebe esto, de ahí que se incluya un amortiguador que representa una función puramente viscosa. Cuando un elemento de este tipo es deformado bajo la acción de un esfuerzo, el mismo reaccionará con una velocidad de deformación proporcional al esfuerzo, de acuerdo a la ley de Newton.

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\lambda_0} t \quad (2)$$

donde:

ε_2 = deformación viscosa

λ_0 = coeficiente de tracción viscosa

$\lambda_0 = 3\eta$

η = coeficiente de viscosidad

Cuando se aplica energía a un elemento de este tipo, la misma se disipa como calor.

El modelo de Burger incluye un tercer elemento representante de la deformación que se recupera con el transcurso del tiempo, bajo la forma de un amortiguador y un resorte unidos en paralelo. Cuando este elemento es deformado, el mismo se extiende en una distancia dada por σ/E_1 , no en forma instantánea, pero sí a una velocidad determinada por el coeficiente de tracción viscosa del amortiguador.

La deformación en función del tiempo viene dada por:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\lambda_1} t} \right) \quad (3)$$

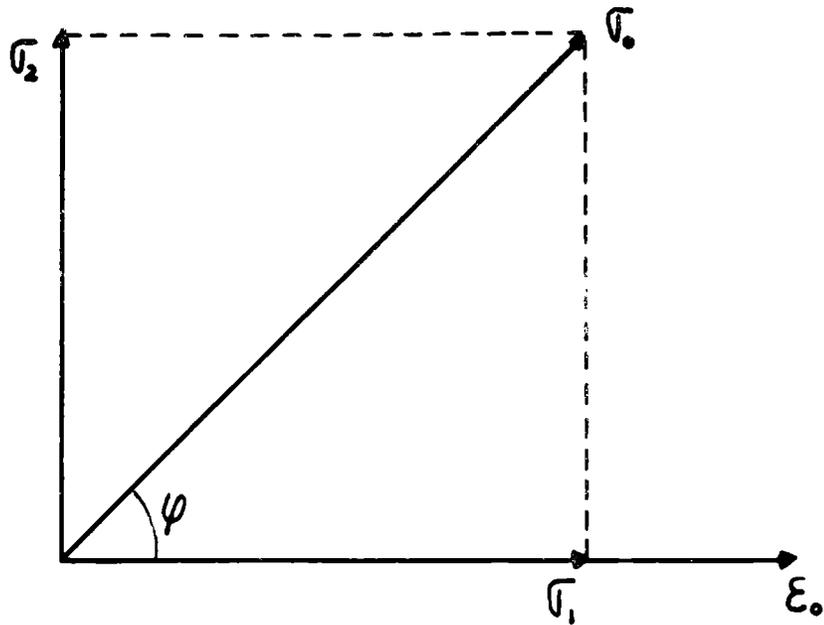


Fig. 3.- Descomposición vectorial del esfuerzo

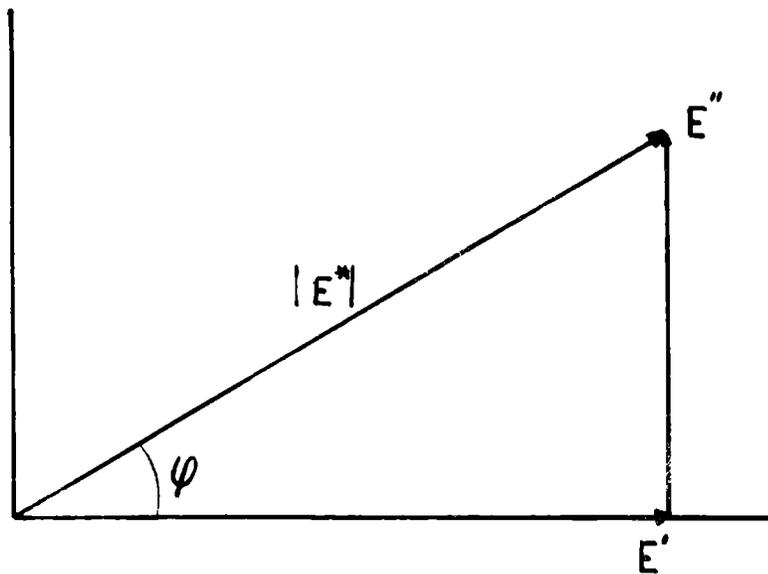


Fig. 4.- Componentes real e imaginaria del módulo complejo

donde:

- ε_3 = deformación elástica retardada
- E_1 = módulo de elasticidad del resorte acoplado en paralelo con el amortiguador
- λ_1 = coeficiente de tracción viscosa del amortiguador acoplado en paralelo con el resorte.

$$\frac{\lambda_1}{E_1} = \tau_1$$

τ_1 = tiempo de retardación del elemento Kelvin (resorte y amortiguador en paralelo).

Este tiempo de retardación τ_1 indica la velocidad específica de acción del elemento Kelvin. De acuerdo a esto la ecuación (3) se transforma en:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (4)$$

La ecuación que relaciona esfuerzo y deformación para el modelo de Burger es la siguiente:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\lambda_0} t + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (5)$$

En general los materiales viscoelásticos requerirán un cierto número de elementos Kelvin.

Brown y Spark (3) utilizan en su trabajo cuatro elementos, mientras que Majidzadeh y Schweyer (13) emplean solamente dos.

Dado que las deformaciones de los elementos Kelvin individuales son aditivas, la ecuación (5) puede ser escrita así:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\lambda_0} t + \frac{\sigma \sum_{i=1}^{i=n} 1}{\sum_{i=1}^{i=n} E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (6)$$

Siendo n el número de elementos Kelvin considerados.

Cuando la velocidad de aplicación de la carga es alta, es decir cuando: $t \rightarrow 0$

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} \longrightarrow E_0$$

Cuando la velocidad de aplicación de la carga es baja, es decir cuando: $t \rightarrow \infty$

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} \longrightarrow \frac{\lambda_0}{t_0}$$

2) Comportamiento a alta velocidad de aplicación de la carga

Cuando a un material viscoelástico lineal se le somete a un esfuerzo σ que varía sinusoidalmente en el tiempo, a una frecuencia determinada (ensayos dinámicos), la respuesta del material será una deformación sinusoidal de la misma frecuencia pero adelantada respecto al esfuerzo en un cierto ángulo φ . Así tenemos.

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 \text{ sen } \omega t \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \text{ sen } (\omega t - \varphi)\end{aligned}$$

donde:

- ω = frecuencia angular en radianes/seg
- $\omega = 2 \pi$ frecuencia
- σ_0 = amplitud del esfuerzo
- ε_0 = amplitud de la deformación
- φ = ángulo de desfasaje

La amplitud máxima del esfuerzo σ_0 , el cual no está en fase con la máxima amplitud de la deformación ε_0 , puede ser separado en dos componentes, como se indica en la figura 3. Una de las componentes en fase con la deformación y la otra 90° fuera de fase con la deformación.

El vector σ_0 rota en sentido contrario a las agujas del reloj, con una frecuencia igual a la del esfuerzo sinusoidal.

La deformación rota en el mismo sentido, a la misma frecuencia, pero retrasada en un ángulo φ .

y σ_1 la componente del esfuerzo en fase con la deformación será:

$$\sigma_1 = E' \epsilon_0$$

y σ_2 la componente del esfuerzo desfasada 90° con la deformación será:

$$\sigma_2 = E'' \epsilon_0$$

de ahí que:

$$E' = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\epsilon_0} \quad (7)$$

$$E'' = \frac{\sigma_2}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0 \operatorname{sen} \varphi}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Los módulos E' y E'' pueden ser adicionados vectorialmente en un plano complejo (18) para dar (figura 4):

$$E^* = E' + i E''$$

$i = \text{unidad imaginaria}$

El valor absoluto del módulo complejo E^* viene dado por:

$$| E^* | = \sqrt{E'^2 + E''^2}$$

E' y E'' son los componentes del módulo complejo.

Reemplazando E' y E'' en la ecuación anterior, nos queda:

$$| E^* | = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

El módulo complejo es función de la frecuencia. Finalmente las ecuaciones 7 y 8 pueden escribirse así:

$$E' = | E^* | \cos \varphi$$

$$E'' = | E^* | \operatorname{sen} \varphi$$

de aquí tenemos:

$$\frac{E''}{E'} = \operatorname{tg} \varphi$$

Para un ciclo de deformación, la energía almacenada y recuperada es proporcional a E' y la energía disipada es pro-

porcional a E'' , φ sería una medida de la disipación de la energía por ciclo.

Dado que la respuesta de un cuerpo elástico, está completamente en fase con el esfuerzo, E' la parte real del módulo complejo es una medida de la elasticidad del material. La respuesta de los materiales viscosos está 90° fuera de fase con el esfuerzo, de ahí que E'' , la parte imaginaria del módulo complejo, es una medida de la viscosidad.

Cuando la velocidad de aplicación de la carga es alta (frecuencias elevadas) es decir:

$$\begin{array}{l} t \longrightarrow 0 \\ |E^*| \longrightarrow E' \quad (\varphi \longrightarrow 0 \quad \text{y} \quad E'' \longrightarrow 0) \end{array}$$

Cuando la velocidad de aplicación de la carga es baja (frecuencias pequeñas), es decir:

$$\begin{array}{l} t \longrightarrow \infty \\ |E^*| \longrightarrow E'' \quad (\varphi \longrightarrow 90^\circ \quad \text{y} \quad E' \longrightarrow 0) \end{array}$$

Finalmente diremos que a E' se la conoce con el nombre de módulo de almacenaje (storage modulus) y a E'' como módulo de pérdida (loss modulus).

La relación entre E'' y E' expresa el grado en que el material se aparta del comportamiento elástico ideal.

RELACION ENTRE LOS ENSAYOS DE CREEP Y DINAMICOS

Las determinaciones de creep se practican para tiempos mayores de 1 seg, mientras que para tiempos menores se recurre a los ensayos dinámicos.

Los parámetros elásticos que describen el mecanismo de deformación de los asfaltos pueden ser calculados de los datos de creep a partir de la ecuación (6) mediante el método de aproximaciones sucesivas (en el apéndice se da en detalle el método de cálculo) con lo que se obtiene E_0 , λ_0 , E_1 y λ_1 Mediante cálculo matemático (13, 15) empleando una transfor-

mación de Fourier se puede calcular la respuesta dinámica, es decir, el módulo complejo, a cualquier frecuencia con los valores E_0 , λ_0 , E_i y λ_i calculados mediante ensayos estáticos de "creep" de acuerdo a:

$$E^{\circ} = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{i\omega\lambda_0} + \frac{1}{E_1 + i\omega\lambda_1} + \frac{1}{E_2 + i\omega\lambda_2} + \dots + \frac{1}{E_n + i\omega\lambda_n}} \quad (11)$$

Como se vio anteriormente:

$$E^{\circ} = E' + iE''$$

Mediante la aplicación de métodos de resolución de números complejos a la ecuación (11) es posible calcular las componentes real e imaginaria del módulo complejo. Hay que recalcar que este módulo es función de la frecuencia.

Resumiendo todo lo dicho anteriormente el comportamiento viscoelástico de asfaltos, es posible mediante el relativamente simple ensayo creep (deformación en función del tiempo a esfuerzo constante) calcular el módulo complejo y sus componentes como así también el ángulo de desfase, en el rango de frecuencia deseado.

TECNICA EMPLEADA

Para obtener directamente el módulo complejo de elasticidad y sus componentes, se requieren equipos complejos y de elevado costo. De ahí que en este trabajo se optó por determinar primeramente la curva de creep (deformación-tiempo) a esfuerzo constante empleando para ello el registrador y parte del equipo del microviscosímetro de placas deslizantes. Para esto se preparó una probeta cilíndrica de 3,33 cm de diámetro por 7,16 cm de largo, de la siguiente manera:

Se funde el betún a 140-150°C y se vierte en el interior de un molde de bronce amalgamado de las medidas dadas anteriormente, apoyado sobre una placa de bronce. Se deja en-

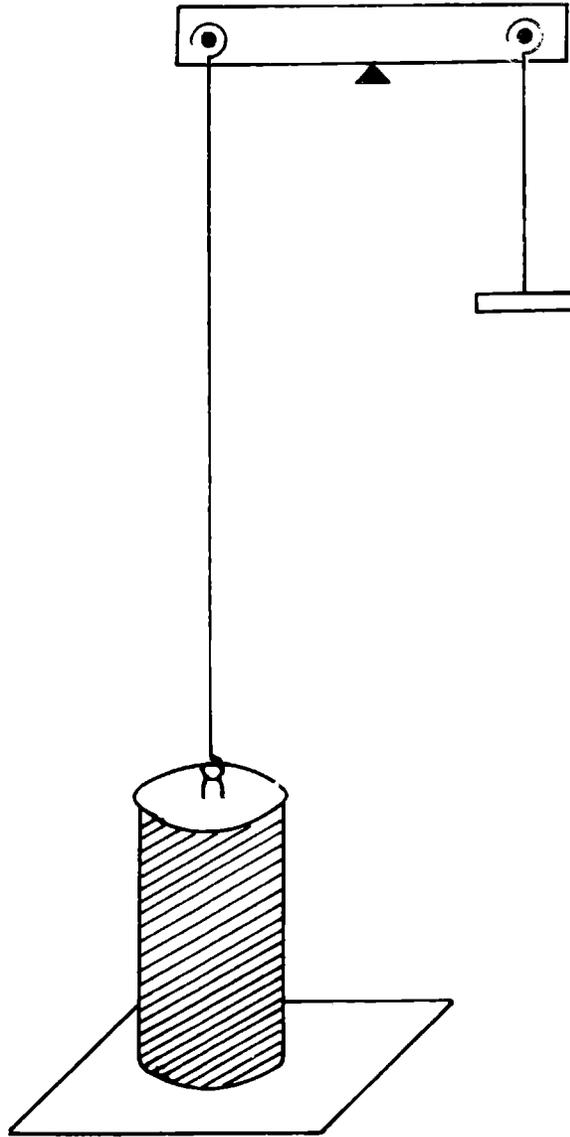


Fig. 5.- Esquema del equipo utilizado

friar durante 2 h dentro de una heladera y al cabo de este tiempo se quita el exceso de asfalto mediante una espátula. Se coloca sobre la cara superior un disco de bronce (previamente calentado) de igual diámetro que el cilindro asfáltico. Se desmolda la probeta y se la coloca durante 2 h a la

temperatura de ensayo, en este caso a 0°C . La placa sobre la cual apoya la probeta puede ser fijada mediante tornillos al pie del microviscosímetro de placas deslizantes y un ojal sobre el disco de bronce en la parte superior de la probeta permite unir a ésta con el dispositivo de tensión del microviscosímetro (figura 5). Se equilibra el sistema y se aplica una carga conocida, registrándose, mediante el registrador del aparato, la deformación producida en función del tiempo (creep).

Las probetas se prepararon con los asfaltos en su estado original y luego de envejecerlos durante 75 minutos a 163°C (Rolling thin Film Test). Con los datos obtenidos de la curva deformación-tiempo, se procedió a calcular los parámetros elásticos y con éstos el módulo de elasticidad complejo y sus componentes. El procedimiento de cálculo se muestra en el apéndice. Para el mismo se siguió el desarrollo dado por Majidzadeh y Schweyer (13).

MATERIALES EMPLEADOS

Los asfaltos estudiados en esta primera parte del trabajo son materiales procesados por destilación directa. Las características se encuentran en la tabla I, habiendo sido ensayados por métodos A.S.T.M. o IRAM.

El betún A proviene de un crudo de la zona Comodoro Rivadavia en Neuquén. El B es proveniente del Yacimiento de Cañadón Perdido, el C proviene de un crudo de Challacó y el D es un asfalto de un crudo de Medanitos. Los asfaltos identificados como C' y D' corresponden a los betunes de Challacó y Medanitos luego de ser sometidos al ensayo de calentamiento (75 min a 163°C) en película fina rotativa.

T A B L A ICARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

	A S F A L T O S			
	A	B	C	D
EN S A Y O S				
Peso específico a 25/25°C	0,987	0,986	1,006	1,004
Penetración a 25°C (100 g-5 seg)	85	67	81	81
Punto de ablandamiento (A y E). °C	51,2	53,0	46,6	45,8
Punto de inflamación. Cleveland, °C	343	338	332	290
Oliensis				
Indice de penetración (Pfeiffer)	+ 0,5	+ 0,4	- 1,0	- 1,2
Solubilidad en S ₂ C, %	99,8	99,8	99,9	99,9
Ductilidad a 25°C, cm.	70	51	+ 150	+ 150
Viscosidad a 60°C, poises (*)	4 750	7 532	1 638	1 938
Viscosidad a 60°C del residuo del ensayo de calentamiento en película fina rotativa, 75 minutos a 163°C (Rolling Thin Film Test), poises (*)			2 899	3 428

(*) Método del viscosímetro capilar para 30 cm de Hg.

T A B L A II

PARAMETROS VISCOELASTICOS A 0°C DE LOS ASFALTOS EMPLEADOS

P A R A M E T R O S							
ASFALTOS	λ_0	$E_0 \cdot 10^{-6}$	λ_1	$E_1 \cdot 10^{-6}$	λ_2	$E_2 \cdot 10^{-6}$	
	poises. 10^{-6}	dinas/cm ²	poises. 10^{-6}	dinas/cm ²	poises. 10^{-6}	dinas/cm ²	dinas/cm ²
A	19 650	373	6 667	203	1 103	331	
B	10 228	400	3 654	140	995	398	
C	6 935		7 344	184	1 340	411	
D	7 971		5 558	200	2 260	813	
C'	15 886	259	21 961	395	3 031	1 037	
D'	12 874	169	13 400	536	2 218	845	

RESULTADOS OBTENIDOS

Operando a 0°C y con un esfuerzo igual a $2,24 \times 10^5$ dinas/cm² se obtuvieron las curvas de deformación en función del tiempo. En la fig. 6 se muestran en trazo lleno las curvas correspondientes a dos asfaltos en su estado original y a uno de ellos luego del ensayo de calentamiento.

Del tratamiento de estas cruvas, lo cual se indica en el apéndice, se obtienen los parámetros viscoelásticos que describen el comportamiento mecánico de los asfaltos estudiados. Los valores correspondientes se encuentran en la tabla 2. En esta tabla puede observarse que los asfaltos A, B, C' y D' presentan un cierto valor de módulo de elasticidad instantáneo E_0 , mientras que esto no ocurre con los betunes C y D. Estos betunes luego de ser calentados durante 75 min a 163°C , alteran su forma de comportamiento, mostrando la aparición de un E_0 . Estos resultados están asociados con los elevados valores de viscosidad a 60°C (tabla I) que se observan en los asfaltos A y B sin calentar y en los C y D luego de ser sometidos a calentamiento.

Con los valores de los parámetros elásticos tabulados en la tabla II se procedió a calcular el módulo de elasticidad complejo en función de la frecuencia en el ámbito de 10^{-4} a 10^2 rad/seg. En las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8, en las que se incluyen los valores de las componentes del módulo complejo y el ángulo de desfase, se presentan los valores absolutos del módulo.

En las figuras 7 a 12 se ha representado la variación del módulo de almacenaje E' y el módulo de pérdida E'' en función de la frecuencia para los asfaltos estudiados. Como dijimos anteriormente E' es una medida de la elasticidad de un asfalto, y aumenta a medida que la frecuencia crece hasta alcanzar un valor constante, haciéndose independiente de la frecuencia. A frecuencias muy bajas su valor tiende a cero, siendo por lo tanto la contribución elástica, despreciable frente a la viscosa. Respecto a E'' que es una medida de la energía disipada

T A B L A III

RESPUESTA DINAMICA DEL ASFALTO "A" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² · 10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² · 10 ⁻⁶	E^* dinas/cm ² · 10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,041	1,964	1,964	88,75
0,001	3,907	18,77	19,17	78,25
0,01	68,93	45,18	82,42	33,23
0,1	139,7	66,94	154,9	25,60
1	303,1	106,6	321,3	19,40
10	373,0	15,5	373,0	2,38
100	373,0	1,542	373,0	0,23

T A B L A IV
RESPUESTA DINAMICA DEL ASFALTO "B" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² . 10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² . 10 ⁻⁶	E^* dinas/cm ² . 10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,0127	1,023	1,023	89,30
0,001	1,247	10,05	10,13	82,92
0,01	43,15	42,73	60,73	44,72
0,1	117,8	80,65	142,8	34,42
1	294,7	127,6	321,1	23,42
10	397,0	21,86	397,6	3,15
100	400,0	2,202	400,0	0,47

T A B L A V

RESPUESTA DINAMICA DEL ASFALTO "C" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E'' dinas/cm .10 ⁻⁶	E''^* dinas/cm .10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,00378	0,694	0,694	89,68
0,001	0,3748	6,895	6,905	86,90
0,01	44,686	102,7	112,1	66,52
0,1	138,6	189,2	234,5	53,77
1	218,9	991,1	1 015,0	77,55
10	220,4	9 745,9	9 748,0	88,70
100	220,4	97 425,0	97 425,0	89,87

T A B L A VIRESPUESTA DINAMICA DEL ASBESTO "D" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E* dinas/cm ² .10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,00393	0,793	0,793	89,72
0,001	0,392	7,439	7,450	87,18
0,01	25,67	60,94	66,00	67,15
0,1	132,1	243,6	277,1	61,53
1	290,4	1 373,5	1 403,9	78,22
10	296,2	13 376,0	13 379,5	88,77
100	298,3	133 696,0	133 696,0	89,87

T A B L A VII

RESPUESTA DINAMICA DEL ASFALTO "C" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E* dinas/cm ² .10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,0191	1,607	1,607	89,33
0,001	1,874	15,80	15,91	83,2
0,01	43,42	85,22	95,56	73,72
0,1	192,5	53,04	199,7	15,43
1	249,7	31,37	251,6	7,25
10	259,1	2,934	259,1	0,65
100	259,1	0,3939	259,1	0,07

T A B L A VIII

RESPUESTA DINAMICA DEL ASFALTO "D" a 0°C

Frecuencia rad/seg	E' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² .10 ⁻⁶	E* dinas/cm ² .10 ⁻⁶	Angulo de fase grados
0,0001	0,0150	1,287	1.287	89,33
0,001	1,457	12,67	12,75	83,43
0,01	60,83	56,03	82,71	42,65
0,1	130,1	30,59	133,6	13,25
1	163,4	14,72	164,1	5,15
10	168,9	1,713	168,9	0,07
100	169,1	0,0011	169,1	0,0083

como calor, se aprecia en los asfaltos C y D, que este módulo crece con la frecuencia, llegando a ser casi proporcional a la misma, en el rango de frecuencias estudiado.

En los asfaltos A, B, C' y D', los cuales presentan un módulo de elasticidad instantánea E_0 , el módulo de pérdida E'' , al principio crece, para luego disminuir, tendiendo su valor a cero a medida que aumenta la frecuencia. Este comportamiento pone en evidencia que en la respuesta de estos asfaltos hay predominio de la contribución elástica frente a la viscosa, es decir, el elemento viscoso no tiene tiempo a reaccionar y por lo tanto se comportan como cuerpos elásticos.

En las figuras 13 a 18 se muestra como varía el valor absoluto del módulo elástico complejo y el ángulo de fase con la frecuencia.

En los asfaltos C y D, los cuales no presentan deformación elástica instantánea, se observa que el módulo complejo aumenta con la frecuencia, llegando a ser casi proporcional a ésta a frecuencias elevadas. Según Majidzadeh, este comportamiento podría ser explicado considerando, que en ausencia de un módulo elástico instantáneo E_0 , solamente el amortiguador del modelo mecánico de Burger responde a la deformación impuesta y por lo tanto el módulo elástico complejo aumenta, alcanzando el valor de E'' , es decir el módulo de pérdida a frecuencias elevadas.

En el caso de los asfaltos A, B, C' y D', que presentan deformaciones elásticas instantánea, el valor del módulo complejo aumenta con la frecuencia hasta alcanzar un valor constante, haciéndose independiente de la misma, tomando un valor igual al del módulo de almacenaje E' .

En cuanto al ángulo de fase, el cual es una medida de la relación entre la energía perdida y la energía almacenada, observamos en los asfaltos C y D (ausencia de E_0) que a baja frecuencia, la contribución viscosa predomina sobre la elástica, por lo tanto el ángulo de fase tiende a 90° lo que indica una disipación total de energía. Al aumentar la frecuencia, el ángulo de fase disminuye, para tender nuevamente a 90° a frecuencias altas. Esto se explica porque a elevada frecuencia solamente el amortiguador (λ_0) del modelo

T A B L A IX

MODULO ELASTICO COMPLEJO Y SUS COMPONENTES A 0°C Y UNA FRE-
CUENCIA DE 100 RAD/SEG

Asfalto	E' dinas/cm ² · 10 ⁻⁶	E'' dinas/cm ² · 10 ⁻⁶	E^* dinas/cm ² · 10 ⁻⁶
A	373,0	1,542	373,0
B	400,0	2,202	400,0
C	220,4	97 425,0	97 425,0
D	298,3	133 696,0	133 696,0
C'	259,1	0,2939	259,1
D'	169,1	0,0011	169,1

mecánico responde.

Con los asfaltos A, B, C' y D', (presencia de E_0) ocurre que a baja frecuencia el ángulo tiende a 90° , pero a medida que ésta aumenta, su valor tiende a cero, lo cual indica que no hay pérdidas de energía dado que hay solamente contribución elástica.

Resumiendo lo entedicho diremos que: en las condiciones de trabajo y en ausencia de un módulo elástico instantáneo (asfaltos B y C) a bajas frecuencias el valor del módulo elástico complejo toma el valor del módulo de pérdida E'' y el ángulo de fase tiende a 90° , es decir, predomina el comportamiento viscoso.

A frecuencias elevadas ocurre lo mismo. Con los asfaltos A, B, C', D', que presentan E_0 , a bajas frecuencias el módulo elástico complejo toma el valor del módulo de pérdida E'' y el ángulo de fase tiende a 90° . A frecuencias altas el ángulo tiende a cero y el módulo complejo toma un valor constante similar al del módulo de almacenaje E' .

Como se dijo anteriormente, el propósito de este trabajo es conocer el comportamiento de los asfaltos bajo condiciones críticas, luego de ser sometidos a ensayos de calentamiento mediante la técnica de película fina rotativa. Como se sabe la alteración producida en los asfaltos luego de ser calentados durante 75 minutos a 163°C es similar a la que se produce durante el calentamiento en usina durante la preparación de la mezcla asfáltica.

Las condiciones críticas a las cuales hacemos referencia, son: baja temperatura (0°C) y bajo tiempo de aplicación de la carga, 100 rad/seg.

En la tabla IX se presentan los valores del módulo elástico complejo y sus componentes E' y E'' calculados para una frecuencia de 100 rad/seg. Los valores corresponden a los cuatro asfaltos estudiados en su estado original y a dos de ellos luego de ser sometidos a calentamiento. Razones de tiempo impidieron ensayar los dos asfaltos restantes luego de envejecidos.

Observamos en los asfaltos A y B que el valor del mó-

Módulo complejo está influenciado por la contribución elástica solamente, no ocurriendo lo mismo con los asfaltos C y D donde la contribución viscosa predomina netamente sobre la elástica.

Recordemos que la energía impartida por las fuerzas de los vehículos en movimiento es almacenada por el mecanismo elástico del asfalto y una acumulación grande de energía puede producir la fractura cuando se sobrecarga muy rápidamente, lo que pone en evidencia que asfaltos con un valor elevado del módulo complejo, donde el mayor aporte está dado por el módulo de almacenaje podrían resultar perjudiciales desde el punto de vista de la fragilidad.

En los asfaltos C' y D' calentados a 163°C durante 75 minutos se nota que el módulo complejo toma el valor de la componente elástica, en las condiciones del ensayo, un cambio notable en las características reológicas de los mismos, ya que el aporte viscoso (E'') al módulo complejo ha quedado reducido a un valor de poca significación frente al valor de la componente elástica (E').

En esta primera parte del trabajo solamente se presenta el método de ensayo seguido y los primeros resultados obtenidos con cuatro asfaltos.

Si bien no es posible arribar a conclusiones definitivas dado el pequeño número de muestras ensayadas, podemos emitir los siguientes juicios a manera de conclusión:

1. Siguiendo el método descripto por Majidzadeh y Schwyer, es posible mediante un dispositivo relativamente sencillo, constituido por el sistema de tensión y el registrador del microviscosímetro de placas deslizantes, obtener las curvas de "creep" (deformación-tiempo) de probetas de asfalto de dimensiones determinadas.

A partir de estas curvas, mediante aproximaciones sucesivas, se pueden calcular los parámetros elásticos que describen el comportamiento mecánico de los asfaltos y con éstos el módulo complejo a la frecuencia deseada.

2. El módulo mecánico considerado, constituido por dos elemen-

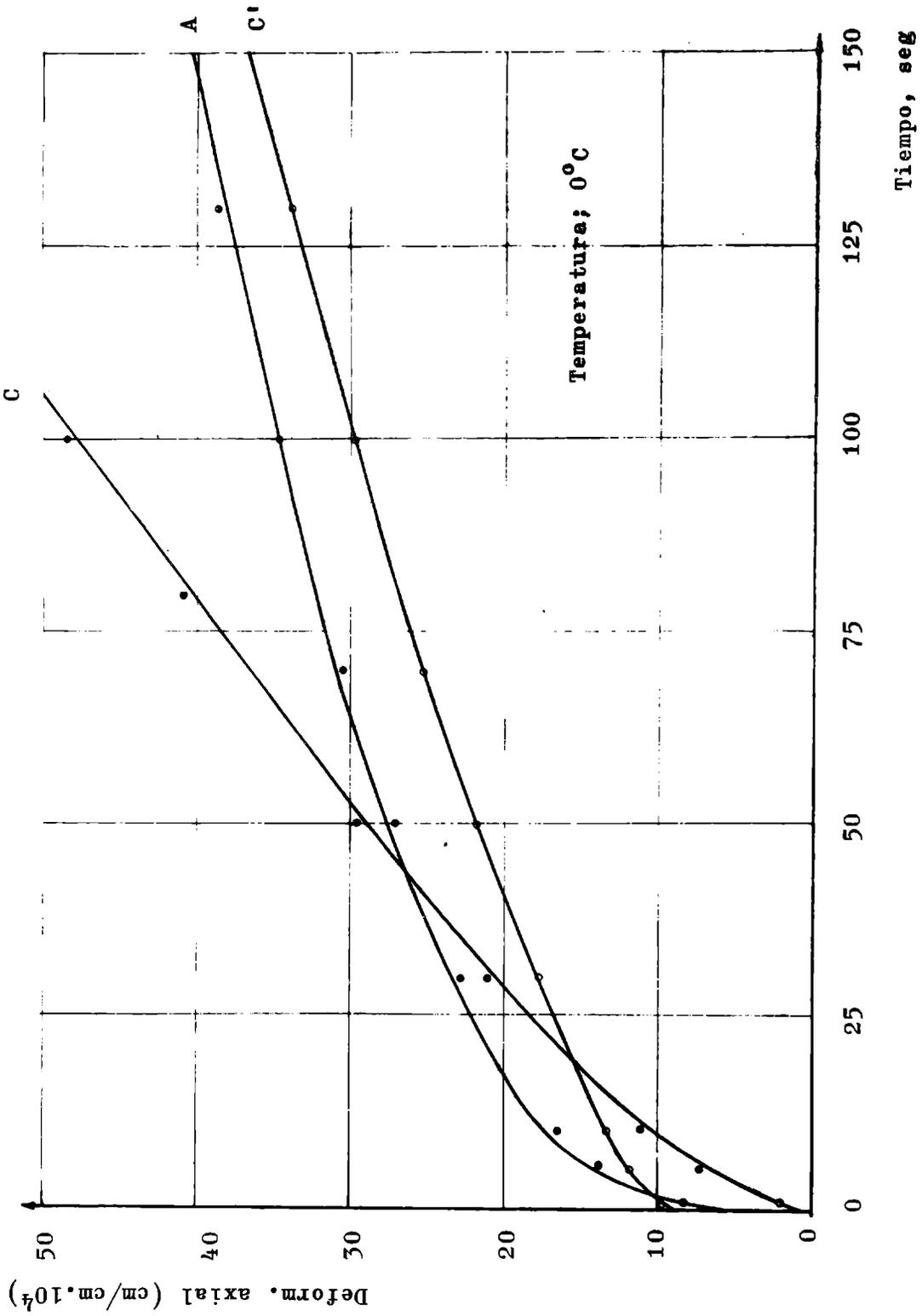


Fig. 6

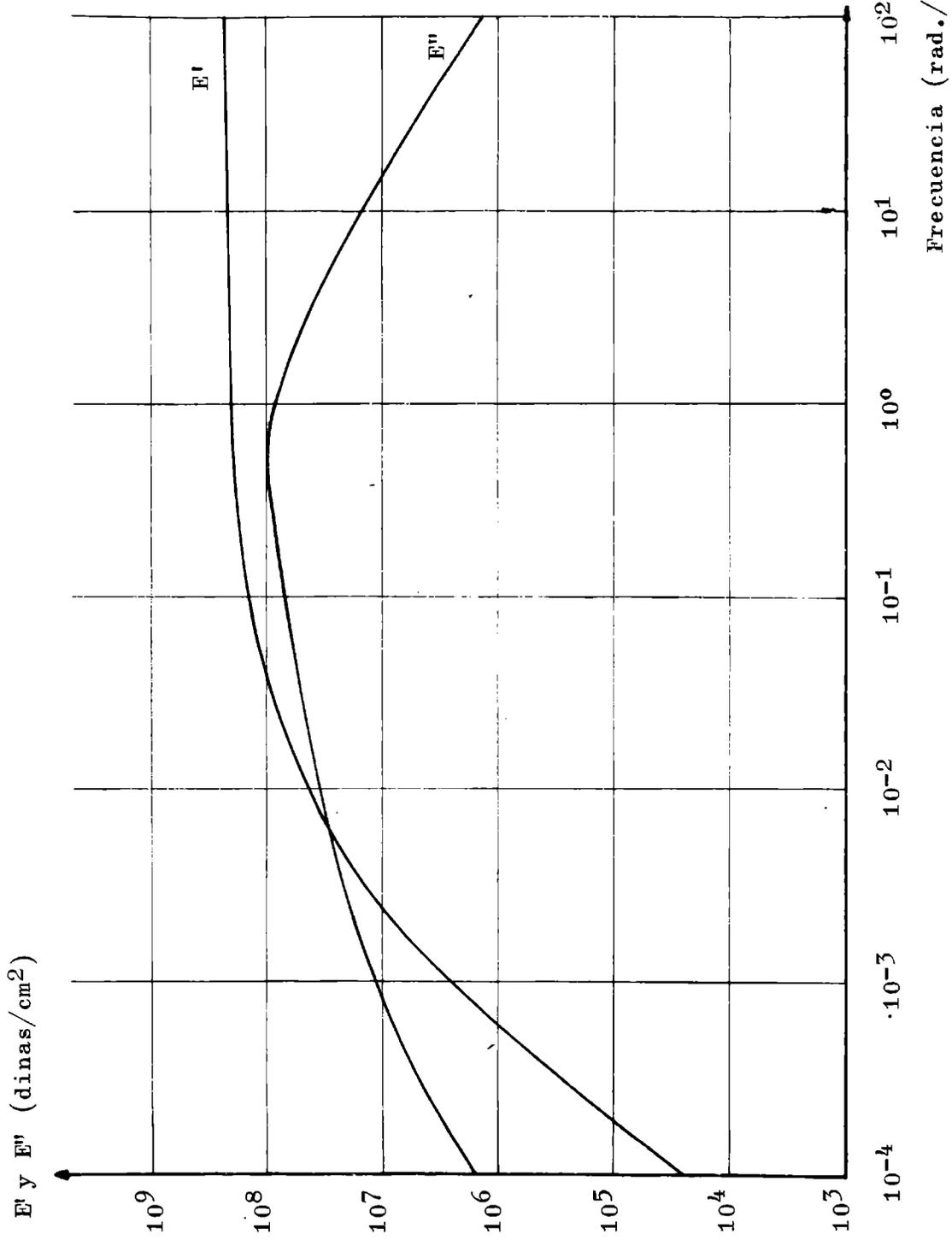


Fig. 7.- Asfalto A

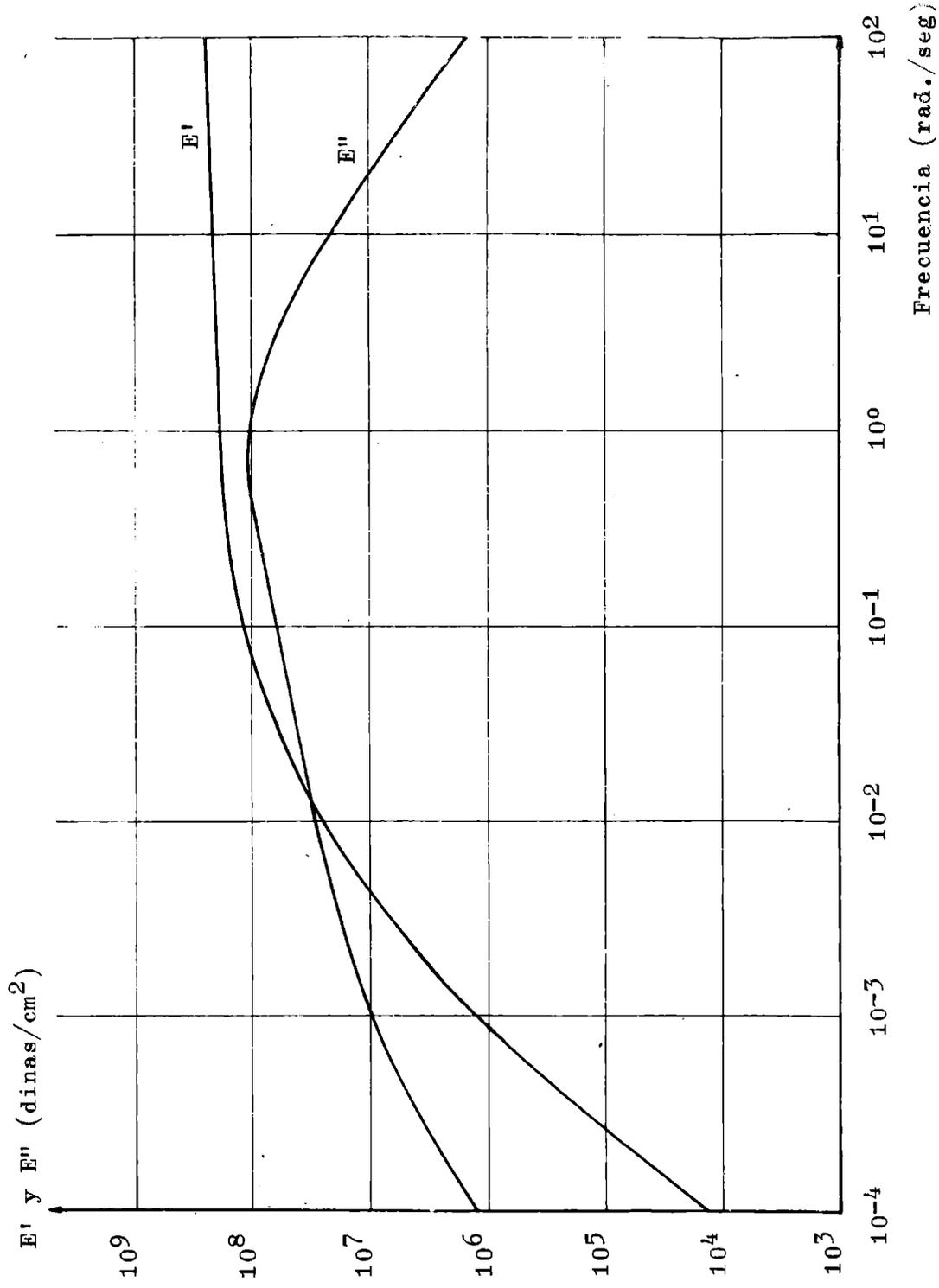


Fig. 8.- Asfalto B

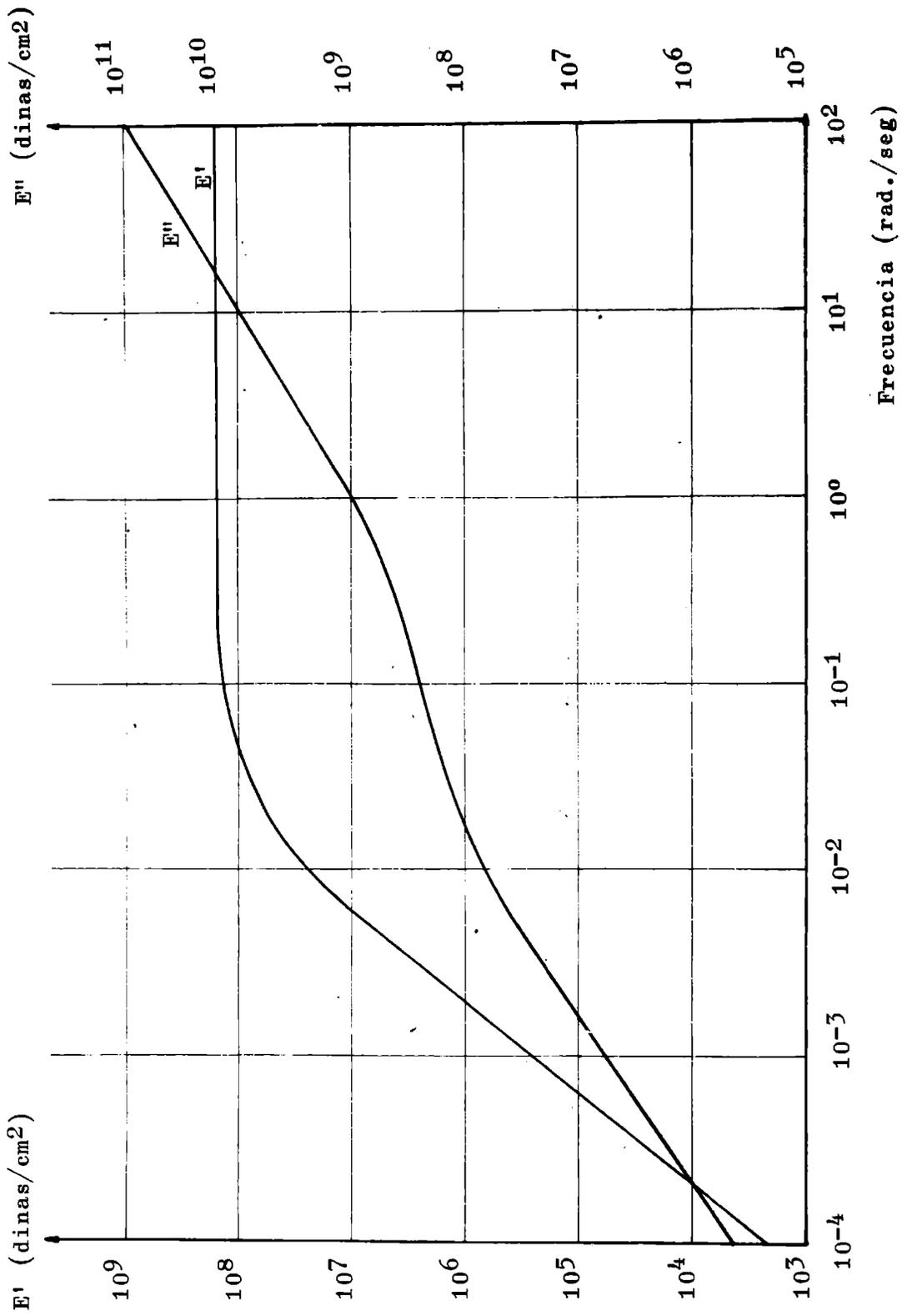


Fig. 9.- Asfalto C

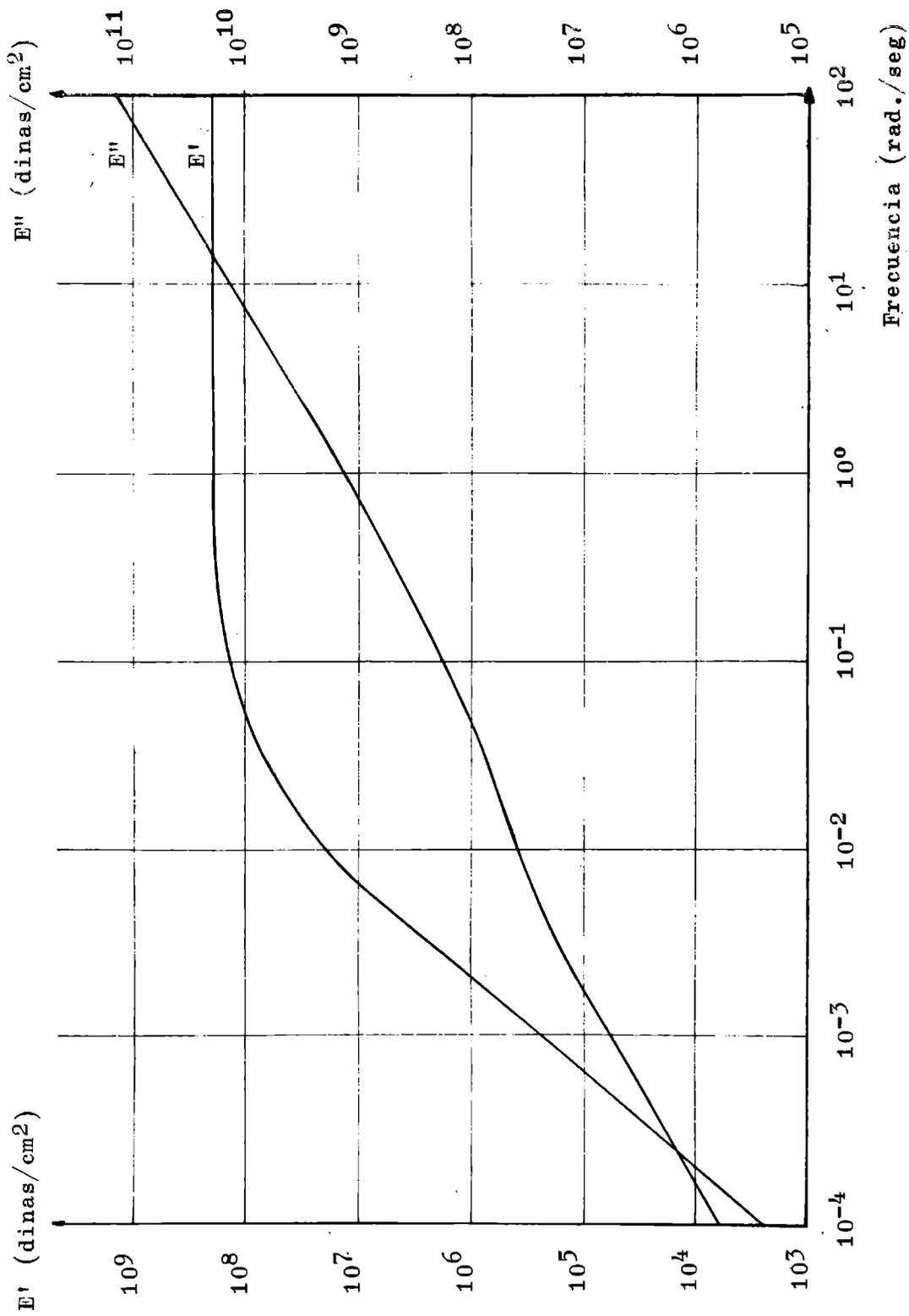


Fig. 10.- Asfalto D

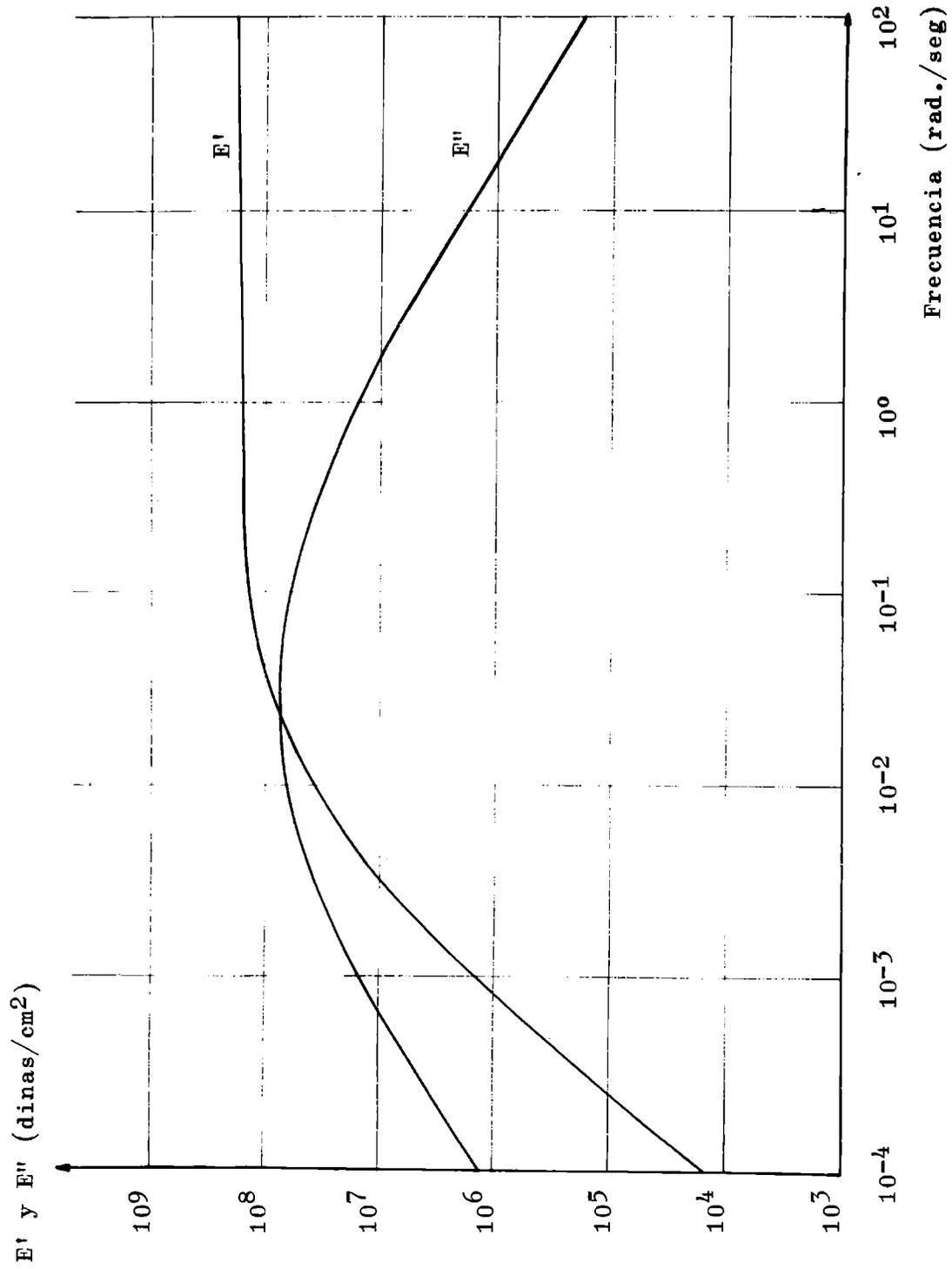


Fig. 11.- Asfalto C'

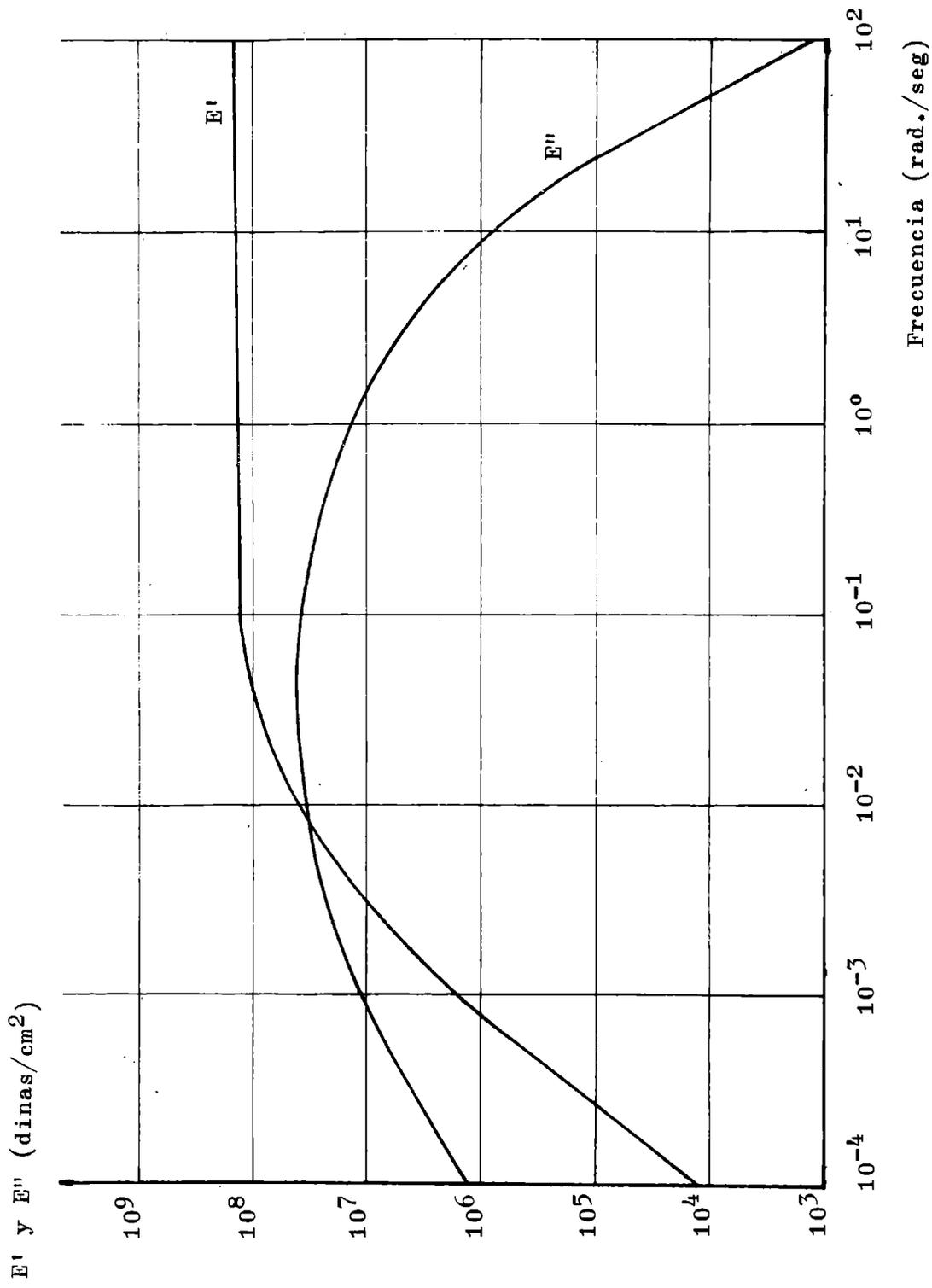


Fig. 12.- Asfalto D'

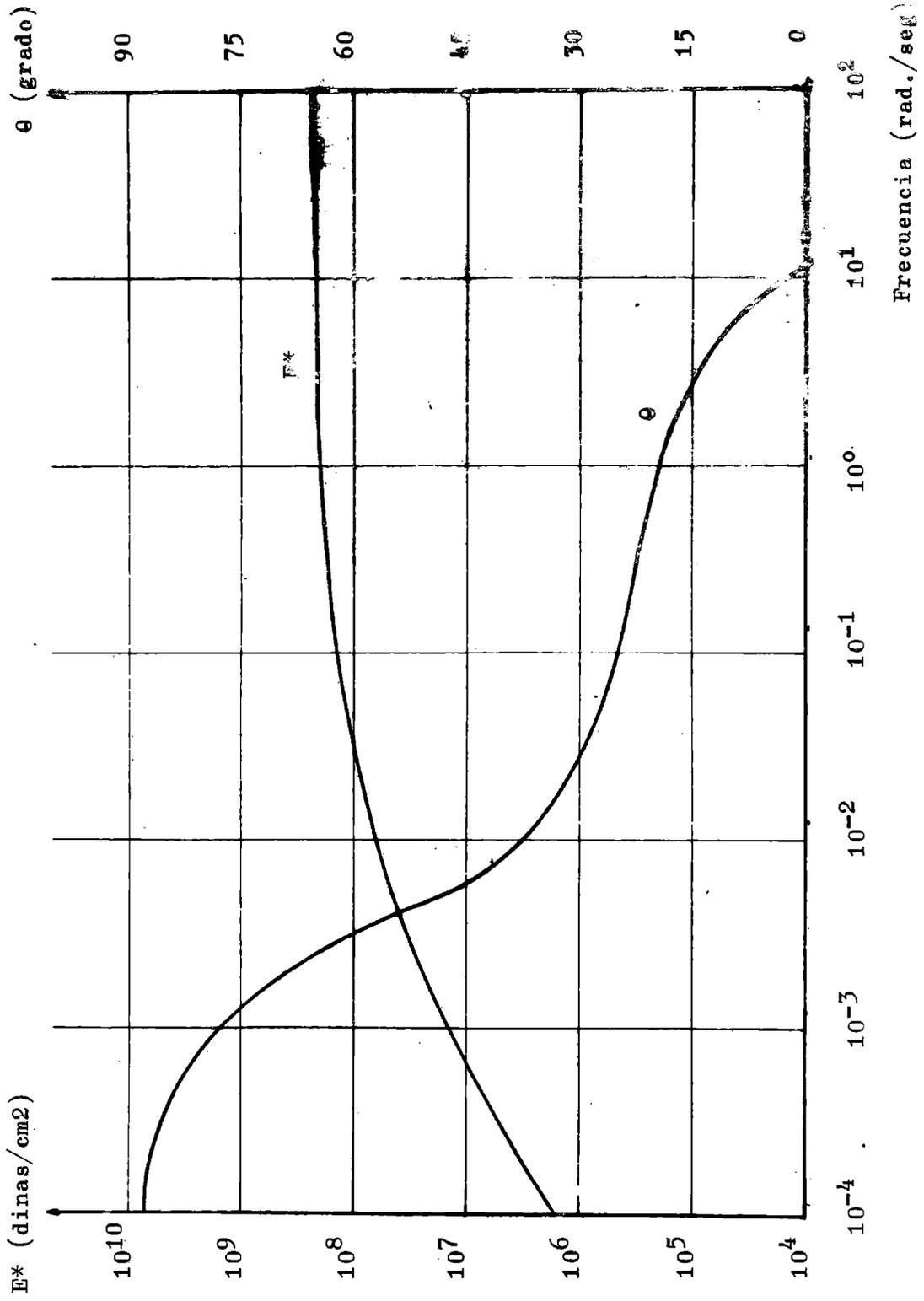


Fig. 13.- Asfalto A

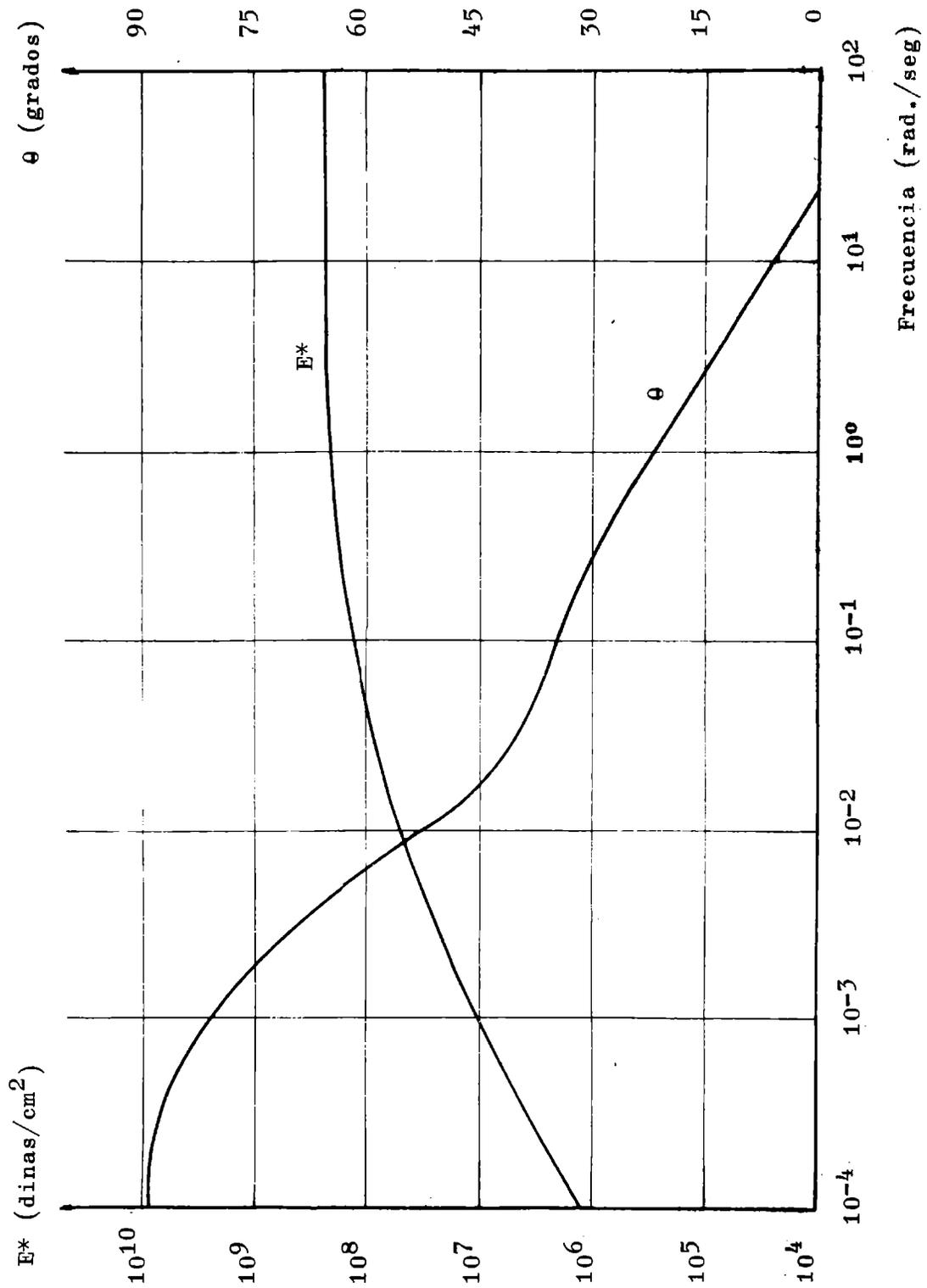


Fig. 14.- Asphalt B

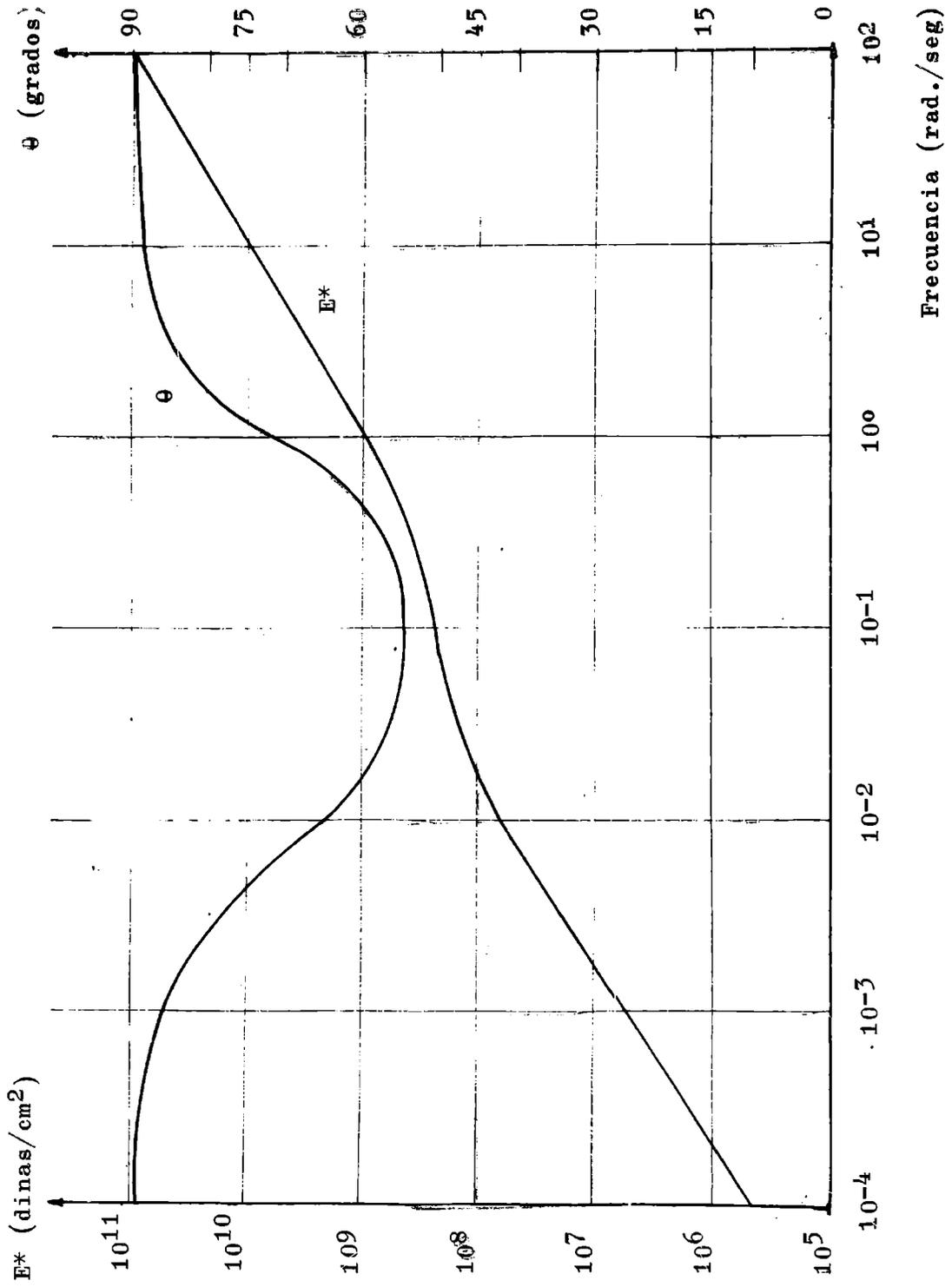


Fig. 15.- Asfalto C

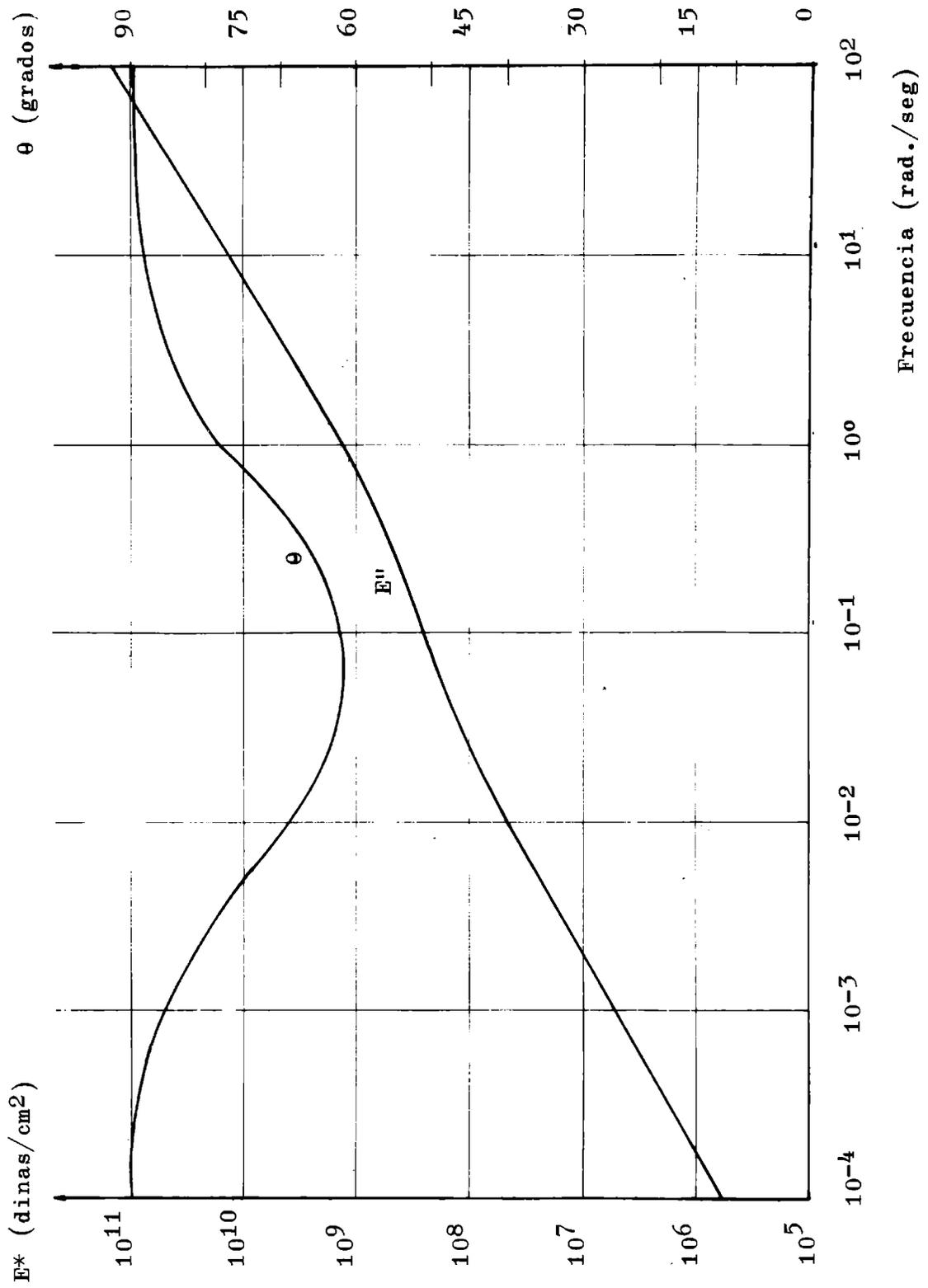


Fig. 16.- Asfalto D

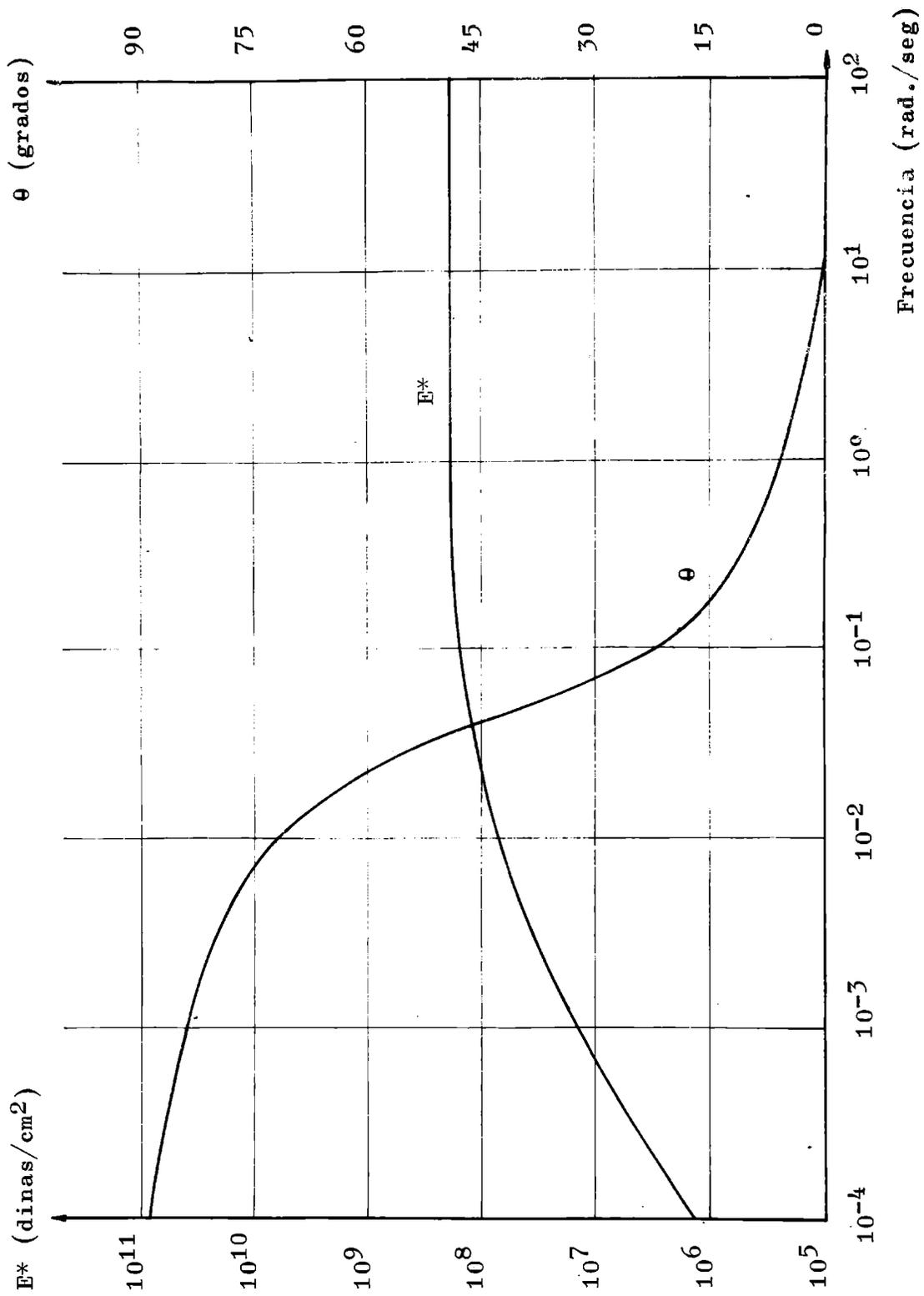


Fig. 17.- Asfalto C'

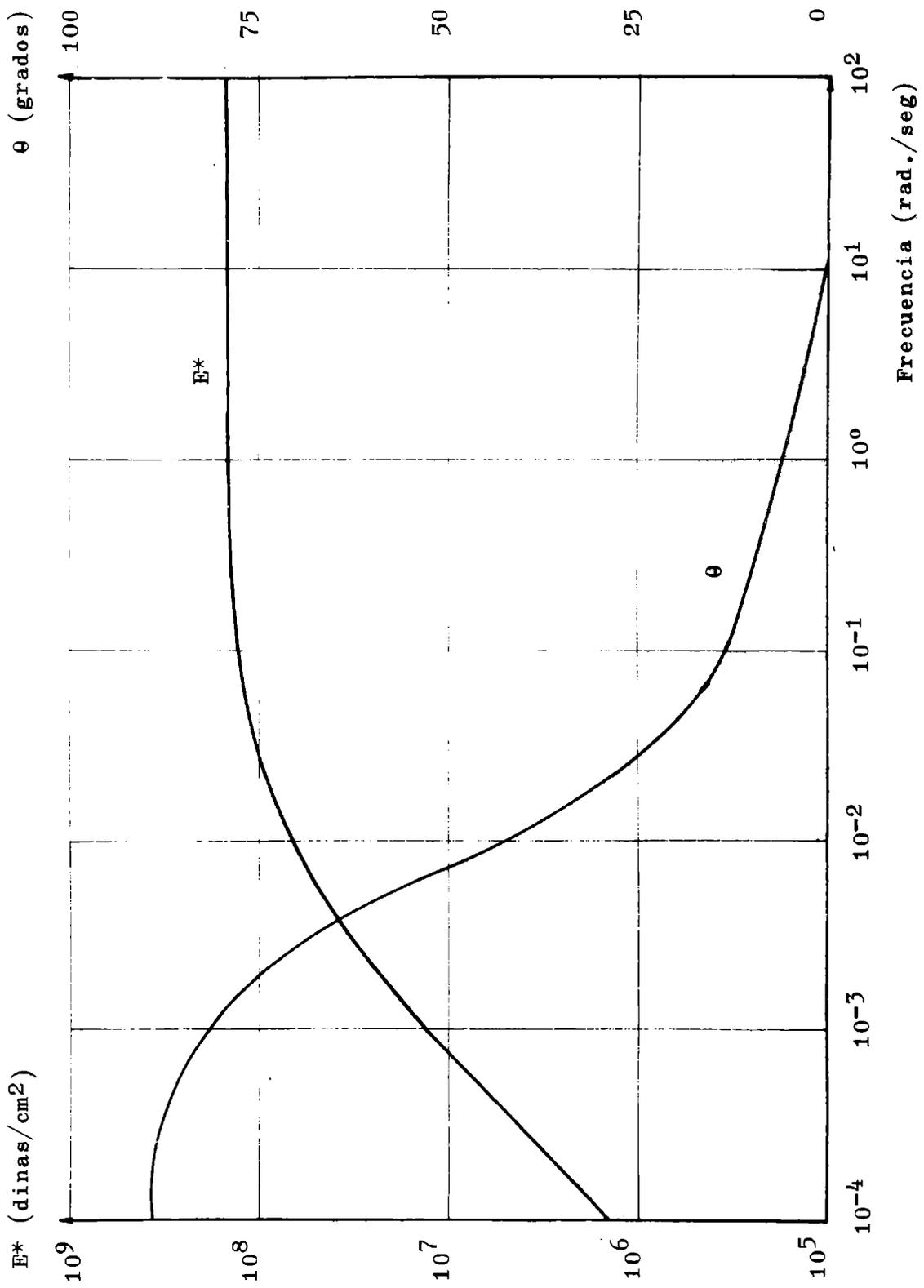


Fig. 18.- Asfalto D'

tos de Kelvin unidos en serie con uno de Maxwell, representa el comportamiento de los asfaltos con bastante exactitud.

3. La forma de las curvas del módulo de elasticidad complejo, sus componentes y el ángulo de fase frente a la frecuencia son similares a las obtenidas por Majidzadeh y Schwyer, lo que demuestra que la técnica seguida es reproducible.
4. El valor de las componentes del módulo de elasticidad complejo y su valor absoluto, determinado a una frecuencia (100 rad/seg) y a 0°C podría ser tomada, en los asfaltos sometidos a calentamiento durante 75 minutos a 163°C (película fina rotativa), como base para futuras especificaciones, donde se tenga en cuenta condiciones críticas de servicio, como son las bajas temperaturas y el bajo tiempo de aplicación de la carga.

APENDICE

Cálculo del módulo de elasticidad complejo a partir de los datos de creep

a) Obtención de los parámetros elásticos

Para nuestro caso particular el modelo mecánico que describe el comportamiento viscoelástico de un asfalto estará compuesto de dos elementos Kelvin y uno de Maxwell (figura 1). Los pasos a seguir son:

1. Experimentalmente se obtiene la curva deformación-tiempo a un esfuerzo constante σ ($2,24 \times 10^5$ dinas/cm²).
2. Las deformaciones se expresan por unidad de longitud dividiéndolas por la longitud de la probeta (7,16 cm).
3. Las deformaciones por unidad de longitud se grafican en función del tiempo.

La ecuación que relaciona el esfuerzo y la deformación para un modelo del tipo aquí considerado es la siguiente:

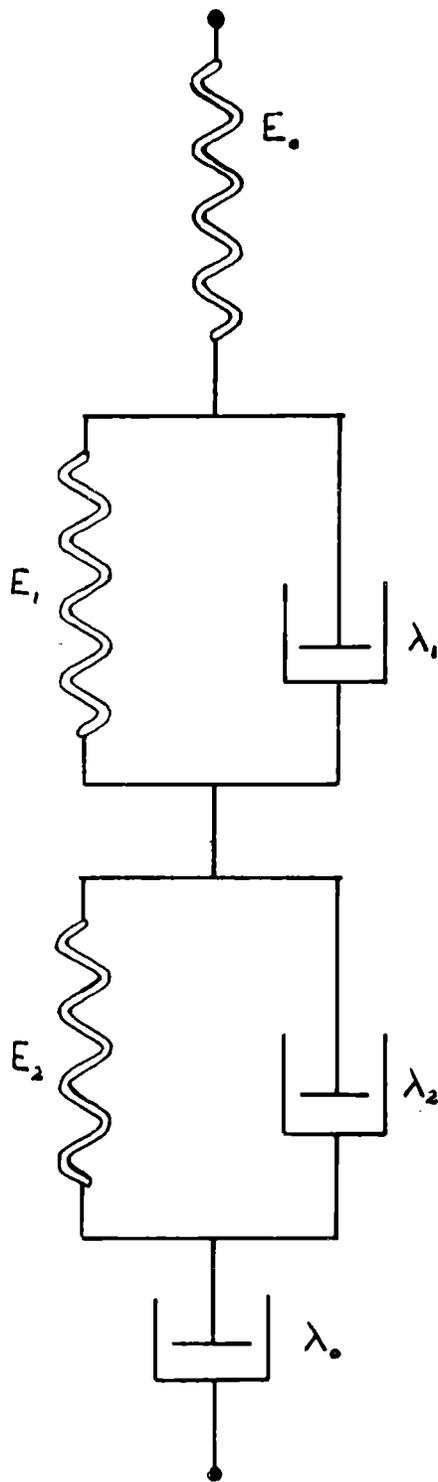


Fig. 1 (apéndice)

Modelo mecánico utilizado

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\lambda_0} t + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (1)$$

Cuando $t \rightarrow 0$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_0} \therefore E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

4. Si derivamos la ecuación (1) respecto del tiempo (derivación gráfica a partir de la curva deformación-tiempo), obtenemos:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\lambda_0} + \frac{\sigma}{E_1 \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\sigma}{E_2 \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

5. Se grafica la velocidad de deformación $\frac{d\varepsilon}{dt}$ en función del tiempo (ecuación 3)

Cuando $t \rightarrow \infty$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_{ss} = \frac{\sigma}{\lambda_0} \quad (4)$$

donde ε_{ss} es la velocidad de deformación cuando se alcanza el estado estacionario, es una constante.

A partir de la ecuación (4) calculamos λ_0 , o sea el coeficiente de viscosidad del amortiguador del elemento de Maxwell.

$$\lambda_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ss}} \quad (5)$$

6. Si a la velocidad de deformación (ecuación 3) le sustraemos la velocidad de deformación en el estado estacionario ε_{ss}^* nos queda:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0} \right) = \frac{\sigma}{E_1 \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\sigma}{E_2 \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

esa ecuación es del tipo:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0} \right) = A_1 e^{-B_1 t} + A_2 e^{-B_2 t} \quad (7)$$

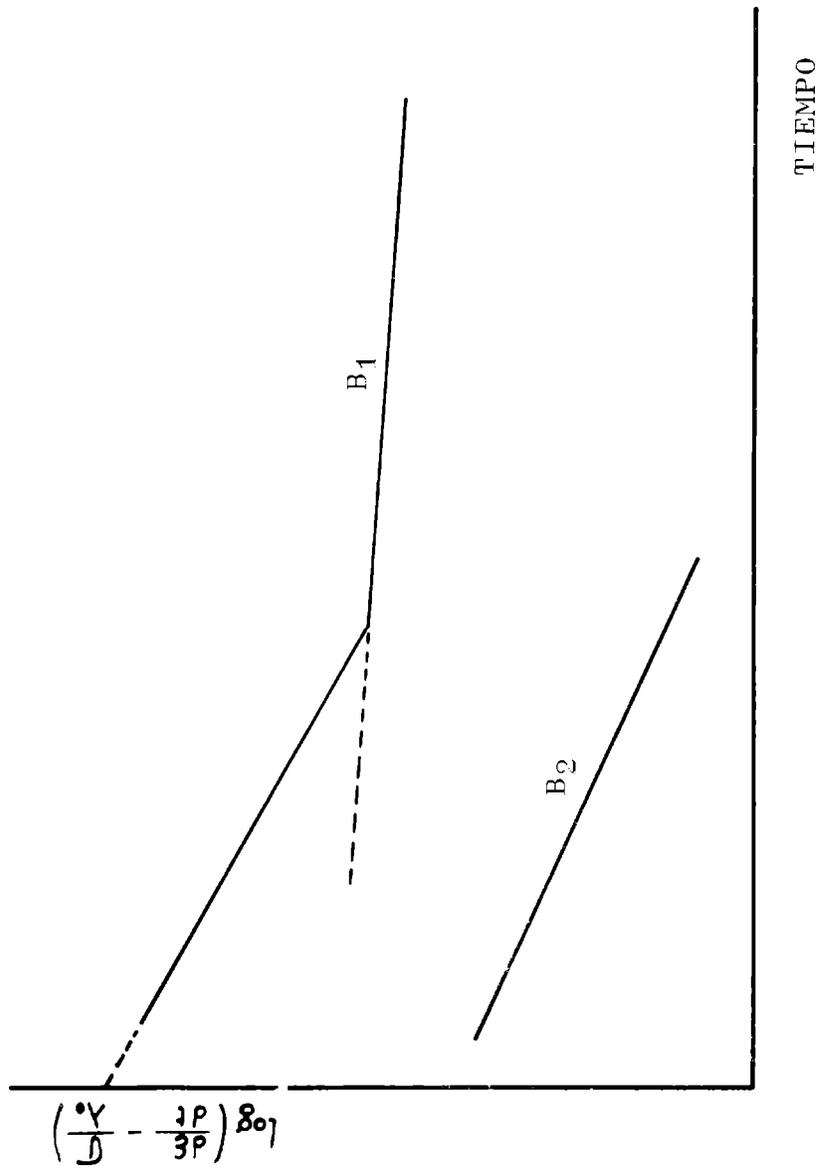


Fig. 2 (apéndice). Gráfico para obtener las constantes de los amortiguadores y resortes

donde

$$A_1 = \frac{\sigma}{E_1 \tau_1} ; A_2 = \frac{\sigma}{E_2 \tau_2} \quad (8)$$

$$B_1 = \frac{1}{\tau_1} ; B_2 = \frac{1}{\tau_2} \quad (9)$$

τ_1 y τ_2 son los tiempos de retardación.

7. Si se grafica $\left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0}\right)$ en función del tiempo en escala semilogarítmica, se obtiene un gráfico de la forma que se muestra en la figura 2. La parte inferior de este gráfico fue aproximada a una línea recta mediante el método de los cuadrados mínimos y se obtuvo su intercepción sobre el eje y (A_1) y la pendiente, (B_1). A_1 y B_1 son constantes relacionadas al primer elemento de Kelvin (ecuación 7).

Esta recta tiene por ecuación:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0}\right) = A_1 e^{-B_1 t} \quad (10)$$

tomando ln nos queda:

$$L_n \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0}\right) = L_n A_1 - B_1 t$$

cuando $t \rightarrow 0$

$$L_n \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0}\right) = L_n A_1$$

A_1 : valor de la ordenada

Teniendo en cuenta la ecuación (8) y considerando que

$\tau_1 = \frac{\lambda_1}{E_1}$ nos queda:

$$A_1 = \frac{\sigma}{\lambda_1} \quad (11)$$

$$\lambda_1 = \frac{\sigma}{A_1}$$

λ_1 es el coeficiente de tracción viscosa del amortiguador del primer elemento Kelvin.

De acuerdo a la ecuación (9)

B_1 , la pendiente es igual a:

$$B_1 = \frac{1}{\tau_1} = \frac{E_1}{\lambda_1} = \frac{E_1 A_1}{\sigma} \quad (12)$$

$$E_1 = \frac{B_1 \sigma}{A_1}$$

E_1 es el módulo de elasticidad del resorte del primer elemento Kelvin.

8. La parte superior del gráfico de la figura 2 es también aproximada a una recta por el método de los cuadrados mínimos.

Hay que considerar que esta recta representa la respuesta conjunta de los dos elementos Kelvin. De ahí que para obtener la respuesta correspondiente al segundo elemento Kelvin, hay que substrair a ésta los valores de las ordenadas de la recta correspondiente al primer elemento Kelvin, es decir, los calculados en el ítem 7. Los valores obtenidos son nuevamente graficados en función del tiempo en escala semilogarítmica y la ordenada A_2 y pendiente B_2 son calculados para el segundo elemento.

Esta recta tiene por ecuación:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0} \right) = A_2 e^{-B_2 t} \quad (13)$$

Cuando $t \rightarrow 0$ y teniendo en cuenta las ecuaciones 8 y 9, nos queda:

$$L_n \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda_0} \right) = L_n A_2$$

A_2 , el valor de la ordenada es igual a:

$$A_2 = \frac{\sigma}{\lambda_2}$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma}{A_2} \quad (14)$$

λ_2 es el coeficiente de tracción viscosa del amortiguador correspondiente al segundo elemento Kelvin.

B_2 , el valor de la pendiente es igual a:

$$B_2 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{E_2}{\lambda_2} = \frac{E_2 A_2}{\sigma}$$

$$E_2 = \frac{B_2 \sigma}{A_2} \quad (15)$$

E_2 es el módulo de elasticidad del resorte correspondiente al segundo elemento Kelvin.

Resumiendo nos queda:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\text{ecuación 2})$$

$$\lambda_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_{ss}} \quad (\text{ecuación 5})$$

$$E_1 = \frac{B_1 \sigma}{A_1} \quad (\text{ecuación 12})$$

$$\lambda_1 = \frac{\sigma}{A_1} \quad (\text{ecuación 11})$$

$$E_2 = \frac{B_2 \sigma}{A_2} \quad (\text{ecuación 15})$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma}{A_2} \quad (\text{ecuación 14})$$

Con estos valores insertándolos en la ecuación 1, se construye la curva de creep teórica.

b) Cálculo del módulo complejo, sus componentes y el ángulo de fase

La ecuación 3 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \epsilon_{ss} + A_1 e^{-B_1 t} + A_2 e^{-B_2 t} \quad (16)$$

Esta ecuación puede ser transformada al campo de la frecuencia mediante la transformación de Fourier, con lo que se obtiene (según Majidzadeh y Schweyer):

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{i\omega\lambda_0} + \frac{1}{E_1 + i\omega\lambda_1} + \frac{1}{E_2 + i\omega\lambda_2}} \quad (17)$$

donde ω es la frecuencia en rad/seg e i la unidad imaginaria. Por lo tanto

$$E^* = E' + iE'' \quad (18)$$

Realizando las operaciones de números complejos en la ecuación 17, nos queda:

$$E^* = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{a_1^2 + a_2^2} + i \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1^2 + a_2^2} \quad (19)$$

donde:

$$a_1 = -\omega^2 E_0 [\lambda_0 (\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_1 \lambda_2] + E_0 E_1 E_2 - (E_1 \lambda_2 + E_2 \lambda_1) \omega^2 \lambda_0$$

$$a_2 = \omega [\lambda_0 E_0 (E_2 + E_1) + (E_1 \lambda_2 + E_2 \lambda_1) E_0 + (E_1 + E_2 - \omega^2 \lambda_1 \lambda_2) \lambda_0]$$

$$b_1 = - (E_1 \lambda_2 + E_2 \lambda_1) \omega^2 \lambda_0 E_0$$

$$b_2 = (E_1 E_2 - \omega^2 \lambda_1 \lambda_2) \omega \lambda_0 E_0$$

El valor absoluto del módulo complejo es:

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (20)$$

El valor del ángulo de desfasaje es igual a:

$$\frac{E''}{E'} = \operatorname{tg} \varphi \quad (21)$$

BIBLIOGRAFIA

- (1) Pinilla, A. y Agnusdei, J. O. - XIII Reunión Anual del Asfalto, 85, 1964.
- (2) Pinilla, A., Agnusdei, J. O. y Reynaldi, A. - XV Reunión Anual del Asfalto, 430, 1968.
- (3) Brown, A. B. y Sparks, J. W. - Proc. Asph. Paving Technologists, 35, 1958.
- (4) Thrower, E. N. - Unpublished report nº RN/3428 Road Research Laboratory, 1959.
- (5) Kühn, S. H. y Ridgen, P. J. - Highway Research Board, 38, 431, 1959.
- (6) Welborn, Y. J. - XIV Reunión Anual del Asfalto, 115, 1966.
- (7) Skog, J. - Proc. Assoc. Asph. Paving Technologists, 407, 1967.
- (8) Puzinauskas, V. P. - Proc. Assoc. Asph. Paving Technologists, 489, 1967.
- (9) Krom, C. J. y Dormon, G. M. - VII Proc. del VII Congreso Mundial de Petróleo.
- (10) Van der Poel, C. - Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, parte 5, mayo 1954.
- (11) Thrower, E. N. - Journal of Scientific Instruments, Vol 38, 69, 1961.
- (12) Sisko, A. W. y Brunstrum, L. C. - Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, 448, 1968.
- (13) Majidzadeh, K. y Schweyer, H. E.- Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, Vol. 36, 1967.
- (14) Leaderman, H. - The elastic and Creep Properties of filamentous Materials Textile Foundation. Washington D. C., 1943.

- (15) Gross, B. - The mathematical Structure of the theories of viscoelasticity, Herman et Cie, 1953.
- (16) Eirich, F. R. - Rheology, Theory and applications, Vol. II, Chapter 9, 1956.
- (17) Papazian, H. S. - Proc. International Conference on the Structural Design of Asphalt Paviments, University of Michigan, 454, 1963.
- (18) Eirich, F. R. - Rheology, Theory and Applications, Vol. II, chapter 11, 1956.

Abstracts of Papers in this Issue

U.D.C. 553.61(82):543.5

Rossini A. R., E. Pereira and L. A. Mennucci

DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS OF ARGENTINE KANDITES

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 1/24 (Serie II, nº 195)

Samples of kaolinitic clays from Argentina, as they occur, have been studied by differential thermal analysis.

Standards thermograms of American samples of kandites of perfectly established origin are presented; use is made of the same thermograms as well as the curves taken from the bibliographic information, to identify by comparison, the minerals under study.

Refractory clays from Buenos Aires, La Rioja, Rio Negro and Neuquen provinces were identified and classified.

U.D.C. 666.76(82)

Rossini A. R., L. A. Mennucci and J. Devoto Ramos

DEFORMATION UNDER LOAD AT HIGH TEMPERATURES OF REFRACTORY MATERIALS

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 25/42 (Serie II, nº 196)

A testing technique is presented which allows to obtain more accurate results of deformation under load at high temperatures.

Seven refractory clays were tested, in his natural state and heated at 145⁰C. Curves of deformation under load obtained and physico-chemical characteristics of tested materials are given.

Conclusions are drawn with reference to the testing method and the behaviour of studied clays.

As a complement, results obtained when testing a series of silico-aluminous refractory bricks, are included.

C.D.U. 553.61(82):543.5

Rossini A. R., E. Pereira y L. A. Mennucci

ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL DE KANDITAS ARGENTINAS

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 1/24 (Serie II, nº 195)

Se estudiaron, mediante la técnica de Análisis Térmico Diferencial, muestras de arcillas caoliníticas argentinas, las que fueron sometidas a ensayo en su condición original.

Se presentan termogramas "patrones" de kanditas, obtenidos de muestras norteamericanas perfectamente identificadas, las que completadas con curvas obtenidas de la información bibliográfica, permitieron identificar por comparación los minerales en estudio.

Se identificaron y clasificaron arcillas refractarias provenientes de las provincias de Buenos Aires, La Rioja, Río Negro y Neuquén.

C.D.U. 666.76(82)

Rossini A. R., L. A. Mennucci y J. Devoto Ramos

DEFORMACION BAJO CARGA A ELEVADAS TEMPERATURAS DE MATERIALES REFRACTARIOS

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 25/42 (Serie II, nº 196)

Se presenta una técnica de ensayo que permite obtener resultados reales de deformación bajo carga a elevadas temperaturas.

Se ensayaron siete arcillas refractarias argentinas, en estado natural y previamente calcinadas a 1450°C . Se presentan las curvas de aplastamiento obtenidas y las características físico-químicas de los materiales ensayados.

Se exponen conclusiones referentes al método de ensayo y al comportamiento de las arcillas estudiadas.

Como complemento se dan a conocer los resultados obtenidos en ensayos realizados sobre ladrillos refractarios sílico-aluminosos de fabricación nacional.

Agnusdei J. O., P. O. Frezzini and A. A. Comai

ALTERATION OF ASPHALTS DURING THE MIXING OPERATION

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 43/74 (Serie II, nº 197)

In this paper the alteration of asphalt cements that occur during the manufacture of paving mixtures in the plant mixing operation was studied, by laboratory testing.

The bituminous mixtures were prepared in a laboratory mixer under controlled conditions (time and temperature). The asphalts under test were recovered by means of the Abson method.

The alteration was studied measuring the viscosity with the sliding plate microviscometer and by infrared spectra. Furthermore a study of the action of inhibitors of oxidation was made. This test was conducted to determine the effectiveness and the mechanism by which the antioxidants perform.

U.D.C. 691.217(821.2)

Añón Suárez H., V. E. Mauriño and D. D. Massaccesi

PHYSICAL AND MECHANICAL QUALITIES OF THE ORTHOQUARTZITES OF THE PROVINCE OF BUENOS AIRES. THEIR UTILIZATION IN PUBLIC WORKS (Part I, Chapadmalal)

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 75/114 (Serie II, nº 198)

The Province of Buenos Aires produces more than 50 per cent of the stony aggregates used in construction in Argentina.

Most of them, specially the sandstone rocks coming from the extreme SE of the Northern range of hills called Tandilia (Chapadmalal). The determination of the technical qualities of these rocks have been made through detailed field and laboratory determinations, that included physical, mechanical and microscopic tests, specific weight, absorption, simple compression, toughness, abrasion (Los Angeles and B. S. tests), durability and bitumen adherence.

The results obtained concludes that this type of rocks, in all these tests, have a satisfactory performance. For that reason there are able to use in public works.

Agnusdei J. O., P. O. Frezzini y A. A. Comai

ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS DURANTE EL MEZCLADO

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 43/74 (Serie II, nº 197)

En este trabajo se estudia, mediante ensayos de laboratorio, la alteración que sufren los asfaltos durante la operación de mezclado en usina.

Empleando un mezclador de laboratorio, se prepararon mezclas asfálticas bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura. El asfalto componente de la mezcla asfáltica fué recuperado mediante el método de Abson. Sobre este se estudió el grado de alteración mediante medidas de viscosidad, utilizando el microviscosímetro de placas deslizantes, y por espectrofotometría infrarroja. Además se estudió la acción inhibidora de ciertos aditivos recomendados como inhibidores de oxidación, tratando de poner de manifiesto su eficacia y forma de actuar.

C.D.U. 691.217(821.2)

Añón Suárez H., V. E. Mauriño y D. D. Massaccesi

CUALIDADES FISICO-MECANICAS DE LAS ORTOCUARCITAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES. SU EMPLEO EN OBRAS VIALES Y CIVILES

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 75/114 (Serie II, nº 198)

La Provincia de Buenos Aires produce más del cincuenta por ciento de los agregados pétreos usados en construcción en la Argentina. Muchos de ellos provienen de las Sierras de Tandil, especialmente las areniscas del extremo SE de estas sierras.

Para determinar las cualidades técnicas de estas rocas, se efectuaron estudios detallados de campo y de laboratorio, que comprendieron ensayos físicos, mecánicos y microscopía, peso específico, absorción, compresión simple, desgaste (Los Angeles y B. S.), durabilidad y adherencia al betún.

Se establece como conclusión que las mismas cumplen en forma satisfactoria los ensayos a que han sido sometidas, evidenciando así su aptitud para ser empleadas en obras viales y civiles.

U.D.C. 625.85.06(82)

Agnusdei J. O. and O. Anvaria

RHEOLOGY OF ARGENTINIAN ASPHALTS AT LOW TEMPERATURE (Part I)

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 115/167 (Serie II, nº 199).

In this paper, a technique for obtain the viscoelastic parameters describing the rheological behavior of asphalt cements used in pavement construction was studied.

The technique consists in to submit the asphalt cements specimens to a constant stress level and to obtain the strain-time data. The testing temperature was 0°C. These data were analyzed and the viscoelastic parameters were determined. The time responses of the asphalt cements were then transformed into a frequency domain and the dynamics moduli were calculated. Some asphalt were previously aged according to the Rolling Thin Film Test, procedure al 163° C, for a period of 75 minutes.

C.D.U. 625.85.06(82)

Agnusdei J. O. y O. Anvaria

REOLOGIA DE ASFALTOS ARGENTINOS A BAJA TEMPERATURA (1a. parte)

LEMIT (La Plata, Argentina), 4-1971, 115/167 (Serie II, n° 199).

En este trabajo se ha utilizado una técnica, mediante la cuál es posible calcular los parámetros elásticos que describen el comportamiento reológico de los betunes asfálticos empleados en pavimentación.

Básicamente, la misma consiste en deformar una probeta del material asfáltico bajo la acción de un esfuerzo determinado, que se mantiene constante, registrando la deformación producida en función del tiempo. El ensayo se realiza a 0° C. Con los datos obtenidos, y utilizando el método gráfico de aproximaciones sucesivas, se calculan los parámetros viscoelásticos. Los datos de deformación tiempo fueron transformados al dominio de la frecuencia y de esta manera se calculó el módulo dinámico. Algunas determinaciones se efectuaron sobre asfaltos que habían sido envejecidos 75 minutos a 173° C (técnica del Rolling Thin Film).

ESTUDIOS REALIZADOS POR LA DIVISION CERAMICA DEL L.E.M.I.T.
ENTRE 1948 Y 1971

- Comportamiento electrocinético de los minerales de arcilla; Bergna H. E., 1952. LEMIT, Serie II, nº 48.
2. Estudio de las modificaciones de propiedades de algunos suelos, por estacionamiento. Pereira E., Facultad de Ciencias Químicas, XXX, 113-155, 1957.
 3. Coeficientes de transmisión térmica de Ladrillos aislantes refractarios de fabricación nacional. Pereira E., Mennucci L. A. y Timpone F.; VIII Congreso Latinoamericano de Química, Buenos Aires, 1962; y II Congreso Interamericano de Ingenieros Químicos, Lima (Perú), abril 1964; LEMIT, Serie II, nº 92, La Plata, 1964.
 4. Comportamiento de la superficie en Materiales Arcillosos Argentinos. Varela O. C. y Pereira E.; XI Sesiones Químicas Argentinas. Páñia Blanca, 1964. (Inédito).
 5. Variaciones permanentes de ladrillos de alta alúmina. Mennucci L. A. y Timpone F.; VIII Congreso Latinoamericano de Química, Bs. As., 1962 y II Congreso Interamericano de Ingenieros Químicos. Lima (Perú), abril 1964. "Cerámica y Cristal", año 4 nº 7, pág. 32-53 (1955).
 6. Dilatometría de ladrillos sílicos. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Pereira E. II Simposio sobre Cerámica, LEMIT, La Plata, octubre 1965. (Inédito).
 7. Formación en estado sólido, de ZrO_2 cúbico a partir de $ZrSiO_4$ por desplazamiento de óxidos alcalino-térreos. Calvelo A., 1965.
 8. Cuarzo, cristobalita y tridimita; estudio de su evaluación mediante análisis térmico diferencial. Rossini A. R.; 1965.
 9. Características físicas y químicas de ladrillos sílico-aluminosos de fabricación nacional. Mennucci L. A. y Timpone F.; IV Congreso Argentino de Cerámica, Vidrio y Afines. 18-22, nov. 1963, Bs. As.; IX Congreso Latinoamericano de Química, Puerto Rico, 5-8, 1965. Publicado en "Cerámica" Vol. XI, Año XI, nº 45, marzo 1966. Asociación Brasileira de Cerámica (Brasil)

10. Comportamiento Reológico de Suspensiones Acuosas de Bentonitas Argentinas. Varela J. C. y Pereira E.; XII Sesiones Químicas Argentinas, Córdoba, 1967. (Inédito).
11. Correlación de Propiedades de Materiales Arcillosos Argentinos (II). Varela J. C. y Pereira E.; XII Sesiones Químicas Argentinas, Córdoba, 1967. (Inédito).
12. Estudio de curvas Tixotrópicas bajo Régimen Operativo. Varela J. C. y Krenkel T. G.; XII Sesiones Químicas Argentinas. Córdoba, 1967. (Inédito).
13. Determinación cuantitativa de cuarzo en arcillas refractarias, mediante A.T.D.; Rossini A. R. y Figueras; XII Sesiones Químicas Argentinas, Córdoba, abril 1967. (Inédito).
14. Estudio de ladrillos sílicos por análisis térmico diferencial. Rossini A. R., Pereira E. y Mennucci L. A.; II Simposio de Cerámica, LEMIT, 1965; Cerámica y Cristal. Año 5, nº 14, pág. 34-47, 1966, y Verres et Refractaires, 21, 94-101, 1967.
15. Estudio del comportamiento térmico-volumétrico de mezclas bauxita-arcilla. Pereira E., Testa R. H. y Robredo J.; XII Sesiones Químicas Argentinas, Córdoba, 1967; Verres et Refractaires, 21, 20-23, 1967. (Comunicación).
16. Reología de Suspensiones Acuosas. Varela J. C. y Pereira E.; XII Sesiones Químicas Argentinas, Córdoba, 1967. (Inédito).
17. Materiales Arcillosos Nacionales. Análisis Térmico diferencial de bentonitas naturales y homoiónicas, en Industria y Química, vol. 26, nº 2, 1968.
18. Estudio de bentonitas argentinas. Composición mineralógica. Industria y Química, vol. 26, nº 6, 1968.
19. "Correlación entre índices de plasticidad de arcillas". Bol. Soc. Española de Cerámica, vol. 7, 393, 1968.
20. Actividad de la Montmorillonita en el Sistema Reológico Bentonita-Agua. Varela J. C., Krenkel T. G. y Pereira E., VII Jornadas sobre Ingeniería Química. Salta, 1970. (Inédito).
21. Acción de los iones (Ca^{++} y Na^{+}) y los electrolitos del medio sobre la reología del sistema bentonita-agua. Anales de

la Comisión de Investigaciones Científicas. Varela J. C., Pereira E. y Krenkel T. G. Tomo CXC, entrega III-IV, Septiembre-octubre, La Plata, 1970.

22. Estudio de algunas variables en la densificación de arcillas refractarias nacionales. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Figueras R. J. LEMIT, Serie II, nº 163, 1970.
23. Dilatometría de arcillas refractarias nacionales. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Figueras R. J. LEMIT, Serie II, nº 141, 1969. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica, vol. 9, nº 5, pág. 507-538, 1970.
24. Mullitización de mezclas de arcilla caolinítica e hidróxido de aluminio. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica, vol. 9, nº 5, pág. 579-591. Rossini A. R., Cohen Arazi S. y Krenkel T. G.; 1970.
25. Análisis térmico diferencial de kanditas argentinas. Rossini A. R., Pereira E. y Mennucci L. A. LEMIT, Serie II, nº 195, 1971.
26. Deformación bajo carga a elevadas temperaturas de materiales refractarios. Rossini A. R., Mennucci L. A. y Devoto Ramos J. LEMIT, Serie II, nº 196, 1971.

ESTUDIOS REALIZADOS POR LAS DIVISIONES DERIVADOS DE PETROLEO
Y MEZCLAS ASFALTICAS DEL LEMIT ENTRE 1945 Y 1971

1. Consideraciones generales acerca del cálculo de calzadas. Arenas, E. LEMIT, Serie II, nº 1, 1945.
2. Pavimento de conchilla y emulsión bituminosa. Solución económica. Añón Suarez, H. LEMIT, Serie II, nº 5, 1945.
3. Sobre las propiedades mecánicas del sistema filler-betún. Ruiz, C. L. LEMIT, Serie II, nº 8, 1945.
4. Teoría de la estructura y deformación de las mezclas asfálticas. Ruiz, C. L. LEMIT, Serie II, nº 9, 1946. Primera Reunión Anual del Asfalto, 365-408, Buenos Aires, 1946.
5. Sobre el proceso de endurecimiento de los asfaltos diluídos tipo ER₁ (RC₁). Añón Suarez, H., Pinilla, A. LEMIT, Serie II, nº 10, 1946. Primera Reunión Anual del Asfalto, 47-78, Buenos Aires, 1946.
6. Mejoradores de adherencia entre betún y agregado pétreo. Comportamiento y elaboración. Pinilla, A. Primera Reunión Anual del Asfalto, 147-156, Buenos Aires, 1946.
7. Contribución al estudio de la variación de propiedades físicas experimentadas por el betún de petróleo durante la preparación de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos. Castellano, E., Galli, J. Primera Reunión Anual del Asfalto, 175-204, Buenos Aires, 1946.
8. Estado actual de los trabajos que se realizan en el LEMIT sobre materiales bituminosos. Pinilla, A., Añón Suarez, H. II Reunión Anual del Asfalto, 89-108. Buenos Aires, 1947.
9. Concreto asfáltico de tosca para pavimentos urbanos. Añón Suarez, H., Marelli, L. III Reunión Anual del Asfalto, 75-95, Buenos Aires, 1948.
10. Estudio de las características de los techados asfálticos de producción nacional. Pinilla, A., Marmonti, A. R. III Reunión Anual del Asfalto, 155-178, Buenos Aires, 1948. LEMIT, Serie II, nº 34, 1950.
11. Composición y posibilidades de aprovechamiento industrial

de algunos alquitranes de madera producidos en el país.
Pinilla, A., Refi, V. LEMIT, Serie II, n° 28, 1948.

12. Proyecto de pavimentos asfálticos para las pistas del Aeropuerto Nacional de Buenos Aires. Añón Suárez, H. Revista Construcciones. Pub. de la Cámara Argentina de la Construcción, 1948.
13. Valor comparativo de distintos mejoradores de adherencia entre betunes y agregados pétreos. Pinilla, A. Congreso de Química, Chile, 1948.
14. Características de algunos pavimentos asfálticos al límite de servicio. Pinilla, A., Añón Suárez, H., Marmonetti, A., Agosti, E. IV Reunión Anual del Asfalto, 53-70, Buenos Aires, 1949.
15. Proyecto de mezclas asfálticas. Añón Suarez, H. Revista del Centro de Ingenieros de la Pcia. de Bs. As., 1949.
16. La adsorción de betunes asfálticos por los agregados minerales finos. Pinilla, A. V Reunión Anual del Asfalto, 181-203, 1950.
17. La naturaleza del agregado grueso y el porcentaje de asfalto para mezclas en caliente. Añón Suarez, H., Mazza, L. A. V Reunión Anual del Asfalto, 299-311, 1950.
18. Estudio reológico de betunes asfálticos obtenidos por destilación conservativa de los petróleos de Challacó y Comodoro Rivadavia y las mezclas de aquellos. Eliçabe, J. L. LEMIT, Serie II, n° 47, 1952.
19. Criterios y trabajos del LEMIT en el problema del contralor de materiales asfálticos. Pinilla, A. I Congreso Sudamericano de Petróleo, 1952.
20. Composición y estructura de los betunes asfálticos de Comodoro Rivadavia y Challacó. Pinilla, A. VII Reunión Anual del Asfalto, 203-241, Santa Fe, 1953.
21. Criterio de selección de "fillers" para mezclas asfálticas. Añón Suárez, H. LEMIT, Serie II, n° 67, 1956.
22. Características de las mezclas asfálticas finas preparadas en planta y de aplicación en frío. Añón Suárez, H., Ruiz, C. L. Revista Construcciones n° 128, 1956.

23. Determinación de tamaño de partículas de asfaltenos, por difusión. Pinilla, A. LEMIT, II, nº 66, 1956.
24. El problema del contralor de los materiales asfálticos. Pinilla, A. Industria y Química, nº 18, 3, 1957.
25. Características de laboratorio de mezclas de caucho en polvo y betunes asfálticos para uso vial. Pinilla, A. LEMIT, Serie II, nº 73, 1957.
26. Criterio para juzgar la calidad de un pavimento asfáltico urbano. Ruiz, C. L. I Simposio sobre pavimentaciones asfálticas urbanas, 139-163, Buenos Aires, 1957. Revista Construcciones, 13, 149, pág. 168, 1957.
27. Bases para pavimentos flexibles urbanos. Fossa, L. M. I Simposio sobre pavimentos asfálticos urbanos. 1957. Revista del Centro de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires, nº 21, 1957.
28. Consideraciones generales sobre pavimentaciones urbanas. Aspectos técnicos y económicos. Arenas, E. I Simposio sobre pavimentaciones asfálticas urbanas, 1957.
29. Superficies de rodamiento para pavimentos urbanos. Añón Suárez, H. I Simposio sobre pavimentaciones asfálticas urbanas, 1957. Revista Caminos, nº 182, 1958.
30. Comportamiento reológico de mezclas de polvos minerales y betunes asfálticos. Pinilla, A. X Reunión Anual del Asfalto, 91-127, Tucumán, 1958.
31. Ensayos de laboratorio comparativos del método Marshall y el usado en el LEMIT para el dosaje de concretos asfálticos. Añón Suárez, H., Massa, L. A. X Reunión Anual del Asfalto, 331-353, Tucumán, 1958. Revista de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, nº 6, 1959.
32. Consideraciones sobre adherencia de carpetas asfálticas construídas sobre bases de suelo cemento. Fossa, L. M., Risso, E. R. XI Reunión Anual del Asfalto, 330-348, Córdoba, 1960.
33. Estudio de la consistencia del sistema filler betún, para mezclas bituminosas densas. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. XI Reunión Anual del Asfalto, 385-414, Córdoba, 1960.

34. Mezclas asfálticas con asfaltos diluídos empleando agregados húmedos. Pinilla, A., Pérez Duprat, R. L. XI Reunión Anual del Asfalto, 534-551, Córdoba, 1960.
35. Estabilización de los suelos granulares del N.0. de la Provincia de Buenos Aires. Ciafardo, O. L. XI Reunión Anual del Asfalto, 143-169, Córdoba, 1960.
36. La adherencia en las mezclas asfálticas y el empleo de aditivos. Pinilla, A. Carreteras, nº 20, 1960.
37. Incremento de la viscosidad con el tiempo de los sistemas betún asfáltico - solvente. Pinilla, A., Jáuregui, E. A. XI Reunión Anual del Asfalto, 192-208, Córdoba, 1960.
38. Estudio reológico de dispersiones de betunes asfálticos nacionales en solventes de petróleo. Jáuregui, E. A., Pinilla, A. Primer Congreso Interamericano de Ingeniería Química, Puerto Rico, 1961.
39. Estudio reológico del flujo de suspensiones no acuosas. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. I Congreso Interamericano de Ingeniería Química, Puerto Rico, 1961.
40. Contralor de estructuras bituminosas. Pinilla, A., Añón Suárez, H. II Simposio sobre diseño estructural y contralor de estructuras bituminosas, Comisión Permanente del Asfalto, Buenos Aires, 1961.
41. Resultados experimentales sobre vacíos en el agregado mineral. Massaccesi, D. D. Revista de Vialidad de la Pcia. de Bs. As., nº 17, 1961.
42. Mezclas de suelo-asfalto en caliente para base de pavimentos, empleando suelos calcáreos. I parte. Añón Suárez, H., Langard, H. XII Reunión Anual del Asfalto, 34-51, Mar del Plata, 1962.
43. Susceptibilidad térmica de asfaltos argentinos y sus mezclas. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Gainza, J. A. XII Reunión Anual del Asfalto, 92-118, Mar del Plata, 1962. LEMIT, II, nº 95, 1962.
44. Aplicación del método de adherencia bajo tránsito al estudio de los materiales empleados en mezclas bituminosas. Pinilla, A., Pérez Duprat, R. L. XII Reunión Anual del Asfalto, 226-245, Mar del Plata, 1962. LEMIT, Serie II, nº 94, 1962.

45. Proyecto de un revestimiento impermeable para canal de riego. Añón Suárez, H., Massaccesi, D. D. XII Reunión Anual del Asfalto, 254-279, Mar del Plata, 1962.
46. Acción de los aditivos mejoradores de adherencia sobre la viscosidad de los asfaltos diluídos. Pinilla, A., Jáuregui, E. A., Gimenez, H. F. XII Reunión Anual del Asfalto, 302-316, Mar del Plata, 1962.
47. Una nueva técnica de la determinación del contenido de betún en mezclas asfálticas. Comunicación. Pinilla, A., Pensado, B. V. XII Reunión Anual del Asfalto, 381-396, 1962, Mar del Plata.
48. Influencia de distintos tipos de agregados en las características mecánicas de un concreto asfáltico. Massaccesi, D. D. Revista El Asfalto, nº 17, 1963, Road Abstracts del Road Research Laboratory, Vol. XXXI, nº 1, Abs. nº 35, 1964.
49. Reología de asfaltos argentinos con el empleo del microviscosímetro. I y II parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. XIII Reunión Anual del Asfalto, 85-104, Córdoba, 1964.
50. Comportamiento bajo compresión triaxial de suelos granulares finos estabilizados por el procedimiento "Wet sand mix". Añón Suárez, H., Massaccesi, D. D. XIII Reunión Anual del Asfalto, 149-174, Córdoba, 1964. Comité Argentino para el estudio de regiones áridas o semiáridas. Santiago del Estero, 1965.
51. Estudio de la durabilidad de asfaltos argentinos en películas delgadas. I Parte. Agnusdei, J. O., Pinilla, A. XIII Reunión Anual del Asfalto, 221-237, Córdoba, 1964. Publicación del Instituto de Pesquisas Rodoviarías, 89, GTM-65-03, Brasil 1965.
52. Características de endurecimiento de asfaltos diluídos de secado rápido. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. XIII Reunión Anual del Asfalto, 340-356, Córdoba, 1964 y V Congreso Nacional de Vialidad y Tránsito.
53. Uso del microviscosímetro en la reología de los asfaltos nacionales y sus mezclas. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. V Reunión Anual de Pavimentación. Brasil, 1964.

54. Reología de mezclas de asfaltos argentinos con polímeros del isobutileno. Agnusdei, J. O., Pinilla, A. II Congreso Interamericano de Ingenieros Químicos, Perú, 1964.
55. Estabilización de suelos arenosos húmedos (wet sand mix). Añón Suárez, H., Fossa, L. M. V Reunión Anual de Pavimentación, Brasil, 1964.
56. Nuevos criterios sobre especificaciones de asfaltos para uso vial. Pinilla, A. Pub. del Instituto de Pesquisas Rodoviarias, 88-GTM-65-02, Brasil, 1965.
57. Determinación de las características elásticas de las diferentes capas del camino mediante el método de propagación de ondas de superficie. Tosticarelli, J. R., Agnusdei, J. O. XIV Reunión Anual del Asfalto, 41-73, Buenos Aires, 1966.
58. Nuevas técnicas de medida de consistencia de materiales asfálticos. Pinilla, A., Reynaldi, A. XI Reunión Anual del Asfalto, 236-256, Buenos Aires, 1966.
59. Comportamiento de aditivos para inhibir el endurecimiento de los asfaltos por acción del calor. Pinilla, A., Frezzini, P. O. XIV Reunión Anual del Asfalto, 296-312, Buenos Aires, 1966.
60. Estudio del secado de asfaltos diluídos por medidas de consistencia, I Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Reynaldi, A. Tercer Simposio de investigaciones Viales del Instituto de Pesquisas Rodoviarias, Brasil, 1967.
61. Características de fieltros y techados asfálticos. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. LEMIT, Serie II, nº 112, 1967.
62. Concretos asfálticos elaborados con emulsiones bituminosas. Proyecto y técnicas constructivas. Massaccesi, D. D., Ciafardo, O. L. Tercer Simposio de investigaciones Viales del Instituto de Pesquisas Rodoviarias, Brasil, 1967. LEMIT, Serie II, nº 166, 1970.
63. Estudio del secado de asfaltos diluídos por medidas de consistencia. I y II Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Reynaldi, A. XV Reunión Anual del Asfalto, 120-140, Mar del Plata, 1968.
64. Estudios de laboratorio y resultado de obras ejecutadas con concretos asfálticos en frío. Ciafardo, O. L., Ma-

- ssaccessi, D. D. XV Reunión Anual del Asfalto, 231-245, Mar del Plata, 1968. IX Reunión de la Asociación Brasileira de Pavimentación, Brasil, 1968. LEMIT, 3-1970, 59-102.
65. Medida de la velocidad de rotura de emulsiones asfálticas catiónicas. I Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Frezzini, P. O. XV Reunión Anual del Asfalto, 259-280, Mar del Plata, 1968.
66. Estudio de la durabilidad de asfaltos viales por ensayos de envejecimiento acelerado. I Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Reynaldi, A. XV Reunión Anual del Asfalto, 430-450, Mar del Plata, 1968.
67. Estudio de la durabilidad de asfaltos viales por ensayos de envejecimiento acelerado. I y II Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Reynaldi, A. Pub. del VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, T. III, 267-284, 1968. LEMIT, 2-1969, 19-52.
68. Medida de la velocidad de rotura de emulsiones asfálticas catiónicas. I y II Parte. Pinilla, A., Agnusdei, J. O., Frezzini, P. O. Pub. del VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, T. III, 285-308, 1968. LEMIT, 4-1970, 105-135.
69. Cualidades físico-mecánicas de las ortocuarzitas de la Provincia de Buenos Aires. Su empleo en obras viales y civiles. Añón Suarez, H., Mauriño, V., Massaccesi, D. D. Pub. del VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. T. III, 347-362, 1968. Revista Carreteras, julio-set. y oct./dic. de 1969.
70. Nuevos criterios y tendencias sobre especificaciones de asfaltos para uso vial. Pinilla, A. XVI Reunión Anual del Asfalto, 69-97, Santa Fe, 1969.
71. Ensayo de mezclas asfálticas para el sellado de juntas de pavimentos de hormigón. Massaccesi, D. D., Rocco, J. F. XVI Reunión Anual del Asfalto, 110-133, Santa Fe, 1969.
72. Primeros ensayos de propagación de ondas en la Provincia de Buenos Aires. Agnusdei, J. O., Bruck, M. XVI Reunión Anual del Asfalto, 169-185, Santa Fe, 1969. LEMIT, 1-1970, 21-48.

73. Pavimentos urbanos ejecutados con mezclas asfálticas en frío. Massaccesi, D. D., Añón Suárez, H. Revista El Asfalto, nº 24, 1971.
74. Envejecimiento de asfaltos durante el mezclado. Agnusdei, J. O., Frezzini, P. O., Comai, A. A. LEMIT, 4-1971, 43-73; VII Simposio sobre Investigaciones Viales, Río de Janeiro, 1971.
75. Reología de asfaltos argentinos a bajas temperaturas. Agnusdei, J. O., Anvaria, O. LEMIT, 4-1971, 115-167; XVI Reunión Anual del Asfalto, 312-347, Santa Fe, 1969.
76. Nuevas tendencias en especificaciones y su aplicación a los asfaltos procesados en el país. Pinilla, A., Agnusdei, J. O. y Frezzini, P. O. XVII Reunión Anual del Asfalto, Mendoza, 1971.
77. Análisis de los componentes estructurales de un pavimento urbano luego de 27 años en servicio. Agnusdei, J. O. y Massaccesi, D. D. XVII Reunión Anual del Asfalto, Mendoza, 1971.

Este ejemplar se terminó de
imprimir en los Talleres Grá-
ficos del M. O. P., el día 27
de diciembre de 1971

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