

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).-

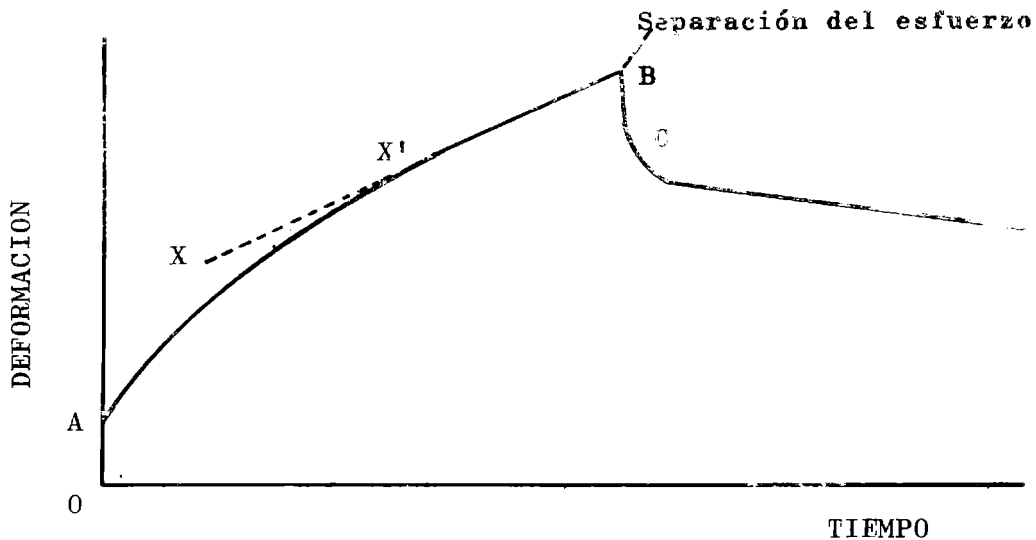


Fig. 1.- Deformación en función del tiempo a esfuerzo constante

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

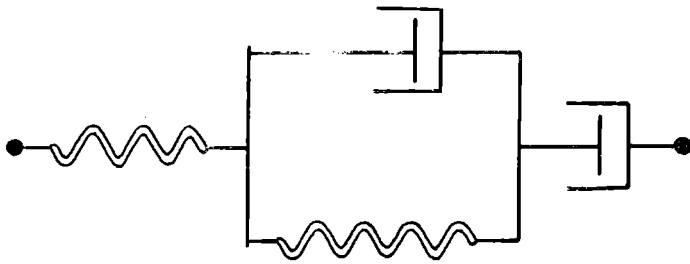
La aplicación de la teoría de la viscoelasticidad a los betunes asfálticos implica suponer que éstos se comportan como materiales lineales, es decir, que bajo un esfuerzo constante la deformación a un tiempo fijo es proporcional al esfuerzo.

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).

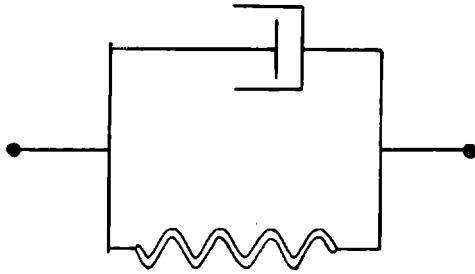
Consideramos a ambos tipos de comportamiento separadamente.

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

$\lambda_0 = \eta$

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:

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

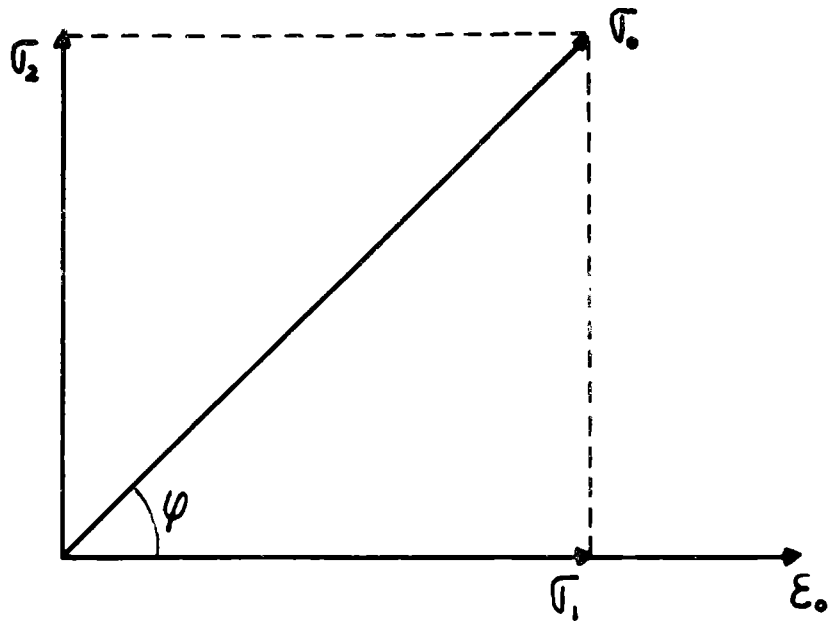


Fig. 3.- Descomposición vectorial del esfuerzo

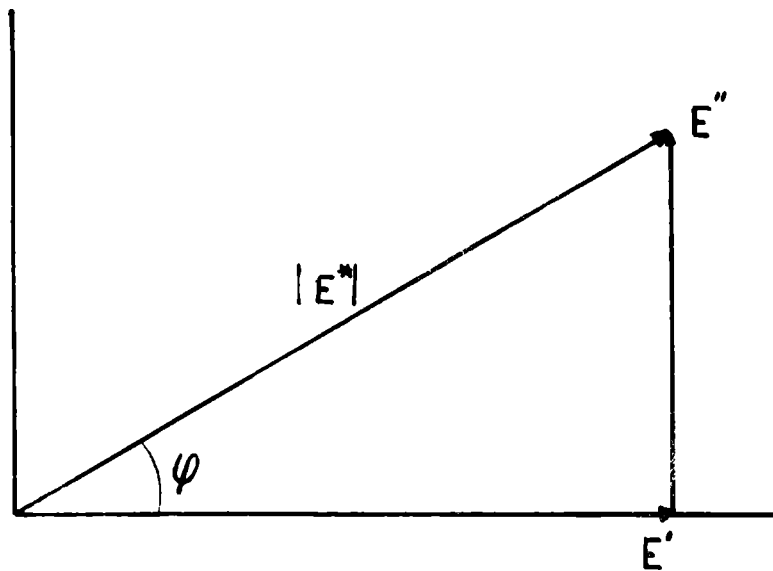


Fig. 4.- Componentes real e imaginaria del módulo complejo

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_1 y λ_1 , 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-

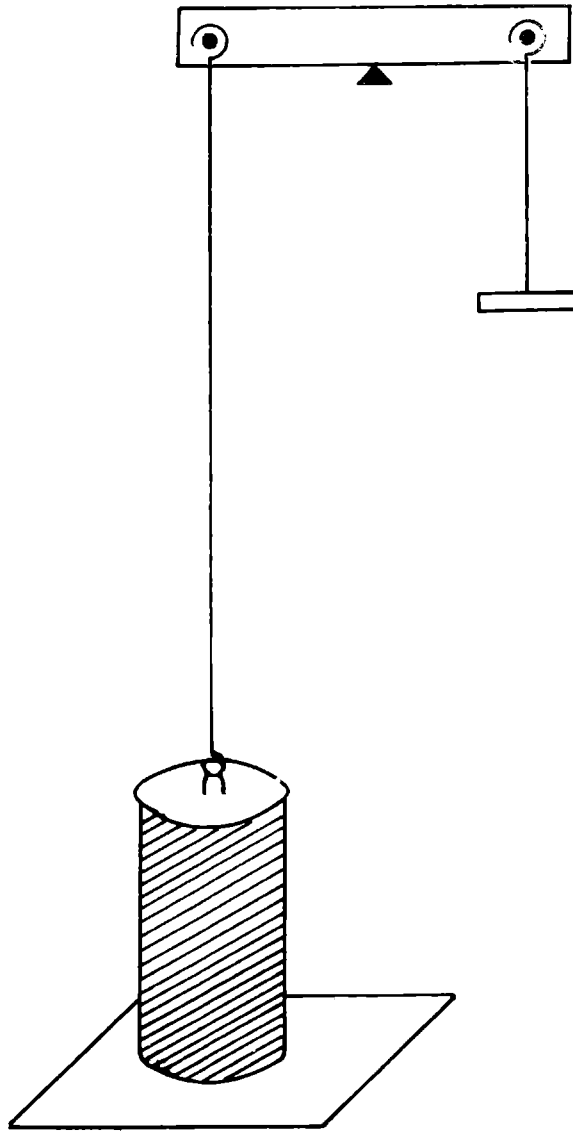


Fig. 5.- Esquema del equipo utilizado

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 VI

RESPUESTA 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 Schweyer, 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-

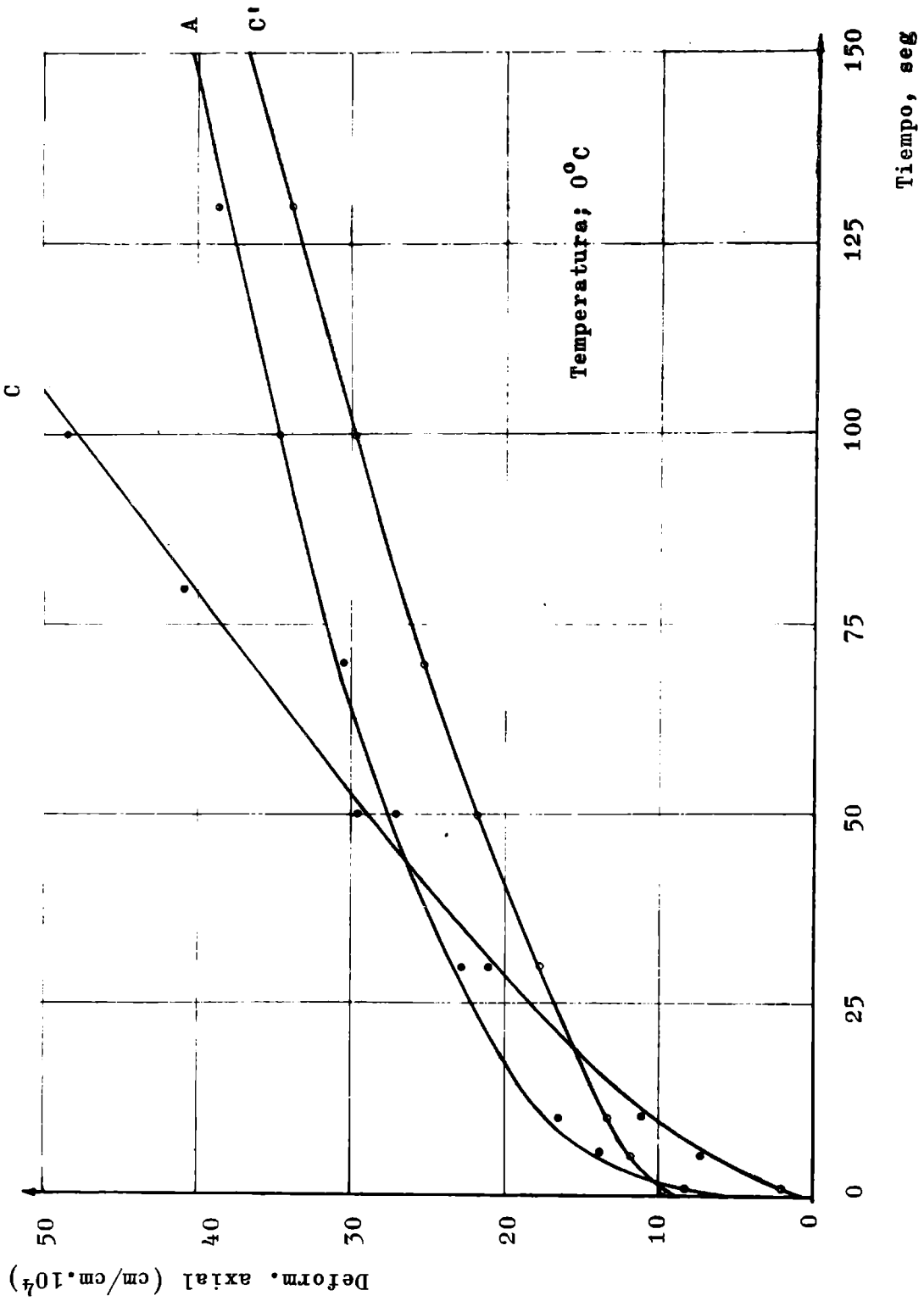


Fig. 6

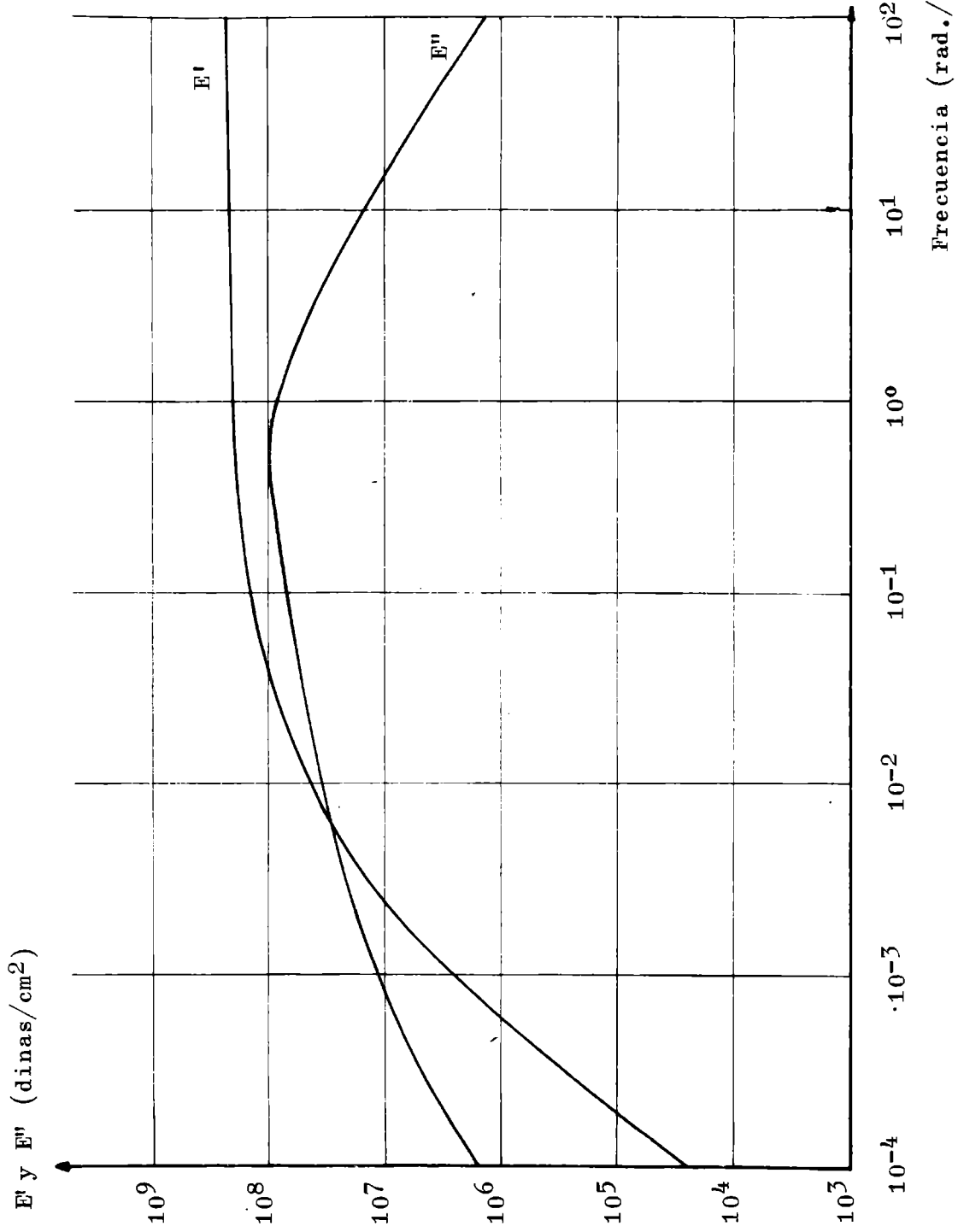


Fig. 7.- Asfalto A

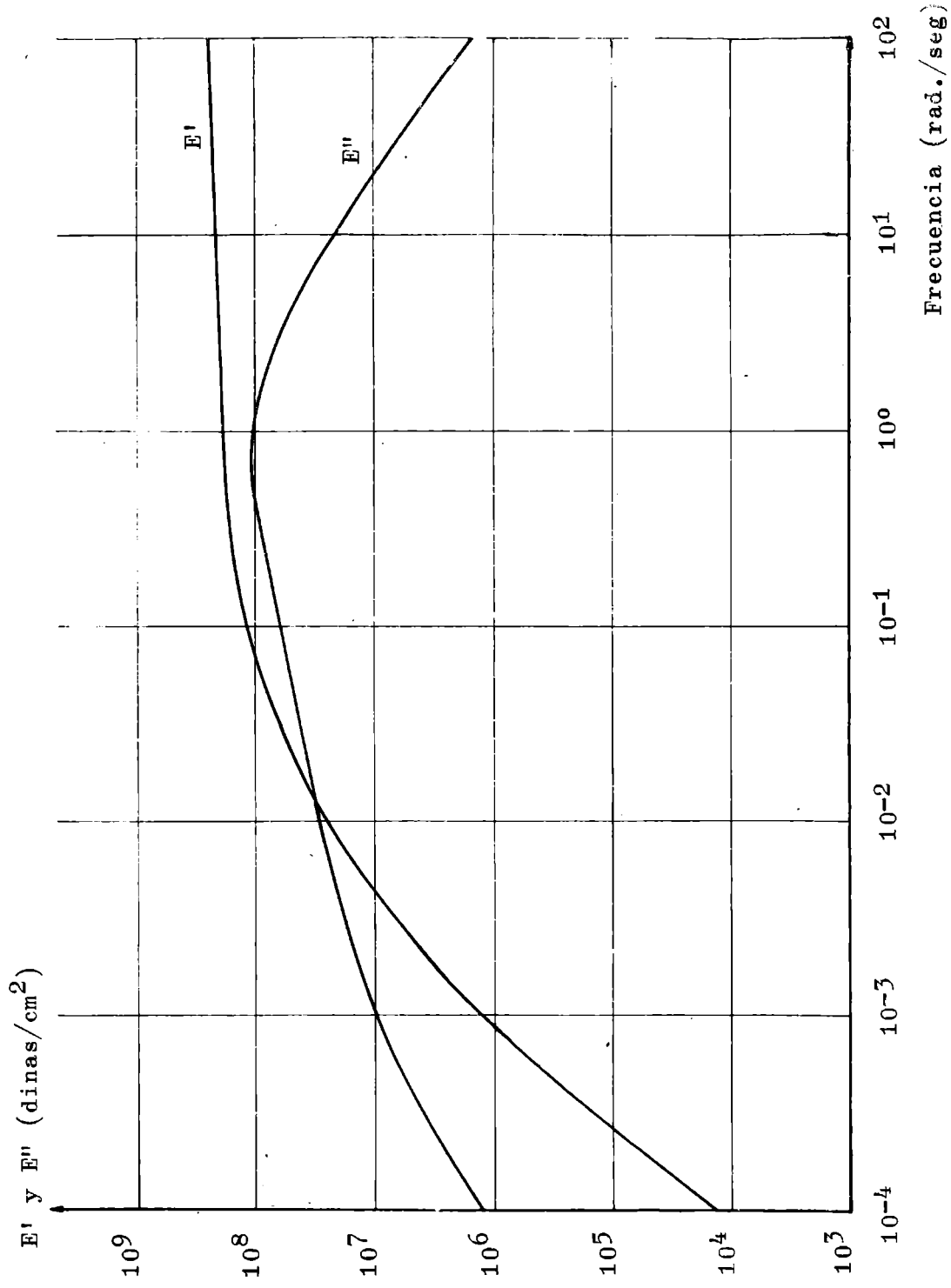


Fig. 8.- Asfalto B

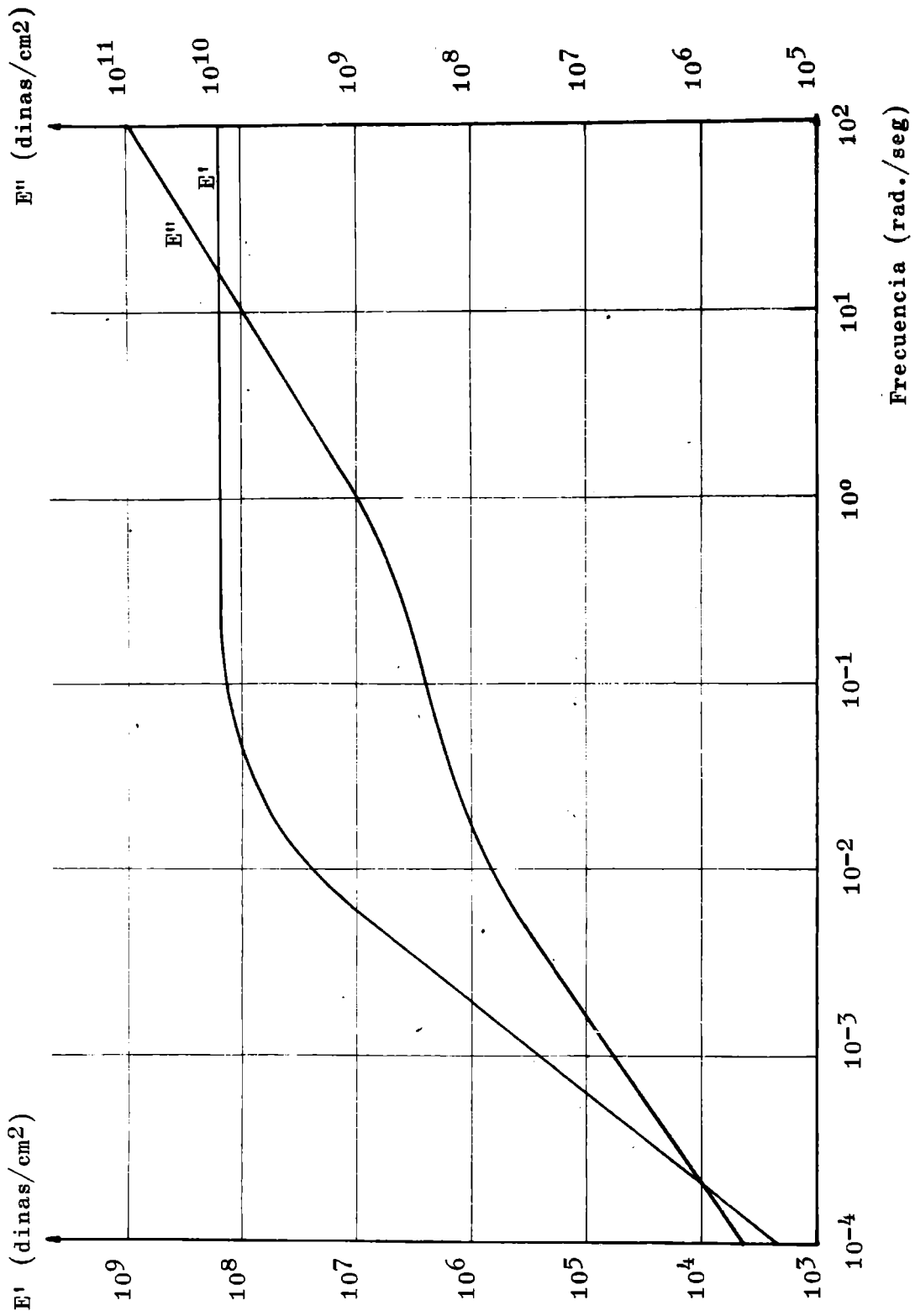


Fig. 9.- Asfalto C

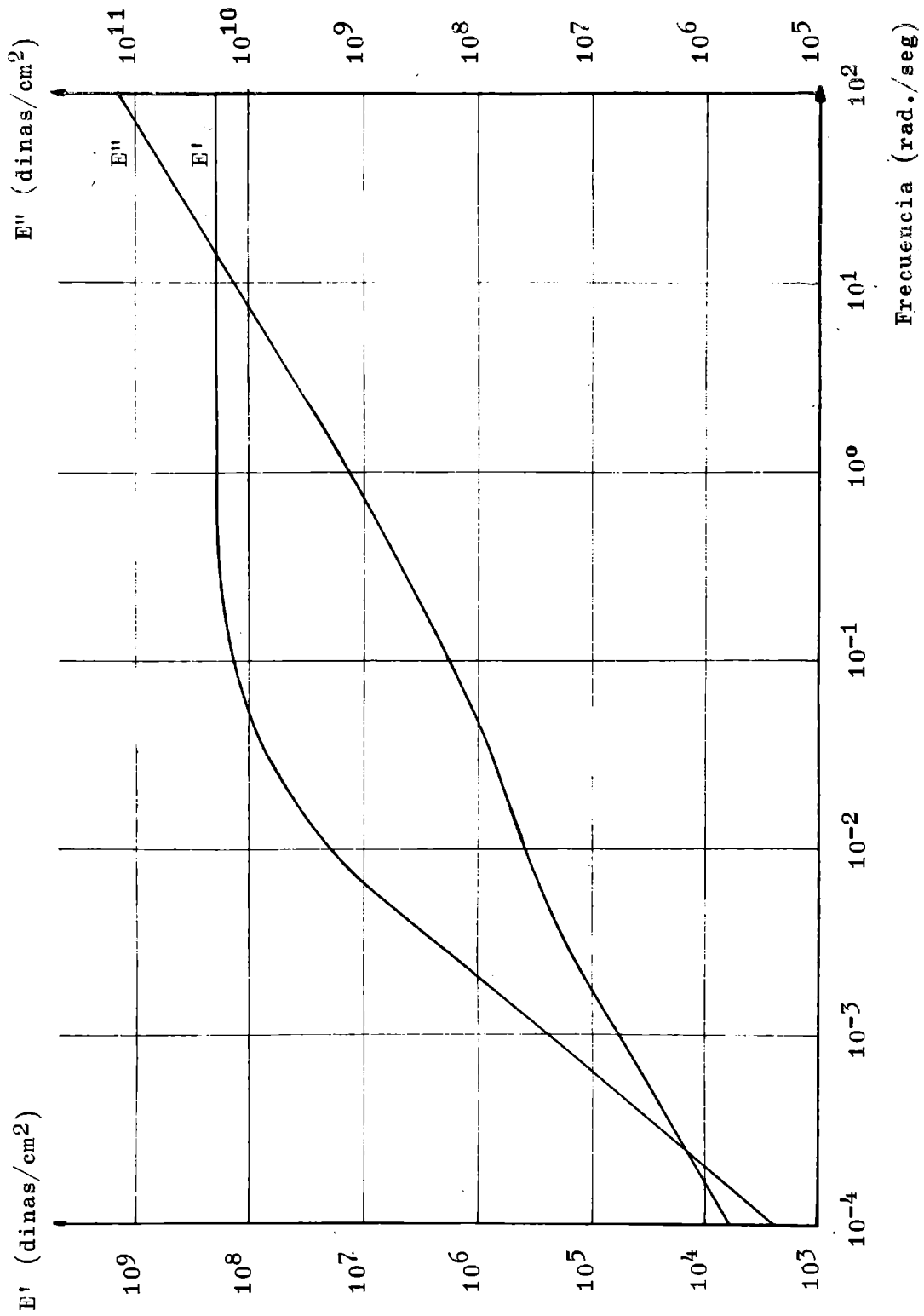


Fig. 10.- Asfalto D

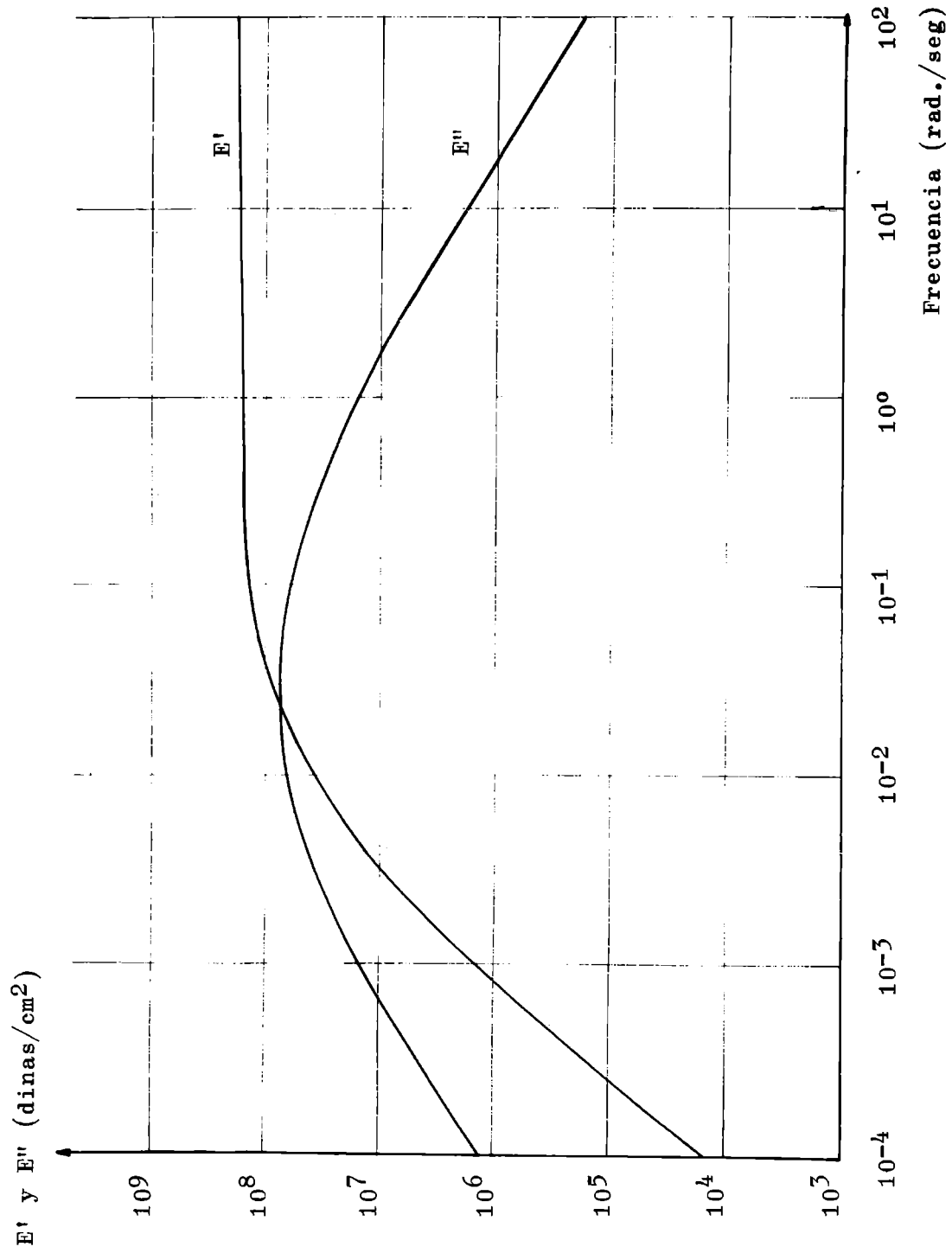


Fig. 11.- Asfalto C'

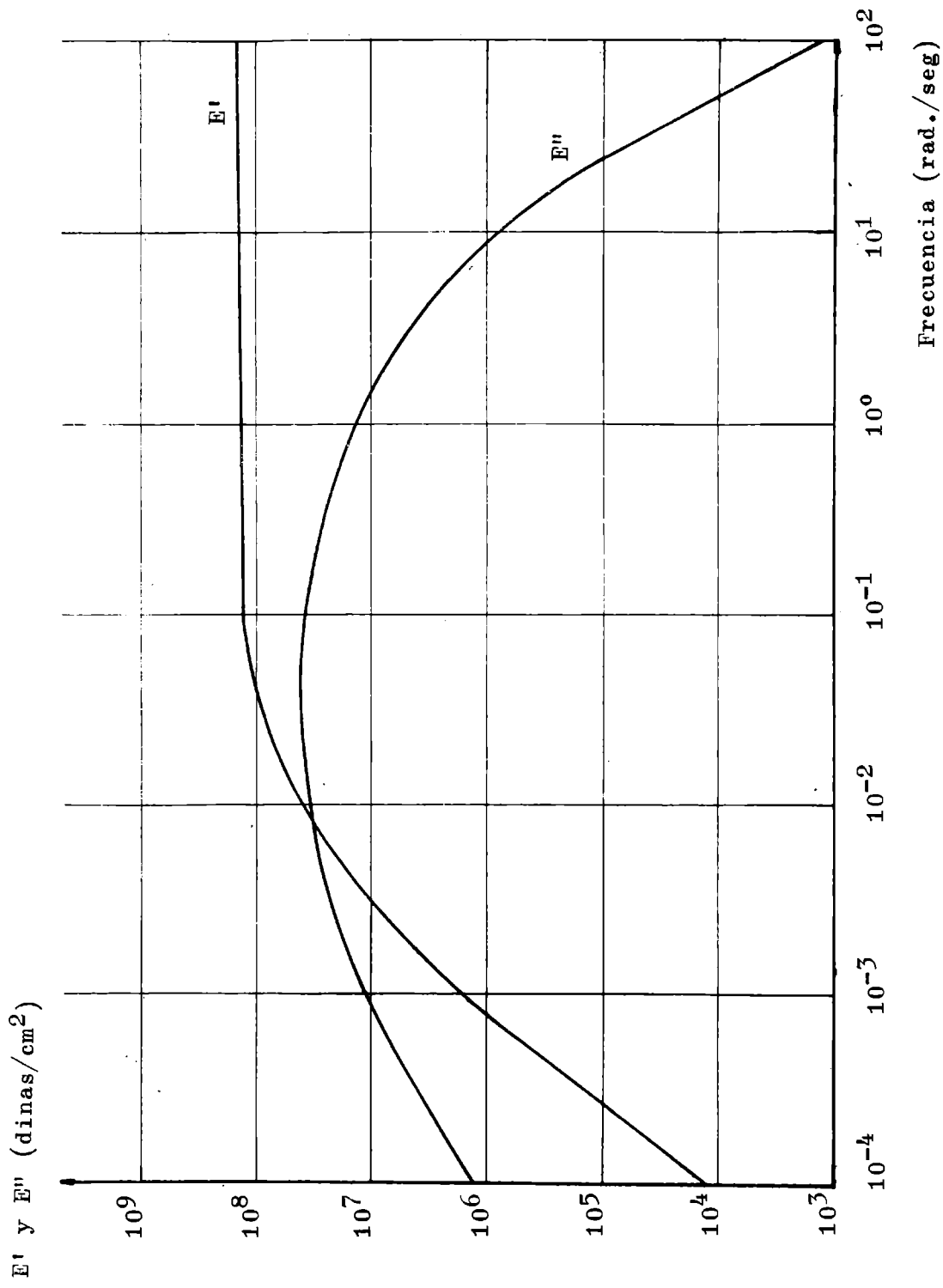


Fig. 12.- Asfalto D'

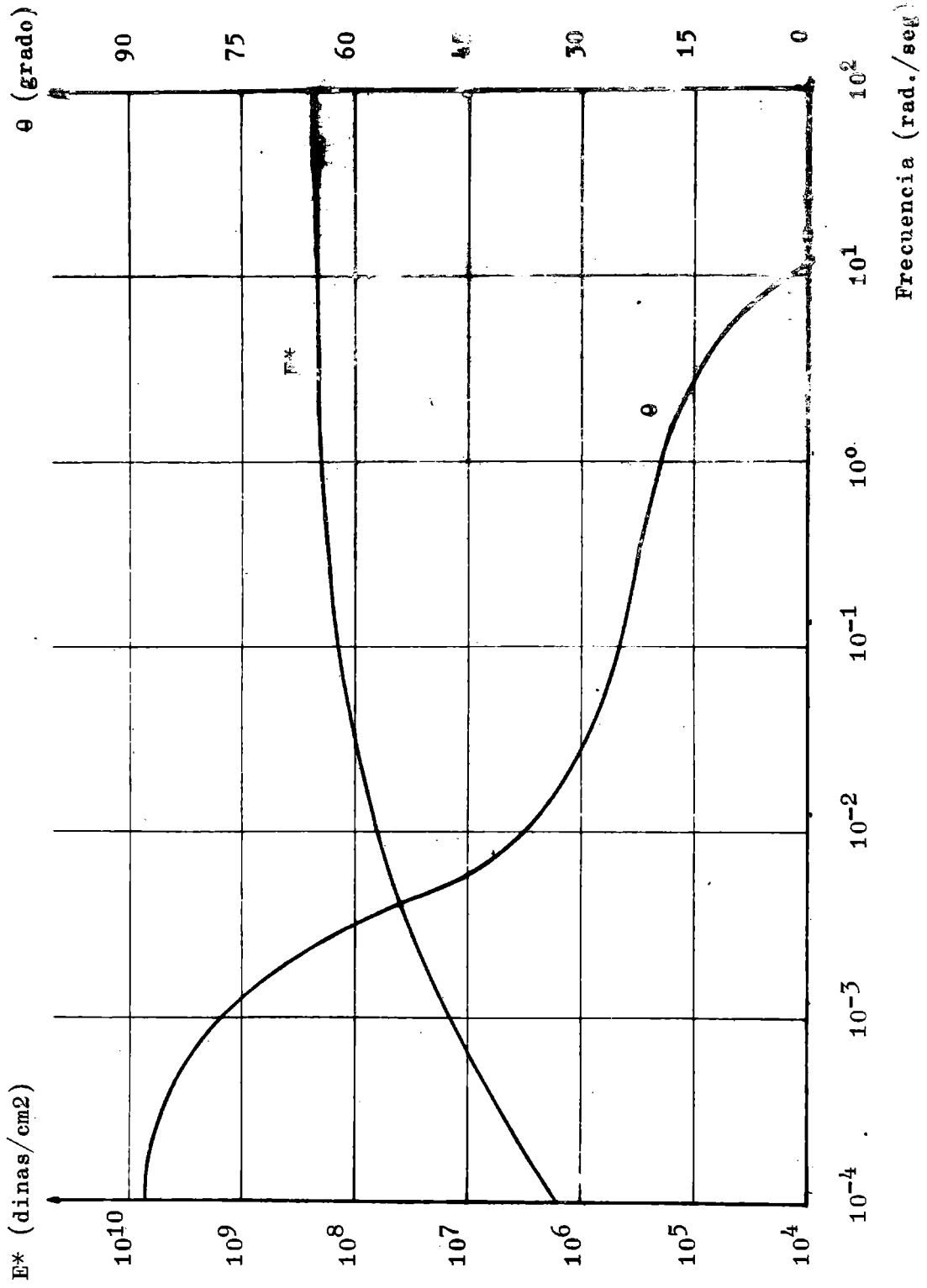


Fig. 13.- Asfalto-A

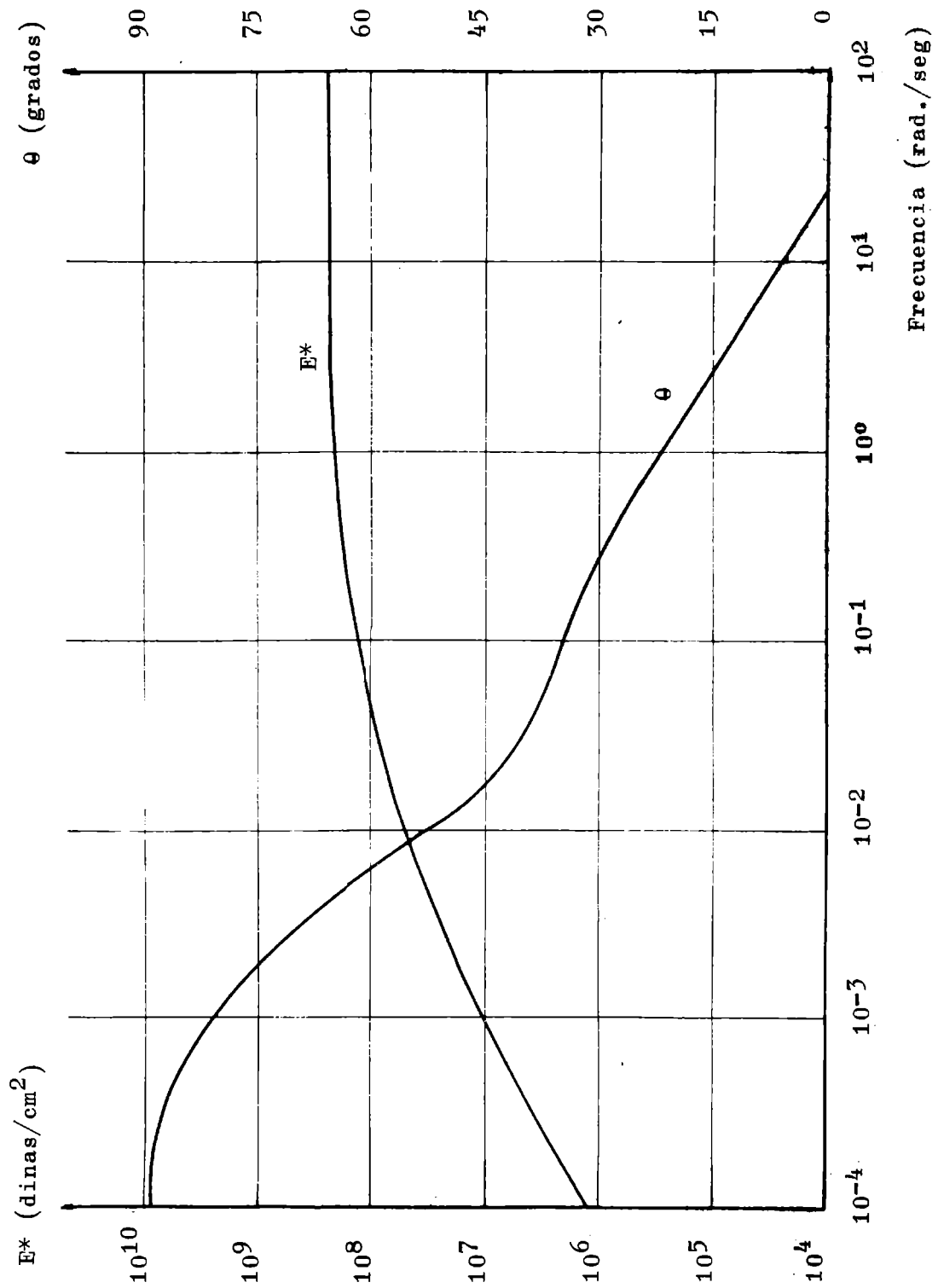


Fig. 14.- Asfalto B

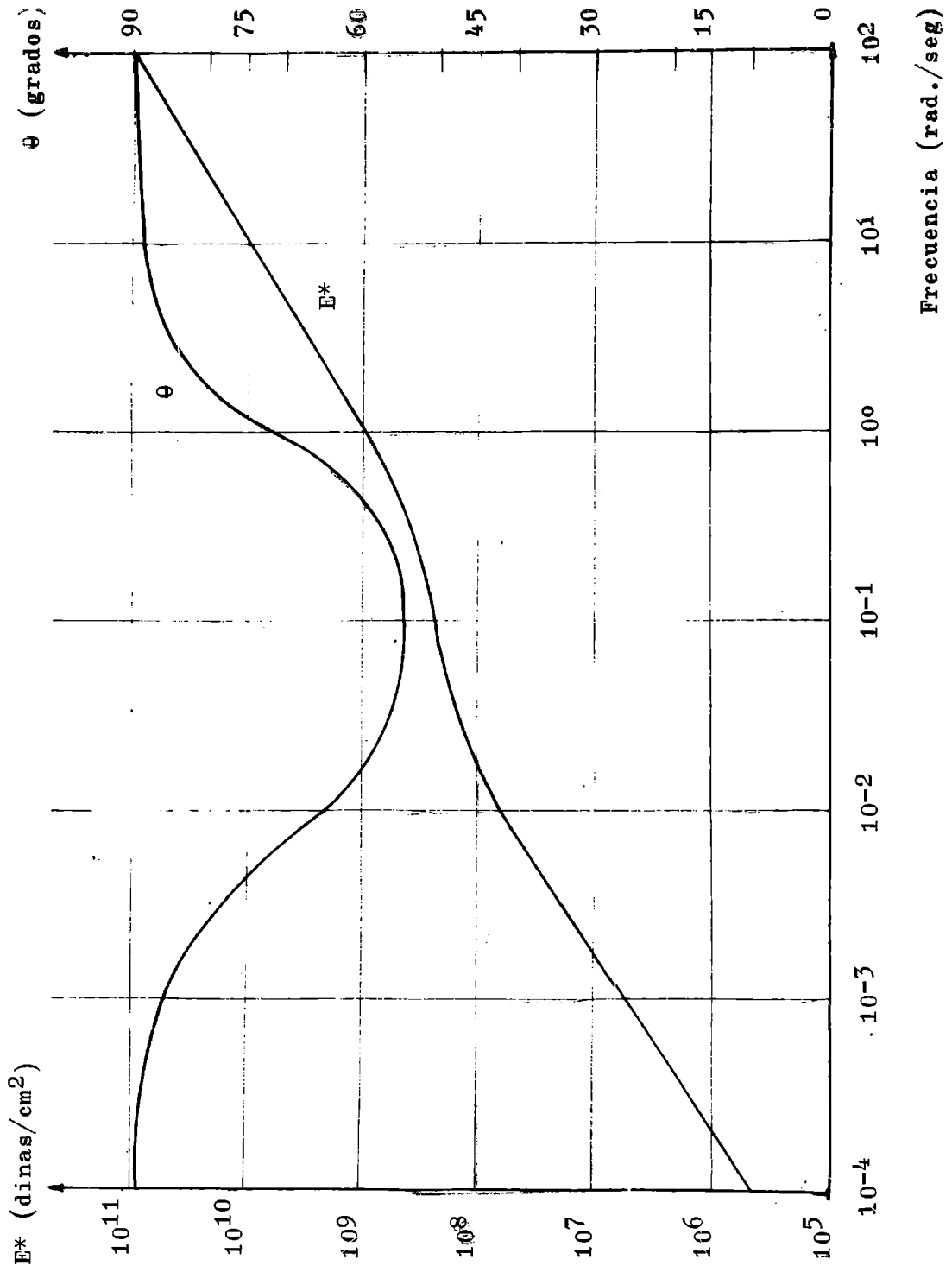


Fig. 15.- Asfalto C

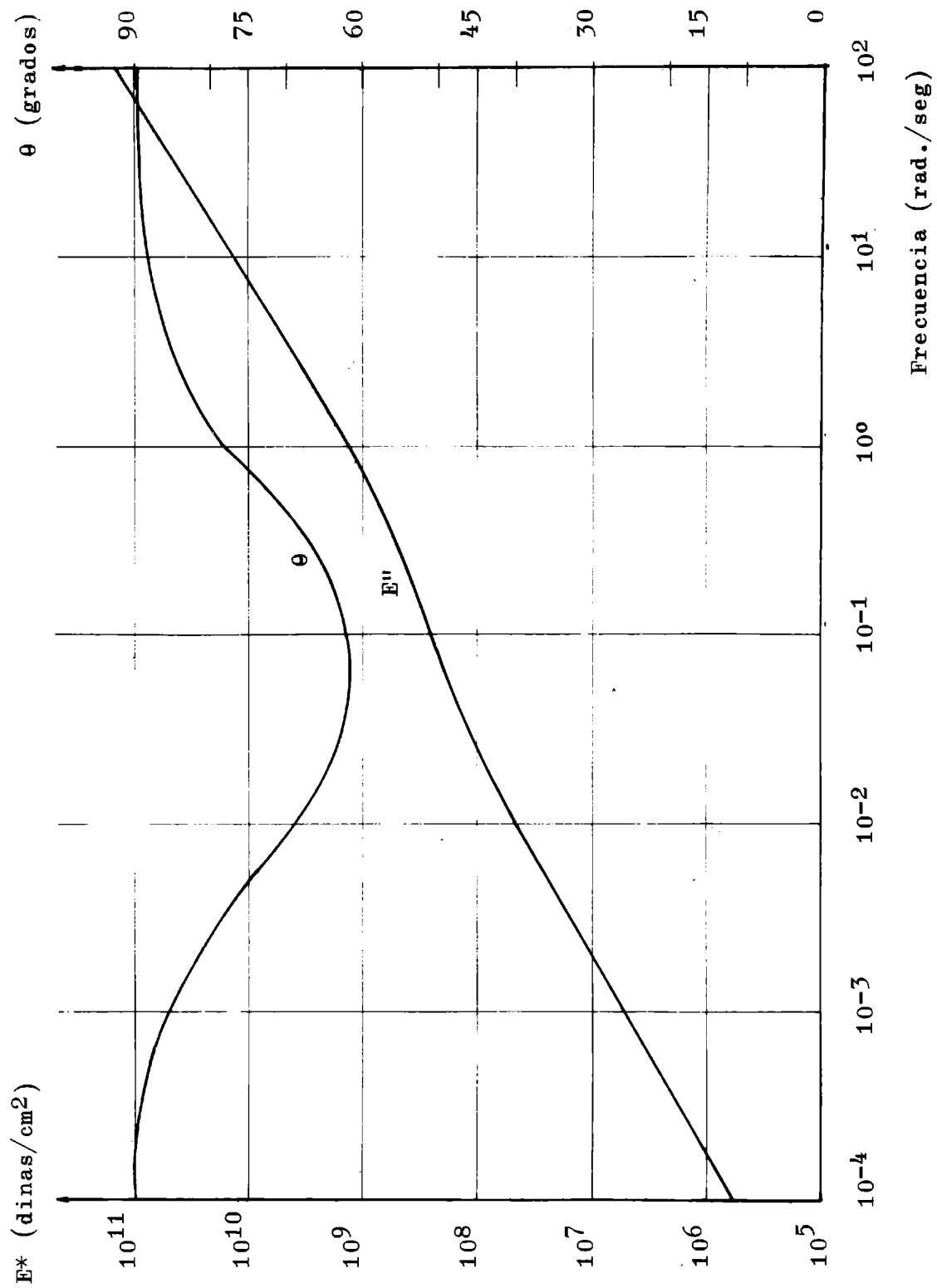


Fig. 16.- Asphalt D

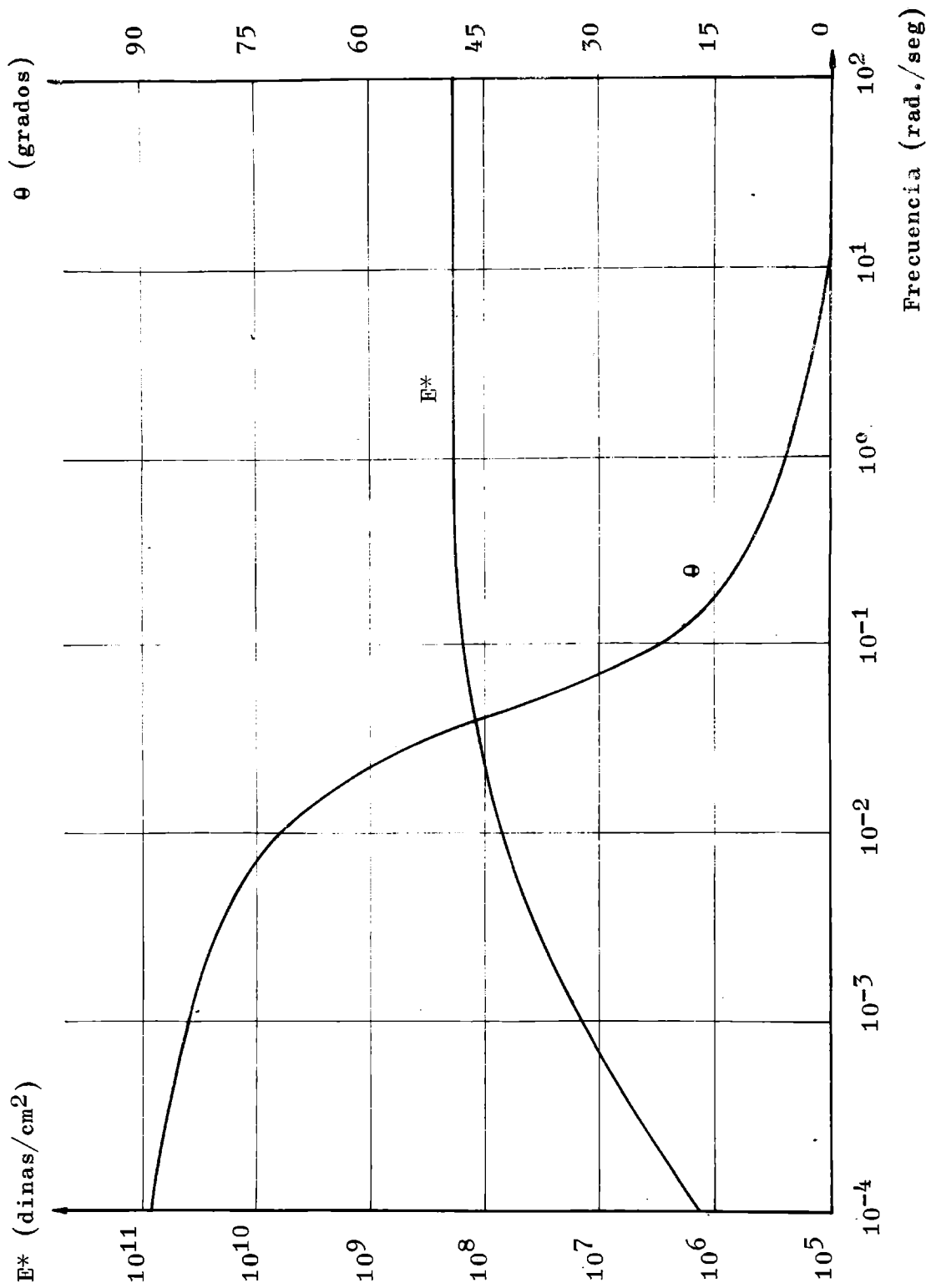


Fig. 17.- Asfalto C'

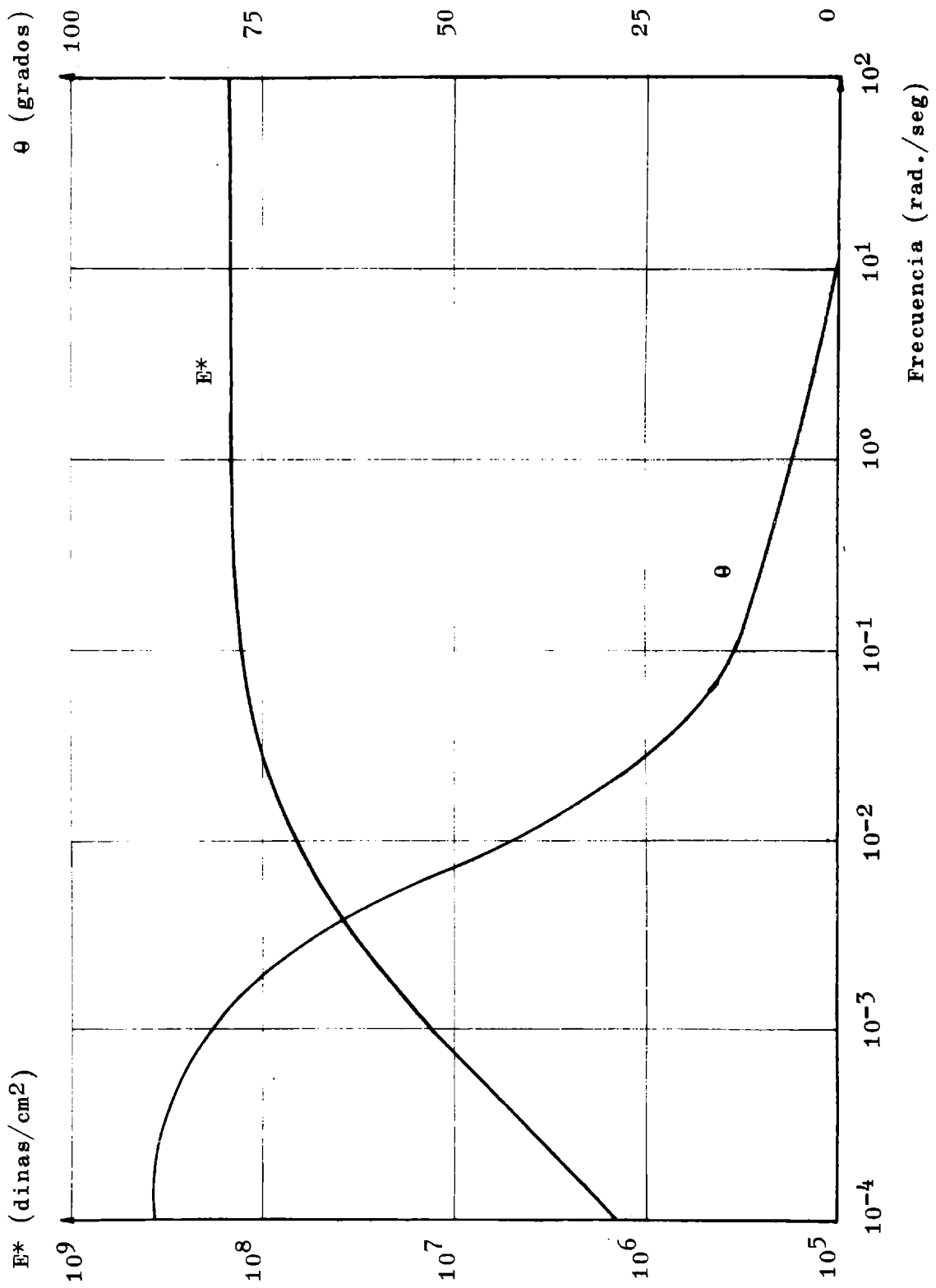


Fig. 18.- Asfalto D'

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:

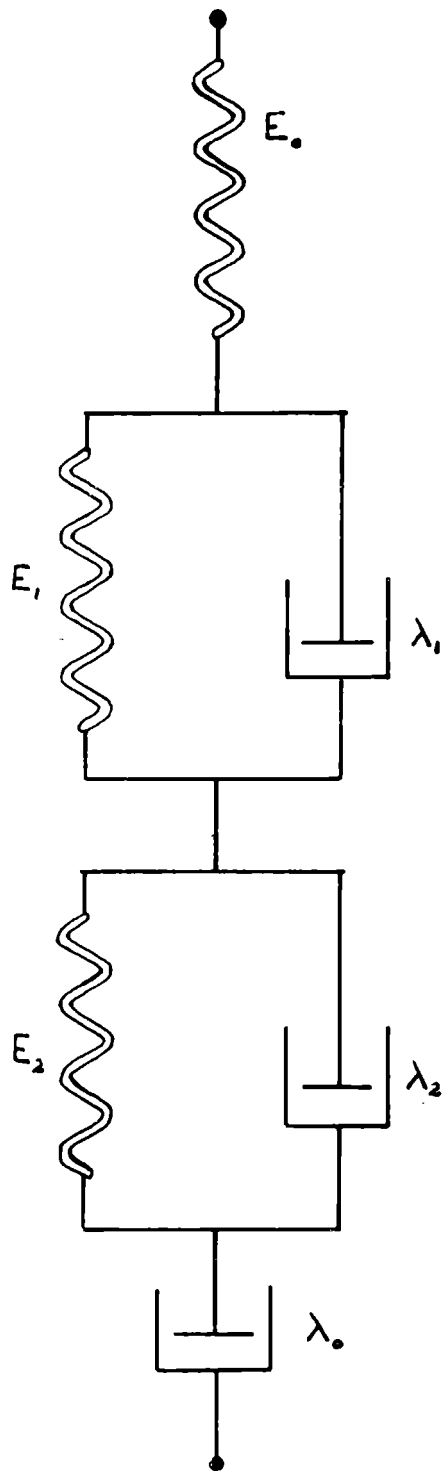


Fig. 1 (apéndice)

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:

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

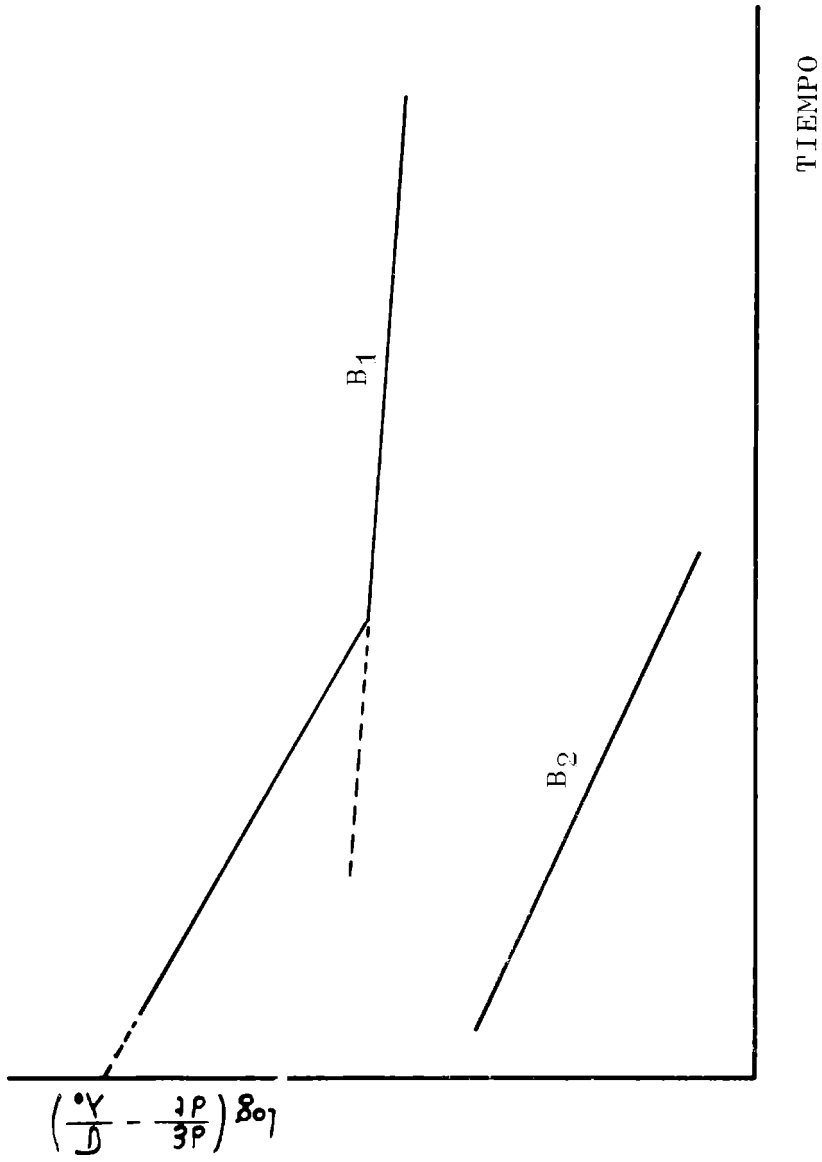


Fig. 2 (apéndice). Gráfico para obtener las constantes de los amortiguadores y resortes

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.