

UNIVERSIDAD DE SANTANDER
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO Y NORMALIZACION DEL ENSAYO DE PERDIDA
POR DESGASTE APLICADO A LA CARACTERIZACION, DOSIFICA-
CION Y CONTROL DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE
GRANULOMETRIA ABIERTA**

Realizada por: D. MIGUEL ANGEL CALZADA PEREZ
Dirigida por: D. FELIX EDMUNDO PEREZ JIMENEZ

SANTANDER, JUNIO DE 1984

A mi abuelo

AGRADECIMIENTOS

Muestro mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han animado ó han colaborado en la elaboración de esta tesis.

Dr. D. Félix Pérez Jiménez, director de la tesis, por su apoyo, ayuda, experiencia e inestimables consejos, puestos a mi disposición.

Dr. D. Alberto Luceño, cuya ayuda me ha sido, muy valiosa, tanto en el procesamiento por ordenador de los datos obtenidos, como en el análisis estadístico de los mismos.

Dr. D. Carlos Kraemer, director e impulsor de los estudios realizados en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos, sobre "mezclas bituminosas porosas", así como a sus colaboradores D. Jesús Gómez, D. Luis Lastra y a mi compañero D. Luis Lázaro cuyos trabajos me han servido de punto de partida.

D. Roberto González, por sus animos y colaboración en todos los ensayos de Laboratorio y que han hecho posible la realización de este trabajo.

D. Agustín Manrique, D. Ramón Arteaga y D. Joaquín San Román que con sus trabajos de delineación y mecanografía han posibilitado la edición de esta tesis.

También quiero aquí hacer constar mi agradecimiento a la Dirección General de Carreteras en particular a los ingenieros del Servicio de Tecnología, impulsores de este trabajo ya los Ingenieros de la Jefatura de Carreteras de Santander.

RESUMEN

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de un método de ensayo destinado a caracterizar el comportamiento de mezclas bituminosas de granulometría abierta, cuando son empleadas como capa especial de rodadura, con el fin de mejorar las condiciones de seguridad y comodidad del tráfico rodado en presencia de lluvia y/o, a altas velocidades.

En primer lugar, en el Capítulo 1 se analiza cuales son las funciones más importantes que debe desempeñar la capa de rodadura de un firme, y que propiedades y cualidades se deben exigir a los materiales que van a ser empleados en ella.

Es precisamente sobre la caracterización de las propiedades mecánicas y resistentes que han de poseer estos materiales sobre lo que se ha centrado el tema de esta tesis. En el Capítulo 2 se refieren los diferentes tipos de ensayos mecánicos empleados en la caracterización de mezclas bituminosas. En el Capítulo 3 se analiza la aplicación de estos ensayos y se presenta el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste como procedimiento más adecuado para la dosificación y proyecto de este tipo de mezclas.

Los Capítulos 4 y 5 hacen referencia al proceso de medida. En primer lugar, Capítulo 4, se determina la precisión y repetitividad del ensayo. En el Capítulo 5 se estudia la in-

fluencia de la temperatura, con el fin de posibilitar la realización del ensayo a diferentes temperaturas.

En el Capítulo 6 se recogen los resultados de este ensayo aplicado a la caracterización de mezclas porosas. Se estudia principalmente la influencia del porcentaje de finos, filler y ligante sobre la resistencia a la pérdida por desgaste de la mezcla. También se estudia la influencia del tamaño máximo del árido, y en especial, el efecto de la variación de la relación filler-betún.

El Capítulo 7 es un capítulo de conclusiones, donde se resumen los resultados obtenidos en su aplicación a la dosificación de mezclas porosas, al mismo tiempo que se señalan nuevos campos de investigación.

I N D I C E

I N D I C E

	<u>Página</u>
CAPITULO 1.- Optimización de las características superficiales del firme mediante el empleo de mezclas bituminosas porosas en capa de rodadura.....	1
1.1. Función y características de la capa de rodadura.....	2
1.2. Solicitaciones del tráfico.....	4
1.3. Características superficiales de la capa de rodadura.....	13
1.3.1. Adherencia.....	13
1.3.2. Regularidad superficial.....	22
1.3.3. Ruido.....	32
1.3.4. Características Ópticas.....	44
1.4. Empleo de mezclas bituminosas porosas como capa de rodadura.....	48
1.4.1. Evolución y desarrollo del empleo de mezclas bituminosas porosas en capa de rodadura.....	50
1.4.2. Ventajas e inconvenientes de las mezclas bituminosas porosas.....	60
1.4.3. Comportamiento de los tramos en servicio.....	74

	<u>Página</u>
CAPITULO 2.- Propiedades de las mezclas bituminosas. Ensayos mecánicos de caracterización.....	85
2.1. Propiedades de las mezclas bituminosas...	86
2.2. Ensayos mecánicos empleados en la caracterización de mezclas bituminosas.....	90
2.2.1. Ensayos para la medida de la estabilidad.....	92
2.2.2. Ensayos para la determinación de la resistencia al desplazamiento.....	111
2.2.3. Ensayos para la determinación de la resistencia a tracción.....	114
2.2.4. Ensayos para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante...	119
2.2.5. Ensayos para la determinación de la resistencia a la fisuración y a la deformación por fatiga.....	122
CAPITULO 3.- Ensayo cántabro de pérdida por desgaste. Desarrollo y normalización.	133
3.1. Análisis del empleo de ensayos mecánicos en la caracterización de mezclas abiertas.	134
3.1.1. Ensayo Marshall.....	154
3.1.2. Ensayo de tracción indirecta.....	155
3.1.3. Cohesímetro Hyeem.....	170
3.1.4. Ensayo en pista de laboratorio.....	182

	<u>Página</u>
CAPITULO V.- Influencia de la temperatura en la pérdida por desgaste.....	274
5.1.- Influencia de la temperatura en la pérdida por desgaste.....	274
5.1.1. Valoración experimental del efecto de la temperatura análisis de resultados.....	280
5.1.2. Corrección de la pérdida por desgaste en función de la temperatura....	293
5.2. Influencia de la penetración del betún en la pérdida por desgaste.....	295
CAPITULO 6.- Aplicación del ensayo cántabro de pérdida por desgaste a la caracterización de mezclas bituminosas porosas.....	300
6.1. Aplicación del ensayo cántabro de pérdida por desgaste a la caracterización de mezclas bituminosas porosas.....	301
6.1.1. Influencia del contenido de filler y de betún.....	302
6.1.2. Influencia del porcentaje de finos	321
6.1.3. Influencia del tamaño máximo.....	325

	<u>Página</u>
6.1.4. Influencia de la energía de compactación en la pérdida por desgaste.	332
6.2. Estudio de la influencia de la relación filler/betón en la resistencia a la pérdida por desgaste.....	333
CAPITULO 7.- Conclusiones.....	350
BIBLIOGRAFIA.....	360
ANEJOS.....	

CAPITULO 1

OPTIMIZACION DE LAS CARACTERISTICAS
SUPERFICIALES DEL FIRME MEDIANTE EL
EMPLEO DE MEZCLAS BITUMINOSAS PORO-
SAS EN CAPA DE RODADURA

1.1. FUNCION Y CARACTERISTICAS DE LA CAPA DE RODADURA

Un problema común a todas las Administraciones de carretera es mejorar la seguridad del tráfico rodado.

Un objetivo que se plantea es el de mantener la seguridad de circulación a altas velocidades y en condiciones climatológicas adversas, especialmente con lluvia ó pavimento mojado.

Al aumentar la velocidad se observa una caída notable de la adherencia entre el neumático y el pavimento, que puede ser total -problema hidroplaneo-, si existe agua sobre el pavimento y ésta no puede ser evacuada de la superficie de contacto neumático-pavimento.

Las características superficiales del pavimento y los materiales que constituyen éste influyen notablemente sobre la adherencia y en general sobre todos los factores que afectan al movimiento del vehículo. Por ello, parte de la investigación desarrollada por estas Administraciones ha tenido como fin mejorar las características superficiales de los pavimentos, y una de las técnicas empleadas ha sido la utilización de mezclas bituminosas porosas como capa de rodadura.

La capa de rodadura constituye los últimos centímetros del pavimento. Sus funciones fundamentales son:

- Resistir las solicitaciones producidas por el tráfico.
- Proporcionar una adecuada superficie para el movimiento de los vehículos.

También se considera función de la capa de rodadura impedir que el agua penetre en el firme, es decir, que sea impermeable. En el caso de emplear como capa de rodadura una mezcla porosa, esta función la desempeñaría la capa intermedia, que junto con la capa de rodadura es lo que se conoce como pavimento de un firme flexible.

Los materiales que constituyen la capa de rodadura han de estar en consonancia con la gran importancia de las solicitaciones a que van a estar sometidos y, por otra parte, han de tener unas características superficiales que hagan la circulación de los vehículos cómoda y segura.

Las solicitaciones que debe de resistir la capa de rodadura son las presiones verticales de contacto aplicadas por los neumáticos, las tensiones tangenciales de frenado, las existentes en las curvas, zonas de aceleración, etc, y las succiones de los neumáticos.

Las características superficiales que más interesan al usuario de la carretera, en cuanto afectan su seguridad y comodidad, son las siguientes:

- Adherencia.
- Uniformidad.
- Ruido.
- Características fotométricas.

Al considerar el efecto destructivo del tráfico sobre el pavimento y las condiciones de comodidad y seguridad proporcionado por éste, hay que tener también en cuenta como estas características son afectadas por las condiciones climatológicas: lluvia, hielo, temperatura, etc.

1.2. SOLICITACIONES DEL TRAFICO

Las solicitaciones de los vehículos se transmiten al firme a través de los neumáticos. Un neumático en reposo tiene, en contacto con el pavimento, un área aproximadamente elíptica, con una presión de contacto que no es uniforme ni exactamente igual a la presión de inflado interior del neumático, ya que tiene influencia la rigidez de la goma y la de las lonas, figura 1.1.

Las presiones de inflado de los neumáticos son mucho mejor conocidas que las de contacto. Las presiones de inflado normales en la mayoría de los países europeos están comprendidas entre:

1,5 - 2,5 Kp/cm² para vehículos ligeros.

4 - 7 Kp/cm² para vehículos pesados.

PRESION DE INFLADO 1.2 Kg / cm²

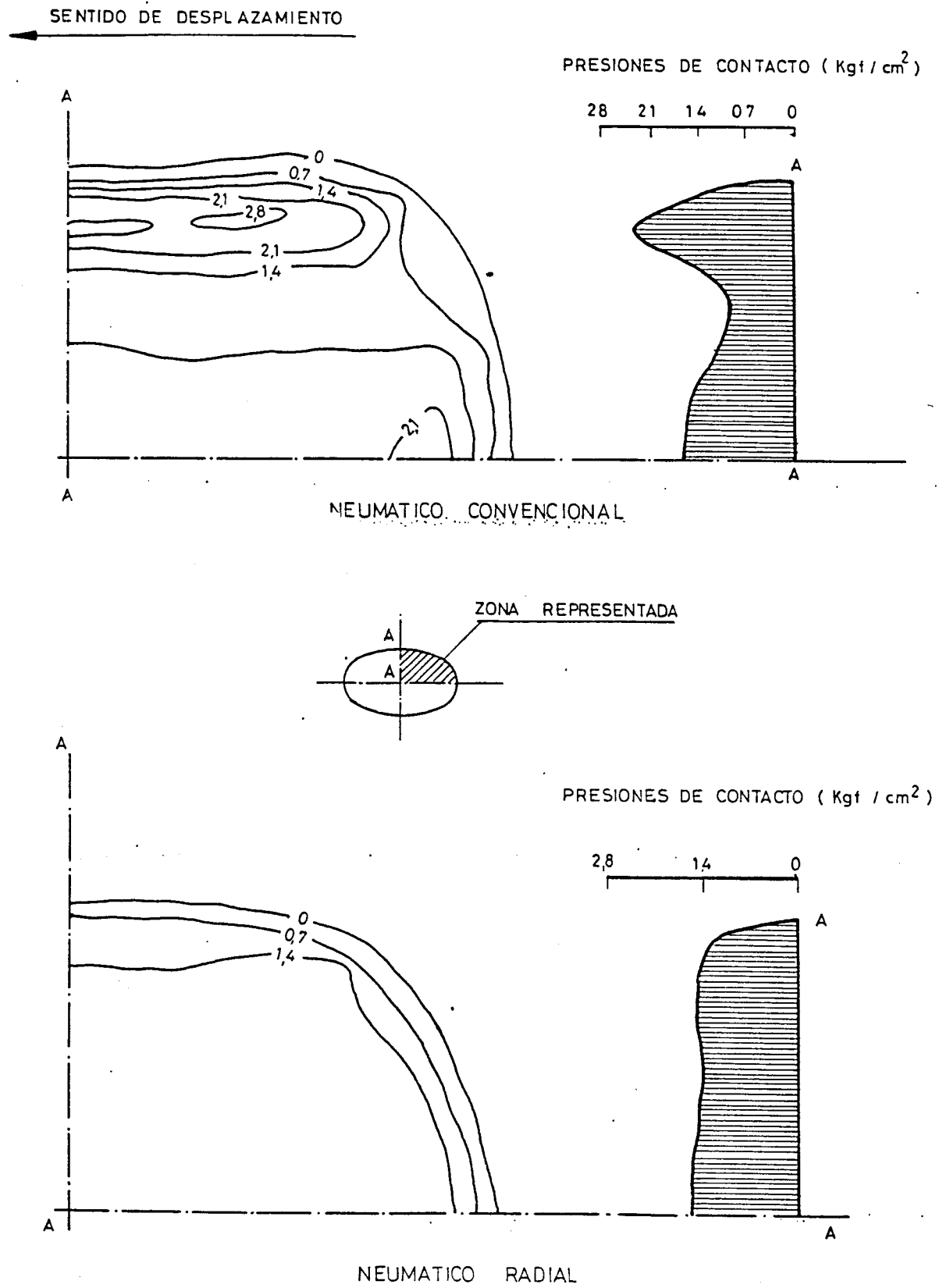


FIG. I. I. - DIAGRAMAS DE LAS PRESIONES DE CONTACTO QUE SE PRODUCEN SOBRE EL FIRME CON DISTINTOS TIPOS DE NEUMATICOS

En España son normales presiones de inflado de 8 a 8,5 Kp/cm^2 e incluso superiores, cuando la existencia de sobrecargas obliga a incrementarla, para evitar que las cubiertas de las ruedas gemelas rocen entre sí.

La presión de contacto depende de la carga que soporta el neumático, de la carga para la que ha sido proyectado éste y de su presión de inflado. Para cargas inferiores ó similares a las de proyecto del neumático, la presión de contacto es similar a la de inflado. Para cargas superiores a la de proyecto la presión de contacto es mayor. Esto es debido a que a medida que aumenta la carga transmitida al neumático, una porción mayor de esta carga es absorbida por las paredes del neumático y consecuentemente, se ve reducida proporcionalmente el área de contacto. En la figura 1.2 se puede observar este efecto al comparar el área obtenida teóricamente para una carga dada, supuesta una presión de contacto igual a la del neumático, con la medida realmente. En esta figura también se representa la diferencia entre suponer la superficie real de contacto ó considerar la superficie aparente de contacto, incluyendo toda la superficie del neumático, incluso su zona con dibujo donde el contacto no es efectivo.

El efecto de la presión y del tipo de neumático puede observarse en los valores recogidos en la figura 1.3, donde se presentan para unos neumáticos convencionales y unos neumáti-

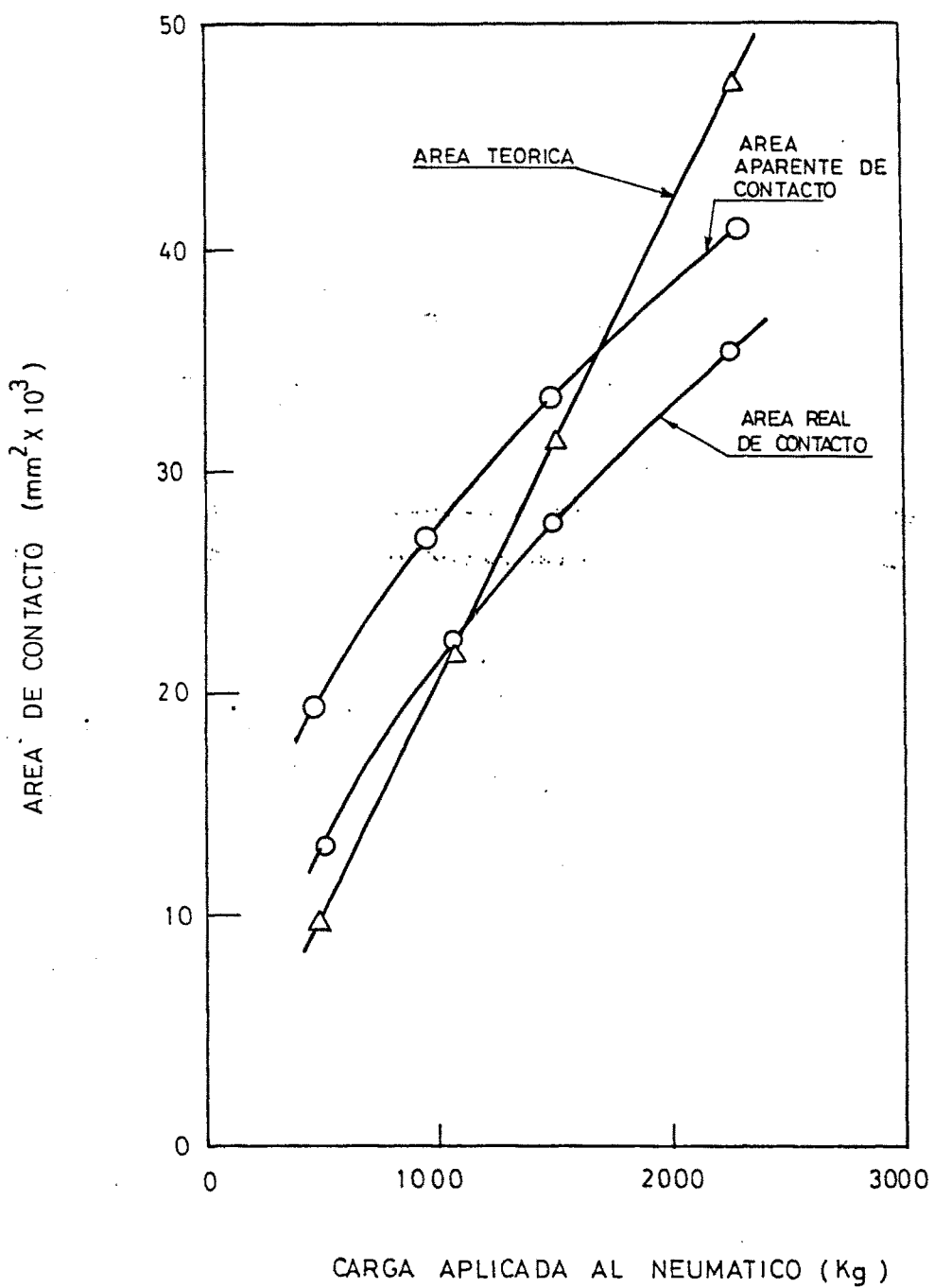


FIG. I.2.- AREAS DE CONTACTO TEORICA APARENTE Y REAL PARA UN NEUMATICO 8,25 x 20 INFLADO A UNA PRESION 4,8 Kg / cm² (D. CRONEY)

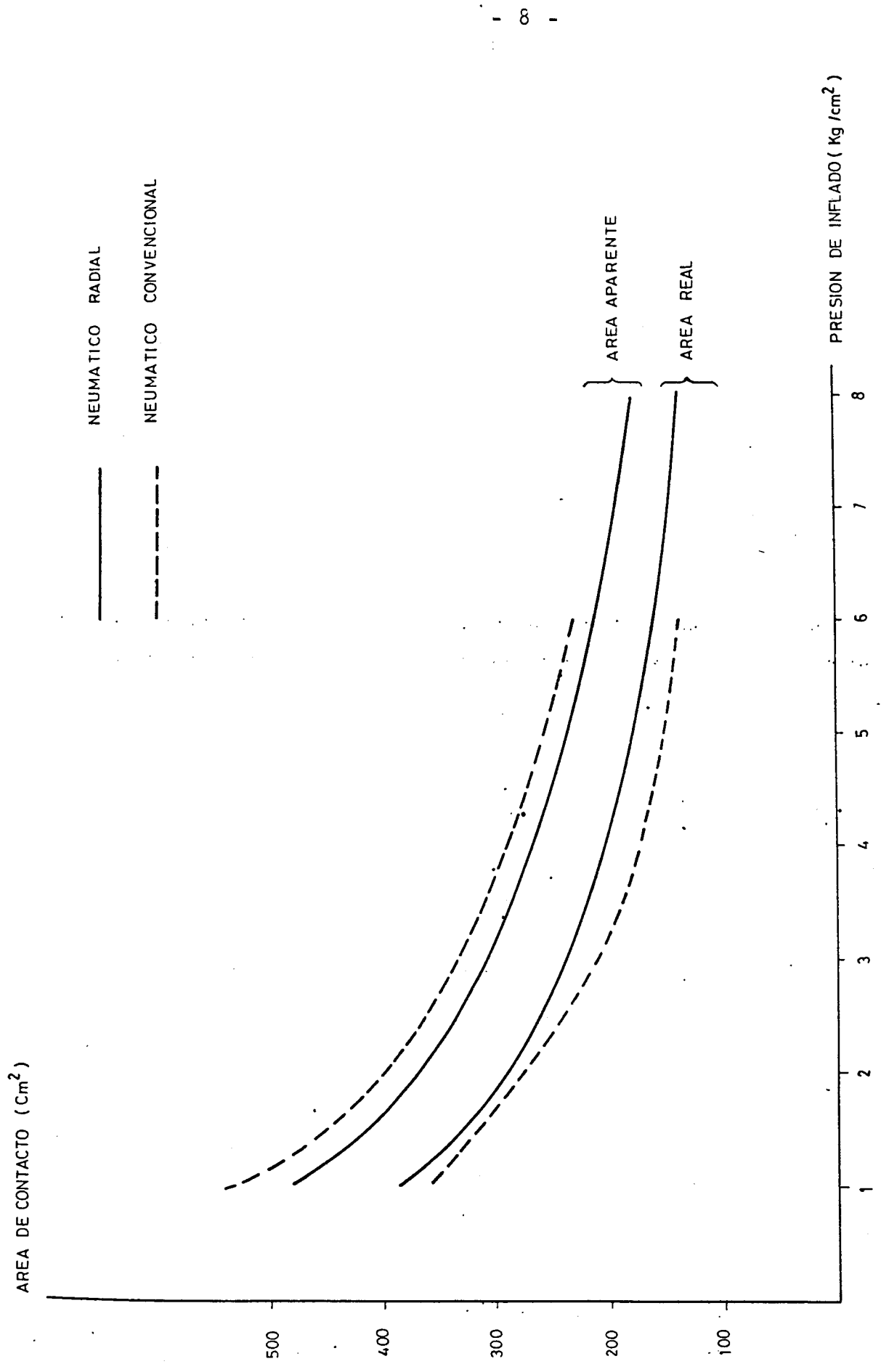


FIG. 1.3.- VARIACION DEL AREA DE CONTACTO EN FUNCION DE LA PRESION DE INFLADO Y TIPO DE NEUMATICO (CARGA 500 Kp) (I.M.FONSECA)

cos radiales, la variación de las superficies real y aparente de contacto en función de la presión de inflado para una carga de 500 Kp. Se observa que el área de contacto disminuye con la presión de inflado y es inferior para los neumáticos convencionales que para los radiales, es decir, que estos últimos disminuyen la presión aplicada al firme a igualdad de presión de inflado.

En cuanto a la distribución de presiones dentro del área de contacto, figura 1.1, influye mucho las características del neumático. Los neumáticos convencionales, sobre todo para presiones de inflado bajas, transmiten presiones altas en los lados de la huella, debido a la rigidez del propio neumático. Los neumáticos radiales son capaces de deformarse uniformemente, sin presentar en el área de contacto zonas de diferente presión. Aunque para las condiciones normales de trabajo (presión de inflado y carga de proyecto del neumático), se puede considerar que la presión media de contacto y la de inflado coinciden, la mayoría de los fabricantes proporcionan ábacos o tablas que relacionan las dos presiones.

Las relaciones anteriores han sido establecidas en condiciones estáticas. Si el neumático se pone en movimiento, el efecto que produce el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo hace que la presión vertical media de contacto pueda alcanzar valores superiores al 50% de la presión estática prevista.

Además de esta carga vertical, los neumáticos transmiten al pavimento esfuerzos de tipo tangencial y succiones que son los que obligan a construir capas de gran calidad como pavimento.

Estos esfuerzos tangenciales aparecen en la zona de contacto pavimento-neumático, no sólo cuando frena ó acelera el vehículo, sino incluso cuando éste rueda sobre el pavimento sin ningún tipo de aceleración.

Debido a la deformabilidad del neumático, y dado que no hay deslizamiento, se produce en la zona de contacto, figura 1.4, diferencias en la velocidad de desplazamiento que originan esfuerzos tangenciales y de cizallamiento.

En M_1 , la velocidad de los elementos del neumático con relación a la calzada es sensiblemente igual a:

$$V = W(R-r); \quad \text{velocidad positiva.}$$

En M esta velocidad es:

$$V' = W(R'-r); \quad \text{velocidad negativa,}$$

siendo

r : el radio de rodadura

R : el radio del neumático sin someter a carga.

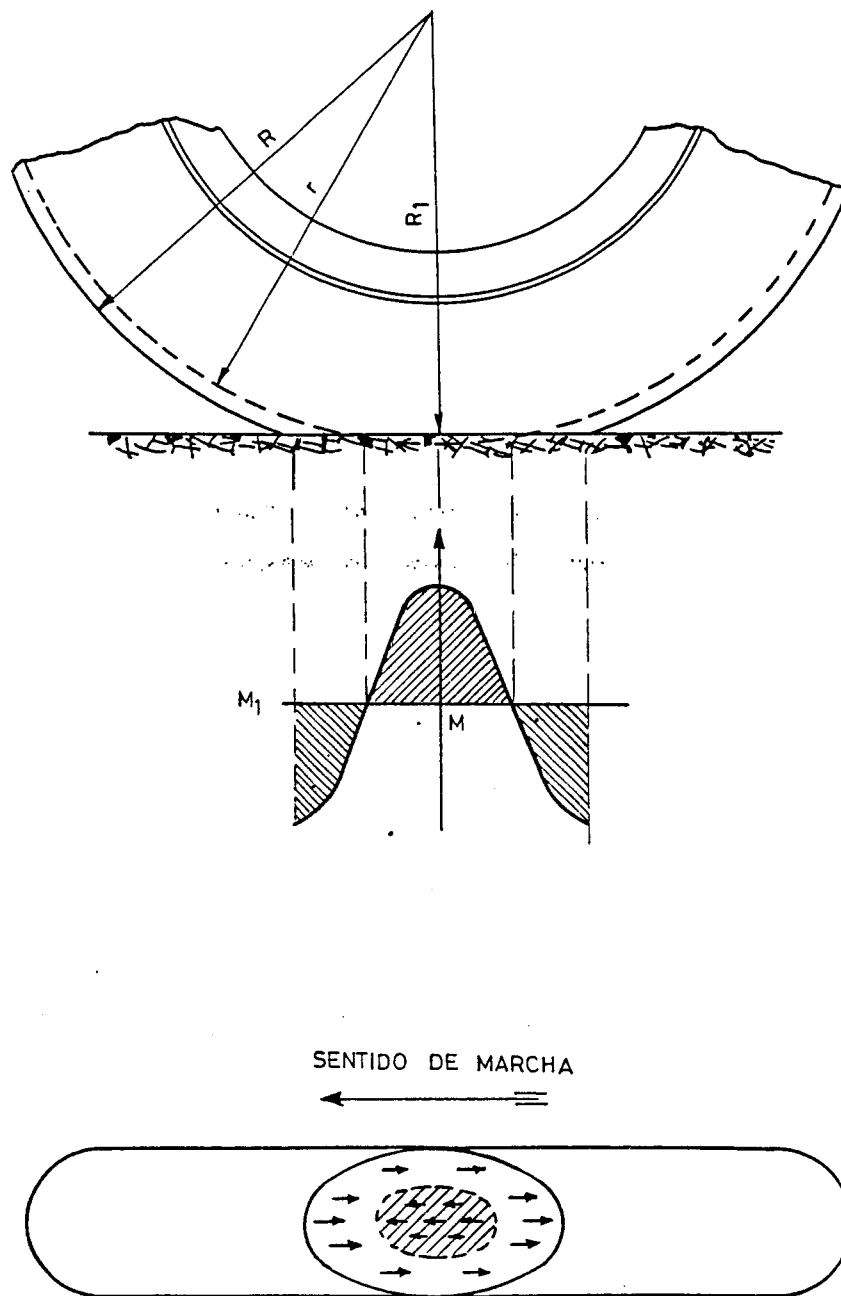


FIG. 1.4. - DISTRIBUCION DE ESFUERZOS TANGENCIALES EN LA ZONA DE CONTACTO NEUMATICO - PAVIMENTO

R' : el radio del neumático bajo una carga.

W : la velocidad angular de la rueda.

Estos esfuerzos tangenciales, cuya resultante es nula en el caso de que no exista ningún tipo de aceleración, son los responsables del desgaste de los neumáticos y de los pavimentos. Son además, generadores de ruido.

La distribución de esfuerzos se modificará si el vehículo frena o acelera, de tal forma, que la resultante equilibre el esfuerzo aplicado. En el caso de acelerar aumentará la zona de esfuerzo tangencial dirigida hacia atrás, y si frena, la zona de esfuerzo tangencial dirigida hacia adelante. En todos los casos, estos esfuerzos tangenciales serán inferiores o iguales a la presión de contacto multiplicada por el coeficiente de rozamiento.

Se ve, pues, que a cada paso del vehículo la superficie de la calzada será solicitada por esfuerzos tangenciales que tenderán a desprender las gravillas del revestimiento y a disgregar los materiales del firme, es decir, a desgastar el pavimento. Es precisamente para valorar la resistencia de las mezclas bituminosas porosas ante este tipo de deterioro, por lo que se ha desarrollado el ensayo de pérdida por desgaste, que constituye el tema de esta tesis.

1.3. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LA CAPA DE RODADURA

La evolución del tráfico con el tiempo ha hecho necesario que se preste una especial atención a mejorar las características, tanto de los vehículos como de la carretera, destinadas a ofrecer a los usuarios unas mejores condiciones de seguridad y comodidad.

A parte de los indudables progresos que se han producido en la fabricación de los vehículos, podemos también destacar mejoras en la construcción de carreteras: mejor trazado, dispositivos de seguridad, barreras, alumbrado, señalización etc. Pero fundamentalmente nos vamos a referir a las que están relacionadas con las características superficiales de la capa de rodadura:

- Adherencia.
- Uniformidad.
- Ruido.
- Características fotométricas.

1.3.1. ADHERENCIA

De todas las propiedades que debe reunir una capa de rodadura desde el punto de vista de la seguridad, indudablemente, la adherencia es la propiedad fundamental. Una adherencia adecuada nos permite mantener la trayectoria deseada y reducir la distancia de frenado.

La adherencia entre el neumático y la superficie del pavimento es debida a las interacciones moleculares que se producen en el área de contacto. Esta adherencia por interacción molecular constituye el principal sumando de la adherencia total que encuentran los vehículos en su rodadura. El otro sumando que debemos considerar es la adherencia por histéresis producida por las irregularidades del pavimento, a las que el neumático se va adaptando, contrallendose y alargandose, durante el desplazamiento del vehículo.

La adherencia por interacción molecular entre el neumático y la superficie del pavimento es un fenómeno complejo en el que intervienen diferentes factores. El contacto que se produce entre ambas superficies depende no sólo de la velocidad del vehículo, de las características del neumático y de la textura de la capa de rodadura, sino también de los factores ambientales a que está sometido el firme, en especial, de la temperatura, de la lluvia y del hielo. Así, una película de agua de cierto espesor sobre la superficie del pavimento puede llegar a reducir considerablemente, y hasta anular, el contacto entre el neumático y el pavimento.

En la adherencia por histéresis influyen fundamentalmente las irregularidades de la superficie, especialmente su forma, la velocidad del vehículo y las características de los neumáticos. Las condiciones ambientales afectan también la adherencia por histéresis en tanto en cuanto modifiquen la regularidad superficial del pavimento ó las características

del neumático.

Normalmente, la adherencia por interacción molecular predomina sobre la adherencia por histéresis. Unicamente cuando por efecto de la presencia de agua sobre el pavimento, u otras razones, se anula la adhesión por contacto, la adherencia por histéresis comienza a predominar. En estos casos la adherencia total es muy pequeña y el peligro de accidente por vuelco o deslizamiento es importante.

En general sobre una superficie seca y limpia se ~~consi-~~ que una buena adhesión entre el neumático y el pavimento y la resistencia al deslizamiento será alta. Pero cuando existe una película de agua en el área de contacto, la adhesión no se desarrollará completamente, y la resistencia al deslizamiento disminuirá. En presencia de agua, en la superficie de contacto se distinguen tres zonas típicas, recogidas en el esquema de la figura 1.5.

Zona A: El pavimento está cubierto por una película ~~con-~~ tina de agua, por lo que no hay contacto neumático-pavimento.

Zona B: Se trata de una zona de transición, en la que existe un contacto parcial en algunos puntos donde ha llegado a romperse la continuidad de la película de agua.

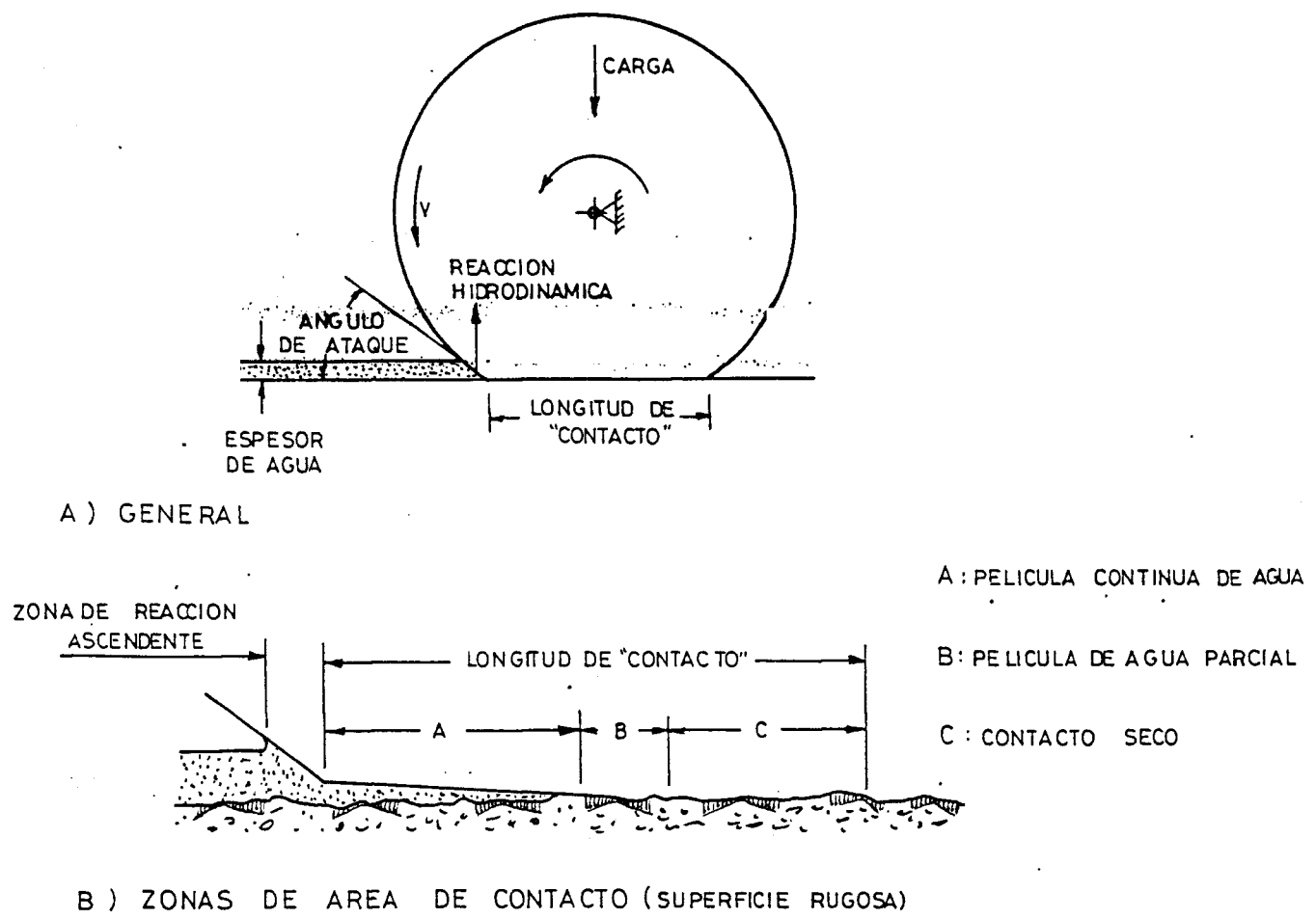


FIG. I.5.- ZONAS DE CONTACTO ENTRE EL NEUMATICO Y LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO EN PRESENCIA DE AGUA. (DESMOND F. MOORE)

Zona C: El agua ha sido expulsada y se ha establecido la adherencia entre el neumático y el pavimento.

Cuando al paso de las ruedas de los vehículos el agua sólo puede ser expulsada parcialmente, se produce una pérdida de adherencia entre el vehículo y la carretera, que a veces, puede ser total.

Por otra parte, la presencia de agua en la superficie de contacto, produce una presión dinámica sobre el neumático que tiende a despegarle de la superficie de rodadura, siendo esta presión creciente con el cuadrado de la velocidad.

Para evitar que se produzca esta pérdida parcial ó total de contacto entre ambas superficies, fenómeno este último conocido con el nombre de hidroplaneo, es preciso que a través de los canales y dibujos del neumático y del firme se pueda evacuar la película de agua interpuesta.

Es decir, en presencia de agua, para que se produzca la adherencia neumático-pavimento es necesario:

- Desplazar el agua bajo el neumático.
- Romper la película de agua, para que se establezca el contacto del neumático con el pavimento.

La capacidad del firme para evacuar el agua de la superficie del pavimento se ve favorecida empleando capas de rodadura de macrotextura rugosa y alta permeabilidad.

Una textura rugosa facilita la expulsión del agua, especialmente con neumáticos lisos. Se opone a que el agua se vaya acumulando delante del neumático, facilitando su expulsión lateral, y ofrece en caso de evacuación parcial del agua un mayor porcentaje de resaltos y zonas donde se pueden producir contactos parciales, especialmente a alta velocidad.

Si por otra parte la capa es muy permeable el agua podrá ser evacuada a través de ella y conducida lateralmente a los arceñes.

El efecto que la macrotextura y la aspereza superficial del pavimento (microtextura) tienen sobre la adherencia entre el neumático y la superficie del firme, en presencia o no de agua, puede ser evaluado mediante la realización de diferentes tipos de ensayos.

Se determina en estos ensayos la resistencia que ofrecen los distintos tipos de pavimento al deslizamiento (tabla 1.1) de un neumático en unas determinadas condiciones. Estas medidas pueden realizarse a distintas velocidades, estando la superficie del pavimento seca ó mojada con distinto espesor de la película de agua.

Los resultados obtenidos, figura 1.6, indican que a bajas velocidades, inferiores a 50 Km/h, el agua es desplazada fácilmente por la rueda. El coeficiente de resistencia al deslizamiento depende fundamentalmente de las asperezas de

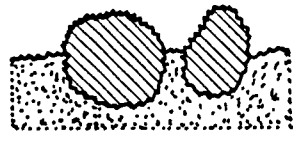
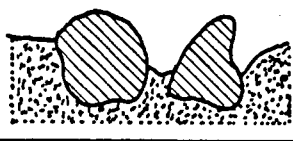
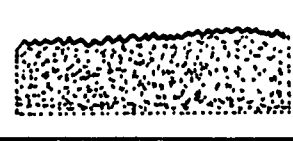
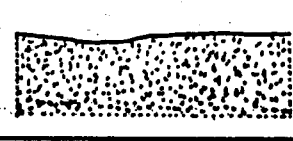
SUPERFICIE		SEGUN ESCALA DE LA TEXTURA	
		MACROTEXTURA	MICROTEXTURA
A		RUGOSA	ASPERA
B		RUGOSA	PULIDA
C		LISA	ASPERA
D		LISA	PULIDA

TABLA 1.1. - CLASIFICACION DE LOS PAVIMENTOS ATEN - DIENDO A SU MACROTEXTURA Y MICROTEXTURA SUPERFICIAL

Ⓐ PROFUNDIDAD DEL CIRCULO DE ARENA 0,3 mm.
 Ⓑ " " " " " 0,7 mm.

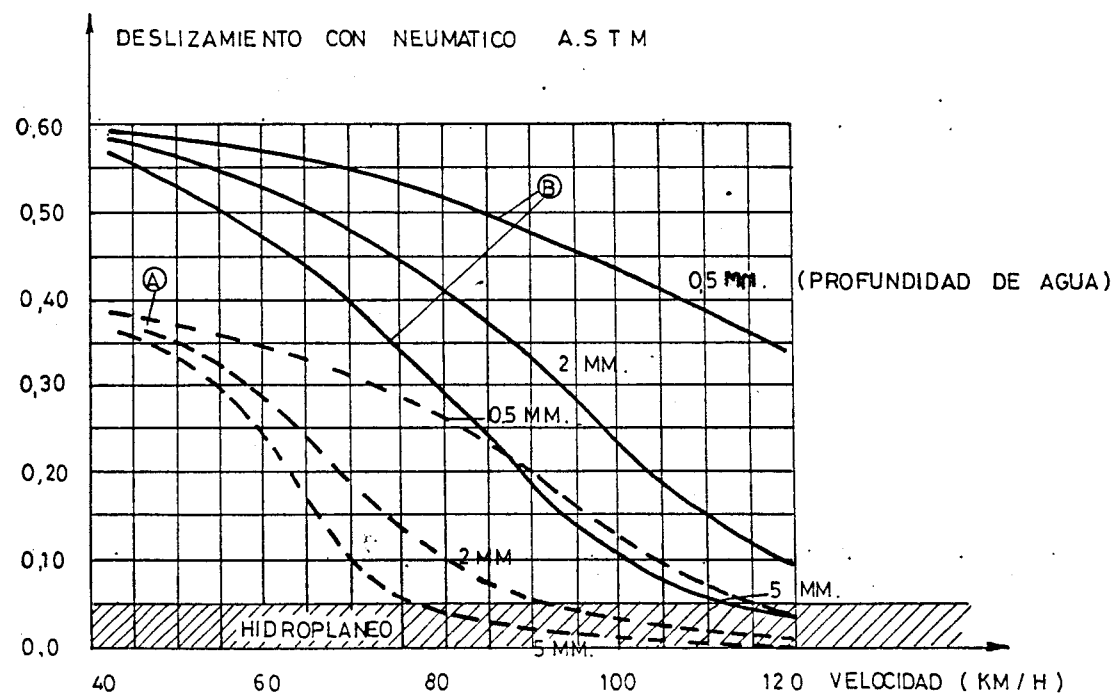


FIG. 1.6. - COEFICIENTE DE FRICCION EN RELACION CON LA VELOCIDAD PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES DE AGUA (S.HUSCHEK)

pavimento (microtextura), que rompen la película de agua y se adhieren al neumático.

Al aumentar la velocidad es más difícil desplazar el agua y la resistencia al deslizamiento disminuye. Esta pérdida será tanto más notable cuanto menor sea la macrotextura del pavimento y mayor sea el espesor de la película de agua sobre este.

En esa misma figura, puede observarse, como el nivel crítico del coeficiente de resistencia al deslizamiento, a partir del cual se considera se produce el fenómeno del hidroplaneo, se alcanza en pavimentos de macrotextura rugosa con espesores de agua superiores a 5 mm y a altas velocidades, mientras que en pavimentos de macrotextura lisa, es posible que se produzca el fenómeno de hidroplaneo con espesores de 1 mm y una velocidad de 90 Km/h.

Por lo tanto, una superficie rugosa y a su vez áspera es la más adecuada para carreteras en las que se desarrollan altas velocidades. En la tabla 1.2 se recogen las recomendaciones francesas sobre la macrotextura que deben de tener los pavimentos de acuerdo con las condiciones de tráfico de proyecto.

La acción del tráfico, en especial el pesado, tiende a modificar la textura del pavimento. Si la resistencia al pulimento del árido es baja, la microtextura pasara de aspera a pulimentada en poco tiempo. También se puede ver modificada la macrotextura de la mezcla por exudación del ligante,

PROFUNDIDAD DEL CIRCULO DE ARENA (mm)	EVALUACION DEL PAVIMENTO
<0,2	Textura muy fina. A proscribir.
0,2 - 0,4	Textura fina. Sólo en tramos donde raramente se superen los 80 km/h. (P. ej.: áreas urbanas).
0,4 - 0,8	Textura media. Para tramos normales con velocidades moderadas. (80-120 km/h).
0,8 - 1,2	Textura gruesa. Para tramos con velocidades superiores a 120 km/h.
>1,2	Textura muy gruesa. Para casos especiales con peligro de deslizamiento.

TABLA 1.2. RECOMENDACIONES FRANCESAS SOBRE MACROPOTEXURA.

CPA	CALIFICACION	COMENTARIOS
<0,35	Deficiente	En principio no debe usarse en capas de rodadura.
0,35 - 0,45	Regular	A emplear sólo cuando las características del trazado y del tráfico son favorables.
0,45 - 0,55	Bueno	A emplear cuando las características del trazado y del tráfico son desfavorables (curvas, intersecciones, alta velocidad, tráfico denso).
>0,55	Muy Bueno	

TABLA 1.3. RECOMENDACIONES FRANCESAS PARA EL COEFICIENTE DE PULIMENTO ACELEPADO.

reamasado de la mezcla ó por desgaste del mortero, especialmente ésto último en pavimentos de hormigón.

En la tabla 1.3 se recogen recomendaciones francesas relativas al valor del coeficiente de pulimento acelerado del árido empleado en la construcción de pavimentos bituminosos en función del uso del mismo. La norma española, recomienda un valor mínimo de 0,45 para tráfico pesado y 0,4 para tráfico ligero.

1.3.2. REGULARIDAD SUPERFICIAL

La regularidad superficial de un pavimento, su uniformidad, es la propiedad principal que requiere un usuario cuando circula por una carretera, ya que de ella va a depender su comodidad.

Para que una carretera resulte confortable a los usuarios a la vez que segura para la circulación de los vehículos, la superficie del pavimento no deberá presentar ningún tipo de resalto, oquedades u ondulaciones que produzcan en el interior del vehículo en marcha aceleraciones que afecten a los pasajeros.

La falta de regularidad de un firme se puede definir como la diferencia existente entre la superficie teórica y la real del pavimento.

El estudio de la regularidad superficial de un pavimento, separación vertical entre la superficie teórica y la real, es un problema tridimensional, sin embargo, por simplicidad, sólo se verifica la regularidad de su perfil longitudinal y transversal.

La falta de regularidad en el perfil longitudinal es causa de cabeceos en los vehículos en movimiento, mientras que la falta de regularidad transversal origina el balanceo de los mismos.

Por otra parte, al hablar del efecto de la regularidad superficial del pavimento sobre la comodidad de los usuarios que circulan sobre él, hemos de tener en cuenta otros factores que también influyen ó al menos condicionan este efecto. En primer lugar, el grado de comodidad de una vía es muy relativo, puesto que cada uno lo aprecia a través del vehículo sobre el que circula, y su juicio dependerá de numerosos factores: velocidad, modo de conducir, suspensión del vehículo, duración del viaje, etc. Esto explica que no haya podido establecerse una correlación clara entre las medidas de la regularidad superficial de un pavimento y las apreciaciones sobre su comodidad dadas por los diferentes usuarios del mismo.

Generalmente se cuantifica la noción de comodidad por las aceleraciones experimentadas por los pasajeros del vehículo, referidas a unas gamas de frecuencias dadas. Estu-

dios ergonómicos han puesto de manifiesto que el efecto de incomodidad que producen los movimientos de cabeceo y balanceo en los viajeros dependen no sólo de las aceleraciones que los producen, sino también de la frecuencia de los movimientos oscilatorios a que se ven sometidos éstos.

Estos estudios indican que las frecuencias que resultan más molestas para los usuarios de los vehículos están comprendidas entre 2 y 15 Hz.

Para esta gama de frecuencias, los umbrales de aceleración que producen en los viajeros sensación de incomodidad, molestias o desordenes físicos, son los siguientes:

umbral de percepción	-	entre 0,01 y 0,15 m/s ²
umbral de molestias	-	entre 0,4 y 1 m/s ²
umbral de desordenes físicos	-	a partir de 2 m/s ²

Además, es dentro de esta gama de frecuencias donde se suelen producir fenómenos de resonancia: frecuencias de 1-3 Hz para la masa suspendida del vehículo y entre 5 y 15 Hz, para el pasajero sentado sobre su asiento. Los movimientos oscilatorios comprendidos fuera de estas frecuencias, resultan muy amortiguadas por efecto de la suspensión. Esto puede apreciarse en la figura 1.7, donde se presenta una función de transferencia tipo.

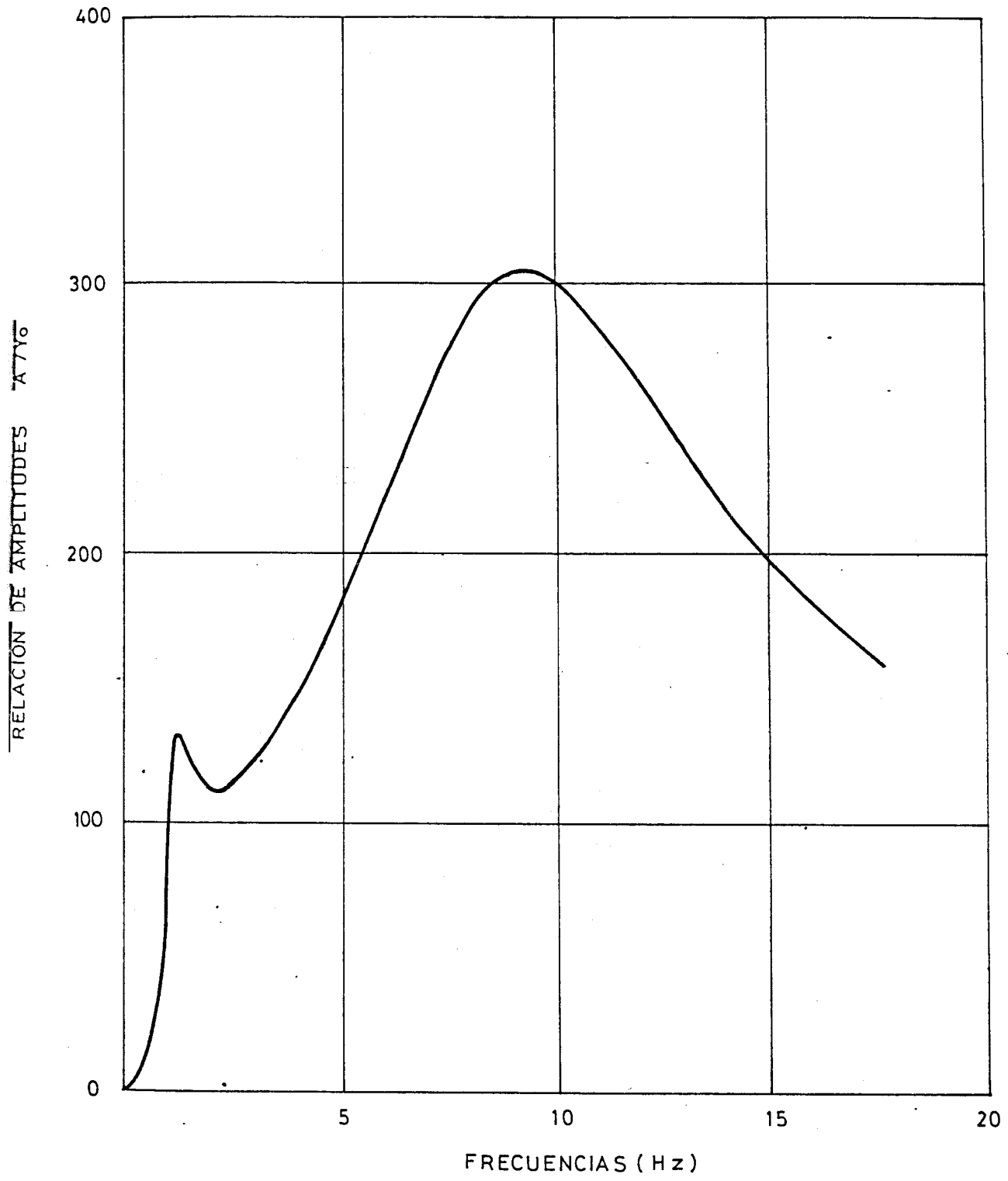


FIG. I. 7. - VARIACION DE LA RELACION DE AMPLITUDES DE LA ACCELERACION Y EL PERFIL DE LA CARRETERA CON LA FRECUENCIA DE OSCILACION

Las posibles ondulaciones que presenta el firme son pues causa de molestias e incluso de riesgo. Dependiendo su incidencia de la amplitud y frecuencia de las vibraciones que provoquen. Para estudiar el efecto que las irregularidades del perfil longitudinal tienen sobre la comodidad suele considerarse por separado la contribución de las diferentes ondas que lo componen.

Por una parte, se consideran las ondas de longitud corta (1-3 m), que son, para las velocidades normales de circulación, las que fundamentalmente inciden sobre la seguridad del vehículo, figura 1.8 y tabla 1.4. Para estas longitudes de onda, el Comité Técnico de la O.C.D.E. sobre características superficiales recomienda limitar a 6 mm la amplitud de la oscilación, si se quieren eliminar las sensaciones de incomfortabilidad en vehículos ligeros, y a 1 mm, si se quiere incluso eliminar su percepción por los viajeros. En la Tabla 1.5 se recoge la tolerancia de acabado de distintas administraciones europeas para longitudes de onda de 3 a 5 m.

Para longitudes de onda media (13-40 m), que son las que inciden más directamente sobre la comodidad de los viajeros, este comité fija unos valores en la amplitud de las oscilaciones para los niveles de confortabilidad y percepción, de 50 y 5 mm, respectivamente.

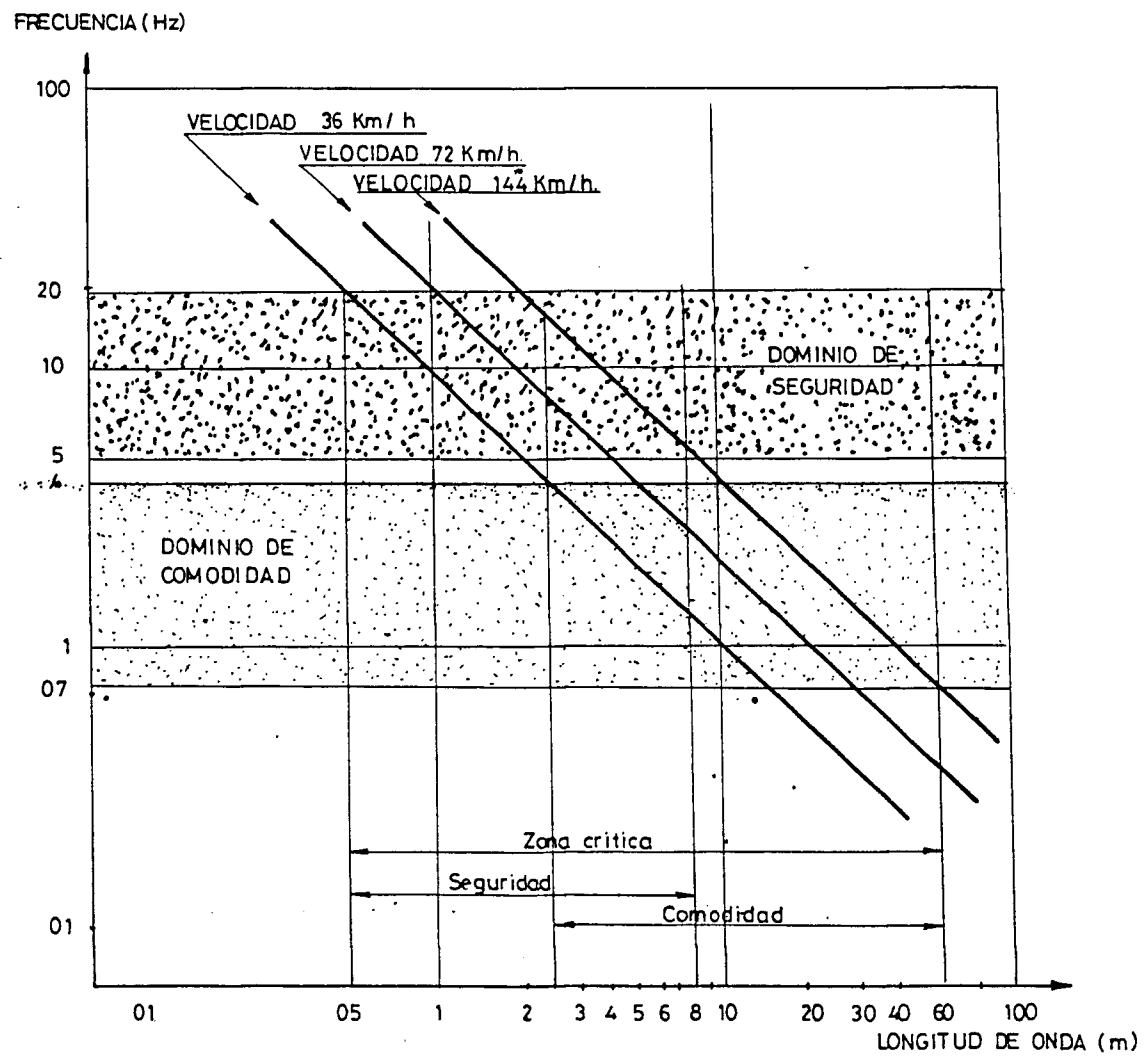


FIG.1.8.- ANALISIS DE LAS LONGITUDES DE ONDA QUE AFECTAN LA COMODIDAD Y LA SEGURIDAD EN FUNCION DE LA VELOCIDAD

VELOCIDAD (KM/H)	LONGITUDES DE ONDA LIGADAS A LA SEGURIDAD (m)	LONGITUDES DE ONDA LIGADAS A LA COMODIDAD (m)
40 - 60 zona urbana	0.6 a 1.6	3.7 a 16.6
90 carreteras nacionales	1.25 a 2.5	8.3 a 25
130 autopista	1.8 a 3.5	12 a 25

TABLA 1.4. GAMAS DE LONGITUDES DE ONDA QUE INCIDEN EN LA COMODIDAD Y SEGURIDAD EN FUNCION DE LA VELOCIDAD, (BRILLET-CCDE).

TIPO DE CAPA	BELGICA	ESPAÑA		FRANCIA						GRAN BRETAÑA	ITALIA	POLONIA		SUECIA	R.F. ALEMANA	YUGOSLAVIA	
	REGLA 3 m	REGLA 3 m	NIVELACION	REGLA 3 m			REGLA 4 m			NIVELACION	REGLA 4 m	REGLA 4 m	PERFIL LONG.	PERFIL TRANS.	REGLA 5 m	REGLA 4 m	REGLA 4 m
				OBRA IMPOR- TANTES	OBRA LONG.	OBRA TRANS.	OBRA LONG.	OBRA TRANS.	OBRA LONG.								
EXPLANADA	20	+0 ₁ - 30	15	20	30	40	20	30	40	+ 20 ₁ - 30		20	20				
SUBBASE	15	+0 ₁ /5 DEL ESPESOR	10							+ 10 ₁ - 30		18	18				10
BASE	10	+0 ₁ /5 ESP.	10	10	15	20	15	15	20	15	15	15	15	12 ⁽²⁾ . 9 ⁽³⁾	20 ⁽²⁾ . 10 ⁽³⁾	8 ⁽³⁾	
CAPA INTERMEDIA	7	15	8	5	8	10	5	8	10			6	6		10 ⁽⁴⁾ . 6 ⁽⁵⁾	6	
RODADURA (MEZCLA)	4	10	5	3	5	7	3	5	7	6		4	5	6	4 . 10 ⁽¹⁾	4	
RODADURA (HORMIGON)	4	6	3														

(1) EN CASO DE PUESTA EN OBRA MANUAL

(2) BASE GRANULAR

(3) BASE BITUMINOSA O DE HORMIGON

(4) SOBRE BASES SIN ESTABILIZAF.

(5) SOBRE BASES ESTABILIZADAS

TABLA 1.5. DIFERENTES TOLERANCIAS DE ACABADO (MM) EN LOS DISTINTOS PAISES DE EUROPA.

En la tabla 1.6 aparecen los valores dados por la administración francesa para la amplitud de las oscilaciones relativas a los niveles de aceptabilidad e inaceptabilidad, obtenidos para diferentes longitudes de ondas a partir de una encuesta entre los usuarios.

Las ondas de gran longitud (mayores de 40 m) no son tenidas en cuenta normalmente al hablar de la regularidad superficial. Estas ondas no afectan a la comodidad, pero producen en el usuario sueño y cansancio del que el conductor no es consciente, por lo que pueden ser peligrosas y producir graves accidentes.

La regularidad del perfil transversal juega igualmente un importante papel, por los movimientos de balanceo que las deformaciones imponen al vehículo. Tienen también un efecto perturbador sobre la trayectoria del vehículo, cuando existen roderas que produzcan un efecto de guía.

Por otra parte, la falta de una buena regularidad transversal, impide la adecuada evacuación del agua de la superficie del pavimento. La presencia de roderas en el firme hace que el agua se acumule en ellas aumentando el riesgo de deslizamiento y el posible vuelco del vehículo por hidroplaneo. La profundidad de las roderas se limita a 0,5 cm en concepto de comodidad y a 3-4 cm por seguridad.

	ONDAS CORTAS (1 a 3,3 m)	PEQUEÑAS ONDAS (3,3 a 13 m)	GRANDES ONDAS (13 a 40 m)
UMBRAL ACEPTABLE	2 mm	4 mm	14 mm
UMBRAL INACEPTABLE	3 mm	8,5 mm	27 mm

TABLA 1.6. AMPLITUDES MEDIAS ACEPTABLES E INACEPTABLES, OBTENIDAS MEDIANTE ENCUESTAS DE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS FRANCESES.

1.3.3. RUIDO

Si bien no es el problema más grave desde el punto de vista de la seguridad, el ruido se reconoce como una de las mayores molestias a la hora de optimizar los revestimientos.

En los estudios sobre las molestias causadas por la emisión del ruido, es necesario tener en cuenta tanto el ruido que se produce en el interior del vehículo como el que éste emite al exterior.

El ruido exterior provocado por los vehículos al circular puede proceder de varias fuentes. Por ello, es corriente distinguir entre el ruido de rodadura y el ruido del grupo propulsor. Este último está compuesto por el ruido del motor, el ruido de admisión, el ruido de escape, el ruido del ventilador, el ruido del tubo de escape y el ruido de transmisión hasta el eje tractor. Por su parte, el ruido de rodadura comprende el ruido de rozamiento entre los neumáticos y la superficie de la carretera, el ruido aerodinámico y los ruidos de la carrocería.

El ruido interior depende del ruido emitido por el vehículo al circular y de los elementos amortiguadores y aislantes existentes entre los elementos emisores y el habitáculo.

La suspensión y el aislamiento acústico permiten una disminución del nivel sonoro, pero por contra, existen ciertas

frecuencias que pueden ser ampliadas por efecto de la resonancia, sobre todo, cuando se presentan revestimientos con una cierta periodicidad en su textura. Por ello, no siempre existe una relación entre el ruido interior y exterior del vehículo. En la tabla 1.7 se recogen estas diferencias para distintos tipos de pavimento.

Referente al ruido exterior, las características superficiales de pavimento influyen también notablemente en los niveles de ruido emitidos, principalmente sobre el de rodadura debido al contacto neumático pavimento.

De las comparaciones efectuadas por el TRRL entre ruido de rodadura y el ruido total, ver tabla 1.8 se ha podido deducir que el primero es la fuente sonora dominante en el caso de vehículos ligeros y que también contribuye en gran medida al ruido producido por los vehículos pesados. En la tabla 1.9 se recogen las variaciones en el nivel del ruido total al cambiar el ruido del motor o el de rodadura.

Parece lógico pensar que los avances tecnológicos en la industria del automóvil permitirán obtener reducciones en el ruido de los motores del orden incluso de los 10dBA, pero sin embargo, para el caso de un tráfico compuesto esencialmente por vehículos ligeros, los beneficios de tal reducción no serán sensibles, sino van acompañados de una reducción del ruido de rodadura.

TIPO DE PAVIMENTO	NUMERO DE SECCIONES ESTUDIADAS	DIFERENCIAS MEDIAS DE NIVEL SONORO, EN dB(A)	
		EXTERIOR	INTERIOR
Pavimento clásico (nivel de referencia)	3	0	0
Mezclas abiertas	2	+2	+1
Pavimento de hormigón	4	+2	+2
Tratamientos superficiales	6	+2	+3
Pavimentos de hormigón con engravillado	6	+6	+5
Hormigón estriado transversalmente	5	+6	+3
Adoquinado	2	+7	+16

TABLA 1.7. DIFERENCIAS DE NIVEL SONORO EN dB(A), PARA DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMIENTOS (BRILLET).

VELOCIDAD DE LOS VEHICULOS (KM/H)	CATEGORIA DE VEHICULO	NIVELES DE RUIDO		
		RODADURA	MOTOR	TOTAL
20	PESADO	61	78	78
	LIGERO	58	64	65
80	PESADO	79	85	86
	LIGERO	76	74	78

TABLA 1.8. NIVELES DE RUIDO OBTENIDOS CON VEHICULOS LIGEROS Y PESADOS CIRCULANDO A DIFERENTES VELOCIDADES (TRRL)

	VARIACION EN EL RUIDO TOTAL DEL VEHICULO (dBA)					
	a 20 Km/h		a 80 Km/h			
	PESADOS	LIGEROS	PESADOS	LIGEROS	PESADOS	LIGEROS
Ruido del motor	+5 dBA	+4	+4	+4	+3	
	-5 dBA	-4	-4	-4	-1	
	-10 dBA	-6	-6	-6	-2	
Ruido de rodadura	+5 dBA	+2	+2	+2	+4	
	-5 dBA	-1	-1	-1	-2	
Ruido del motor y ruido de rodadura	-10 dBA	-9	-9	-9	-6	
	-5 dBA					

TABLA 1.9. VARIACIONES EN EL NIVEL DE RUIDO TOTAL AL CAMBIAR EL RUIDO DEL MOTOR Y EL DE RODADURA.

Entre los diferentes factores que contribuyen a la generación del ruido de rodadura, los ruidos originados por la transmisión y la carrocería suelen carecer de importancia en los vehículos en buen estado. El ruido aerodinámico tampoco resulta ser un componente significativo del ruido de rodadura. Queda, por tanto, como factor principal del ruido de rodadura, el rozamiento entre el neumático y la superficie del firme.

El ruido que se produce en el contacto neumático pavimento, es debido a los siguientes mecanismos:

-La puesta en vibración de los neumáticos producida por los movimientos verticales debidos a la textura del revestimiento y de los neumáticos.

-Las excitaciones locales generadas por la sucesión de adherencia y deslizamiento producida por la deformación del neumático.

-Fenómenos de compresión y expansión de bolsas de aire aprisionadas entre los dibujos del neumático y los huecos del revestimiento.

-Los ruidos de origen aerodinámico causados por la turbulencia producida por los dibujos del neumático en movimiento.

Experimentalmente se ha obtenido que sobre estos mecanismos de ruido los factores que más influyen son los siguientes:

La velocidad: Los estudios realizados en vehículos pesados y ligeros sobre la influencia de la velocidad en el nivel de ruido, han puesto de manifiesto que el nivel de ruido es creciente con la velocidad. Pudiéndose establecer buenas correlaciones entre los niveles de ruido obtenidos y el logaritmo de la velocidad de circulación. En la tabla 1.10 se recoge esta relación obtenida por GEOTMA para tráfico interurbano.

Rugosidad y textura: Los primeros estudios parecían indicar que el ruido de rodadura crecía con la rugosidad. En posteriores trabajos se ha observado que no siempre un aumento de la macrotextura produce un aumento del ruido.

Los resultados obtenidos muestran que el ruido de contacto neumático-pavimento está ligado a unas longitudes de onda críticas de la textura. Con valores de esta longitud de onda próximos a 80 mm se produce un aumento del ruido de rodadura en la gama de bajas frecuencias (≤ 1000 Hz).

Asimismo, cuando la longitud de onda esta próxima a 3 mm, se produce una disminución del ruido de rodadura en la gama de altas frecuencias (≥ 1000 Hz).

Una explicación de este distinto comportamiento para diferentes longitudes de onda se puede obtener al analizar los

SITUACION URBANA	-AUTOMOVILES Y FURGONETAS	70
	-CAMIONES LIGEROS Y PESADOS	83
SITUACION INTERURBANA	-AUTOMOVILES Y FURGONETAS Valor medio de máximas media tercio superior	$L_M = 36.5 LgV + 3.7$ $L_M = 36.5 LgV + 7$
	-CAMIONES LIGEROS Y PESADOS Valor medio máximas Media tercio superior	$L_M = 23.6 LgV + 38.6$ $L_M = 23.5 LgV + 40.2$

V = velocidad en Km/h.

L_M = nivel sonoro máximo.

TABLA 1.10. NIVELES SONOROS MAXIMOS PARA VEHICULOS ESPAÑOLES EN FUNCION DE LA VELOCIDAD Y DE LA SITUACION
(Niveles base a 15 m de distancia en dB(A) (GEOTMA).

dos mecanismos fundamentales que producen el ruido de rodadura: la vibración de los neumáticos debida a la textura y los fenómenos de compresión y expansión de las bolsas de aire aprisionadas entre los dibujos del neumático y los huecos del revestimiento. Un examen del primer mecanismo muestra que, independientemente de la profundidad de las irregularidades, la deformación del neumático son máximas cuando la longitud de huella de este se aproxima a la longitud de onda del revestimiento. Para valores próximos a 80 mm se cumple esta condición. En el segundo mecanismo, la formación de bolsas de aire se ve coartada al existir numerosos canales de contacto que comunican el aire aprisionado entre neumático y pavimento con el exterior, siendo por tanto este ruido menor cuanto mas irregularidades presente el pavimento.

Los materiales: Estudios recientes del TRRL han mostrado que el nivel de ruido emitido por una carretera de hormigón es ligeramente superior al emitido por carreteras con pavimento de mezcla bituminosa, midiéndose diferencias del orden de 1dB(A). Atribuido a una mayor rigidez del pavimento de hormigón frente a las de mezcla bituminosa.

Referente a límites admitidos para valores máximos del nivel del ruido, estos son fijados en función de la ubicación y de la hora.

Por el día, en las proximidades de las fachadas de los edificios, se fijan valores que oscilan desde 55 dBA a un máximo de 80 dBA. Durante la noche los umbrales son inferiores en 10 dBA a los del día.

En la tabla 1.11 se recogen algunas de las limitaciones existentes, en diversos países.

Las tendencias actuales se encaminan a que el ruido producido por el contacto neumático-carretera debe de ser, cuantitativamente, semejante al producido por los motores.

Las actuaciones tendientes a aminorar el ruido han estado dirigidas al empleo de pavimentos de textura poco profunda que, como contrapartida, resultan poco seguros a altas velocidades. Afortunadamente es posible construir pavimentos que pueden ser simultáneamente poco ruidosos y seguros a altas velocidades. Las características que deben reunir estos pavimentos son las siguientes:

-Irregularidades destacadas con longitudes de onda inferiores a 3 cm.

-Irregularidades poco destacadas con longitudes de ondas superiores a 3 cm.

CEE	CEE NUEVOS LIMITES (1)	ESTADOS UNIDOS		SUIZA (1977/82/1986)	JAPON (79/OBJETIVOS)	PAISES ESCANDINAVOS (OBJETIVOS, 1985)	ALEMANIA PROPUESTA 1985	GRUPO DE TRABAJO PARA VEHICULOS DE MOTOR (WP-29) (PROPUESTA 1985)
		ACTUALES	PROPUESTA					
82	80	86(4)	-	80/77/75	81/78	76	75	77
84	81	-	-	81/79/77	81/78	77	78	79
84	81	-	-	81/79/77	81/78	77	76	79
89	82	-	89-83	85/82/80	86/83	80	80	80
81	85(2)	-	89-83	87/84/82	86/83	80	80	80(3)
89	86	89	86	86/84/82	86/83	80	80	80(3)
91	88	89	86	88/86/84	86/83	80	80	80(3)
-	86	81(4)	89-86	85/85/89	81/78	80	-	-

- (1) ESTOS VALORES ADMITEN UNA TOLERANCIA DE 1dB.
- (2) A PARTIR DE 1982.
- (3) LIMITES A APLICAR DESPUES DE 1985
- (4) EN CALIFORNIA ACTUALMENTE

TABLA 1.11. LIMITACIONES ACTUALES Y FUTUROS DE LOS VALORES DE EMISION SONORA DE LOS VEHICULOS A MOTOR. (OCDE).

-Si es posible textura abierta porosa.

-Ausencia de estrías transversales.

La presencia de irregularidades destacadas con longitudes de onda inferiores a 3 cm evitan la formación de bolsas de aire entre el neumático y el pavimento. La ausencia de irregularidades destacadas con longitudes de onda superiores a 3 cm, aminora la emisión de ruidos de baja frecuencia. El empleo de materiales de textura porosa, amortiguan el ruido emitido por el peso de los vehículos.

Por otra parte, las características del neumático pueden también variar el nivel sonoro, siendo las características fundamentales que producen esta variación las siguientes:

-Las dimensiones del mismo. El nivel sonoro se reduce cuando se disminuye la anchura y aumenta el diámetro.

-La estructura. Los neumáticos de estructura radial son menos ruidosos.

-Las características de la cubierta. Algunos ruidos de alta frecuencia pueden ser amortiguados, mejorando las características mecánicas de las gomas empleadas en la fabricación de los neumáticos.

-El dibujo. El diseño de este influye asimismo en el nivel acústico.

Con relación al estado del pavimento, se ha comprobado que un revestimiento mojado tiene un nivel sonoro superior a un revestimiento seco, este fenómeno es sensible sobre todo en frecuencias medias y altas. Asimismo, un revestimiento con una textura favorable para la evacuación del agua superficial, aparte de mejorar las condiciones de deslizamiento, mejora el nivel de ruidos respecto al producido por un pavimento liso.

El estado de deterioro de un pavimento aumenta también el ruido de contacto neumático-carretera, sobre todo, cuando existe deterioro que conduce a una textura no homogénea.

El comportamiento ante el ruido y la adherencia de los diferentes tipos de pavimentos actualmente empleados en la construcción de firmes ha sido recogido por M. Brillet en la tabla 1.12. En ella se califica de 0 a 4 la respuesta de diferentes tipos de pavimentos, así como el interés de su empleo desde el punto de vista económico.

1.3.4. CARACTERÍSTICAS OPTICAS

A la hora de optimizar un revestimiento de una carretera tanto desde el punto de seguridad como de comodidad, además de exigir una adecuada adherencia, regularidad y un nivel sonoro admisible, es necesario exigir unas características ópti

TÉCNICA	PARA DISMINUIR EL RUIDO	PARA AUMENTAR LA ADHERENCIA	ECONOMICA
Tratamientos superficiales clásicos	0	4	4
Tratamientos alta calidad	1 a 3	4	0
Revestimientos clásicos	2	2	2
Revestimientos abiertos	4(a)	3	2
Revestimiento con gravillado	1	3	1 a 2
Mezclas finas	4(b)	0	2
Hormigón sin tratamiento	2	0	2
Hormigón estriado transversalmente	0(c)	4	1
Hormigón estriado longitudinalmente	2	3	1
Hormigón con engravillado	0	3	1
Adoquinado	0	0	0

- (a) RESULTADOS A CONFIRMAR MENOR INTERES PARA DISMINUIR EL RUIDO INTERIOR.
- (b) NIVEL SONORO RELATIVAMENTE ELEVADO EN ALTAS FRECUENCIAS Y SOBRE REVESTIMIENTO MOJADO.
- (c) DEPENDE DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRIA.

El interés creciente se mide de 0 a 4.

TABLA 1.12. SITUACION ACTUAL DE LA RELACION RUIDO/DESPLAZAMIENTO (BRILLET).

cas que nos permitan una buena percepción, tanto de día como de noche, de los posibles obstáculos y señales, ya que son factores que inciden fundamentalmente en la seguridad de los usuarios.

Estudios realizados en diversos países, y recogidos por Serres en XVII Congreso Mundial de Carreteras, han llegado a la conclusión que para intensidades de tráfico iguales:

- El índice de accidentes durante la noche es del orden de 2 a 3 veces superior al del día.
- Los accidentes de noche son generalmente más graves que los de día.
- Las salidas de la carretera son más frecuentes de noche que de día, así como los choques por alcance, colisiones frontales y laterales, accidentes con peatones, animales y obstáculos laterales.

Esta incidencia del número y la gravedad de accidentes se ve potenciada negativamente cuando a la noche se la suman condiciones climatológicas desfavorables.

La percepción de un objeto de unas dimensiones dadas depende del contraste que este objeto presenta sobre el fondo sobre el que destaca, y para los usuarios de las carreteras este fondo es el revestimiento superficial de los mismos.

Matemáticamente el contraste se define como:

$$C = \frac{L_0 - L_f}{L_f} 100$$

donde

C = contraste en tanto por ciento

L_0 = luminosidad del objeto en Lux

L_f = luminosidad del fondo en Lux.

El valor de C a partir del cual se puede apreciar un objeto depende de numerosos factores, entre los que podemos citar el tamaño del objeto, posibles deslumbramientos, etc. Pero en general para las condiciones normales este valor se puede encontrar próximo al 20%.

Si comparamos las características ópticas de una carretera seca y mojada, observamos que estas varían notablemente. Cuando la carretera está seca la reflexión se realiza de una forma difusa, figura 1.9, pero si sobre la carretera tenemos una película de agua, esta actúa como un espejo, pasando de una reflexión difusa a una especular, incidiendo negativamente en la visibilidad. Asimismo, se aumenta el peligro de deslumbramiento por los focos de los vehículos que circulan en dirección contraria y por las superficies luminosas, tales como anuncios luminosos ó los propios puntos de alumbrado público.

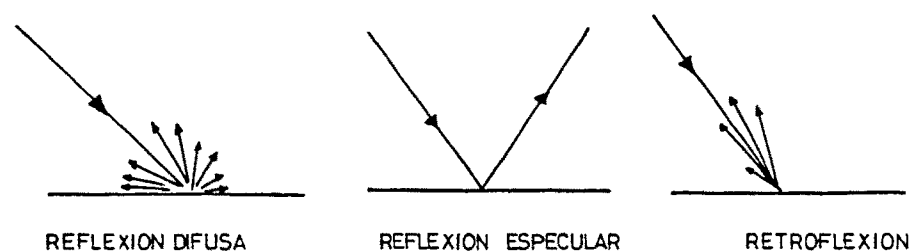


FIG.1.9.- PRINCIPALES MODOS DE REFLEXION DE LA LUZ

Esto nos indica que una carretera que presente una buena evacuación de agua superficial además de incidir favorablemente en la adherencia mejora notablemente las características ópticas mismas. Las mezclas bituminosas porosas son en estos dominios muy favorables, ya que tienen una gran adherencia y facilitan la evacuación del agua superficial.

1.4. EMPLEO DE MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS COMO CAPA DE RODADURA

El empleo de mezclas bituminosas porosas, mezclas de granulometría abierta, en la construcción de firmes de carretera, no constituye en sí una novedad: mezclas abiertas en frío, mezclas gruesas, macadan bituminoso por penetración; pero sí lo es el hecho de emplearlas como capa de rodadura, en carreteras solicitadas por un tráfico rápido y pesado, con el fin primordial de mejorar la seguridad y comodidad del movimiento de los vehículos.

El empleo de mezclas bituminosas porosas en capa de rodadura surge como un intento de las diferentes administraciones y técnicos de carreteras para mejorar las condiciones de seguridad y comodidad de rodadura de los vehículos, principalmente, con lluvia, ó pavimento mojado, y/o a altas velocidades, condiciones adversas, muy críticas, que con frecuencia concurren y que son origen de una alta tasa de los accidentes mortales.

Consiste en esencia, en emplear como capa de rodadura una capa de mezcla bituminosa porosa de poco espesor, 3-4 cm, de una alta porosidad, 18-25% de huecos, que, colocada directamente sobre la capa intermedia del pavimento, tiene la función de absorber y evacuar a su través, hasta los arceles, el agua caída sobre el firme. Consiguiendo una superficie de rodadura libre de agua en todo momento, incluso con lluvia, salvo que la intensidad y duración del agua sea tan intensa o prolongada que produzca su saturación. Incluso en estos momentos, la capa de mezcla porosa ofrece, gracias a su permeabilidad, una mayor facilidad para evacuar el agua en la zona de contacto neumático-pavimento que las capas de rodadura convencionales, impermeables, que evacúan toda el agua de la zona de contacto superficialmente. En las capas de rodadura porosas, parte de esta agua, es eliminada a través de sus poros, impulsada por los neumáticos.

En el esquema de la figura 1.10 puede verse una sección estructural de un firme de carretera en el que ha sido empleada una mezcla bituminosa porosa como capa de rodadura, y como el agua es evacuada a su través hasta los arcenes. Para que esto pueda realizarse adecuadamente, la capa de mezcla porosa ha de estar apoyada sobre una superficie regular, que no tenga ni resaltos ni oquedades que detengan el agua. Normalmente, esta superficie de apoyo es la capa intermedia de un firme flexible, pero también puede ser un pavimento de hormigón o cualquier otra superficie impermeable, con la regularidad y pendiente adecuada.

1.4.1. EVOLUCION Y DESARROLLO DEL EMPLEO DE MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS EN CAPA DE RODADURA

El empleo de las mezclas bituminosas porosas en firmes como capa especial de rodadura no empieza a considerarse y experimentarse hasta los años 50, y es a partir de los años 70 cuando su empleo cobra un interés generalizado. En la tabla 1.13 se recoge, de acuerdo con los datos proporcionados por los diferentes países al Comité de Características Superficiales del XVI Congreso Mundial de Carreteras (Viena 1978), las fechas iniciales en que empezaron a emplear este tipo de capa de rodadura especial, así como las granulometrías y dosificaciones y espesores normalmente empleados.

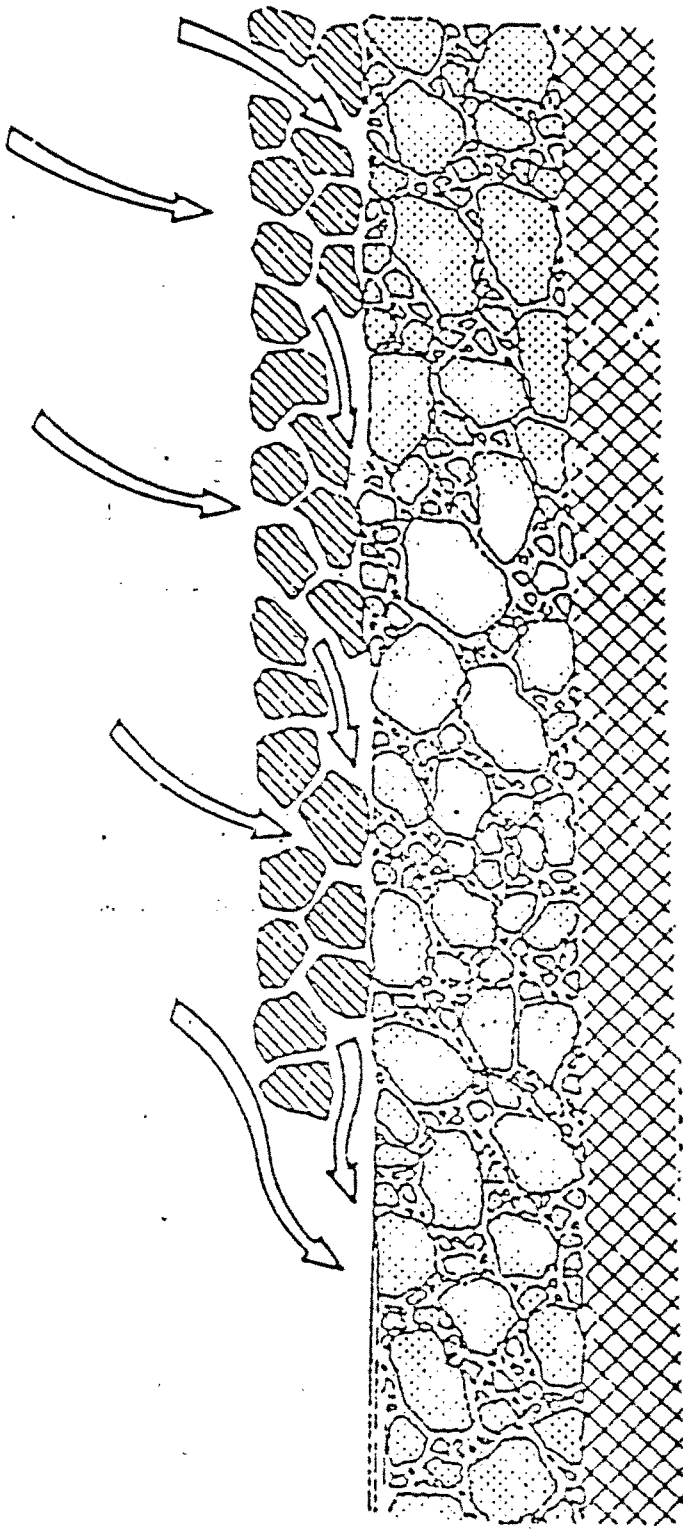


FIG. I. IO.- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CAPAS DE RODADURA DRENANTE

Características	Bélgica		Dinamarca	Estados Unidos		Francia	Holanda	Italia	Japón	Noruega	Reino Unido			Sudáfrica				
	0/16	0/22	1973	FHWA	FAA	RN721	SCW	Istrana	Route	Fornebu	0/10		0/19		1953	Actualmente		
	≥ 4	≥ 5	4	1.3-2.5	1.9	4	3.2-4.5	2.5	3.4	2.5	BS	PSA	TRRL	BS	TRRL	Gruesa	Fina	
Espesor (cm)																		
% Pasa																		
Tamiz (mm)																		
# 0																		
25																		
19			100				100	100	100					100	100			
														90-100	90-100			
22																		
16																		
13																		
10			45	100	100	100		98	95-100	100				100	100			
			32	95-100	80-100	97		81		90								
12																		
8																		
6.3			25					4.8										
4.75								37	23.45	37								
3.35																		
2.35																		
2			18															
1.18																		
0.075			5	2-5	3-9	5	4.6-8	7	2-7	5	2-6	3-5	3-5	2-6	2-6	2-5	2-5	2-5
Betún																		
Porcentaje %	4.5-5.5	4.0-5.0	4.1-4.3	5-6.5	5-2.7	4.6	4.5-4.7	4.2-4.5	3.5-5.5	4-5	4.5-5.5	4.75-5.25	4.4-4.6	3.6-4.8	4-5	4.5-7.5	4.5-6.5	4.5-6.5
Penetración	180/220	180/220	100	40-100	60-100	80/100	80/100	60-80	80/80		200	200	150	200	150	200	60-70	60-70
% Huecos iniciales	10-20	10-20	23	≥ 15	30	22-25		.17				20-28	20-29		20-29			
Fecha	1968	1968	1973	1974	1976	1978		1976	1975	1973	1978	1970	1970	1968	1970	1953	1976	1976

TABLA 1.13.- COMPOSICION DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS

En las tablas 1.14 y 1.15 se recoge para estos mismos países las características de los tramos donde estas mezclas han sido empleadas, autopistas, arterias urbanas, red principal, pistas de aeropuertos, así como la referencia a la longitud de los tramos construidos en los diferentes países.

La experiencia española sobre este tipo de mezclas comienza en el año 1980. En este año se construyen entre los P.K. 212 y 213 de la carretera N-634, San Sebastián a Santander y La Coruña, cuatro tramos de ensayo de pequeña longitud (200-225 m). Las características de estos tramos así como las formulaciones empleadas están recogidas en la tabla 1.16. En la tabla 1.17 se recogen otras realizaciones efectuadas en nuestro país con este tipo de mezcla los dos años siguientes.

Del análisis de los datos recogidos en estas tablas, principalmente en lo que a granulometría y dosificación de estas mezclas se refiere, se aprecian unas características comunes en todos los casos:

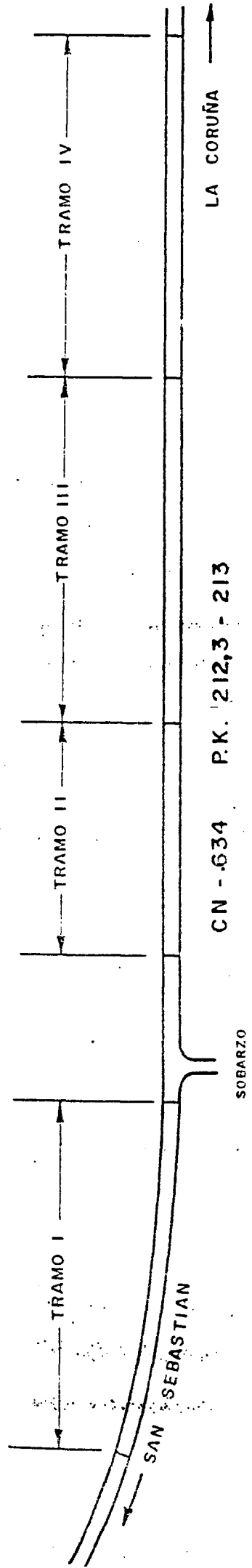
- árido grueso (retenido por el tamiz 2.5 UNE) 80-90%
- filler (pasa tamiz 0,680 UNE) 2-6%
- betún asfáltico 4,-7%
- huecos iniciales en mezcla 15-30%

PAIS	TIPO DE VIA	NUMERO DE SECCIONES	LONGITUD TOTAL KM	TRAFICO IMD	TIPO CLIMA
AUSTRALIA	Autopista Red Principal Arteria Urbana	8	250	5000 - 31000 5000 - 21000 1000	Templado a Subtropical lluvia: 500 a 1220 mm
		9	16		
		6	10		
BELGICA	Red Nacional Autopista	1		1500 14000	Templado
		2			
CHECOSLOVAQUIA	Red Principal Red Secundaria	4	6	800 - 2000 300 - 800	Continental lluvia: 600 a 800 mm
		3	5		
DINAMARCA	Autopista	1	2	1000 - 30000	Templado lluvia: 600 a 900 mm.
		10	0.3-0.5		
FRANCIA	Autopista Red Principal	2	2	12500 2700 - 5500	Templado lluvia: 720 a 1200 mm
		8	8		
GRAN BRETANA	Autopista Red Principal	2	2	45000 - 50000 7000 - 25000	Templado lluvia: 500 a 1000 mm
		7	4,5		
ALEMANIA	Autopista	1	1		Templado continental

TABLA 1.14. CARACTERISTICAS Y SITUACION DE LOS TRAMOS DONDE HAN SIDO EMPLEADAS MEZCLAS POROSAS EN CAPA DE RODADURA (XVII C.M.R. SYDNEY, 1983).

PÁIS	TIPO DE VIA	NUMERO DE SECCIONES	LONGITUD TOTAL KM	TRAFICO SMD	TIPO DE CLIMA
JAPON	Autopista	Numerosas		250-3000	Templado Lluvia: 1500 a 2500 mm Esencialmente en regiones con nieve
HOLANDA	Primaria Secundaria Terciaria	4 2 1	3 3 2	15000-3000 3000 500	Templado
NORUEGA	Red Nacional	1	0,2	7500	Templado Lluvia: 800 mm
AFRICA DEL SUR	Rural	12	287	500-3200	Lluvia: 750 mm Temperatura del firme 60°C
ESPAÑA	Red Principal	1	1	2500	Lluvia: 1200 mm Temperatura 0 a 30°C
SUECIA	Autopista y Red Principal Red Secundaria	Numerosas Numerosas	PFC..20000t DGAEM 250000 t	<1000	Temperatura Subártica
SUIZA	Red Principal	5	6	1000	Temperatura continental Lluvia 900 a 1200
USA	Autopistas y Carreteras inter-estados	Numerosas	>15000	300-75000	Temperatura continental subtropical Lluvia: 100 a 1600.

TABLA 1.15. CARACTERISTICAS Y SITUACION DE LOS TRAMOS DONDE HAN SIDO EMPLEADOS MEZCLAS POROSAS EN CAPA DE RODADURA (XVII C.M.R., SYDNEY, 1983).



FECHA DE EJECUCION	TRAMO I	TRAMO II	TRAMO III	TRAMO IV
19 - FEBRERO - 1980	29 - ABRIL - 1980	29 - ABRIL - 1980	29 - ABRIL - 1980	29 - ABRIL - 1980
DOSIFICACION REAL	% PASA	% PASA	% PASA	% PASA
TAMICES UNE	100	100	100	100
12.5	90	91	90	93
10	43	40	39	34
5	14	20	16	18
2.3	8	8	8	8
0.63	5	5	6	5
0.08				
TIPO DE LIGANTE	B - 60/70	R - 60/70	BETUN CON ELASTOMERO	BETUN CON ELASTOMERO
PORCENTAJE DE LIGANTE	4.5	4.5	4.5	4.5
ESPESOR CAPA mm	40	40	40	40

TABLA I.16.-SITUACION Y CARACTERISTICAS DE LOS TRAMOS DE ENSAYO

SANTANDER CN - 634 TRAMO SOLARES - BERANGA														PALMA MALLORCA		ORENSE	PAMPLONA	
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10								
	P-12(15,4)	P-12(10,4)	P-10(15,4)	P-10(10,4)	P-10(15,4)	PA-12	PA-10	P-10(10,4)	P-10(15,4)	P-10(15,4)								
LONGITUD Km.	1	1	6	2	2	0.150	0.150	0.400	0.150	0.150	1.100	0.1	0.22	0.4				
SITUACION P.K.	N-634 201	N-634 201	N-634 200	N-634 194	N-634 191	N-634 189.2	N-634 189.05	N-634 188.9	N-634 188.5	N-634 188.35	C-719 21	PALMA CENTRO URBANO	OR-210 16	N-121 4				
ESPESOR CAPA cm.	4	4	3	3	3	4	3	3	2	2	3	3	-	4				
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100				
12.5	80	78	84	77	84	82	81	82	83	83	89	89	87	87				
10	60	56	36	35	36	30	27	32	34	34	35	35	25	36				
5	33	28	17	13	17	19	16	14	16	16	18	18	16	15				
2.5	14	12	8	6	8	8	8	6	7	8	8	8	10	7				
0.63	7	5	7	5	7	7	6	5	6	6	6	6	-	5.5				
0.32	6	4	5	4	5	4	4	3.5	4	4	4.4	4.4	3.5	4				
0.08	4	3	4	4	5	4	4	3.5	4	4	4.4	4.4	3.5	4				
TIPO LIGANTE	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	betún elastom.	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/70	B-60/100 + elastom.			
% LIGANTE S.O.	4.5	4.1	4.3	4.1	4.3	5.1	4.7	4.8	4.3	5.3	4.5	4.5	4.5	4.6				
FECHAS CONS.	13-XI-81	19-XI-81	12-1-82	18-1-82	21-1-82	2-11-82	3-11-82	3-11-82	4-11-82	4-11-82	X-1981	1982	12-XII-80	14-IV-82				

TRAMO DE 6 Km. EN EL QUE LOS TRES ULTIMOS Km. SE HAN PAVIMENTADO 0.5m. DE ARLEN CON H.B.P.

TABLA I.17.- CARACTERISTICAS DE LOS TRAMOS CONSTRUIDOS Y DE LAS MEZCLAS EMPLEADAS

Sin embargo, en esos mismos cuadros se observan a la hora de su empleo dos tendencias que es necesario diferenciar. Ya que, en algunos casos, estas mezclas son usadas con una función distinta de la que aquí estamos considerando.

Este es el caso de países como E.E.U.U. y África del Sur, donde se emplean espesores de capa reducidos (alrededor de 2 cm) y dotaciones de ligante altas (5-7%), mientras que en Europa y Japón los porcentajes de ligante utilizados son más bajos (4-5%) y los espesores de capa más elevados, del orden de 4 cm.

En el primer caso se trata frecuentemente de operaciones de conservación, como unidad de obra alternativa a un tratamiento superficial, dirigidas a mejorar la calidad de rodadura de firmes deslizantes o degradados superficialmente. Se utilizan mezclas con exceso de ligante con el fin de sellar el pavimento existente y no se puede considerar que tengan una función drenante a la hora de evacuar el agua superficial.

En el caso de Europa y Japón las mezclas bituminosas porosas, son claramente empleadas en el sentido que estamos considerando, como capas de rodadura drenantes, especialmente proyectadas para mejorar la seguridad y comodidad del usuario con lluvia y a altas velocidades. Por ello, la

composición de la mezcla y los espesores utilizados son adecuados para mejorar su respuesta. Se limita el porcentaje de ligante para asegurar su permeabilidad al mismo tiempo que se aumenta el espesor de capa con el fin de aumentar su capacidad de almacenamiento de agua y drenaje.

En el proyecto de una capa de rodadura porosa, no solo hay que tener en cuenta su capacidad de absorber agua, sino también su capacidad de evacuación. Normalmente, esta es inferior a su capacidad de absorción y, a veces, menor que la intensidad de lluvia que cae sobre el firme. Por ello, esta capa debe tener cierta capacidad de almacena-miento, si queremos evitar que se sature rápidamente. Esta capacidad de almacenamiento es función de su porosidad y espesor.

La porosidad de la capa suele oscilar entre un 18 y un 23% y variando su espesor se consigue adecuar la capa capacidad de almacenamiento. Espesores de 3-4 cm son suficientes para evitar que se produzca esta saturación, en la mayor parte de los casos, en climas como los del Norte de España.

1.4.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS

Se recoge en este apartado las principales ventajas e inconvenientes que presentan estas mezclas frente a otros tipos de pavimentos. Algunas de ellas ya han sido señaladas al comentar las características superficiales de los pavimentos y otras son expectativas y dudas relativas a su comportamiento, que, dada la escasa experiencia que sobre este tipo de mezclas se dispone, todavía no han sido resueltas de forma definitiva, y son motivo de estudio e investigación.

Como cualidades más interesantes de estas mezclas, la mayoría de los autores señalan las siguientes propiedades:

1. Eliminación o reducción del fenómeno de hidropilaje

Esta es una de las mayores ventajas de las mezclas bituminosas porosas. La alta rugosidad de su macrotextura (profundidad del círculo de arena comprendida entre 1 y 3 mm) así como su alta porosidad facilita con lluvia el contacto entre el neumático y la superficie de rodadura.

Uno de los objetivos que se pretendía conseguir cuando se pensó en utilizar aglomerados porosos en capa de rodadura era el de eliminar el problema de hidropilaje o aqua

Planing. El hidroplaneo consiste en la pérdida total del control sobre la dirección del vehículo, al interponerse una película de agua entre los neumáticos y pavimento. El vehículo pierde la adherencia con el pavimento y el riesgo de vuelco ó de trompo es muy elevado, con el consiguiente peligro para los ocupantes del mismo y de los vehículos próximos.

El problema de hidroplaneo es más fácil que ocurra cuanto menor sea la macrotextura del pavimento y mayor sea el espesor de la película de agua sobre este. La mejora notable que las mezclas porosas producen sobre el fenómeno del hidroplaneo se debe principalmente a estos dos efectos:

- Aumentan la macrotextura del pavimento.
- Facilitan la evacuación del agua que se interpone al contacto neumático-pavimento a través de sus poros.

Por otra parte, con estas mezclas se consigue mantener la superficie del pavimento libre de agua incluso con lluvia.

2. Eliminación del agua de la superficie del pavimento

La alta porosidad y permeabilidad de estas mezclas posibilitan que, incluso bajo lluvia, no llegue a formarse una

película de agua sobre la superficie del pavimento. El agua de la lluvia es absorbida rápidamente y almacenada por éste y, poco a poco, es evacuada a su través lateralmente hasta el borde de calzada o arcén. Salvo con lluvias de larga duración o fuertes chubascos, no se forma una película de agua que pueda reducir notablemente el rozamiento entre el neumático y el pavimento.

La capacidad de la mezcla para mantener el pavimento libre de agua depende de su porosidad y espesor, y, es también función de la intensidad de la lluvia. De cualquier forma, esta es elevada. Como ejemplo, se necesitan más de 18 minutos de duración, de una precipitación de 20 l/h de intensidad media, para saturar una capa de mezcla con un 20% de huecos y 3 cm de espesor.

3. Mantiene también elevada la resistencia de deslizamiento a altas velocidades

La pérdida de la resistencia al deslizamiento con la velocidad depende fundamentalmente de la macrotextura que presente la capa de rodadura.

Los resaltos que presenta un pavimento de macrotextura rugosa aumentan la deformación del neumático en su contacto con la superficie del firme, con lo que se consigue un mayor rozamiento. Esto hace que los pavimentos de elevada ma-

crotextura presenten una menor caída de la resistencia al deslizamiento con la velocidad.

En el caso de los pavimentos de mezcla bituminosas porosa, las oquedades que aparecen en la superficie de la mezcla proporcionan una elevada macrorrugosidad, aumentan la energía de deformación, y, en consecuencia, la resistencia al deslizamiento se mantiene elevada a altas velocidades.

No obstante, el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento depende también de la microtextura del pavimento. En el caso de las mezclas bituminosas porosas, debido a su escaso contenido de árido fino, esta microtextura es proporcionada fundamentalmente por las partículas de árido grueso. Por ello, es necesario emplear en este tipo de mezclas áridos de textura áspera no pulimentable.

En el momento de su puesta en servicio, estas mezclas presentan una resistencia al deslizamiento inferior a la que adquieren al cabo de un periodo de estar sometidas a la acción del tráfico. Al principio los áridos están recubiertos por el betún y poseen una textura pulida. El coeficiente de resistencia al deslizamiento, medido por ejemplo con el péndulo de fricción del RRL, suele ser inicialmente del orden de 0,5 y al cabo de varios meses alcanzan valores del orden de 0,6, siempre que se empleen áridos de buena calidad.

4. Reducción del agua proyectada y pulverizada al paso de los vehiculos

Quizás sea este uno de los efectos más espectaculares y a la vez más prácticos de este tipo de pavimento. Al mantener, incluso con lluvia, la superficie del pavimento libre de agua, ésta no es salpicada, ni proyectada, al paso de los vehículos. Se consigue así una mejora considerable de la visibilidad con lluvia o pavimento mojado. Las fotografías de las figura 1.11 y 1.12 reflejan la diferencia de visibilidad entre un pavimento convencional (mezcla tipo S-12) y un pavimento de mezcla bituminosa porosa para las mismas condiciones climatológicas.

5. Mejora de la visibilidad con pavimento mojado

Con pavimentos mojados y sobre superficie de macrotextura lisa, sin resaltos ni oquedades, se produce con facilidad la reflexión de la luz, dando lugar, durante la noche, al deslumbramiento de los conductores que circulan en dirección contraria. Los pavimentos de textura rugosa, o lisos con oquedades, dispersan la luz y reducen el problema del deslumbramiento.

La menor reflexión de la luz en este tipo de pavimentos hace que se puedan divisar mejor las marcas viales.



FIGURA 1.11. Proyección de agua por el paso de un vehículo sobre un pavimento convencional.



FIGURA 1.12. Eliminación de la proyección de agua al paso de un vehículo sobre un pavimento de mezcla porosa.

6. Pavimentos de rodadura cómoda y silenciosa

Las capas de rodadura fabricadas con mezclas bituminosas porosas presentan una superficie lisa, sin resaltos, con oquedades, que le proporcionan una elevada macrotextura, pero que no aumenta, respecto a los pavimentos normales contruidos con mezclas densas y semidensas, ni el nivel de ruido, ni la vibración, al circular con el pavimento seco sobre ellas.

Al contrario, con lluvia, la rodadura es más silenciosa, del orden de 3 dB(A), respecto a los pavimentos usuales.

7. Aumento de la seguridad de circulación con lluvia, por la menor tensión a la que está sometido el conductor

Bajo lluvia, la combinación de un pavimento libre de agua, la disminución del agua salpicada y pulverizada, y la prácticamente nula probabilidad de la pérdida de adherencia por hidroplaneo, da al conductor una mayor sensación de comodidad y seguridad, disminuyendo la fatiga de la conducción.

8. Buen comportamiento mecánico

Las capas de rodadura fabricadas con mezclas bituminosas porosas presentan en general un buen comportamiento mecánico.

La estabilidad de estas mezclas es baja, pero la cohesión de la mezcla y el rozamiento interno de su esqueleto mineral son suficientes para impedir que con pequeños espesores (2-4 cm) se presenten problemas de deformaciones plásticas.

La cohesión y trabazón proporcionada por el ligante y la fracción de árido fino es suficiente para mantener la unión del árido en la mezcla e impedir que se produzcan peladuras y pérdidas del árido grueso.

La durabilidad también es buena, no habiendo observado en los firmes en servicio problemas importantes de degradación debidos a la acción del agua o del envejecimiento del ligante.

Por otra parte, y desde un punto de vista económico, la utilización de este tipo de mezcla no presenta un mayor coste respecto a otros materiales utilizados en mejorar la superficie de rodadura del firme.

Junto a las ventajas señaladas, es necesario también indicar los eventuales inconvenientes y limitaciones de las mezclas bituminosas porosas. Como ya se ha indicado, la mayoría de los problemas señalados no son inconvenientes en sí, sino más bien dudas respecto a algunos aspectos de su comportamiento. Parte de estos problemas han sido ya resueltos y

otros necesitan un mayor estudio y profundización. Como eventuales inconvenientes de estas mezclas aparecen:

1. Su vida de servicio puede ser más corta que el de una mezcla densa

Al tener una mayor porosidad y accesibilidad del agua, puede esperarse una menor resistencia al envejecimiento y una posible pérdida de adherencia entre el árido y el betón.

La acción del agua se puede ver favorecida por el espacio de tiempo que la mezcla permanece húmeda. El agua que ha almacenado durante la lluvia tarda cierto tiempo en salir, siendo necesario, como puede observarse en la figura 1.13 el transcurso de varias horas después de la lluvia para que el agua desaparezca totalmente del interior de la mezcla.

No obstante, y como ser verá de manera más detenida al estudiar el comportamiento de estas mezclas en firmes en servicio, no parece que debido a la mayor porosidad, la acción del agua o del envejecimiento afecte de una manera significativa la duración de la mezcla.

2. Pérdida de porosidad

Debido a la acción conjunta del tráfico y la intemperie se produce una reducción del porcentaje de huecos accesibles

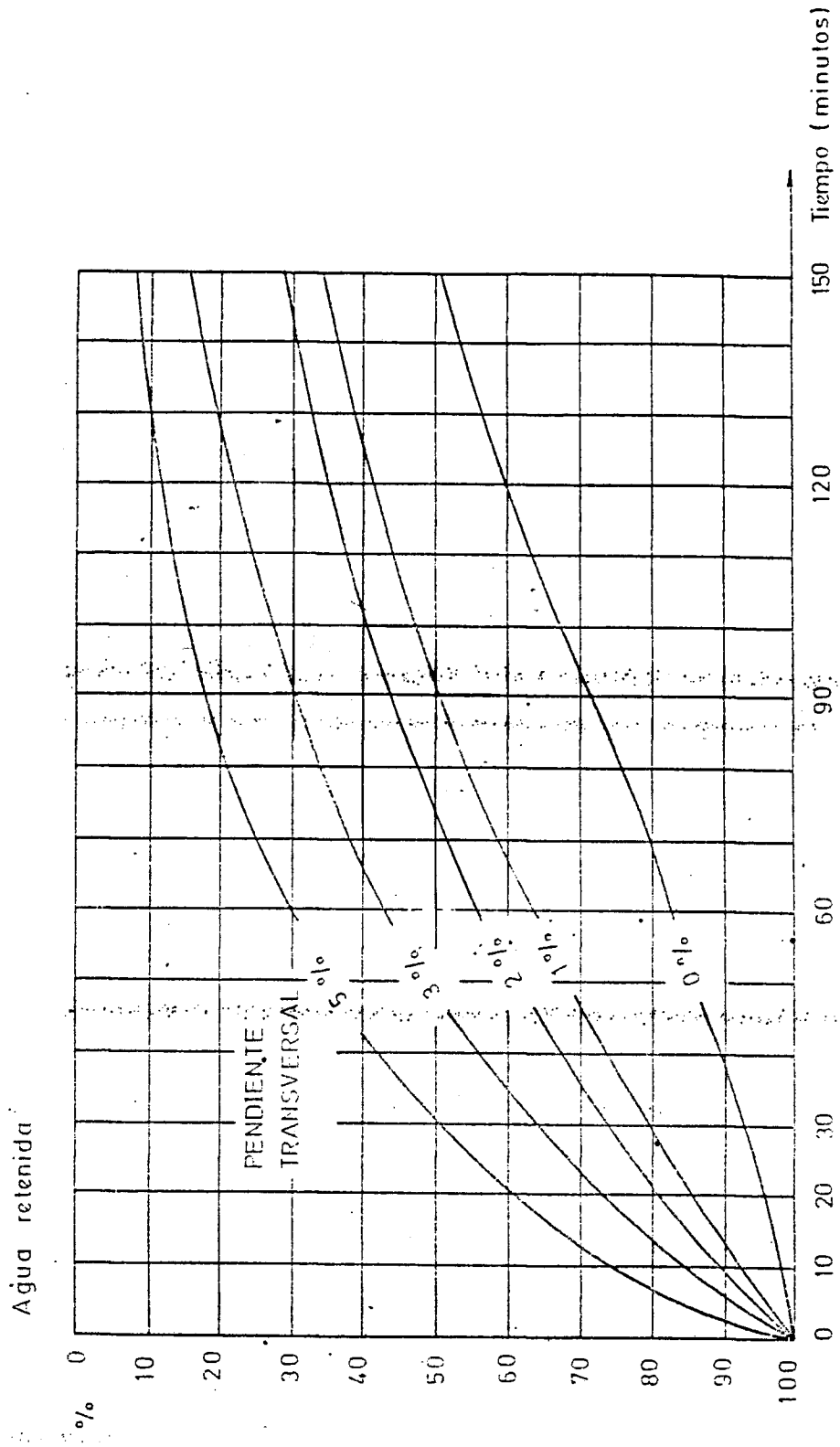


FIG.1113.- PORCENTAJE DE AGUA RETENIDA POR LA MEZCLA EN FUNCION DEL TIEMPO Y DE LA PENDIENTE TRANSVERSAL PARA UNA CAPA EXPERIMENTAL DE 4.6 cm. DE ESPESOR Y 0.96 m. DE ANCHO Y UNA MEZCLA CON UNA PERMEABILIDAD DE 0.003 m/s

DE HUECOS DE MEZCLA

y de la capacidad de drenaje de la mezcla. Esta disminución de la porosidad puede suponer la pérdida de las propiedades para las que la mezcla fue proyectada.

Sin embargo la utilización de áridos con buena forma y alta resistencia al desgaste así como la succión producida por el paso de los neumáticos ayudan a evitar que se produzca la colmatación de los poros, manteniendo sus cualidades iniciales en un alto nivel tras varios años en servicio.

3. Menor resistencia a la acción del petróleo y disolventes

Debido a la mayor accesibilidad que tienen estas mezclas respecto a los aglomerados de tipo denso y semidenso utilizados en capa de rodadura, el problema de los disolventes es más grave. Se trata en todo caso de un problema local y está solamente relacionado con tramos o zonas en que puede producirse el vertido de productos derivados del petróleo (rampas, ciertas áreas de aeropuertos) y se puede paliar con ligantes resistentes a la fluidificación.

4. Necesidad de apoyarse en un firme estructuralmente adecuado y de buena geometría

Las mezclas bituminosas porosas son un material flexible, de baja rigidez, y dado el reducido espesor de capa en

que son utilizados no debe considerarse estructuralmente como una capa que colabora sustancialmente en el comportamiento mecánico y resistente del firme. Es más, esta capa necesita apoyarse sobre un firme estructuralmente adecuado, y ser extendida sobre una superficie impermeable y bien acabada que no impida la circulación del agua a través de la capa de rodadura hacia los arcenes.

En el caso de utilizar este tipo de mezcla sobre un firme ya en servicio se debe comprobar antes de su empleo el estado de la superficie en la que debe apoyarse, y en caso de que ésta presentase irregularidades o no fuese totalmente impermeable, es necesario proceder a su regularización con una capa de mezcla cerrada tipo denso y semidenso y eventualmente a su impermeabilización.

5. Desague lateral en arcenes

La utilización de estas mezclas presenta algunos problemas relacionados con el drenaje superficial del pavimento. La sección transversal del firme debe ser adecuadamente proyectada para que la capa de mezcla bituminosa pueda desaguar lateralmente, sin que los arcenes constituyan una barrera que impida la circulación del agua.

6. Otros inconvenientes

En algunos países de clima riguroso se ha observado un mayor consumo de sales fundentes para mantener la vialidad invernal. La menor eficacia del tratamiento se debe al parecer a que las sales disueltas penetran en el aglomerado, permitiendo la formación de placas de hielo en superficie. Este inconveniente solo afecta a carreteras en las que se emplean sales con frecuencia, caso que es afortunadamente raro en España.

También se considera que estas mezclas pueden presentar problemas de conservación en cuanto a tratamiento y eliminación de baches y peladuras.

Las dudas e incertidumbres que sobre la respuesta de las mezclas bituminosas porosas existen ponen de manifiesto la necesidad de realizar, tanto en laboratorio como en tramos experimentales, sucesivas investigaciones sobre problemas relacionados con su dosificación, puesta en obra conservación y comportamiento. El objetivo fundamental de este trabajo es el desarrollo de un procedimiento de ensayo que permita caracterizar estas mezclas frente a uno de sus fallos más frecuentes, formación de baches, peladuras y disgregación de la mezcla.

1.4.3. COMPORTAMIENTO DE LOS TRAMOS EN SERVICIO

El comportamiento de las mezclas bituminosas porosas como capa de rodadura ha sido evaluado principalmente en tramos experimentales, observándose los fallos aparecidos en el firme por la acción del tráfico y de los agentes atmosféricos, controlando especialmente la evolución de los parámetros que confieren a estas mezclas sus características particulares: porosidad, resistencia al deslizamiento y textura superficial.

La respuesta de estas mezclas en los tramos de ensayo ponen de manifiesto que los fallos observados en su comportamiento: fisuras, grietas, peladuras, baches, han sido debidos en la mayoría de los casos a una mala ejecución o inadecuada dosificación de la mezcla, presentando en general estas mezclas un buen comportamiento, manteniendo en todo momento una superficie de rodadura cómoda y segura.

La aparición de fisuras y grietas es motivado por la colocación de estas mezclas sobre superficies agrietadas de baja capacidad de soporte. Aunque las mezclas bituminosas porosas son poco rígidas, no son lo suficientemente dúctiles para poder ser colocadas sobre superficies agrietadas sin que estas grietas se reflejen en superficie.

También se observa la aparición de manchas de betún en superficie cuando las mezclas bituminosas porosas son colocadas sobre mezclas excesivamente ricas en ligante, lo que da lugar a su contaminación y a la aparición de manchas de ligante en superficie.

La aparición de peladuras y pérdida de árido es otro defecto que también se observa en el comportamiento de estas mezclas. Este fallo ocurre especialmente en mezclas con carencia de fracción fina, o el ligante que disminuye su resistencia a los esfuerzos de abrasión y succión producidas por el tráfico o cuando por cualquier circunstancia, envejecimiento, acción del agua y de los agentes atmosféricos, etc, se produce una pérdida de cohesión de la mezcla.

Los tramos de ensayo también ponen de manifiesto que las mezclas bituminosas porosas conservan, cuando son proyectadas adecuadamente, sus cualidades particulares de proyecto en un alto nivel. Esto puede observarse en las figuras 1.14 1.15 y 1.16 donde se recoge, para los tramos españoles, construidos en la carretera N-634 de San Sebastián a Santander y La Coruña, la evolución con el tiempo de la porosidad y permeabilidad de la mezcla, así como la evolución de la calidad de rodadura en el pavimento a través de la medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento y de la macro-textura superficial. La IMD de estos tramos en el año de su

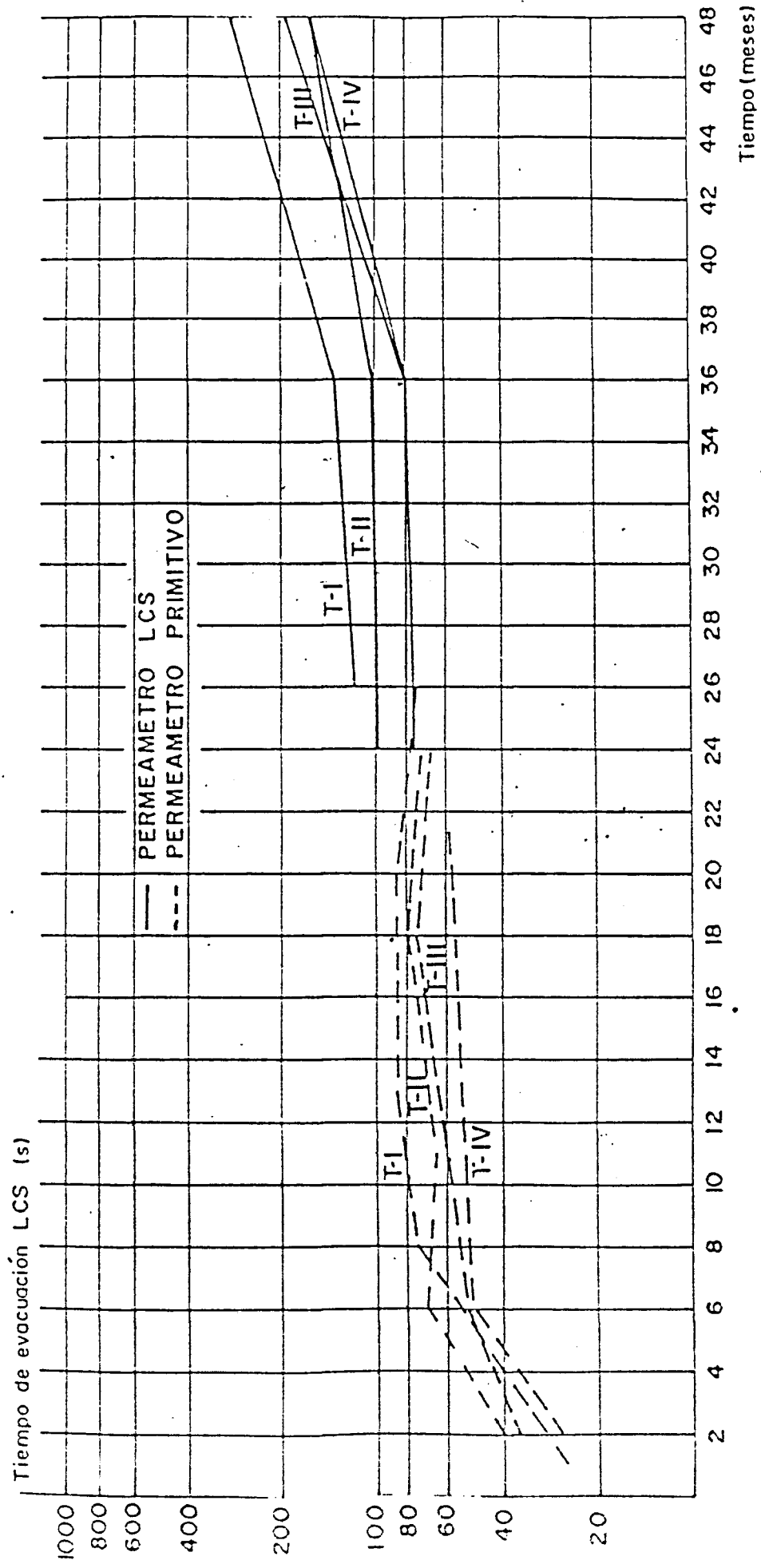


FIG. I.14 . - VALORES MEDIOS OBTENIDOS EN LA MEDIDA DEL TIEMPO DE EVACUACION DEL AGUA. TRAMOS : SARON ~ PAMANES

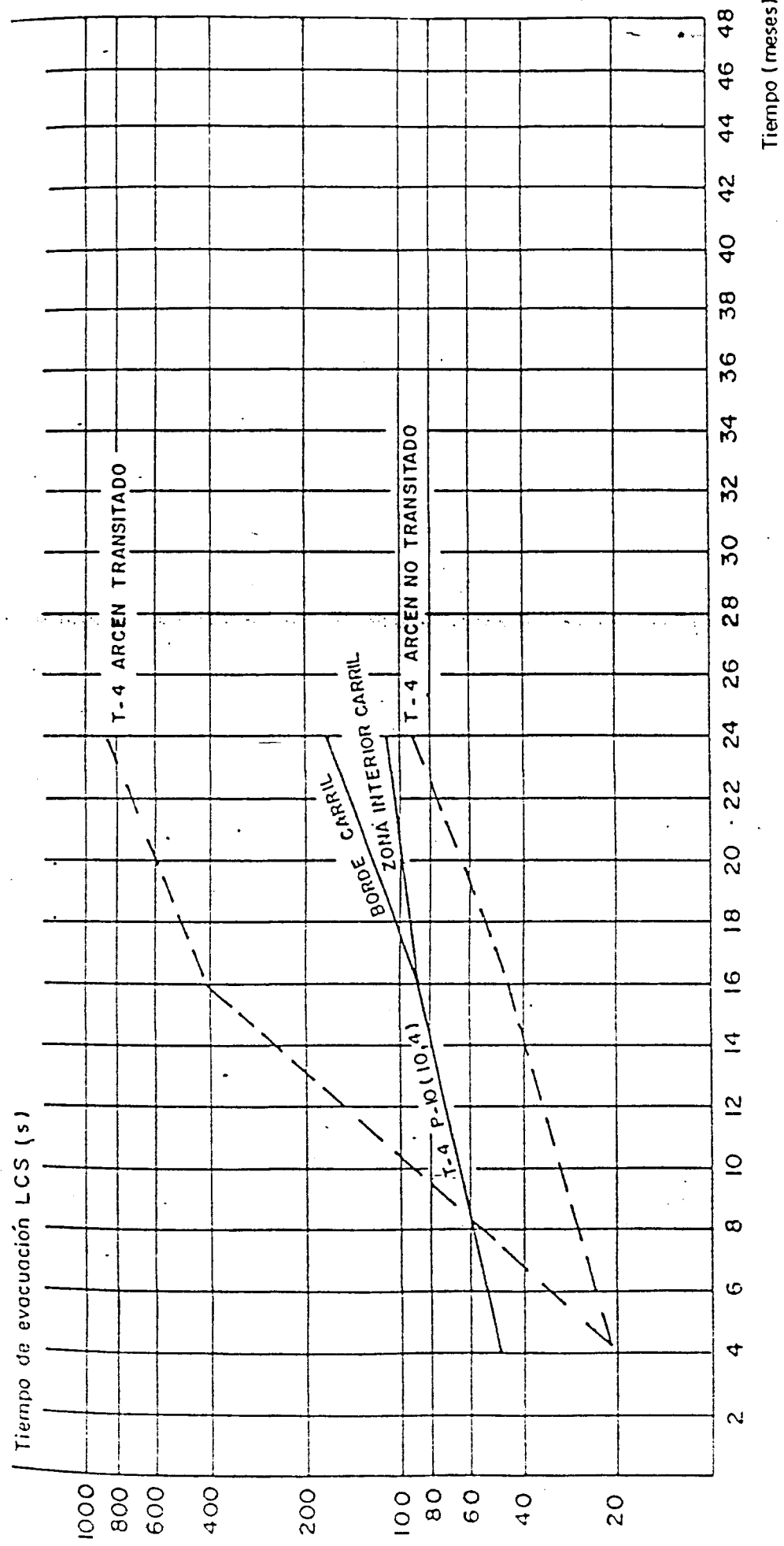


FIG. I. 15 .- MEDIDA DEL TIEMPO DE EVACUACION DEL AGUA EN CARRILES Y ARCENES .
TRAMO : SOLARES - BERANGA, MEZCLA P-10 (10,4)

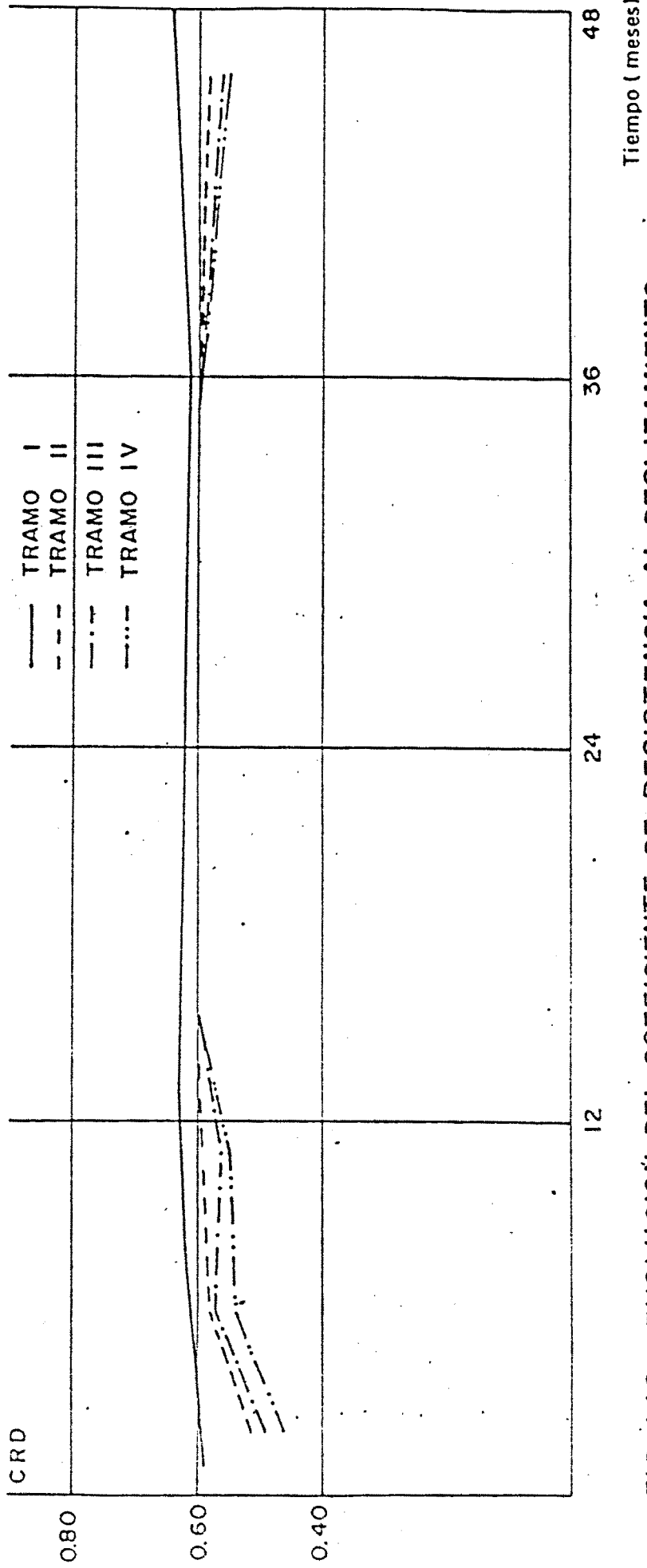


FIG. I.16 .- EVOLUCION DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.
TRAMOS : SARON - PAMANES

construcción, 1980 era de 5000 veh/día con un 25% pesados.

Para la medida de la permeabilidad in situ de la mezcla se desarrolló un sencillo permeámetro de carga variable, permeámetro LCS, que permite estimar el coeficiente de permeabilidad de la mezcla a partir del tiempo que tarde en infiltrarse en el firme una determinada cantidad de agua.

Aunque se observa una disminución de la permeabilidad a lo largo de estos cuatro años de servicio, figura 1.14, esto no ha significado una pérdida efectiva de las cualidades del pavimento. De una manera cualitativa y en tiempo lluvioso es evidente la diferencia existente actualmente (desaparición de la película de agua, eliminación de proyecciones de agua, reducción del ruido) entre los tramos con mezclas porosas y el resto de la carretera pavimentado con mezclas cerradas.

Por otra parte, esta pérdida de permeabilidad es superficial, y ha sido producida por el tránsito de carros y vehículos agrícolas procedentes de terrenos arcillosos limítrofes. En la zona central los mismos esfuerzos de succión del tráfico tienen un efecto limpiador como puede observarse en la figura 1.15, donde se representa la diferencia de permeabilidad entre arcenes, borde y zona central del carril.

El coeficiente de resistencia al deslizamiento se mantiene a lo largo de cuatro años en servicio con valores superiores a 0,55, figura 1.16. Por otra parte, estas mezclas conservan una alta macrotextura, con una profundidad media medida con el ensayo de mancha de arena comprendida entre 1.4 y 1.6 mm.

En la medida del coeficiente de rozamiento transversal con el SCRIM, se han obtenido para estas mezclas valores superiores a los medidos en tramos contiguos de mezcla densa, 65 y 45, respectivamente, para una velocidad de 80 Km/h y 1 mm de agua.

El comportamiento mecánico y resistente de las mezclas en los tramos también ha sido satisfactoria. Tras cuatro años de servicio no hay indicios de formación de roderas. Su resistencia a la disgregación de la mezcla por los esfuerzos tangenciales y de succión del tráfico es también satisfactoria. Únicamente se observan pequeñas peladuras o cortes longitudinales producidos accidentalmente por la llanta de neumáticos pinchados o por el empleo de palas en el despeje de la nieve caída en el invierno de 1983. No apreciándose que estos fallos hayan evolucionado hacia un mayor deterioro en el tiempo transcurrido.

Respecto a su aporte al refuerzo estructural del firme, se comparó, en la construcción de estos tramos, el descenso

de la deflexión característica producido por estas mezclas frente al producido por una mezcla densa del mismo espesor, no encontrándose diferencias significativas.

Deflexión característica (1/100 mm) Viga Dinkelman Eje 130 KN	Tramo con mezcla porosa	Tramo con mezclas densas
Antes del refuerzo	82	93
Después del refuerzo	45	53

La conclusión sobre el comportamiento de estas mezclas es también satisfactoria en el resto de los países en que ha sido empleada este tipo de capa de rodadura. En la tabla 1.18 se recoge la experiencia de alguno de estos países sobre la evolución de la porosidad y del coeficiente de resistencia al deslizamiento. En las figuras 1.17 y 1.18 se representa la evolución de la porosidad en el caso de los tramos belgas e ingleses.

Es difícil establecer una comparación entre resultados, puesto que se trata de tramos de distintas peculiaridades, en que su colmatación, puede producirse por diferentes factores, y, además por la diferencia en el proceso empleado en la medida de la permeabilidad in situ. Pero, lo importante es señalar que en todos los casos se observa una evolución satisfactoria.

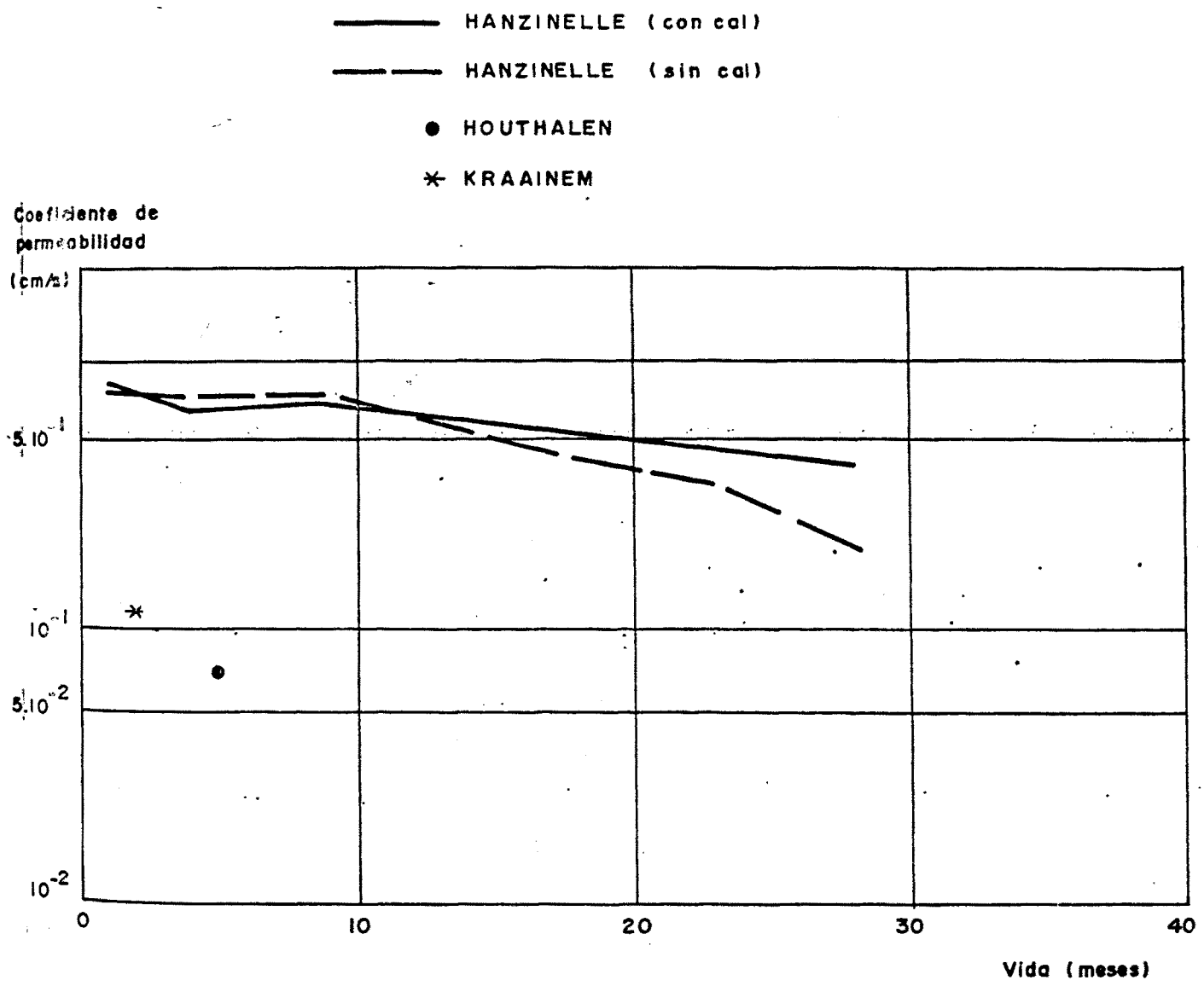


FIG. I.17.- EVOLUCION DE LA PERMEABILIDAD
EXPERIENCIA BELGA (DECOENE)

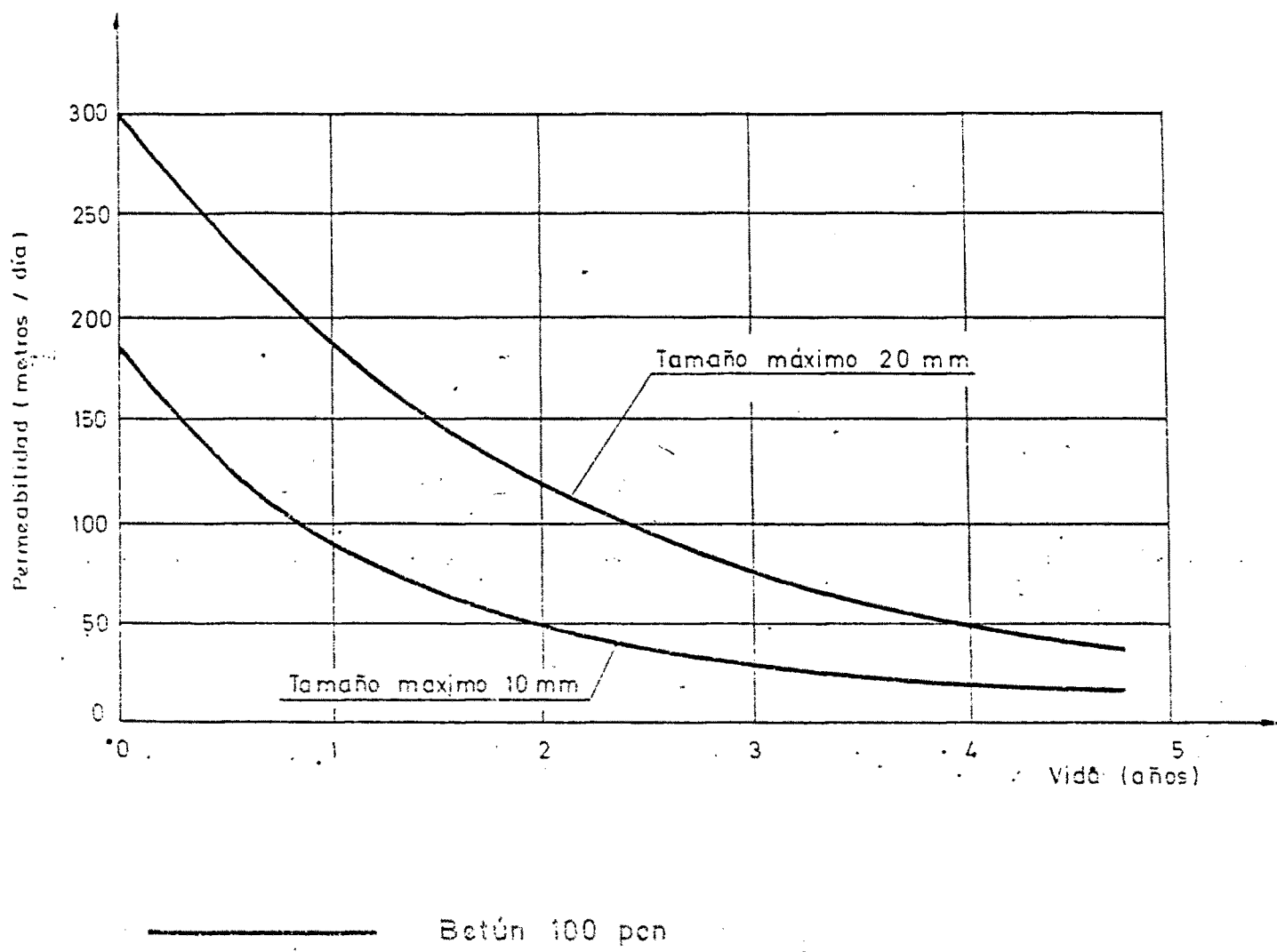


FIG. I. 18.- EVOLUCION DE LA PERMEABILIDAD
EXPERIENCIA INGLESA (SZATKOWSKI)

CAPITULO 2

PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS
BITUMINOSAS. ENSAYOS MECA-
NICOS DE CARACTERIZACION

2.1. PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Una mezcla bituminosa está constituida por un conjunto de partículas minerales envueltas por una película continua de ligante. Las mezclas bituminosas por su buen comportamiento en cuanto a durabilidad y resistencia, son actualmente un material usado muy ampliamente en la construcción de firmes flexibles de calidad, ya que con ellas se consigue una superficie de rodadura de gran regularidad geométrica, cómoda para los vehículos, y adecuada para altas velocidades. También se emplean en capas de base en las que descansa la función portante del firme.

Las propiedades que debemos de exigir a una mezcla bituminosa dependerán de las solicitaciones a las que va a estar sometida y de su disposición dentro de las capas del firme.

En general, las propiedades fundamentales que debemos considerar en una mezcla bituminosa son las siguientes:

- Estabilidad y resistencia a las deformaciones plásticas.
- Flexibilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Durabilidad.
- Fácil puesta en obra.

Las tres primeras se refieren a su comportamiento mecánico. Las capas que constituyen el firme y entre ellas las capas

de mezcla bituminosa deben soportar las solicitaciones del tráfico de forma que en ningún momento, durante su vida en servicio, las deformaciones plásticas producidas por el paso de los vehículos impidan la adecuada circulación de estos. Deben por tanto, resistir estas solicitaciones sin apenas deformarse y en caso de ser empleadas como capa de base, ser lo suficientemente rígidas para transmitir a la explanada los esfuerzos del tráfico amortiguados para que puedan ser soportados por ésta.

Esto exige de la mezcla una alta estabilidad que se consigue fundamentalmente empleando mezclas densas y bajos contenidos de ligante.

A veces, el comportamiento mecánico que se exige en la mezcla es diferente. Se trata de que ésta se pueda adaptar a las posibles deformaciones que aparecen en el firme, es decir, se busca su flexibilidad, que se consigue mediante el empleo de granulometrías abiertas y porcentajes de ligante altos.

Cuando se trata de optimizar la respuesta de la mezcla ante los mecanismos de deterioro por fatiga y rotura a tracción se debe emplear mezclas cerradas y altos contenidos de ligante.

La siguiente propiedad hace referencia a la durabilidad. En este apartado debemos considerar la resistencia de la mezcla a la acción del agua, ya que normalmente el deterioro y

desintegración de la mezcla por el tráfico se ven favorecidos por la presencia de agua. Para lo que se requieren mezclas densas y altos contenidos de ligante.

Por último, referente a la facilidad de puesta en obra, resultan más sencillas de fabricar y de compactar las mezclas con porcentajes altos de árido fino, cantos rodados y altos contenidos de ligante, pero esto produce generalmente una pérdida importante de la estabilidad.

En la tabla 2.1, debida a Finn, se recogen recomendaciones relativas al contenido de ligante y a la granulometría de los áridos, en función de la propiedad que queramos exigir a la mezcla.

Como podemos observar en esta tabla, la optimización de una propiedad puede ir en detrimento de otras, por lo que muchas veces las fórmulas de aglomerado son fórmulas de compromiso.

A parte de la granulometría y el porcentaje de ligante, en la respuesta de una mezcla también influye el tamaño máximo de árido, su textura, forma, propiedades del ligante, etc. La influencia de estos factores en cada una de las propiedades antes señaladas puede ser evaluada mediante el empleo de ensayos mecánicos convenientemente desarrollados al efecto.

PROPIEDADES DE LA MEZCLA	CONTENIDO DE LIGANTE	GRANULOMETRIA DE LOS ARIDOS
Estabilidad	Bajo	Cerrada
Durabilidad	Alto	Cerrada
Flexibilidad	Alto	Abierta
Resistencia a la fatiga	Alto	Cerrada
Resistencia al deslizamiento	Bajo	Cerrada o Abierta
Impermeabilidad	Alto	Cerrada
Resistencia a la rotura	Alto	Cerrada

TABLA 2.1. CARACTERISTICAS DESEABLES PARA OPTIMIZAR LOS AGLOMERADOS. (Según F.N. Finn).

Estos mismos ensayos permiten optimizar la composición de la mezcla de acuerdo a la propiedad seleccionada y son la base de la mayoría de los métodos de dosificación.

2.2. ENSAYOS MECANICOS EMPLEADOS EN LA CARACTERIZACION DE MEZCLAS BITUMINOSAS

A la hora de emplear una mezcla bituminosa es necesario seleccionar una granulometría y un porcentaje de ligante de forma que una vez fabricada y puesta en obra cumpla las propiedades para las que ha sido elegida. Los métodos de dosificación tienen como fin optimizar la composición de la mezcla de acuerdo a las propiedades seleccionadas.

Actualmente la mayoría de los métodos de dosificación de mezclas están basados en el empleo de ensayos mecánicos.

Además, estos ensayos nos permiten llevar un control de la fabricación y puesta en obra.

Estos métodos de ensayo pueden medir directamente alguna de las propiedades que presentan las mezclas. Pero también existen otros métodos basados en métodos empíricos, que aunque no miden directamente las propiedades de las mezclas, las pueden cuantificar de una forma indirecta.

En la tabla 2.2 se han recogido los principales ensayos mecánicos empleados para la dosificación y control de mezclas

PROPIEDAD	PARAMETRO MEDIDO	ENSAYO	APLICACION
ESTABILIDAD	ESTABILIDAD HUBBARD RESISTENCIA COMPRESION SIMPLE (σ , KG/CM ²) ESTABILIDAD MARSHALL KG. DEFORMACION MARSHALL MM. ESTABILIDAD HVEEM (%) ESTABILIDAD KG. ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO Y COHESION	HUBBARD-FIELD COMPRESION SIMPLE MARSHALL HVEEM PENETROMETRO DE CONO TRIAXIAL	MEZCLAS CERRADAS Y MORTEROS MEZCLAS CERRADAS MEZCLAS CERRADAS MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS MASTIC Y MORTEROS ASFALTICOS MEZCLAS, CARRADAS Y ABIERTAS
ADHESIVIDAD (RESISTENCIA DESPLAZAMIENTO)	RESISTENCIA CONSERVADA % RESISTENCIA CONSERVADA % PROFUNDIDAD RODERA MM	INMERSION-COMPRESION DUREZA ENSAYO EN PISTA DE LABORAT. (PROBET. SUMER.)	MEZCLAS CERRADAS MEZCLAS CERRADAS MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS
RESISTENCIA A TRACCION	COHESION HVEEMG/IN RESISTENCIA A TRACCION G/CM ²	HVEEM TRACCION INDIRECTA	MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS
RESISTENCIA ESFUERZO CORTANTE	RESISTENCIA ESFUERZO CORTANTE	ENSAYO DE CORTE	MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS
RESISTENCIA ANTE DEFORMACIONES PLASTICAS POR FATIGA	VELOCIDAD DEFORMACION MM/MIN ESTABILIDAD GIRATORIA KG/CM ANGULO GIRATORIO DEFORMACION PLASTICA ACUMULADA	ENSAYO EN PISTA DE LAB. MAQUINA GIRATORIA TRIAXIAL DINAMICO	MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS
RESISTENCIA ANTE LA FISURACION POR FATIGA	Nº APLICACIONES CARGA HASTA LA ROTURA Y % ϵ IMPUESTAS	ENSAYOS DINAMICOS DE FLEXOTRACCION	MEZCLAS CERRADAS Y ABIERTAS

TABLA 2.2. CLASIFICACION DE LOS ENSAYOS MECANICOS EMPLEADOS EN LA DOSIFICACION DE MEZCLAS BITUMINOSAS

bituminosas, clasificados en función del parámetro que miden, ya sea de una forma directa ó indirecta.

2.2.1. ENSAYOS PARA LA MEDIDA DE LA ESTABILIDAD

Este grupo recoge los ensayos que miden la estabilidad de la mezcla. Todos ellos los podríamos encuadrar en el grupo denominado "ensayos convencionales" de la clasificación que ha realizado la comisión técnica 17BM del RILEM sobre los métodos de ensayo de mezclas bituminosas. La única excepción es el ensayo triaxial que está incluido en el grupo de "ensayos fundamentales" de la citada clasificación.

El desarrollo histórico de estos métodos de ensayo está ligado al empleo de los materiales bituminosos en la construcción de firmes de carreteras. La primera preocupación fue comprobar el comportamiento de las mezclas, como capa superficial de rodadura de poco espesor, frente a los esfuerzos a que eran sometidos por las llantas de acero de los vehículos de tracción animal y las llantas de acero recubiertas de caucho macizo de los vehículos autopropulsados. Para realizar estos primeros estudios se desarrolló el método Hubbard-Field, que actualmente todavía se aplica para el estudio de los morteros bituminosos.

Tras estos primeros ensayos, se comenzó a tratar los aglomerados como materiales sólidos y estables, ensayándolos a compresión simple y a compresión triaxial, empleando este último

en la determinación de las características intrínsecos de la mezcla: cohesión y ángulo de rozamiento interno.

Por último, se han desarrollado otros ensayos, Marshall, Hveem y penetroméetro que aunque no tienen una interpretación clara sobre el proceso de rotura ó deterioro que producen y, por otra parte, someten a la mezcla a sollicitaciones muy diferentes a las que estará sometida en el firme, son los más empleados, debido a su sencillez y a la gran experiencia que existe sobre los mismos.

— La experiencia ha demostrado claramente que los resultados obtenidos de estos ensayos dependen de gran número de factores, entre los que podemos destacar: el proceso de fabricación de probetas y el método operativo seguido en la ejecución del ensayo. Por ello, estos ensayos se deben de realizar en unas condiciones normalizadas de temperatura y carga.

En general, con cada uno de estos ensayos se ha correlacionado los resultados obtenidos en la caracterización de diferentes mezclas en el laboratorio con el comportamiento que han tenido estas mismas mezclas en el firme. Lo que ha permitido establecer unas especificaciones y normativas sobre los requisitos mínimos a exigir a las mezclas a emplear en el firme para que su comportamiento sea adecuado. Estas especificaciones varían con el tipo de tráfico, condiciones ambientales y posición estructural en el firme.

Ensayo Hubbard-Field

El ensayo Hubbard-Field, figura 2.1, consiste en someter a una probeta cilíndrica a extrusión a través de un agujero a velocidad constante. La máxima carga que soporta la mezcla hasta la rotura por extrusión es la que se denomina estabilidad Hubbard-Field.

Este método está indicado por el estudio de morteros, pero existe también un ensayo modificado que es aplicable a aglomerados.

En la tabla 2.3, se recogen las recomendaciones del Asphalt Institute para morteros, referentes a los valores de la estabilidad Hubbard-Field y el porcentaje de huecos de la mezcla. Si la resistencia supera las 2000 libras (890 Kg) la experiencia

	TRAFICO PESADO		TRAFICO LIGERO	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Estabilidad	2000 lb	-	1200 lb	200 lb
% Huecos	2	5	2	5

TABLA 2.3. Valores de la estabilidad Hubbard-Field y porcentaje de huecos recomendados por el Instituto del asfalto para dosificación de morteros.

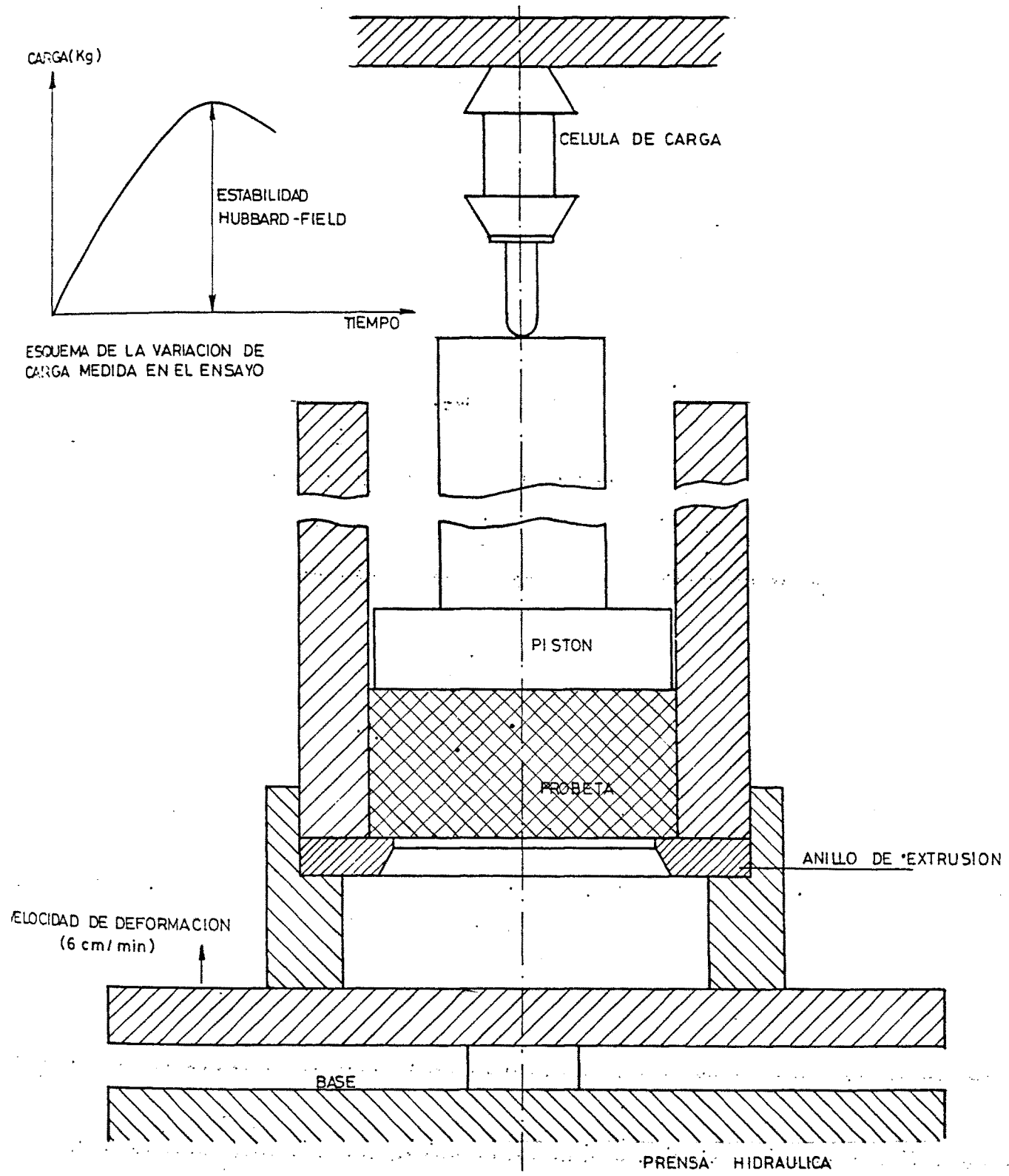


FIG. 2.1. - ENSAYO HUBBARD - FIELD

demuestra que no aparecen deformaciones permanentes apreciables para tráfico pesado. Estas comienzan a aparecer para valores de la estabilidad inferiores a 1200 libras (530 Kg).

El porcentaje máximo de huecos está limitado en un 5% para conseguir que la mezcla tenga suficiente impermeabilidad al aire y al agua. El límite inferior del 2% se fija para permitir la dilatación del ligante en tiempo caluroso.

Ensayo de compresión simple

Para mezclas bituminosas, se han normalizado varios tipos de ensayo de compresión simple (ensayo Duriez, procedimiento del Road Research Laboratory, procedimiento del laboratorio de Transportes). Todos ellos consisten en la rotura de probetas cilíndricas a una velocidad de deformación constante.

El ensayo de compresión simple, en todas sus versiones, proporciona buenos resultados cuando se aplica a materiales isótropos y homogéneos. Aplicado a la caracterización de mezclas bituminosas da mejores resultados cuando se ensayan morteros y mezclas en que el árido grueso este distribuido entre los finos sin formar un fuerte esqueleto mineral.

Por esta razón, este ensayo apenas ha sido usado en la caracterización mecánica de mezclas bituminosas, siendo empleado más frecuentemente en la evaluación de la resisten-

cia de la mezcla a la deservuelta por acción del agua, midiendo la resistencia a compresión conservada después de tener la probeta sumergida en agua durante varios días. A este empleo nos referiremos más adelante al comentar este grupo de ensayos.

Ensayo Marshall

El ensayo Marshall es el método mas empleado de todos los desarrollados para la dosificación y control de mezclas bituminosas. Este ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica de 4" de diámetro y 2 1/2" de altura a una compresión diametral con un confinamiento producido por unas mordazas. El ensayo se realiza a velocidad de deformación constante de 5 cm/min, figura 2.2.

El valor de la carga máxima que se ejerce sobre la probeta hasta el momento en que se produce la rotura se denomina estabilidad Marshall. Del mismo modo la deformación Marshall es el valor de la deformación para la carga máxima.

El ensayo Marshall se aplica a mezclas bituminosas con un tamaño máximo inferior a 25 mm, pudiendo aplicarse a probetas fabricadas en laboratorio ó a testigos de 4" de diámetro extraído de la carretera y con un valor de la altura comprendida entre 1" y 5". Debiendo en este ultimo caso hacer una corrección de la estabilidad obtenida en función del valor de la altura del testigo.

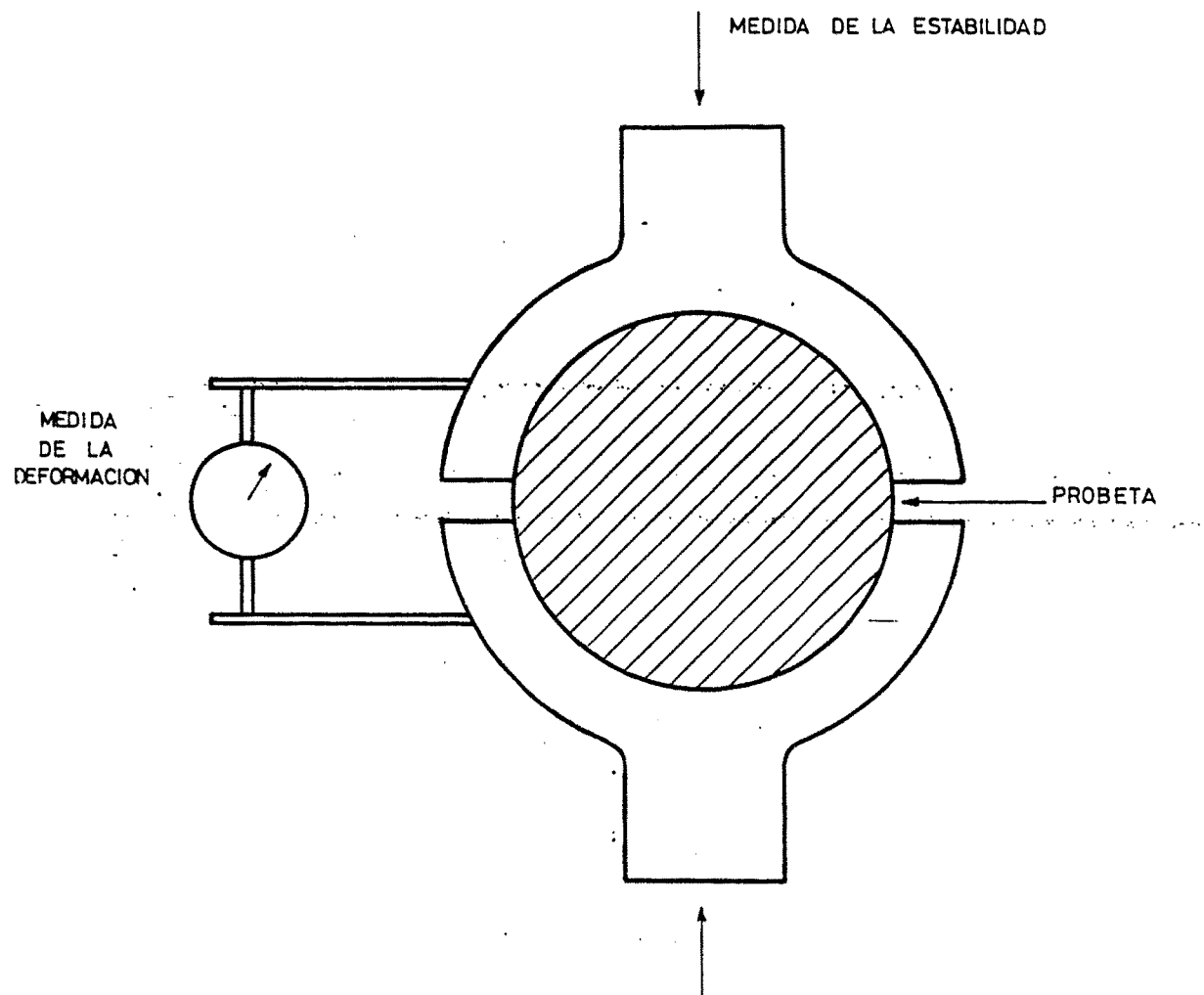


FIG. 2.2.- PRINCIPIO DE MEDIDA DEL METODO DE ENSAYO MARSHALL

Aunque el método Marshall no es un método de investigación fundamental, algunos estudios han tratado de relacionar las propiedades que mide éste con otras características de la mezcla y con su capacidad portante.

Así Coetz y McLaughlin han relacionado la deformación Marshall con el ángulo de rozamiento interno de la mezcla, hallando la siguiente expresión:

$$\phi = 60 - F$$

donde

ϕ : ángulo de rozamiento interno en grados.

F: deformación Marshall expresada en centésima de pulgada.

Esta relación experimental parece cuestionable, si se considera que el ángulo de rozamiento interno depende fundamentalmente de las tensiones aplicadas y no de las deformaciones.

Por otra parte, Nijboer ha hallado una relación entre la estabilidad, deformación y la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos para que el firme no experimente deformaciones permanentes. Esta relación es la siguiente:

$$\frac{E}{F} = 30 p$$

siendo, E la estabilidad expresada en Kp, F la deformación expresada en mm y p la presión de inflado en Kp/cm².

Esta relación está basada en las dos hipótesis siguientes:

1. Se consideran que las deformaciones inferiores al 1% son esencialmente elásticas. Este valor determina el límite considerado en el cálculo de la fuerza portante ó presión de inflado.
2. La tensión de confinamiento del revestimiento se considera un 40% de la carga.

Básandose en las mismas hipótesis de Nijboer, pero considerando la tensión de confinamiento del 50%. Metcalf ha obtenido la siguiente expresión:

$$p = \frac{E}{F} \frac{(120-F)}{100}$$

donde la estabilidad, la deformación y fuerza portante están expresadas respectivamente, en libras, centésimas de pulgada y en libras por pulgada cuadrada. En la figura 2.3 se recogen las relaciones obtenidas por estos diversos autores.

Básandose en estas relaciones experimentales y en la observación de comportamiento bajo tráfico de mezclas que pre-

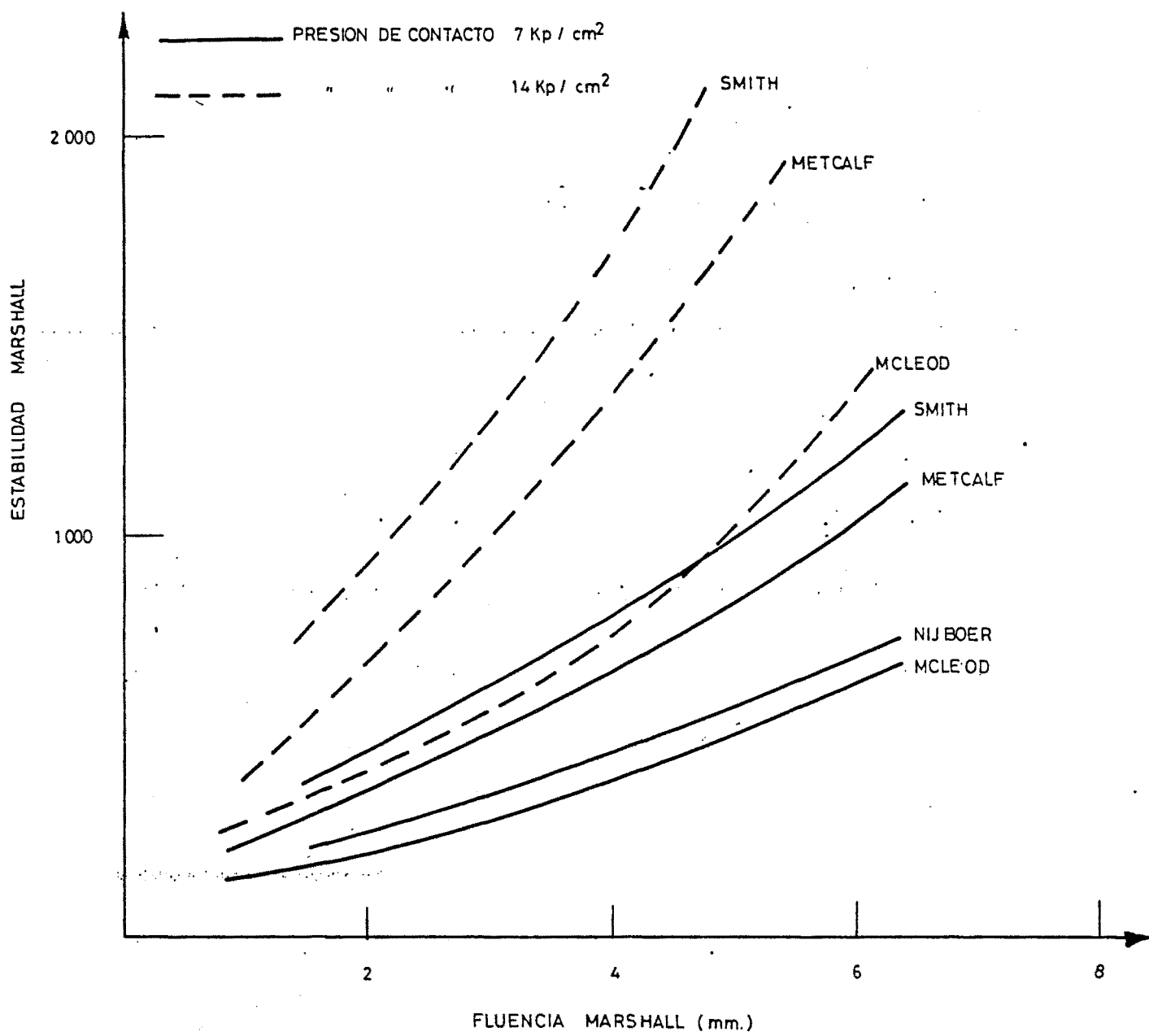


FIG. 2.3. - PARAMETROS MARSHALL DE LAS MEZCLAS RESISTENTES A LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN FUNCION DE LA PRESION DE CONTACTO

viamente habian sido caracterizadas con este ensayo, ver tabla 2.4, se han establecido diferentes criterios de diseño como los recogidos en la tabla 2.5, correspondientes al Instituto de Asfalto y al Ministerio del Aire Británico.

Los criterios que se siguen en España para determinar las características de la mezcla, estan fijados por el PG-3, tabla 2.6, en función del tipo de tráfico, y de su empleo. Se refieren a los siguientes parámetros:

- Estabilidad superior a 500 Kp para tráfico ligero, 1000 Kp para tráfico pesado.
- Deformación comprendida entre 2 y 3,5 mm.
- Porcentaje de huecos superior al 3% para permitir la dilatación del ligante en tiempo caluroso e inferior al 5% ó 8% dependiendo de la mayor ó menor permeabilidad requerida.

Conviene notar que aunque el Pliego no menciona el campo de validez de este ensayo, no lo aplica para la caracterización de mezclas abiertas.

A partir de estas prescripciones se deben determinar los intervalos óptimos del porcentaje de ligante. El método original del Corps of Engineers recomienda tomar como porcentaje

	COMPORTAMIENTO DE LAS SECCIONES BAJO EL EFECTO DE LA CIRCULACION.	ESTABILIDAD (Kp)	DEFORMACION (mm)
IGUAL ESTABILIDAD	Satisfactorio	663 647	1.52 3.05
	Deformaciones permanentes	636 665 647	3.30 4.06 4.06
IGUAL DEFORMACION	Satisfactorio	1818 913	3.30 3.30
	Deformaciones permanentes	636 531	3.30 3.30

* Composición de la mezcla: Arido grueso 55%, finos 39%, filler 6%.

TABLA 2.4. Comportamiento en servicio de mezclas caracterizadas con el ensayo Marshall en Laboratorio.

	TRAFICO	ESTABILIDAD (Kp)	DEFORMACION (mm)
INSTITUTO DEL ASFALTO	Ligero Medio Pesado	227 min. 227 min. 341 min.	3-5 2-4,5 2-4
U.K. AIR	Aeropuertos	317 min.	4 máximo

* 35 golpes por cara 50 golpes 75 golpes

TABLA 2.5. Recomendaciones sobre estabilidad y deformación Marshall del Asphalt Institute y U.K. Air.

CARACTERISTICAS	UNIDAD	T R A F I C O					
		P E S A D O		M E D I O		L I G E R O	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
Número de golpes en cada cara			75		75		50
Estabilidad	kgf	1.000*		750		500	
Deformación	mm	2	3,5	2	3,5	2	4
Capas de rodadura	%	3**	5	3	5	3	5
Capa intermedia		3**	6	3	8	3	8
Capa base		3	8	3	8	3	8
HUECOS EN ARIDOS EN MEZCLA	Mezclas D.S.G.12	15		15		15	
	Mezclas D.S.G.20	14		14		14	
	Mezclas D.S.G.25	13		13		13	

(*) En el caso de capas de base este valor será 750 kgf.

(**) Valor mínimo deseable, 4%.

TABLA 2.6. CRITERIOS DE PROYECTO DE MEZCLAS POR EL METODO MARSHALL (PG-3/75)(NLT-159/75).

de ligante óptimo en una primera aproximación, el valor medio del betún correspondiente a: la máxima estabilidad, máxima densidad, y los valores medios del intervalo fijado para el porcentaje de huecos en mezcla y de huecos rellenos de betún.

A pesar de haberse obtenido las relaciones comentadas anteriormente, es importante indicar el empirismo de este ensayo. Sin embargo, parece un ensayo insustituible, al menos actualmente, debido su gran empleo y a la enorme experiencia acumulada sobre el mismo.

Estabilómetro Hveem

El Estabilómetro Hveem está basado en principios menos empíricos que los métodos comentados anteriormente. Su empleo está indicado en mezclas bituminosas y en todo tipo de suelos. Consiste en una aplicación particular del ensayo triaxial, y en el se registra la variación de presión de confinamiento lateral cuando se incrementa la carga axial hasta un valor de 2.280 Kp. Después, se reduce la carga axial a 456 Kp y se mide el número de vueltas de la bomba manual para alcanzar una presión lateral de 7 Kp/cm^2 , figura 2.4.

A partir de estos dos valores, presión lateral transmitida y número de vueltas, se define la estabilidad Hveem que tiene en cuenta conjuntamente la deformación y la carga aplicada.

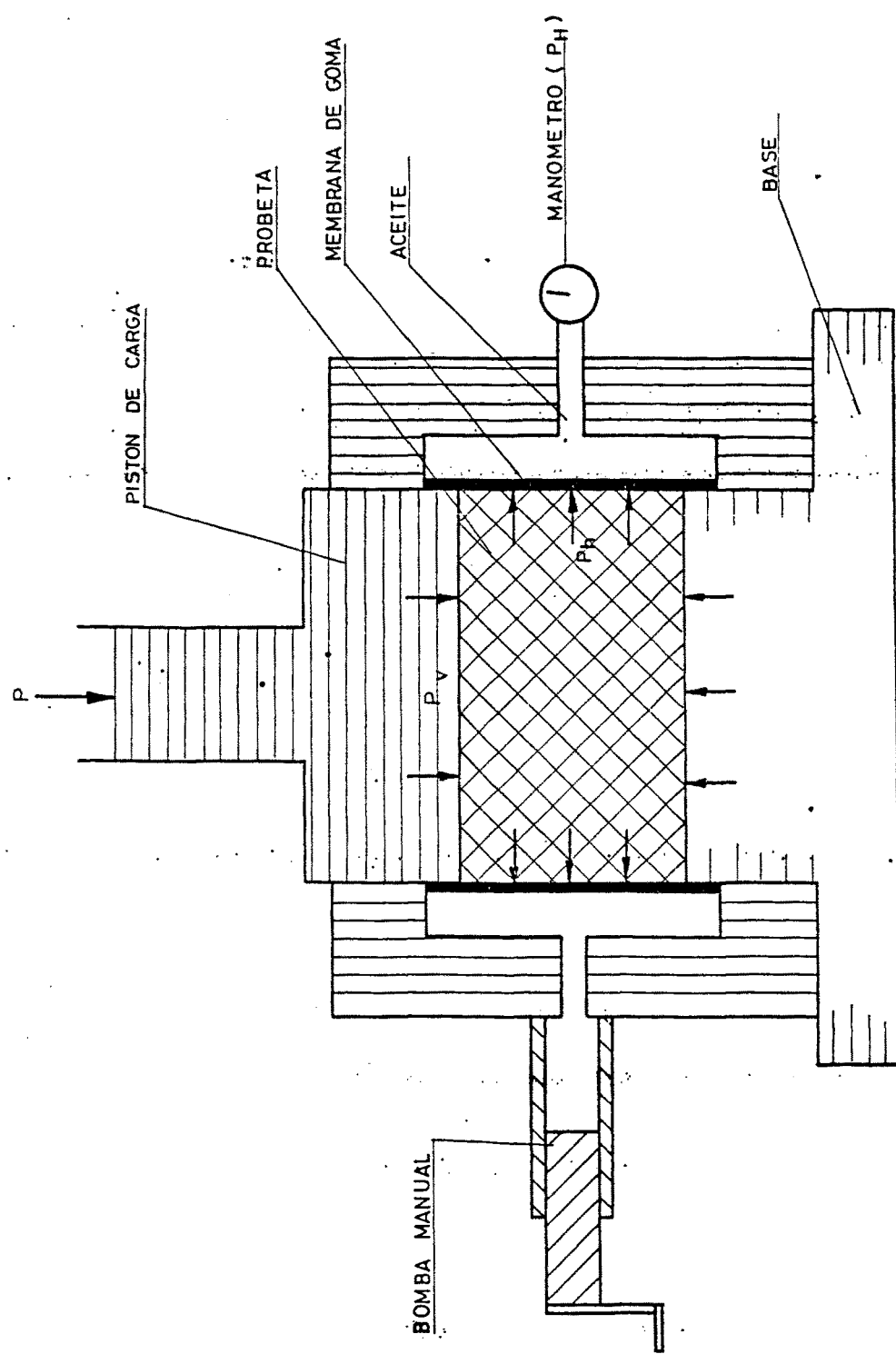


FIG. 2.4.- ESQUEMA DEL ESTABLOMETRO HVEEM

$$s = \frac{P_v - P_h}{P_v - P_h \left(1 - \frac{ID'}{0.222}\right)} \times 100$$

siendo

S = estabilidad Hveem (%)

P_v = presión vertical (Kp/cm²)

P_h = presión horizontal (Kp/cm²)

ID' = número de vueltas de la bomba manual

Una observación de la fórmula nos indica que cuanto mayor sea la estabilidad Hveem, el valor de la presión lateral será más pequeño y por lo tanto la mezcla será menos deformable. En las mezclas bituminosas habituales los valores de la estabilidad Hveem están comprendidos entre 20 y 40.

Ensayos de Identación

Por último, dentro de los ensayos que miden la estabilidad de la mezcla, vamos a considerar el penetromé^{tro} de como, que es el más representativo de los ensayos de identificación. Este ensayo se aplica a la dosificación de mastic y morteros bituminosos.

La estabilidad de una mezcla, se determina midiendo la huella dejada por una cono en la superficie de la muestra, cuando se ha aplicada una carga durante 3 minutos y a una temperatura de ensayo de 18°C. La estabilidad está dada por la relación siguiente:

$$s = \frac{p}{\pi e^2}$$

siendo

p = carga en Kg.

e = penetración en cm.

Ensayos triaxiales

Los ensayos triaxiales están incluidos en la clasificación RILEM en el grupo de ensayos fundamentales, puesto que permiten determinar los parámetros intrínsecos de la mezcla: cohesión y ángulo de rozamiento, y por la similitud que presentan estos ensayos con las sollicitaciones que está sometida la mezcla. El inconveniente con relación a otros ensayos mecánicos es la complejidad de su aplicación, por lo que su campo de utilización se ha centrado en trabajos de investigación ó en la dosificación de mezclas especiales.

Mediante este ensayo, además de determinar la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, podemos determinar la resistencia al fallo de la mezcla por deformación plástica producida por cargas repetidas (triaxiales dinámicos).

Existen dos tipos de ensayos triaxiales normalizados que se emplean en el estudio de mezclas bituminosas: ensayo triaxial Smith (sistema cerrado) y ensayo triaxial Carpenter (sistema abierto).

En el ensayo triaxial Smith los incrementos de carga son inferiores a 0,025 mm/min. El ángulo de rozamiento interno y la cohesión se obtienen de la curva, figura 2.5, que representa la relación entre la presión horizontal y vertical:

$$- \frac{a}{b} = \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\psi}{2} \right)$$

$$OD = 2C \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\psi}{2} \right)$$

dónde

ψ : ángulo de rozamiento interno

C: cohesión.

El triaxial de Carpenter aplica una carga vertical hasta la rotura, con una presión horizontal que permanece constante durante todo el ensayo. En este caso el cálculo del ángulo de rozamiento interno y el valor de la cohesión se realiza a partir de la determinación de los círculos de Mohr, por lo que es necesario realizar el ensayo para varios valores de la presión de confinamiento.

Apartir de los resultados obtenidos del ensayo sobre diferentes mezclas en laboratorio y de su comportamiento en el firme, se han establecido criterios de proyecto sobre los valores mínimos de la cohesión y ángulo de rozamiento que han de tener las mezclas para su empleo en carretera. En la figura 2.6 se recogen estos criterios, variables según los diversos

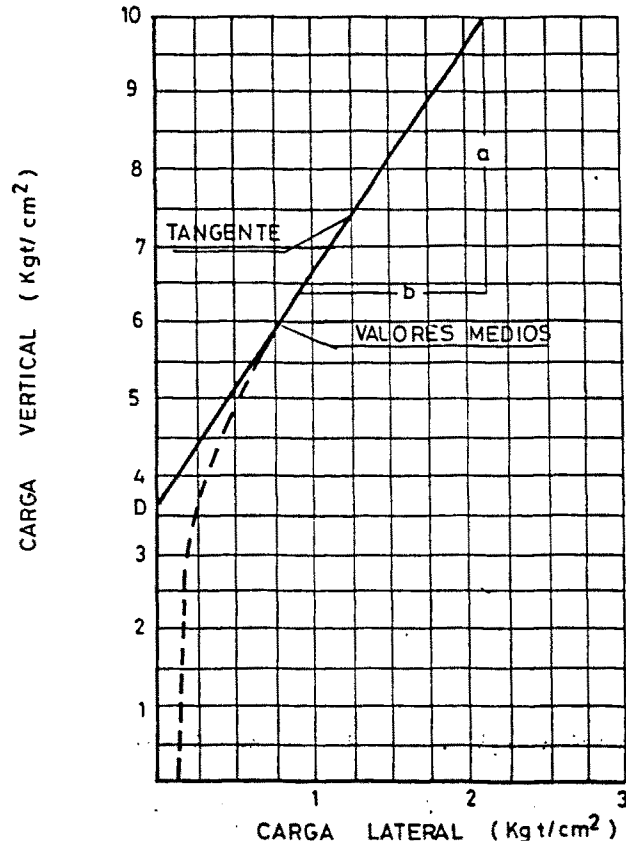
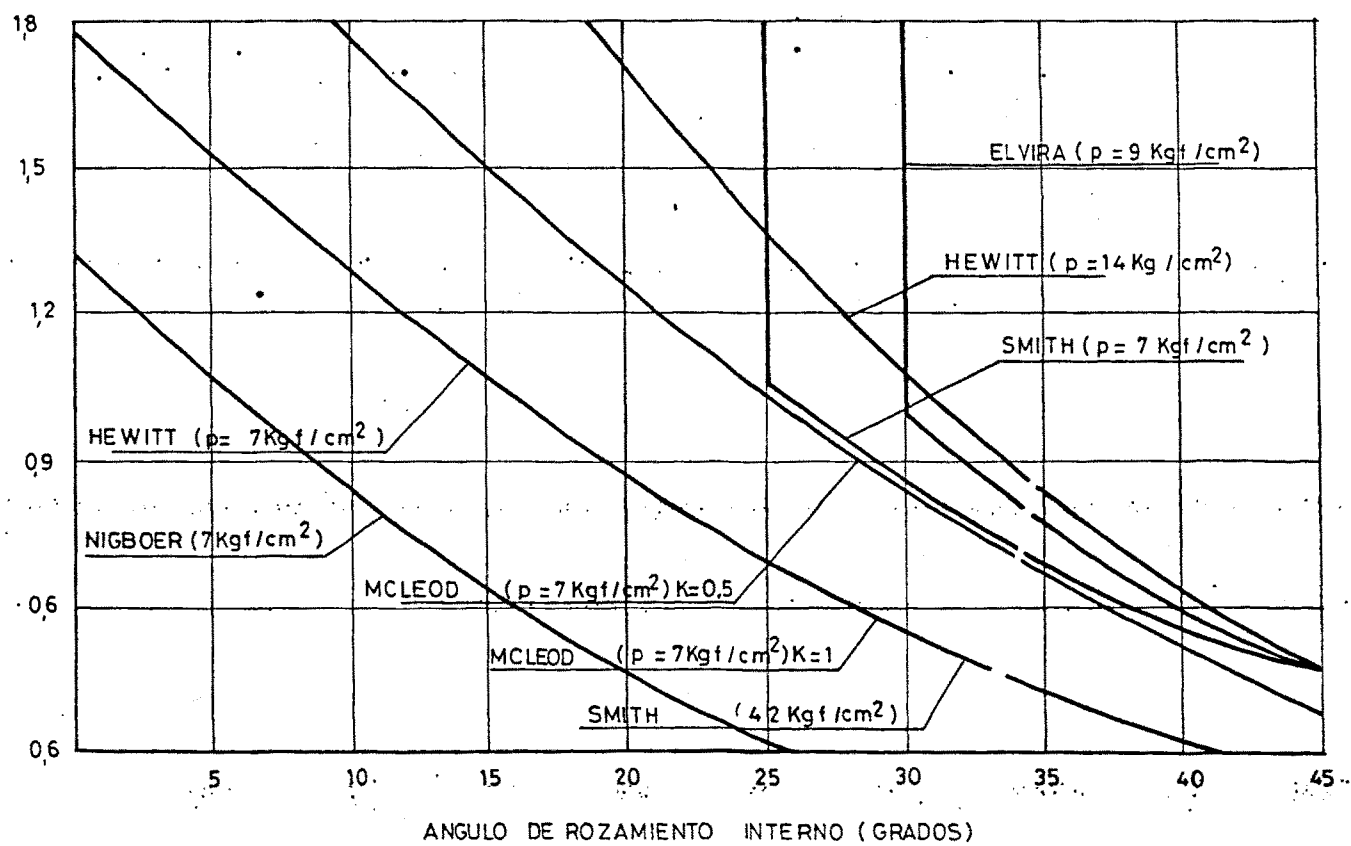


FIG. 2.5.- CURVA OBTENIDA EN EL ENSAYO TRIAXIAL (SISTEMA CERRADO SMITH)



ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (GRADOS)

P - PRESION DE CONTACTO

K - CONSTANTE RELATIVA A: GRADO DE CONFINAMIENTO TOTAL

FIG. 2.6.- CURVAS LIMITE PARA LA ESTABILIDAD DE LAS MEZCLAS SOMETIDAS A PRESIONES ESTATICAS

autores, ya que tienen en cuenta diferentes condiciones de tráfico y temperatura en su establecimiento.

2.2.2. ENSAYOS PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO

Mediante este tipo de ensayos se evalua la resistencia de la mezcla a la acción del agua, fenómenos de desenvuelta, pérdida de resistencia, etc. Normalmente consisten en medir las propiedades de la mezcla antes y después de tenerla sumergida en agua durante varios días:

-ensayo inmersión-compresión

-ensayo Duriez

o bien, realizar el ensayo en presencia de agua:

-ensayo de pista (probeta sumergida)

Ensayos de inmersión-compresión, consiste en la rotura de una serie de probetas cilíndricas ($\phi = 10$ cm, $h = 10$ cm), de las que una parte se rompen en seco y la otra parte se rompen después de haber estado sumergidas en un baño de agua a 49°C , durante cuatro días.

Se suele emplear este ensayo para poner de manifiesto la utilidad del uso de activantes o la necesidad de cambiar de tipo de filler. Para las mezclas empleadas habitualmente,

los valores de la resistencia en seco oscilan de 30 a 60 Kgf/cm², y generalmente se exige una resistencia conservada del 75%.

Ensayo Duriez. Otro método basado en ensayos de compresión, es el ensayo LCPC (método Duriez) que, como el de inmersión-compresión, mide el porcentaje de resistencia conservada.

Las probetas se compactan aplicando una presión de 120 Kp/cm², y se conserva la mitad al aire a una temperatura de 18°C y la otra mitad sumergida en agua.

Las probetas conservadas en seco y las probetas sumergidas en agua se rompen a los 8 días. También se mide el porcentaje de agua absorbida y el inchamiento volumétrico de las probetas después de los 8 días.

Para determinar las cantidades óptimas de ligante y filler, en el estudio de la mezcla, se emplean 3 contenidos de filler y 4 de betún. Asimismo es recomendable efectuar ensayos a 0 y 50°C para estudiar la susceptibilidad térmica de la resistencia a compresión.

Los criterios dados por el LCPC para mezclas empleadas como capas de regularización y de rodadura se recogen en la tabla 2.7.

		CAPA INTERMEDIA	CAPA DE RODADURA
RESISTENCIA A COMPRESION (Bares)	B-80/100	50	50
	B-60/70	60	60
	B-40/50	70	70
RESISTENCIA CONSERVADA		75	75
COMPACIDAD (%)		90 - 94	91 - 95

TABLA 2.7. Ensayo Duriez. Criterios LCPC.

Ensayo en pista (probeta sumergida)

Dentro del grupo de ensayos que miden la susceptibilidad al desplazamiento por agua, hay que incluir el ensayo en pista con inmersión. El principio del aparato es el mismo que el del ensayo en pista de laboratorio que describiremos mas adelante. Consiste en estudiar la evolución de una probeta sumergida en un baño a una temperatura constante, registrando como evoluciona la profundidad de la rodera en función del tiempo.

La falta de resistencia al desplazamiento se manifiesta por la aparición de erosiones superficiales y deformaciones plásticas excesivas.

2.2.3. ENSAYOS PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A TRACCION

Estos ensayos de resistencia a tracción se realizan de una forma indirecta, generalmente mediante ensayos de flexo tracción y compresión diametral. Son pocos los ensayos normalizados de este tipo que se emplean para la dosificación y control de mezclas bituminosas. En la tabla 2.2 hemos recogido el ensayo de cohesión Hveem y el ensayo de tracción indirecta.

Cohesiómetro Hveem

El ensayo del cohesiómetro Hveem, figura 2.7, generalmente se emplea conjuntamente con el ensayo del estabilómetro Hveem, que se describió cuando se comentaron los ensayos que median la estabilidad. Este ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica a un esfuerzo de tracción con una velocidad de carga constante hasta conseguir su rotura. El valor de la cohesión Hveem esta dada por la relación:

$$C = \frac{P}{W(0,2H+0,0445H^2)}$$

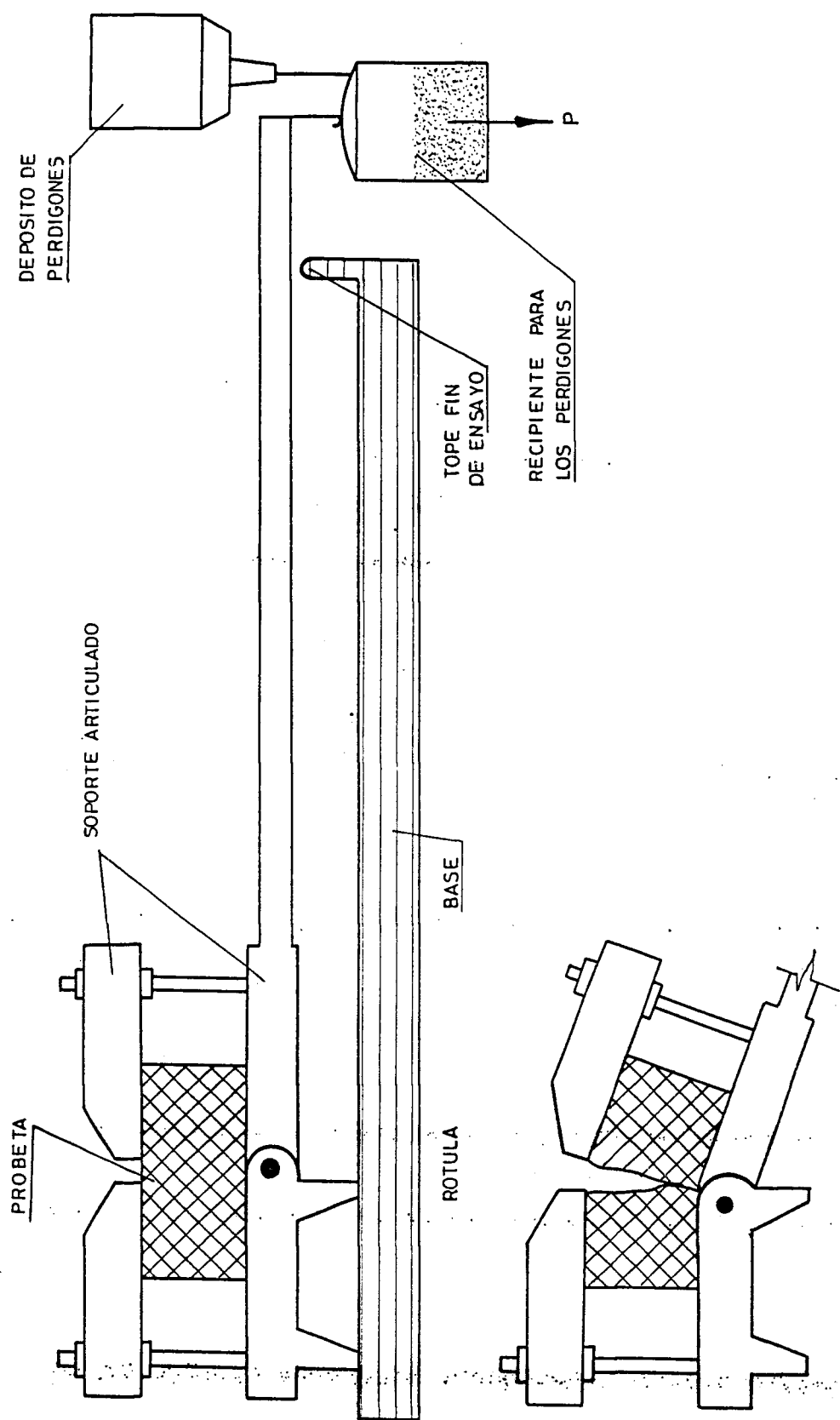
siendo

C = cohesión relativa

P = peso en gramos, necesario para romper la probeta

H = altura de la probeta en pulgadas

W = diámetro de la probeta en pulgadas.



ESQUEMA DE LA PROBETA ROTA

FIG. 2.7. - ESQUEMA DEL COHESIOMETRO HVEEM

La tabla 2.8 recoge los valores mínimos de la estabilidad y cohesión Hveem, recomendados por el Instituto del Asfalto, en función de la intensidad de tráfico.

TIPO DE TRAFICO	PESADO	MEDIO	LIGERO
Estabilidad relativa	37	35	30
Cohesión relativa	50	50	50
Entumecimiento	Menos de 0,76 mm.		

TABLA 2.8. Recomendaciones del Instituto del asfalto sobre la estabilidad y cohesión Hveem.

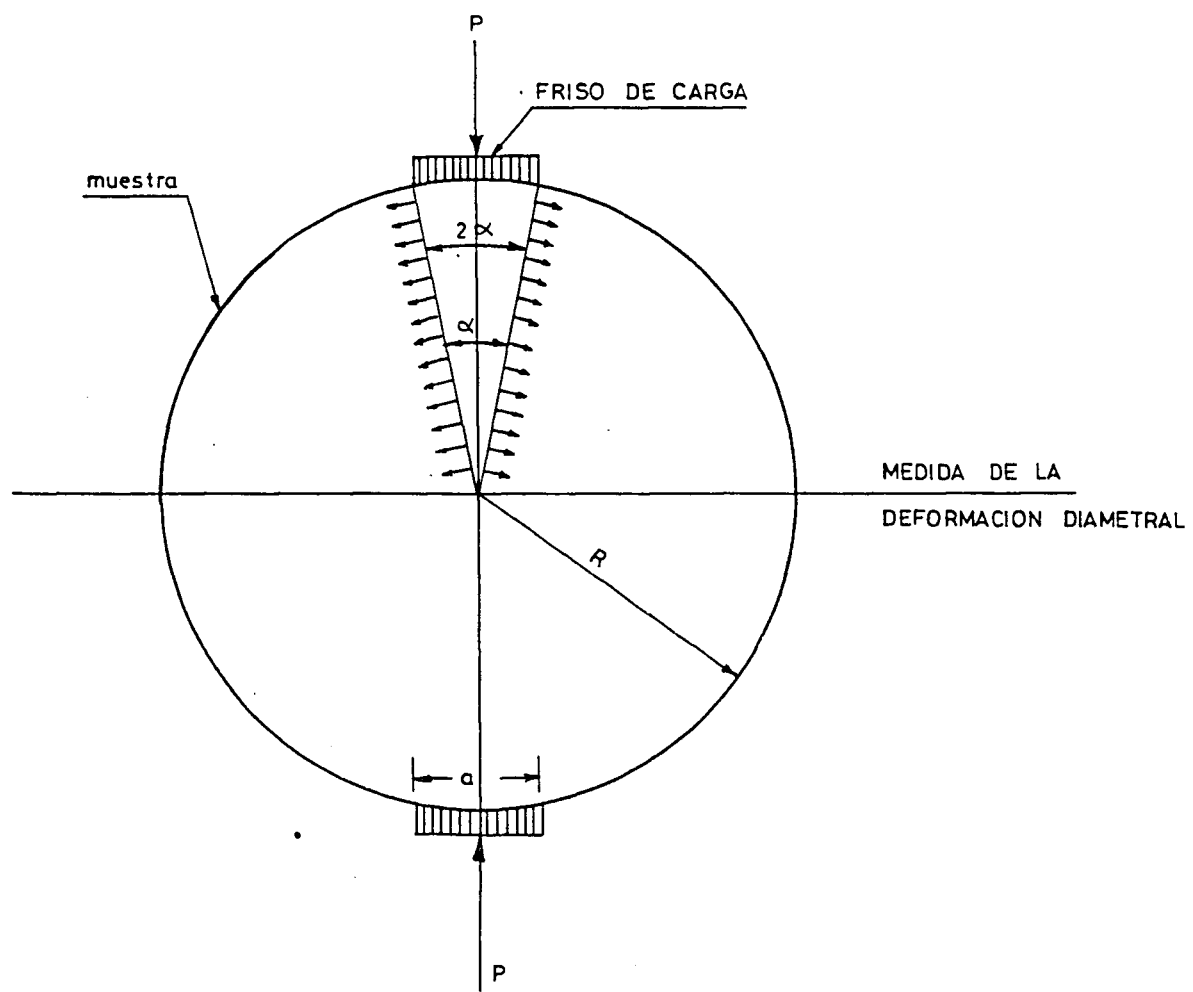
Ensayo de tracción indirecta

Consiste en la rotura de una probeta cilíndrica, mediante una carga que se aplica en dos generatrices opuestas, produciéndose la rotura por un esfuerzo de tracción, figura 2.8.

El ensayo se debe de realizar a una velocidad de deformación constante, registrando durante el ensayo la variación de la carga en función de la deformación diametral medida en un plano perpendicular al de aplicación de la carga.

La resistencia a tracción indirecta de un material elástico se determina aplicando la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi ah} \left(\text{sen} 2\alpha - \frac{a}{2R} \right)$$



$$\sigma_t = \frac{2 P}{\pi a h} \left(\text{sen } 2 \alpha - \frac{a}{2 R} \right)$$

σ_t = TENSION DE TRACCION INDIRECTA

P = CARGA VERTICAL APLICADA EN LA MUESTRA

a = ANCHO DEL FRISO DE CARGA

h = ALTURA DE LA MUESTRA

R = RADIO DE LA MUESTRA

FIG. 2.8.- ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA

donde

P = carga vertical en Kp,

a = ancho del friso de carga,

h = altura de la probeta en cm,

R = radio de la probeta en cm,

σ_t = tensión a tracción en Kp/cm²,

2 α = ángulo en el centro de la probeta correspondiente a la superficie cargada.

En el caso de aglomerado, y para tener en cuenta el carácter plástico de las deformaciones, algunos autores proponen adoptar para el valor de la resistencia a la rotura:

$$\sigma = \frac{P}{\pi ah} \left(\text{sen} 2\alpha - \frac{a}{2R} \right)$$

Este ensayo nos permite también determinar el módulo de rigidez de la mezcla, a partir de la carga y la deformación producida, mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{P}{dh} (0,27324 + \nu)$$

donde

S = módulo de rigidez Kp/cm²

ν = módulo de Poisson

d = deformación medida en el diámetro perpendicular al de la aplicación de la carga en cm.

Esta relación se ha obtenido suponiendo que en cada momento del ensayo el material se comporta elásticamente.

El módulo de la mezcla se determina para diferentes tiempos de aplicación de carga, lo que nos permite establecer una correlación entre el logaritmo del módulo de la mezcla y el tiempo en el que se ha determinado este.

Según Lottman esta correlación se puede ajustar mediante una recta, figura 2.9, lo que nos permite definir el valor del módulo instantáneo de elasticidad correspondiente a un tiempo de aplicación de carga cero. Este valor del módulo instantáneo y el valor de la resistencia a tracción se utilizan para caracterizar mediante este ensayo la resistencia mecánica y la deformabilidad de la mezcla.

2.2.4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La comisión técnica 17BM del RILEM, en la publicación "cahier 17 BM/Nº2/1966" recoge dos ensayos que miden la fluencia por esfuerzo cortante .

Ensayo de esfuerzo cortante a carga constante, reparto de fluencia impuesto

Un esquema de este ensayo se recoge en la figura 2.10, consiste en someter a una probeta con forma de paralelepípe-

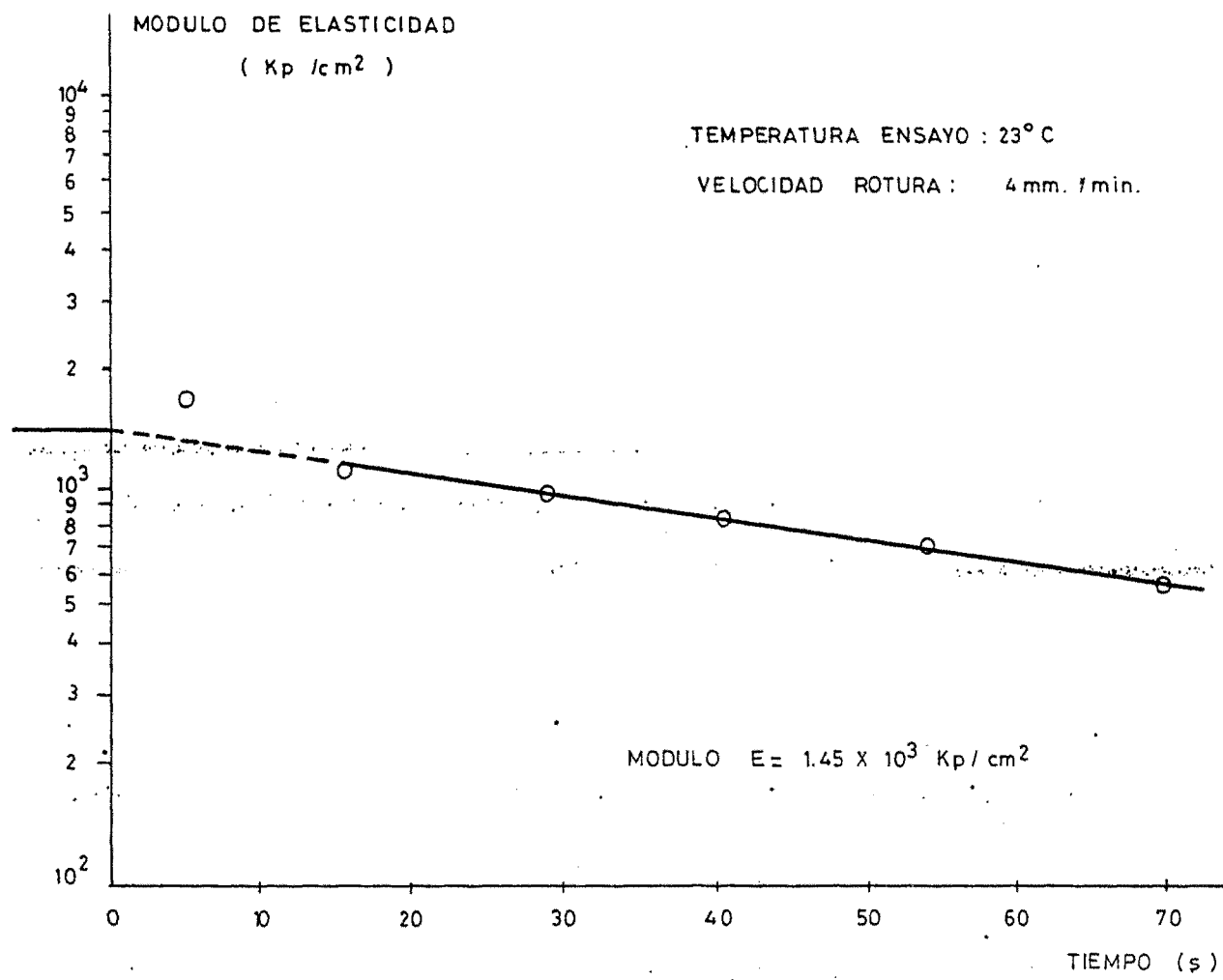


FIG. 2.9.- RELACION ENTRE EL LOGARITMO DEL MODULO DE ELASTICIDAD Y EL TIEMPO DURANTE EL ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (R. P. LOTTMAN (20))

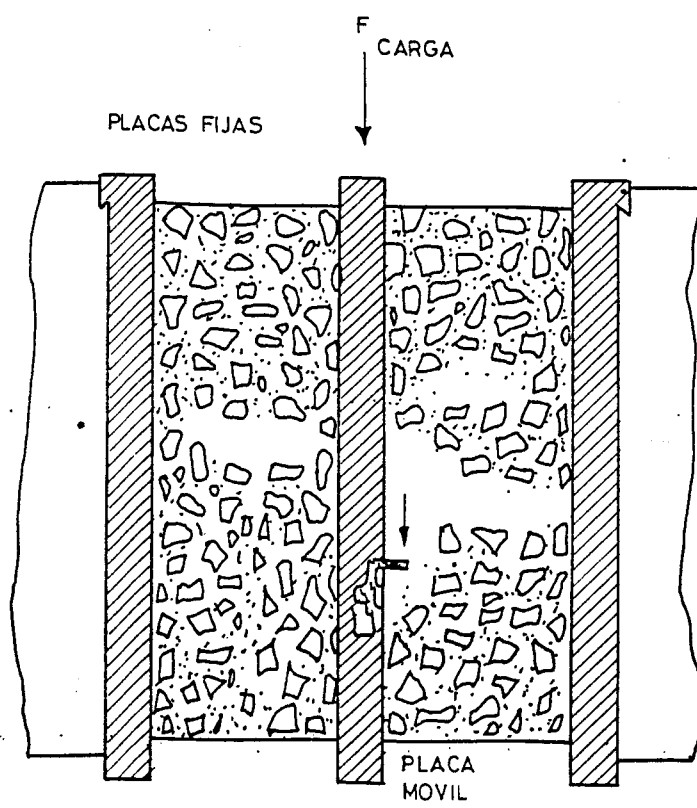
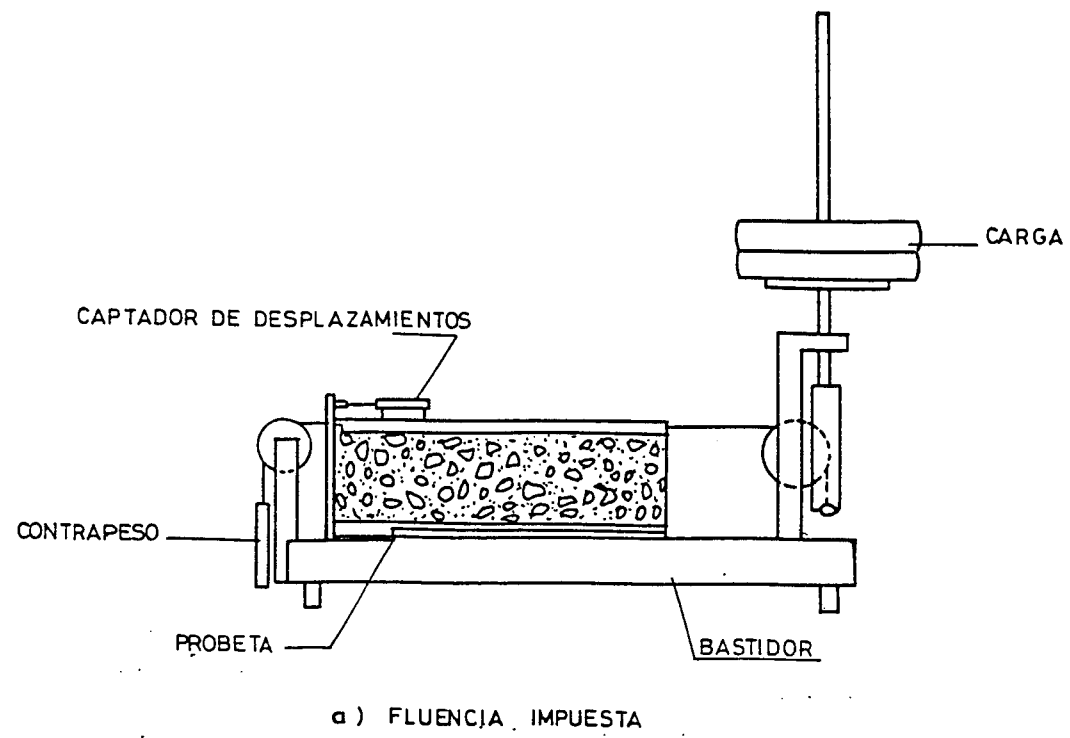


FIG. 2.10. - ENSAYO DE ESFUERZO CORTANTE

do y una cara fija, a una carga que actúa en la cara opuesta y en la dirección paralela a la base fija. La deformación de la mezcla se registra a lo largo del ensayo hasta el momento de la rotura.

Ensayo de esfuerzo cortante a carga constante, reparto de fluencia no impuesto

El ensayo anterior tiene el inconveniente de conducir durante el ensayo a un aumento del espesor de la probeta, debido al desplazamiento de los áridos. Esto provoca que la cara superior, no se mantenga paralela a la fija, lo que hace que en los extremos opuestos aparezcan esfuerzos de tracción y compresión..

Para evitar este problema la carga se ejerce sobre una placa metálica dispuesta entre dos probetas, sometiendo al conjunto a un confinamiento, que permita la libre dilatación de la probeta.

2.2.5. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FISURACIÓN Y A LA DEFORMACIÓN POR FATIGA

En el comportamiento de una mezcla bituminosa no sólo se debe tener en cuenta su respuesta ante cargas estáticas, sino más bien considerar su comportamiento ante cargas dinámicas, repetidas, variables en el tiempo, que inferiores a las de

rotura, van produciendo poco a poco su fallo, bien por fisuración o por deformaciones permanentes excesivas.

En general estos ensayos se pueden clasificar en dos categorías:

-Ensayos destinados a estudiar el comportamiento a flexión repetida.

-Ensayos destinados a estudiar el comportamiento a compresión repetida.

La primera categoría trata de estudiar los fenómenos de fisuración por fatiga, que son los predominantes cuando las temperaturas son elevadas y los tiempos de carga son pequeños.

La segunda categoría trata de estudiar los fenómenos de deformación permanente, que son los predominantes cuando las temperaturas son elevadas y los tiempos de carga prolongados.

Dentro de la primera categoría, existen numerosos ensayos que se han desarrollado por diferentes organismos. Con ellos se estudia la respuesta mecánica ante una sollicitación y condiciones de ensayo prefijados, determinando los módulos de rigidez y las relaciones existentes entre la tensión ó de formación con el número de ciclos de carga hasta la rotura.

Normalmente en todos los casos se obtiene una correlación lineal entre el logaritmo de la tensión ó deformación impuesta y el número de repeticiones de carga.

$$\log \sigma = a + b \log N$$

$$\log \epsilon = a' + b' \log N$$

siendo a, a', b, b' coeficientes de la correlación que dependen del tipo de mezcla, sollicitaciones y temperaturas a que se realiza el ensayo.

La segunda categoría recoge los ensayos destinados a estudiar la resistencia ante deformaciones plásticas por fatiga:

- Ensayo de pista en laboratorio
- Máquina giratoria
- Triaxial dinámico

Ensayo de pista en laboratorio. Consiste en someter a una probeta prismática a la acción de una rueda maciza que describe un movimiento de vaiven con una frecuencia de 42 pasadas por minuto. Manteniéndose una temperatura constante durante todo el ensayo, se procede a registrar la evolución de la profundidad de la rodera en función del tiempo. Ver figura 2.11.

Se ha adoptado como resultado del ensayo la velocidad de deformación en los últimos 15 minutos, figura 2.12. En España se recomienda que esta velocidad de deformación sea inferior a $1,5 \cdot 10^{-2}$ mm/min.

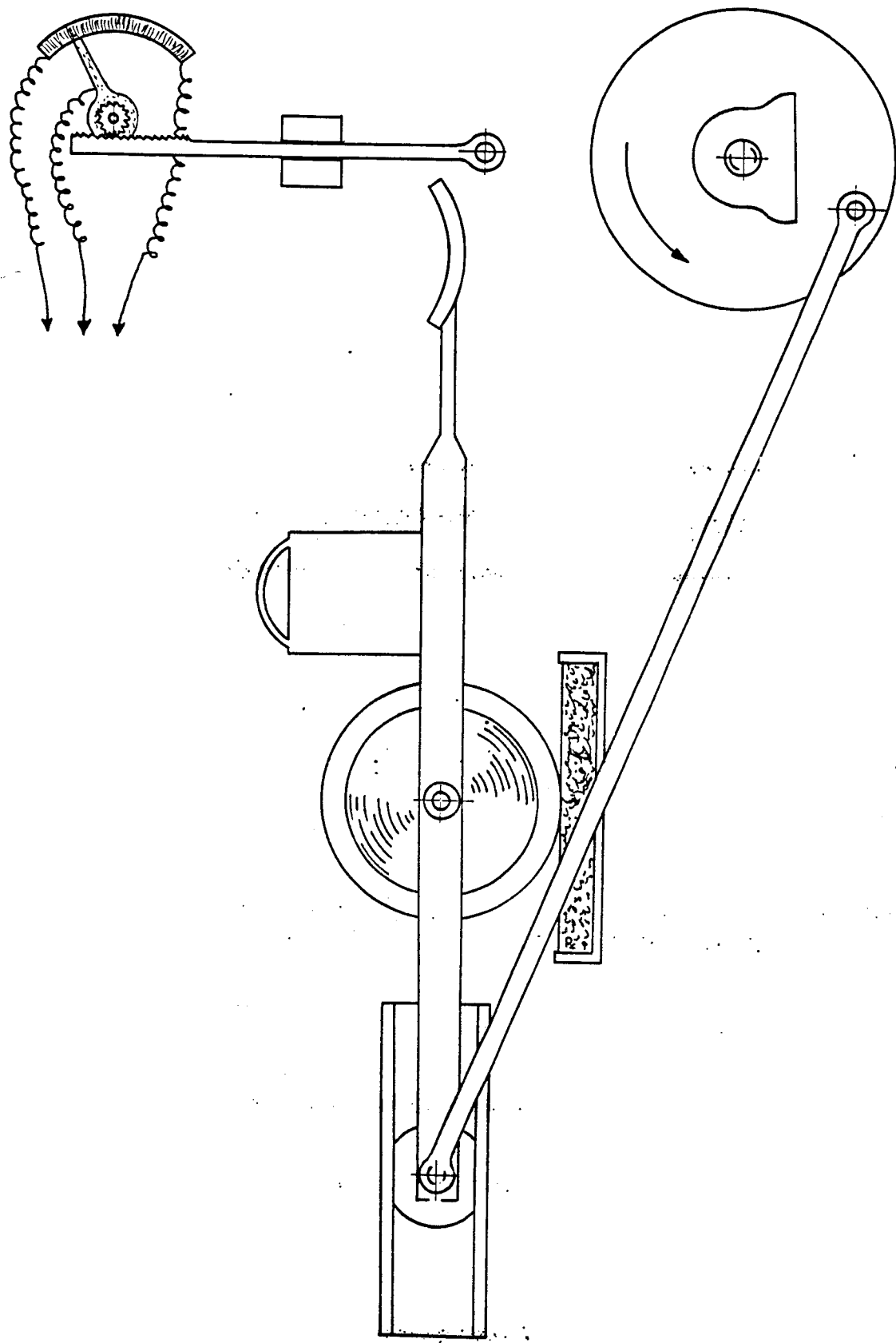


FIG. 2.11.- ESQUEMA DE LA MAQUINA EN PISTA DE LABORATORIO

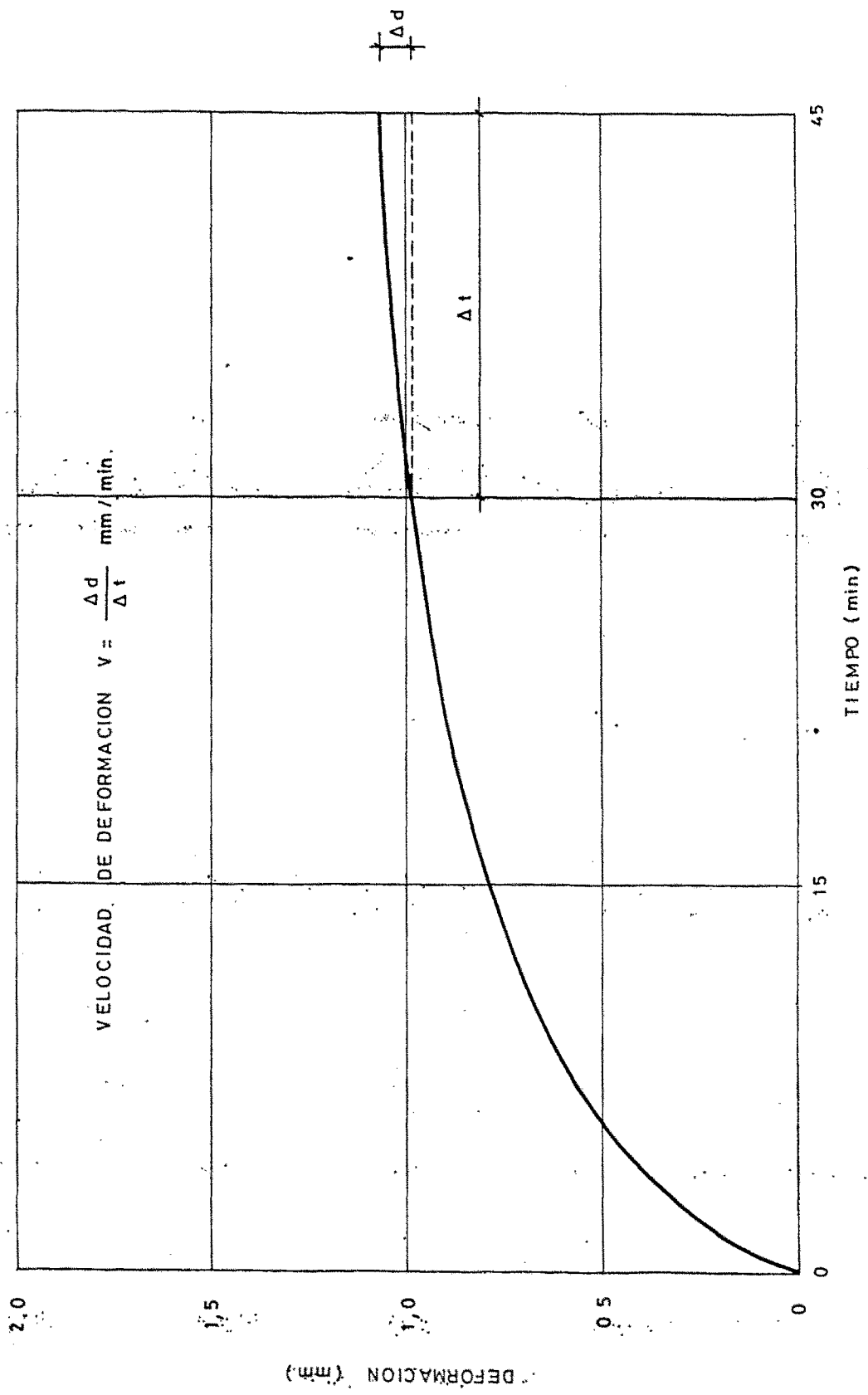


FIG. 2.12.- CURVA DEFORMACION - TIEMPO NORMAL EN UN ENSAYO EN LA PISTA DE LABORATORIO

Las principales ventajas de este ensayo son:

- 1) La carga de ensayo es similar a la del tráfico real.
- 2) La deformación de la mezcla situada bajo la zona de carga es contenida por el propio material ensayado.
- 3) Las tensiones varían en magnitud y dirección sin llegar a valores de rotura.
- 4) El comportamiento de la mezcla es similar a las capas de rodadura de firmes semirrígidos.

Máquina giratoria

La máquina giratoria consiste en un molde cilíndrico de acero que contiene la mezcla que se desea ensayar. La mezcla se somete a una compresión mediante un gato situado en la parte inferior del aparato, que permite ejercer una presión vertical constante. Durante el ensayo la probeta adquiere una inclinación producida por dos rodillos que giran alrededor de su eje vertical, produciendo un movimiento que amasa la probeta, figura 2.13.

Este ensayo está indicado para estudiar los procesos de plastificación y el grado de compacidad de la mezcla. Empleando este ensayo se puede estudiar:

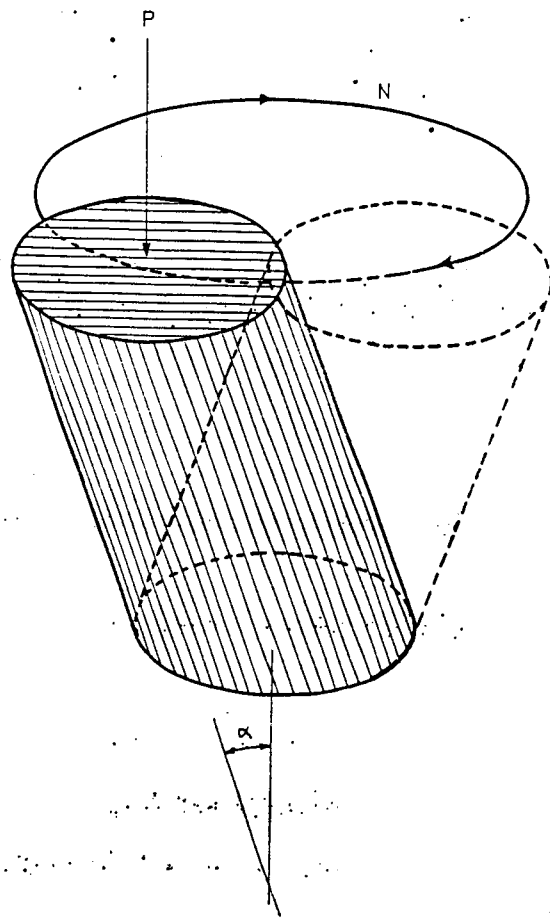
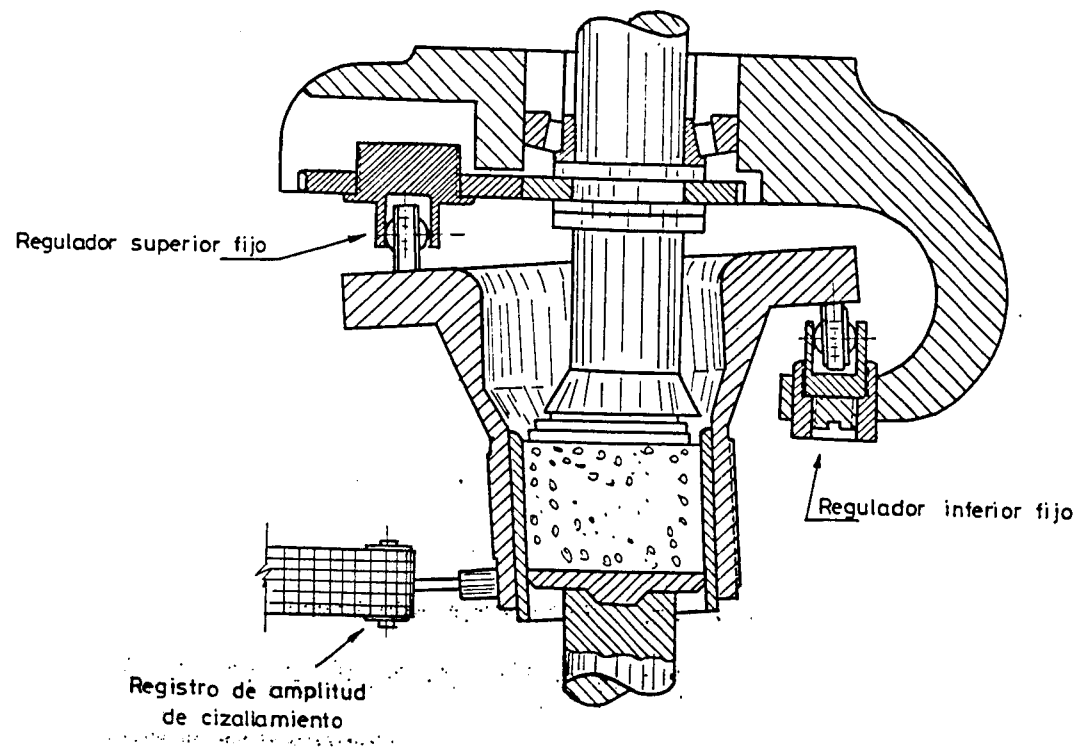


FIG. 2.13.- ESQUEMA DE LA COMPACTACION DE UNA PROBETA MEDIANTE MAQUINA GIRATORIA

-El contenido óptimo de ligante de una mezcla.

-Los fenómenos de densificación de la mezcla posteriormente a su puesta en servicio.

-La deformación plástica en función de las variables que se miden en el aparato.

-Modificaciones de la granulometría de la mezcla por degradación del esqueleto mineral del árido.

Triaxial dinámico

El ensayo triaxial dinámico tiene el mismo principio de funcionamiento que el ensayo triaxial estático, siendo la única diferencia, la posibilidad de variar las solitaciones a lo largo del tiempo.

Mediante este ensayo se puede estudiar la evolución de una mezcla en función de número de aplicaciones de carga, analizando como influyen los tiempos de carga y de reposo, la amplitud de las cargas verticales, la presión de confinamiento lateral y la temperatura de ensayo.

Son numerosos los estudios llevados a cabo por diferentes organismos destinados a estudiar el comportamiento de mezclas bituminosas, siendo las principales conclusiones obtenidas las siguientes:

-Las frecuencias de las presiones verticales que mejor simulan el tráfico real están comprendidas entre 1 y 10 Hz, dependiendo de la profundidad del elemento de firme considerado y de la velocidad de los vehículos.

-Los tiempos de reposo entre tiempos de carga no influyen en los resultados.

-Una presión lateral dinámica es equivalente a una estática de valor igual al medio de aquella. Los valores reales de confinamiento de las mezclas bituminosas oscilan de 0,3 a 2 Kgf/cm².

-Un aumento de la amplitud de oscilación de la presión vertical incrementa la deformación vertical, pero no la velocidad de deformación.

-Dentro del rango de estudio de la temperatura (10°C a 40°C), existe una relación lineal entre los logaritmos de la velocidad de deformación y de la temperatura.

-Para las mezclas empleadas como capa de rodadura se alcanza el 6% de la deformación total unitaria para un número de ciclos comprendido entre 10⁴ y 15⁵.

Se puede decir que los ensayos triaxiales son fundamentales en la investigación y en el conocimiento de los mecanismos de comportamiento ante las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas, presentando buenas correlaciones con las deformaciones permanentes medidas en cazadas experimentales, figura 2.14.

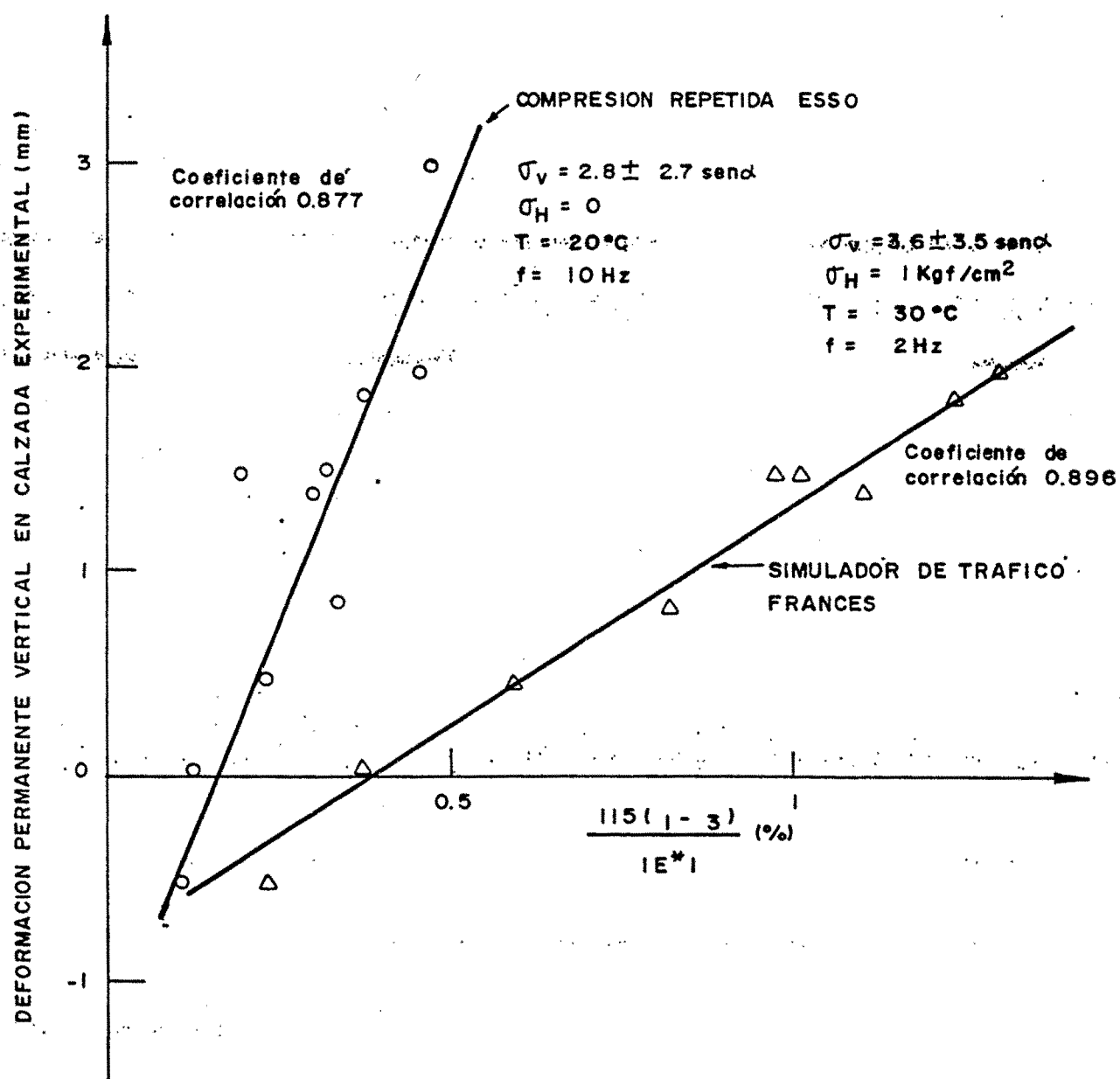


FIG. 2.14.- CORRELACION ENTRE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES DINAMICOS Y LA DEFORMACION MEDIDA EN CALZADA EXPERIMENTAL.

CAPITULO 3

ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA
POR DESGASTE, DESARROLLO Y
NORMALIZACION

3.1. ANÁLISIS DEL EMPLEO DE ENSAYOS MECANICOS EN LA CARACTERIZACION DE MEZCLAS ABIERTAS

El análisis de los métodos de dosificación de mezclas de granulometría abierta pone de manifiesto la ausencia de ensayos en los procedimientos desarrollados.

Normalmente estos se basan en la determinación del porcentaje de ligante en función de la superficie específica de los áridos, existiendo diferentes relaciones en función de la experiencia de los distintos países y autores que las han formulado.

Duriez establece la siguiente relación entre el porcentaje en peso de betún referido al peso total de los aridos y la superficie específica:

$$A = K \sqrt[5]{\frac{\epsilon}{\alpha}}$$

donde

A = porcentaje en peso de betún referido al peso total de los aridos.

ϵ = es la superficie específica de los aridos.

α = es un factor de corrección por densidad del árido dado por la relación:

$$\alpha = \frac{2,65}{\text{densidad del arido}}$$

K = módulo de riqueza, que debe tomarse.

3 a 3,5 para capas de base

3,3 a 3,8 para capas intermedias

3,8 a 4,8 para capas de rodadura

Otras expresiones son las dadas por la FHWA, por el estado de California y Colorado:

$$A = 2K_C + 4 \text{ (FHWA)}$$

$$A = 1,5 K_C + 4,0 \text{ (California)}$$

$$A = 1,5 K_C + 3,5 \text{ (Colorado)}$$

donde K_C es la superficie específica de la fracción de arido retenido por el tamiz 5 UNE.

La expresión dada por el Estado de Colorado es la misma que ha recogido la Norma del Laboratorio del Transporte NLT-169/72 para la dosificación de mezclas de granulometrías abiertas.

En el caso del método de Duriez la superficie específica de los aridos se calcula a partir de su granulometría mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = 0.25G + 2.3S + 12s + 135F$$

donde

G = peso elementos superiores a 6 mm

S = peso elementos entre 6 y 0.315 mm

s = peso elementos entre 0.314 y 0.08 mm

f = peso elementos inferiores a 0.08 mm

En los restantes casos la superficie específica se determina empleando el abaco de la figura 3.1, a partir del porcentaje de aceite retenido por la fracción del árido superior a 5 mm, después de haber estado sumergido en aceite durante 5 minutos y habiéndolo dejado escurrir durante 15 minutos a 60°C. Este porcentaje está referido al peso del arido seco y debe de ser multiplicado por el factor α antes comentado para tener en cuenta la densidad relativa del arido.

En la aplicación del método de Duriez no se tiene en cuenta la absorción de los aridos. Los otros métodos no consideran los porcentajes de arido fino (pasa 5 UNE) presente en la mezcla, que pueden ser muy importantes en el caso de mezclas porosas, con valores próximos al 30%.

Todas estas fórmulas pretenden proporcionar un espesor de película de ligante que recubra totalmente los aridos y de una adecuada cohesión a la mezcla. Al aumentar la dotación de ligante se aumenta la cohesión de la mezcla, pero su exceso produce una disminución del rozamiento interno y estabilidad de

MATERIAL UTILIZADO ARIDO: PASA EL TAMIZ 20 UNE QUEDA RETENIDO POR EL 5UNE
ACEITE SAE 10
% ACEITE RETENIDO CORREGIDO = % ACEITE RETENIDO x DENSIDAD RELATIVA DEL ARIDO
2,65

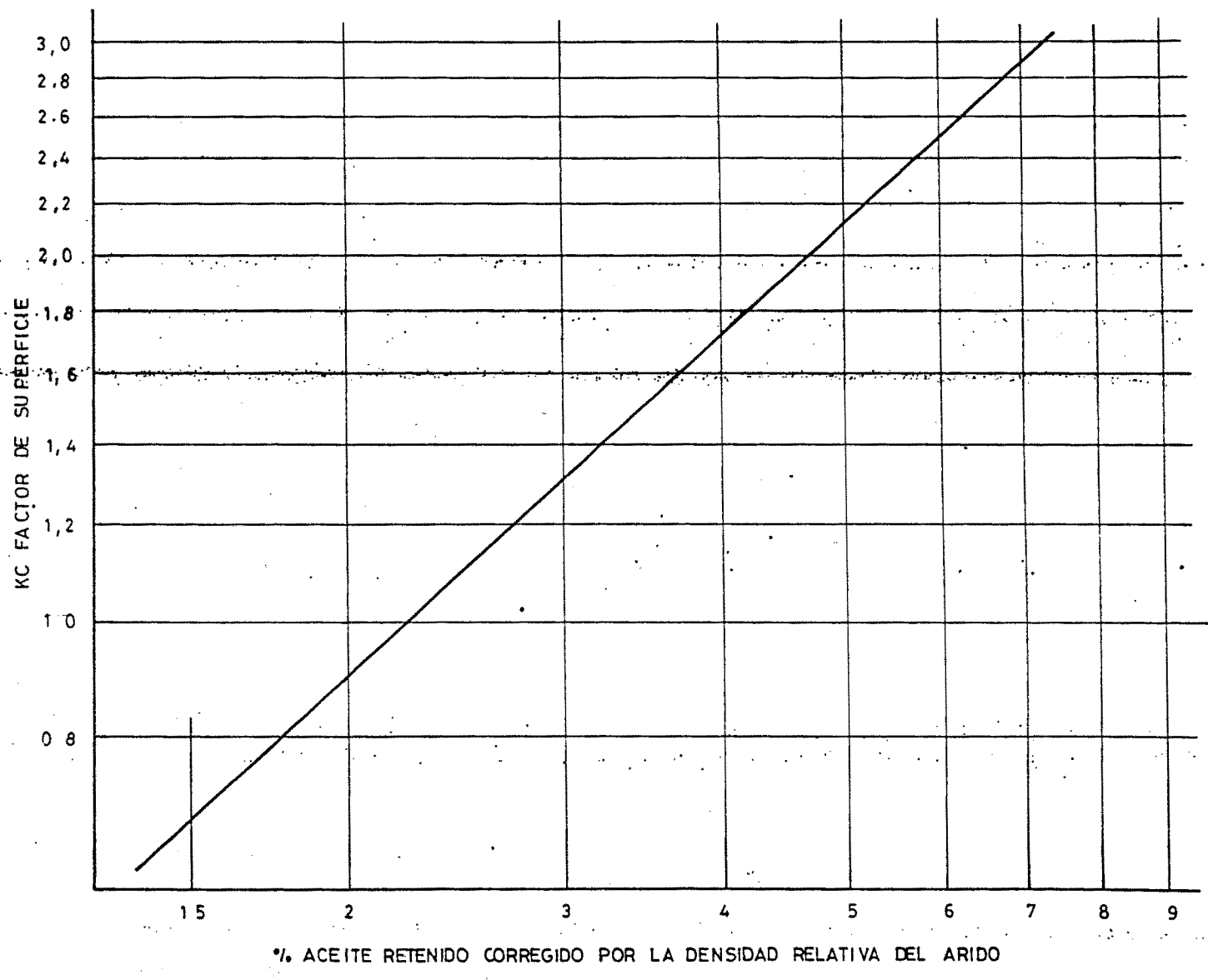


FIG. 3.1.- ABACO PARA DETERMINAR KC DE LA ABSORCION DEL ARIDO GRUESO

la mezcla. Incluso podría ocurrir que el exceso de ligante aflore en la superficie, dando lugar en el pavimento a manchas de ligante, es decir, a superficies deslizantes, impermeables y deformables.

Por otra parte, estas mezclas tienen el inconveniente que durante su fabricación ó extendido puede producirse fácilmente el escurrimiento del ligante. A la temperatura a que se fabrica la mezcla con betún de penetración, o bien, cuando se emplean emulsiones, la viscosidad del ligante es baja, y los riesgos de escurrimiento grandes. Por ello, muchas veces estos métodos van acompañados de un ensayo de escurrimiento, en el que se determina el máximo porcentaje de emulsión que se puede emplear sin que esta escurra, ó la máxima temperatura y porcentaje de betún que se puede emplear en el caso de fabricar una mezcla en caliente.

En el caso de mezclas en caliente, este ensayo consiste en envolver los aridos con diferentes porcentajes de ligante y temperaturas, e introducir la mezcla en una estufa a la temperatura que se empleó en su fabricación. Al cabo de 60 minutos se observa si sobre la base del recipiente de vidrio en que se introdujo la mezcla se ha producido el escurrimiento del betún, ó bien solo existen pequeñas manchas de ligante en las puntas de contacto entre la mezcla y el vidrio. La temperatura de fabricación de la mezcla en planta deberá ser inferior a la mínima en que se observen índices de escurrimiento.

Por otra parte, la viscosidad del ligante debe ser adecuada para conseguir una buena envuelta de los aridos. La FWHA recomienda que la envuelta de la mezcla se realice a una temperatura que proporcione al ligante una viscosidad comprendida entre 700 y 900 centistokes. Sin embargo, algunos estados americanos realizan la envuelta cuando el ligante tiene una viscosidad comprendida entre 1400 y 1700 centistokes, que corresponde a una temperatura inferior en 8°C a las recomendaciones de la FWHA.

De todos modos, hay que hacer notar que el ensayo de escuarrimiento tiene como único fin fijar la temperatura de envuelta y no debe ser utilizado como método de dosificación para determinar el porcentaje de ligante. Este, lo mismo que los otros componentes de la mezcla, deben de ser elegidos para que de acuerdo con las condiciones ambientales y sollicitaciones a que va a estar sometida, la mezcla se comporte adecuadamente.

En el caso de las mezclas bituminosas porosas, las propiedades que más nos interesan son la porosidad, estabilidad, cohesión y resistencia al envejecimiento a la acción del agua.

De estas variables, únicamente la FWHA da un procedimiento de ensayo para el estudio de la porosidad. El contenido de huecos en mezcla es un factor importante que es preciso cuidar en la dosificación de este tipo de mezclas. De su valor dependen

de su permeabilidad y, en especial, la capacidad para almacenar el agua.

El método empleado para determinar densidades y huecos en mezclas densas y semidensas, consistente en pesar la probeta seca, sumergida y saturada con la superficie seca, proporciona resultados erróneos cuando se aplica a mezclas porosas. Por ello, la FHWA ha desarrollado un procedimiento para determinar el porcentaje de huecos de la mezcla a partir de huecos de la fracción de arido grueso y el porcentaje de ligante. Este porcentaje de huecos está dado por la relación:

$$H_m = VA - \frac{100}{100 - P_f} \left(\frac{P_b \cdot d_{ag}}{d_b} + P_f \frac{d_{ag}}{d_f} \right)$$

siendo

H_m = porcentaje huecos en mezcla

VA = porcentaje de huecos en la fracción de arido grueso retenido por el tamiz 2,5 UNE, compactado por vibración

P_b = porcentaje en peso de betún s/a

P_f = porcentaje de aridos que pasan por 2,5 UNE

d_{ag} = densidad relativa aparente de la fracción del arido grueso compactada por vibración

d_b = densidad relativa del betún

d_f = densidad relativa real de la fracción fina

La densidad relativa aparente d_{ag} y el porcentaje de huecos VA se determinan, figura 3.2, compactando por vibración en un

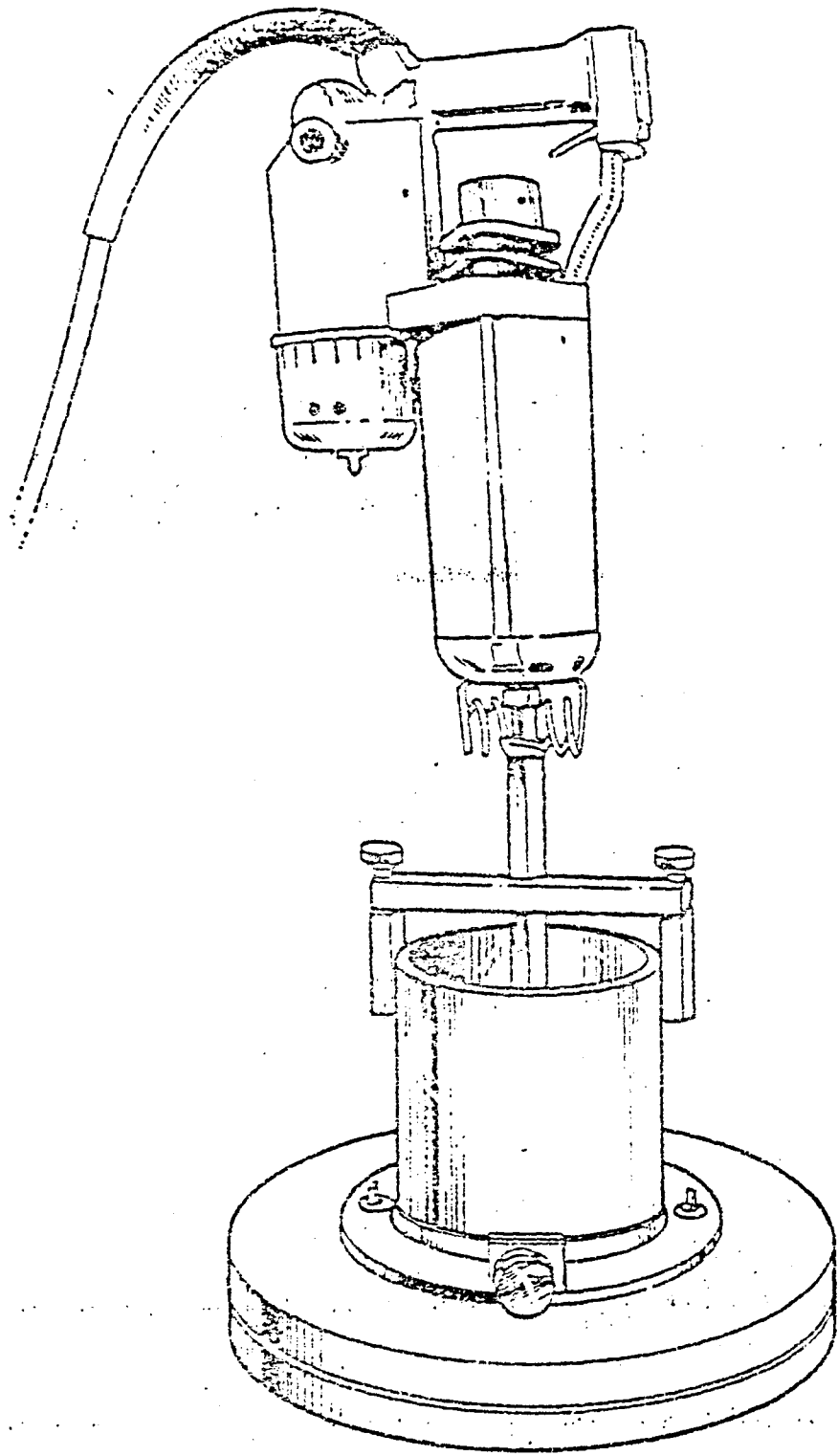


FIG. 3.2.- METODO DE LA FHWA. PROCESO DE COMPACTACION
POR VIBRACION DE LA FRACCION GRUESA

molde cilíndrico, figura 3.3, la fracción de arido retenido por el tamiz 2,5 UNE. Otros autores consideran que los procedimientos más convenientes son los geométricos, determinando con un calibre las dimensiones de la probeta.

El motivo de que no hallan sido aplicadas en la caracterización del comportamiento mecánico de estas mezclas los procedimientos y ensayos existentes, puede ser debido, bien porque estos estén relacionados con propiedades que no son representativas de estas mezclas en su modo de empleo, o bien, porque han sido desarrollados para mezclas densas y semidensas y no se ha estudiado su aplicación a mezclas abiertas.

Cuando en el año 1979 se comenzaron en el Laboratorio de la Cátedra de Caminos y Aeropuertos, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, los estudios encaminados a la caracterización de las mezclas bituminosas porosas para su empleo como capa especial de rodadura, se definieron dos líneas concretas de investigación. Por una parte, se estudió en laboratorio la influencia que la composición de la mezcla podía tener sobre su permeabilidad. Por otra parte, se analizó la posibilidad de caracterizar mecánicamente el comportamiento de estas mezclas.

Para medir la permeabilidad de la mezcla se desarrolló en laboratorio un permeámetro de carga variable que permite esti-

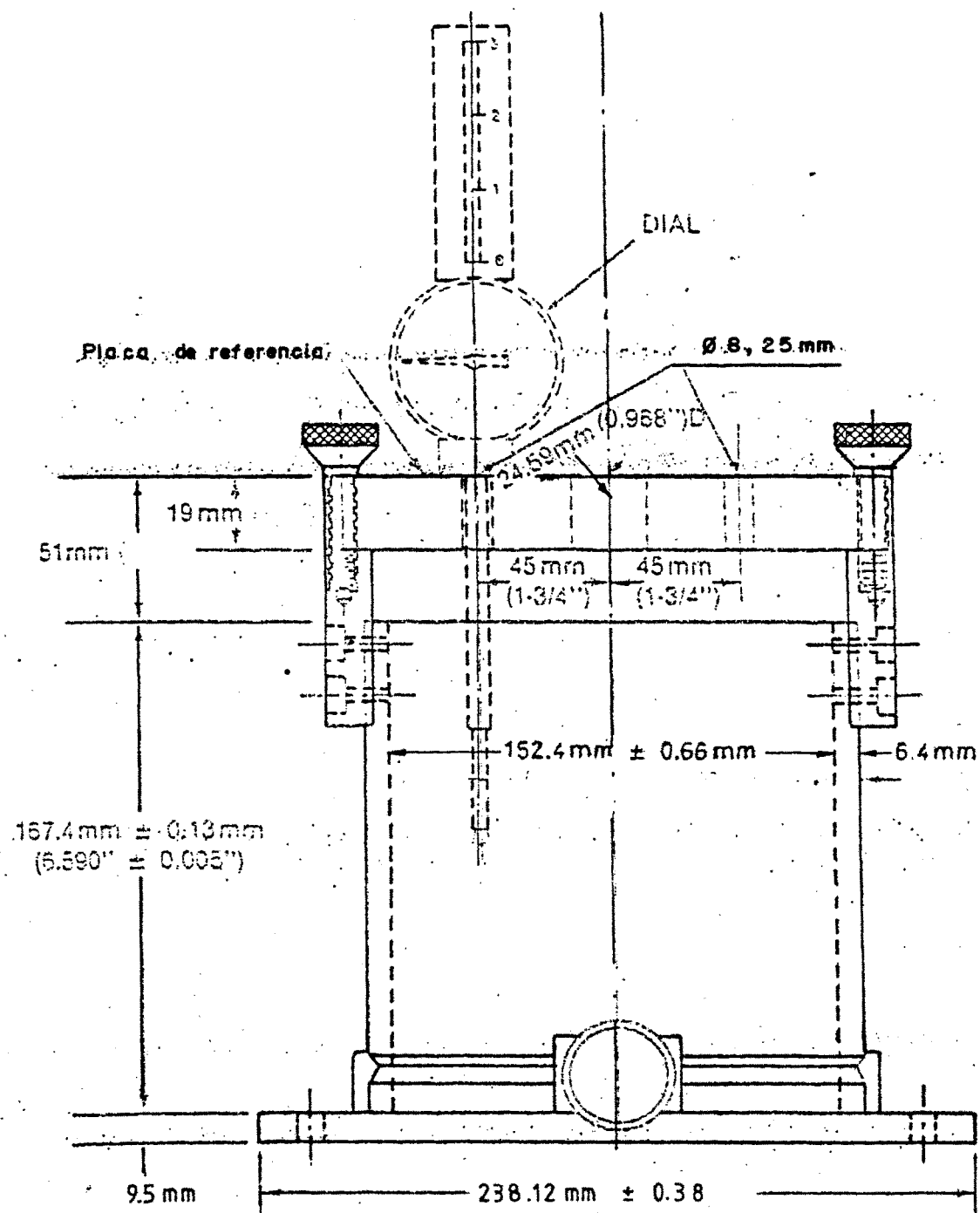


FIG. 3.3. - METODO DE LA FHWA. MEDIDA DEL VOLUMEN DE LA FRACCION GRUESA COMPACTADA

mar el coeficiente de permeabilidad de la mezcla, después de que esta ha sido saturado en vacío, figura 3.4. Como resultado de este estudio se obtuvo una relación entre la porosidad y permeabilidad de la mezcla, dada por la siguiente expresión:

$$\text{LogK} = 9,296 \text{ LogH} - 13,373$$

donde

K = coeficiente de permeabilidad de la mezcla (cm/s)

H = porcentaje de huecos en mezcla

En la figura 3.5 se representa gráficamente esta relación así como los valores medidos para cada una de las mezclas ensayadas. Se ensayaron 54 tipos de mezclas, que se diferenciaban en el tamaño del arido empleado 10, 12 y 20 mm, el porcentaje de arido fino 10 y 15%, el porcentaje de filler: 2, 4, 6%, y también en el porcentaje de ligante empleado: 2,5 - 4,5 - 5,5% de betún de penetración B60/70. El ensayo se realizó sobre probetas Marshall compactadas con 50 golpes por cara, cuya densidad se determinó geométricamente.

Para caracterizar mecánicamente estas mezclas, se procedió al estudio de la posibilidad de aplicar los ensayos existentes, para evaluar las propiedades mecánicas y resistentes de estas mezclas. En primer lugar, se pensó en aquellos ensayos que podían estar relacionados con la medida de la cohesión.

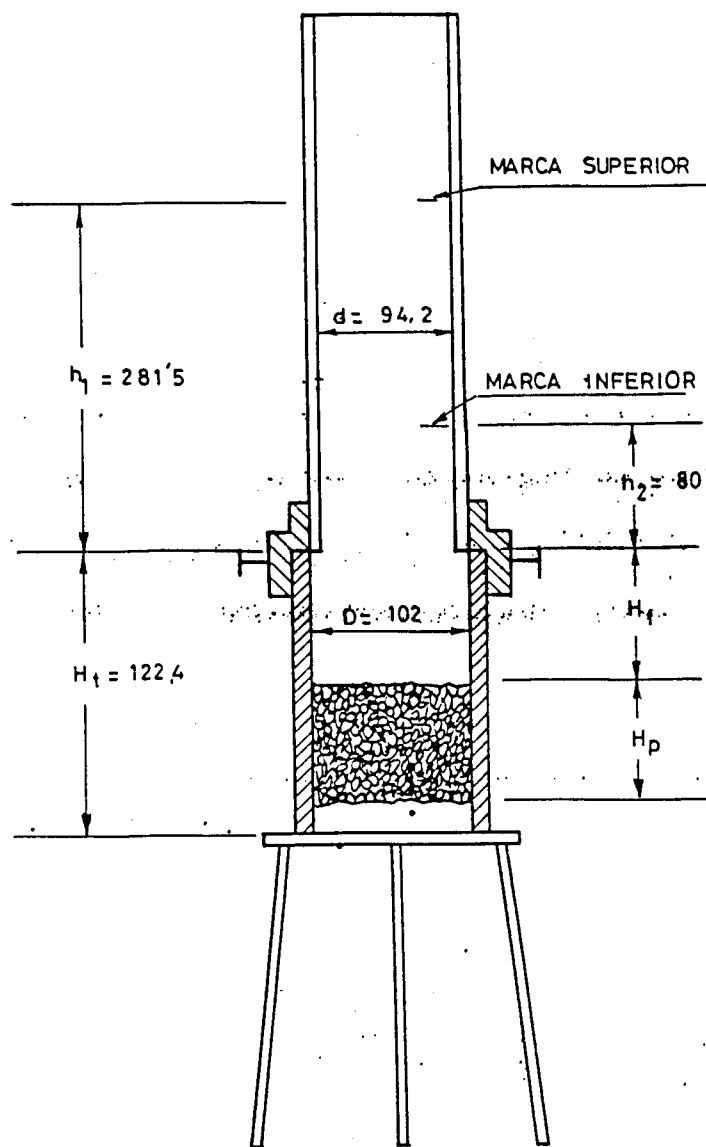


FIG. 3. 4.- ESQUEMA DEL PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE

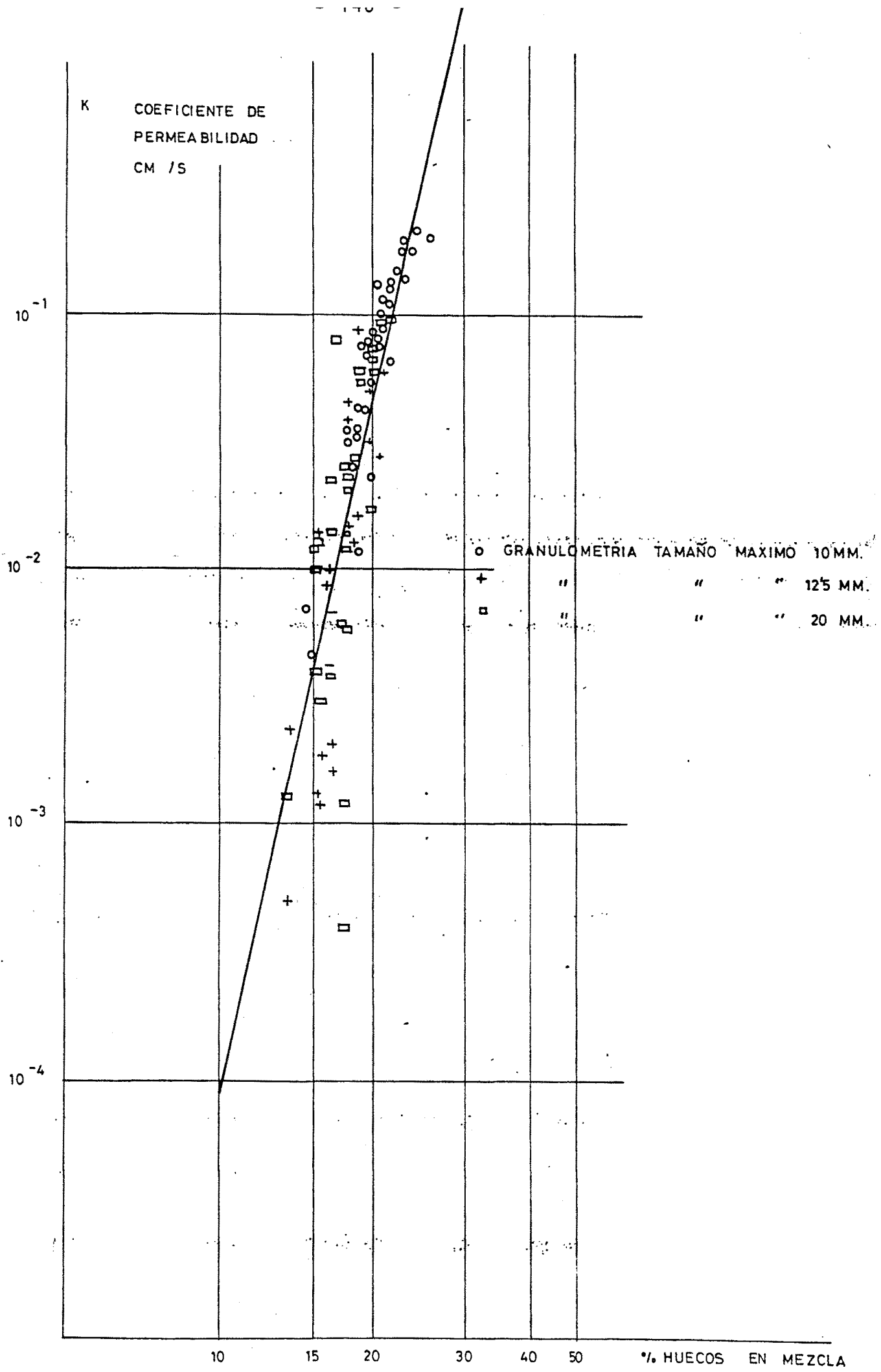


FIG. 3.5.- RELACION ENTRE HUECOS EN MEZCLA Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

-Ensayo de tracción indirecta.

-Cohesiómetro Hveem.

sin descartar la aplicación del ensayo Marshall, por su sencillez y amplia difusión.

La cohesión es un factor de gran interés en el estudio de estas mezclas, ya que de ella va a depender en gran medida su resistencia a los esfuerzos de abrasión y succión del tráfico. Normalmente, el fallo que presentan estas mezclas es por disgregación, no teniendo especial importancia otros fallos de la capa de rodadura, como roderas ó fisuración por fatiga.

Los resultados obtenidos al aplicar estos ensayos están recogidos en la continuación, junto con los obtenidos por otros autores al aplicar el ensayo de máquina de pista y giratoria, ensayos estos últimos, más relacionados con la resistencia a la deformación plástica por fatiga de la mezcla.

Los ensayos de tracción indirecta, cohesiometro y Marshall, fueron realizadas sobre probetas Marshall compactadas con 50 golpes por cara. La energía de compactación se fijó a partir de los estudios realizados en laboratorio sobre la evolución de la compactación de la mezcla en función de la energía de compactación.

La compactación en laboratorio se realizó para dos temperaturas, 130°C y 145°C, empleando para cada una de ellas -

tres energías de compactación de 15, 50 y 75 golpes por cara. Las temperaturas seleccionadas corresponden para el betún utilizado, B 60/70, a los límites de viscosidades que se emplean en la fabricación de este tipo de mezclas (700 y 1400 centistokes).

El estudio se realizó sobre una granulometría tipo, figura 3.6, empleando en su fabricación porcentajes de ligante de 3,5 - 4,5 y 5,5% de betún sobre arido. Las características del betún empleado aparecen en la tabla 3.1.

En este estudio como en el resto del trabajo se ha empleado siempre un arido ofítico, procedente de San Felices (Rioja) cuyas características se recogen en la tabla 3.2.

Los resultados obtenidos en estos ensayos se recogen en la tabla 3.3 y figura 3.6'. En ellas puede observarse que, tanto a 130°C como a 145°C, existe una pequeña disminución del porcentaje de huecos, alrededor del 1% de emplear 50 a 75 golpes.

Como la compactación de este material en obra suele realizarse con rodillo metálico liso de tipo medio, limitando el número de pasadas a 3 ó 4 para no producir la rotura del arido, se ha supuesto que una energía de compactación de 50 golpes sería suficiente para alcanzar la densidad esperada en obra, y es la que se ha utilizado en la fabricación de las probetas.

BETUN ASFALTICO B-60/70

CARACTERISTICA	NORMA DE ENSAYO NLT	VALOR
PENETRACION (a 25°C, 100 g y 5 s) (0.1mm)	124/72	68
P. REBLANDECIMIENTO (ANILLO y BOLA) (°C)	125/72	51,2
INDICE DE PENETRACION	181/72	-0,1
DUCTILIDAD (a 25°C y 5 cm/min) (cm)	126/72	
PERDIDA POR CALENTAMIENTO (%) (a 163°C y 5h)	128/72	0,006
PENETRACION DEL RESIDUO (%)	124/72	96
PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS (°C)	182/72	-
DENSIDAD RELATIVA (a 25°C)	122/72	1,035
CONTENIDO EN AGUA (%)	123/72	0

TABLA 3.1.- CARACTERISTICAS DEL BETUN UTILIZADO

ARIDO GRUESO

CARACTERISTICA	NORMA NLT	VALOR
DESGASTE DE LOS ANGELES (%)	149/72	11
COEFICIENTE DE FRIABILIDAD (%)	351/74	10,5
COEFICIENTE DE PULIMENTO	174/72	0,49
ADHESIVIDAD (%)	166/	99
PESO ESPECIFICO (g/cm ³)	153/76	2,935
ABSORCION DE AGUA (%)	153/76	0,5
INDICE DE LAJAS (%)	354/74	30
INDICE DE AGUJAS (%)	354/74	--

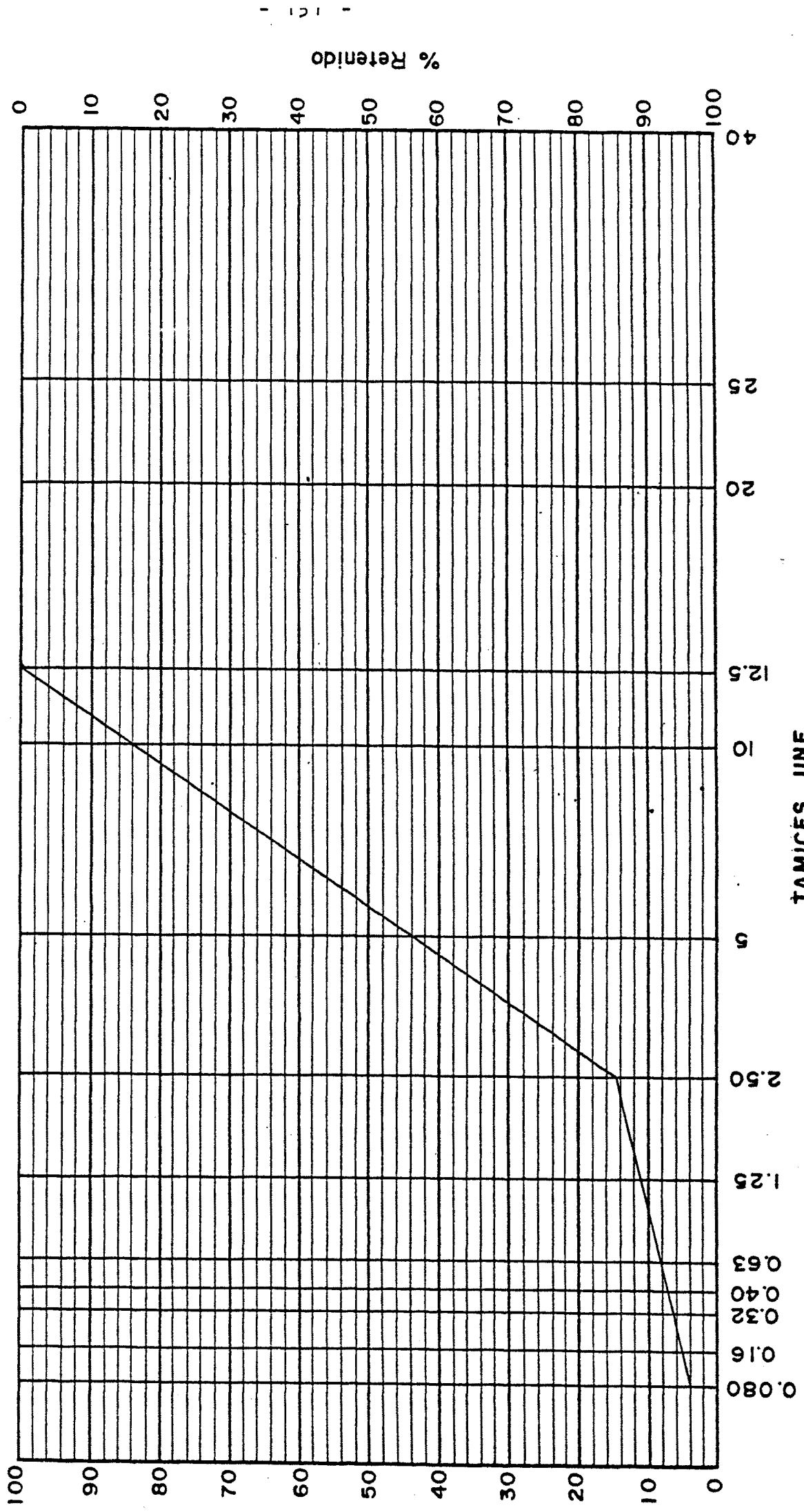
ARIDO FINO

CARACTERISTICA	NORMA NLT	VALOR
ADHESIVIDAD RIEDEL-WEBER	355/74	-
PESO ESPECIFICO (g/cm ³)	154/76	2,920
ABSORCION DE AGUA (%)	154/76	2,85
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	113/72	-

TABLA 3.2. CARACTERISTICAS DEL ARIDO OFITICO UTILIZADO

ANALISIS GRANULOMETRICO (ABERTURA TAMIZ 0.45)

FIGURA 3.6. GRANULOMETRIA P-10(15,4)



NUMERO DE GOLPES EN LA COMPACTACION	TEMPERATURA COMPACTACION 130°C			TEMPERATURA COMPACTACION 145°C		
	3.5	4.5	5.5	3.5	4.5	5.5
%Betún sobre artidos compactac.	24,5	22,5	20,4	23,5	21,8	20,1
15	20,6	18,4	15,6	20,7	18,2	15,9
50	19,7	17,2	14,6	19,3	17,1	14,8
75						

TABLA 3.3. INFLUENCIA DE LA ENERGIA DE COMPACTACION DE LA TEMPERATURA Y DEL CONTENIDO DE LIGANTE EN EL PORCENTAJE DE HUECOS EN MEZCLA.

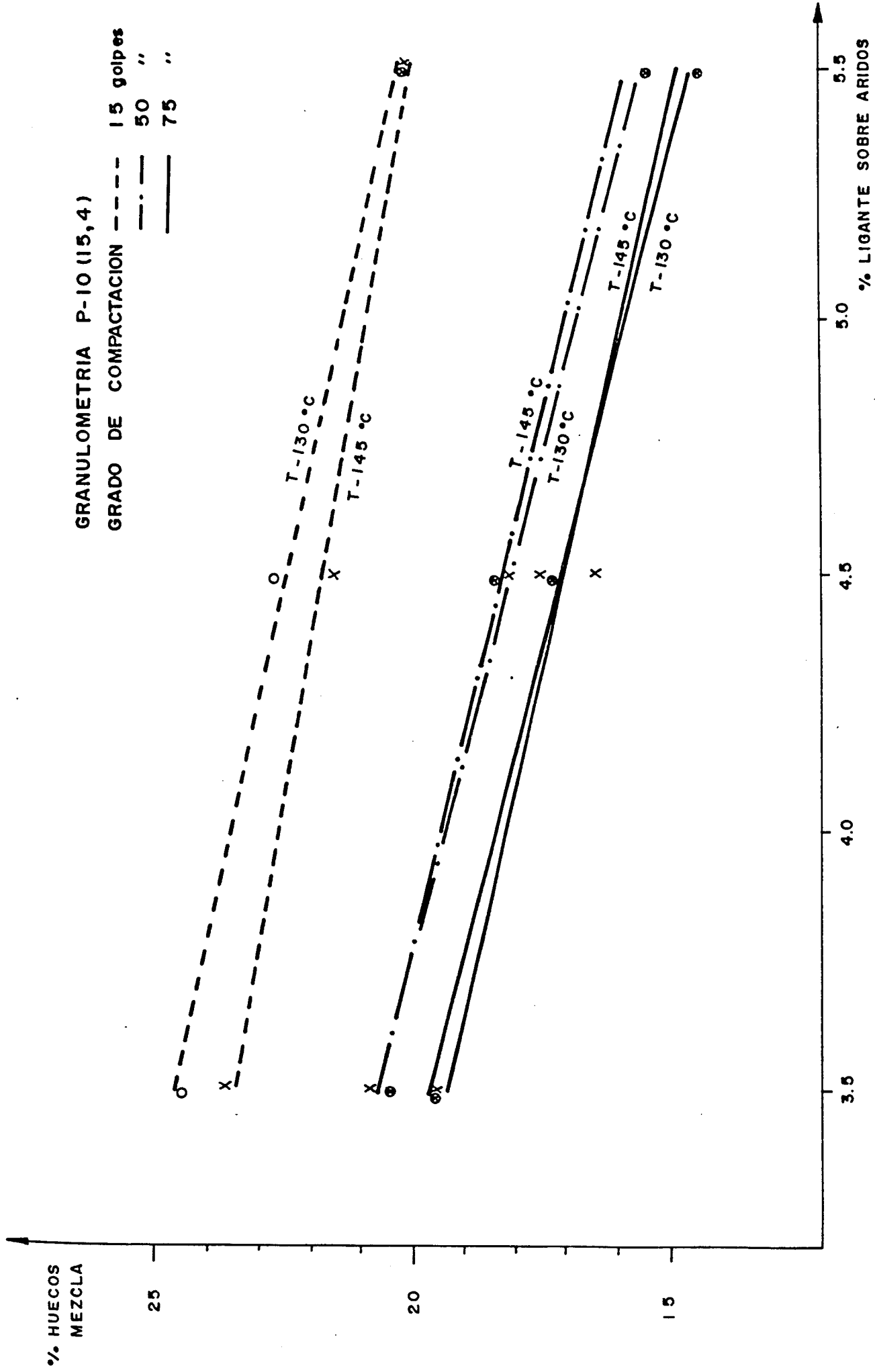


FIG. 3.6'.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA ENERGIA DE COMPACTACION Y DEL PORCENTAJE DE LIGANTE EN EL PORCENTAJE DE HUECOS EN MEZCLA

Respecto a la temperatura, se observa como apenas esta tiene influencia. Se eligió la temperatura de 145°C para la envuelta de las probetas, por ser esta más adecuada para la fabricación en planta, donde se emplean temperaturas lo mas altas posibles con el fin de favorecer el proceso de secado del arido. Se comprobó que con esta temperatura no se produce el escurrimiento del ligante, incluso con porcentajes del betún del 6,5%.

3.1.1. ENSAYO MARSHALL

Para analizar la validez de aplicación del ensayo Marshall se estudió con la granulometría tipo P-10(15,4), figura 3.6, la susceptibilidad que presentaba el ensayo a las variaciones de ligante en la determinación de la estabilidad y deformación Marshall.

El estudio se realizó sobre tres series de probetas, las dos primeras fabricadas con 4 probetas por cada porcentaje de ligante y la tercera con 8 probetas por porcentaje. Los porcentajes de ligante utilizados en las tres series fueron del 3,5 4,5 y 5,5% en peso sobre arido.

La temperatura de ensayo fue de 45°C, ya que en algunos casos en mezclas con pocos finos, se produce el desmoronamiento de las probetas cuando se ensayan a la temperatura establecida en la norma NLT-159/73, de 60°C.

Los resultados de estos ensayos recogidos, en la tabla 3.4 y en la figura 3.7, ponen de manifiesto la poca susceptibilidad de este ensayo al porcentaje de betún, así como la notable dispersión de los resultados. Los coeficientes de variación para la estabilidad y deformación Marshall oscilan de 0.07 a 0.1 para la primera, y de 0.15 a 0.27 para la segunda. De acuerdo con estos resultados, no se puede establecer diferencias significativas entre los valores obtenidos para la estabilidad Marshall para los distintos porcentajes de ligante incluso cuando se emplean series de 8 probetas por porcentaje. Lo mismo ocurre cuando se comparan los valores obtenidos para la deformación Marshall.

En los ensayos Marshall realizados por el laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, sobre mezclas similares a las aquí ensayadas, mezclas tipo A-12 del PG-3/75 figura 3.8, ponen de manifiesto que si se emplea el ensayo Marshall para determinar los porcentajes de ligante en los que se obtiene la máxima estabilidad, los valores obtenidos (2,5 3,5%), están muy lejos de los empleados habitualmente en estas mezclas (4-5%). Figuras 3.9 y 3.10.

3.1.2. ENSAYO DE TRACCION INDIPECTA

La comprobación de la validez de este ensayo, para caracterizar el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas porosas, se realizó con la granulometría P-10(15,4), antes señalada

SERIE	% LIGANTE SOBRE ARIDOS	ESTABILIDAD (Kp)			DEFORMACION (mm)		
		VALOR MEDIO	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE VARIACION	VALOR MEDIO	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE VARIACION
1	3,5	729	73,3	0,100	1,70	0,29	0,170
	4,5	629	54	0,086	1,90	0,27	0,142
	5,5	688	75,1	0,109	2,13	0,46	0,216
2**	3,5	700	69	0,098	1,76	0,29	0,165
	4,5	642	41,6	0,065	1,89	0,34	0,179
	5,5	658	65,5	0,099	1,94	0,53	0,273
3	3,5	703	87,1	0,123	2,03	0,35	0,172
	4	611	45,6	0,069	2,033	0,31	0,152
	4,5	592	4,52	0,076	2,1	0,56	0,266

** Serie de 8 probetas

TABLA 3.4. ESTABILIDADES Y DEFORMACIONES DE PROBETAS COMPACTADAS A 145°C Y 50 GOLPES. ROTAS A 45°C SEGUN EL METODO MARSHALL. GRANULOMETRIA P.10(15,4)

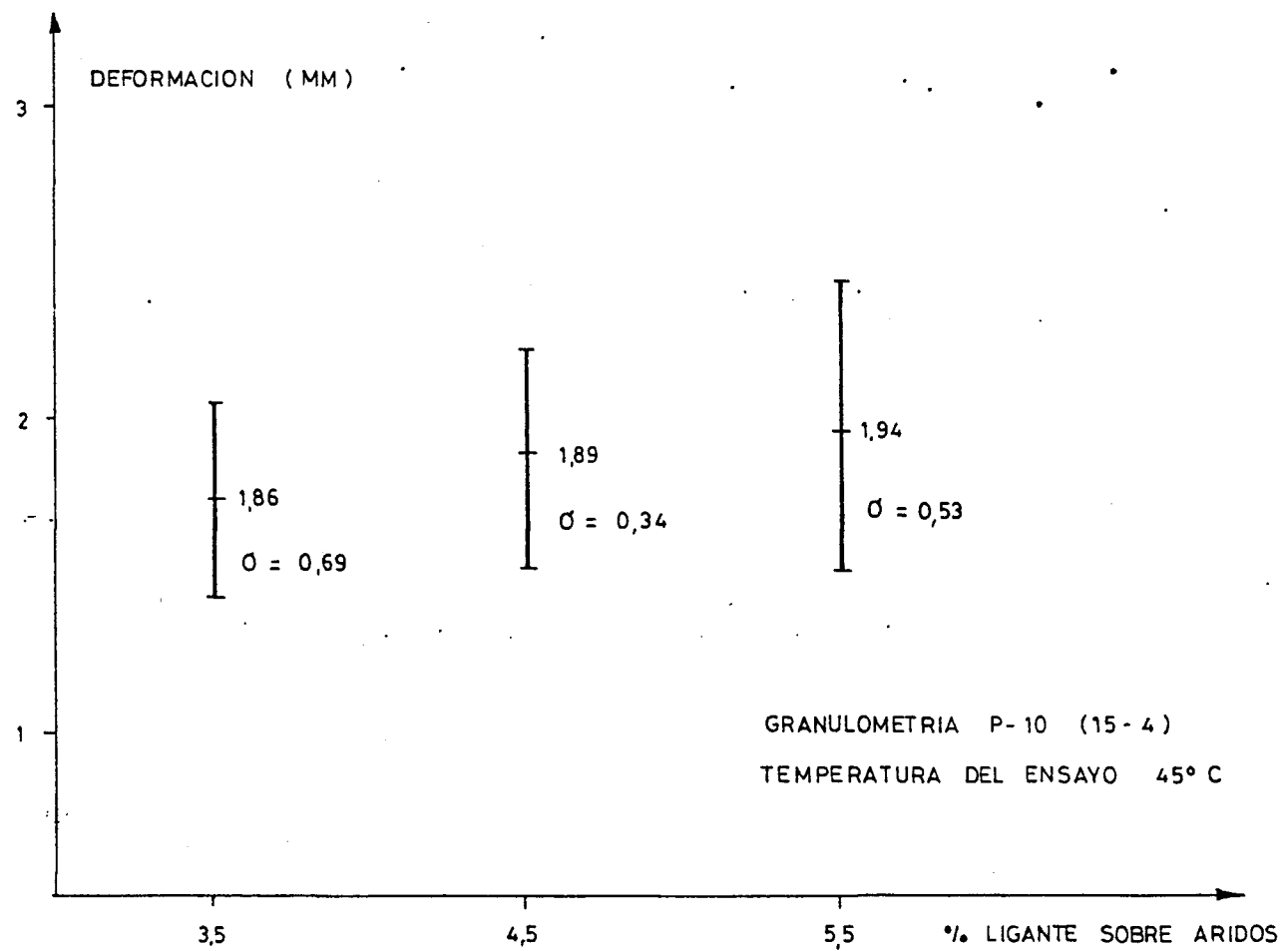
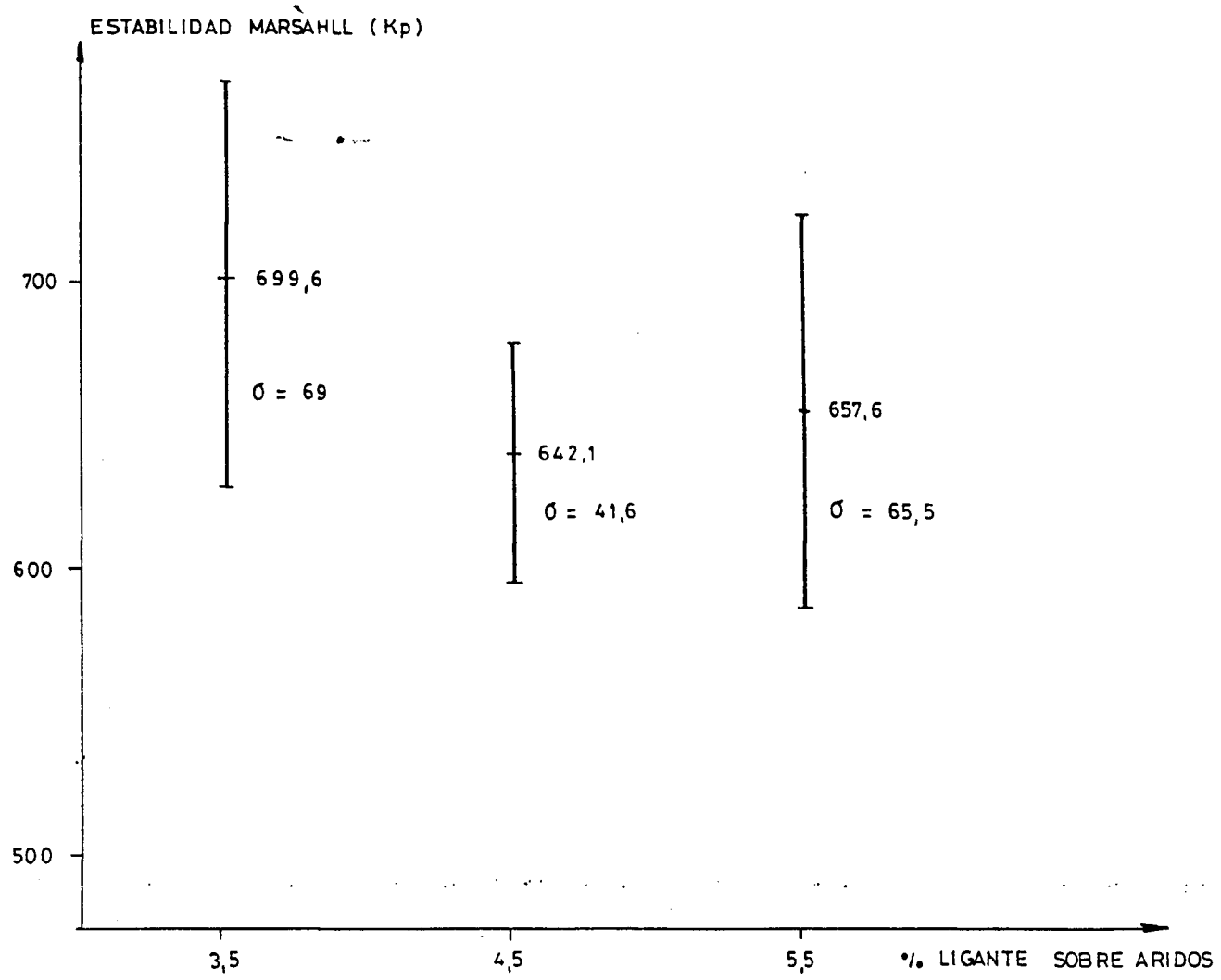
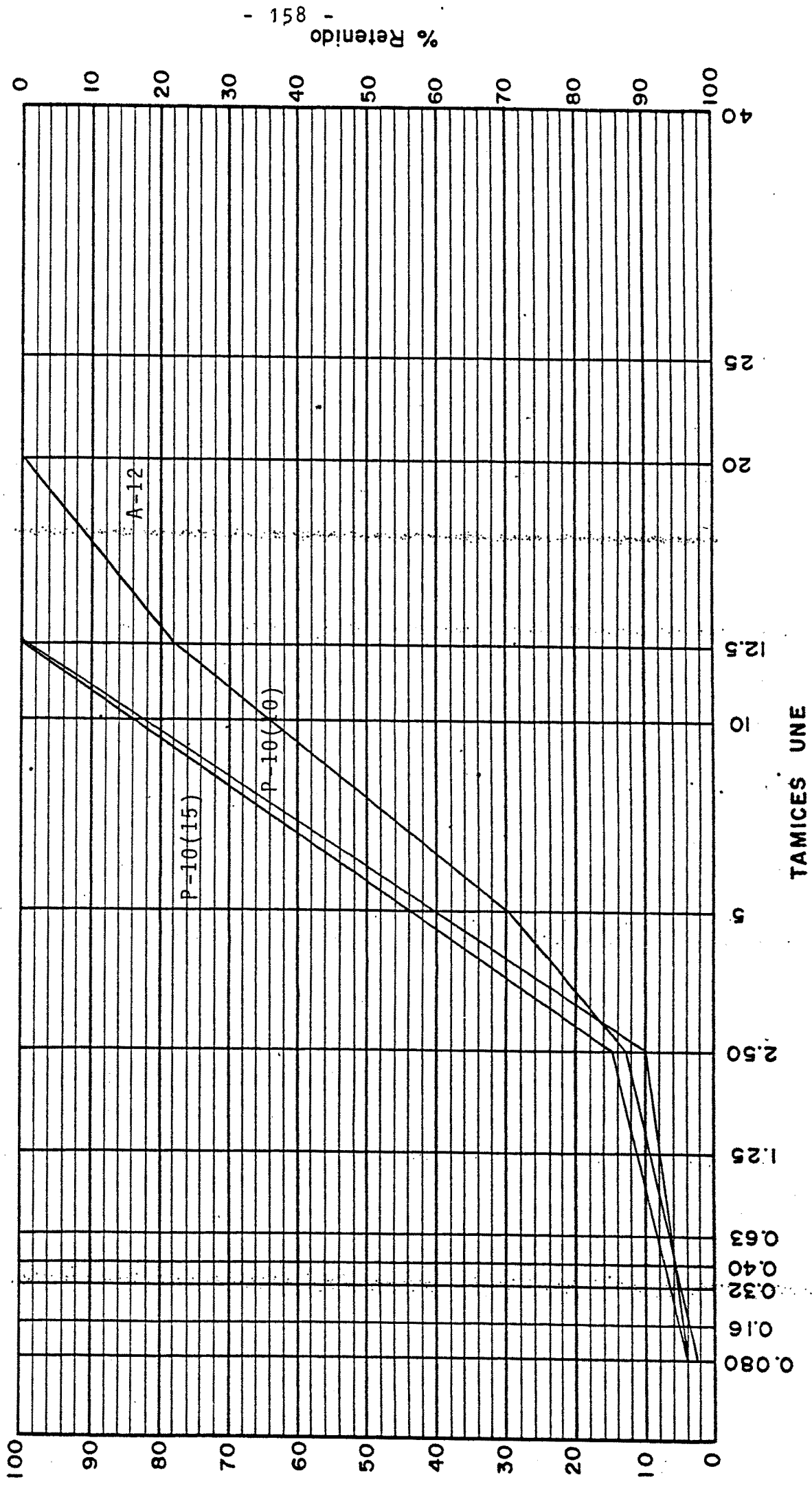


FIG. 3.7.- VALORES MEDIOS Y DESVIACION TIPICA OBTENIDOS EN LA ROTURA DE PROBETAS EN EL ENSAYO MARSHALL.
(SERIE DE 6 PROBETAS POR PORCENTAJE DE LIGANTE)

ANALISIS GRANULOMETRICO (ABERTURA TAMIZ 0.45)

FIGURA.3.8. GRANULOMETRIAS A-12, P-10(15,4) y P-10(10,4)



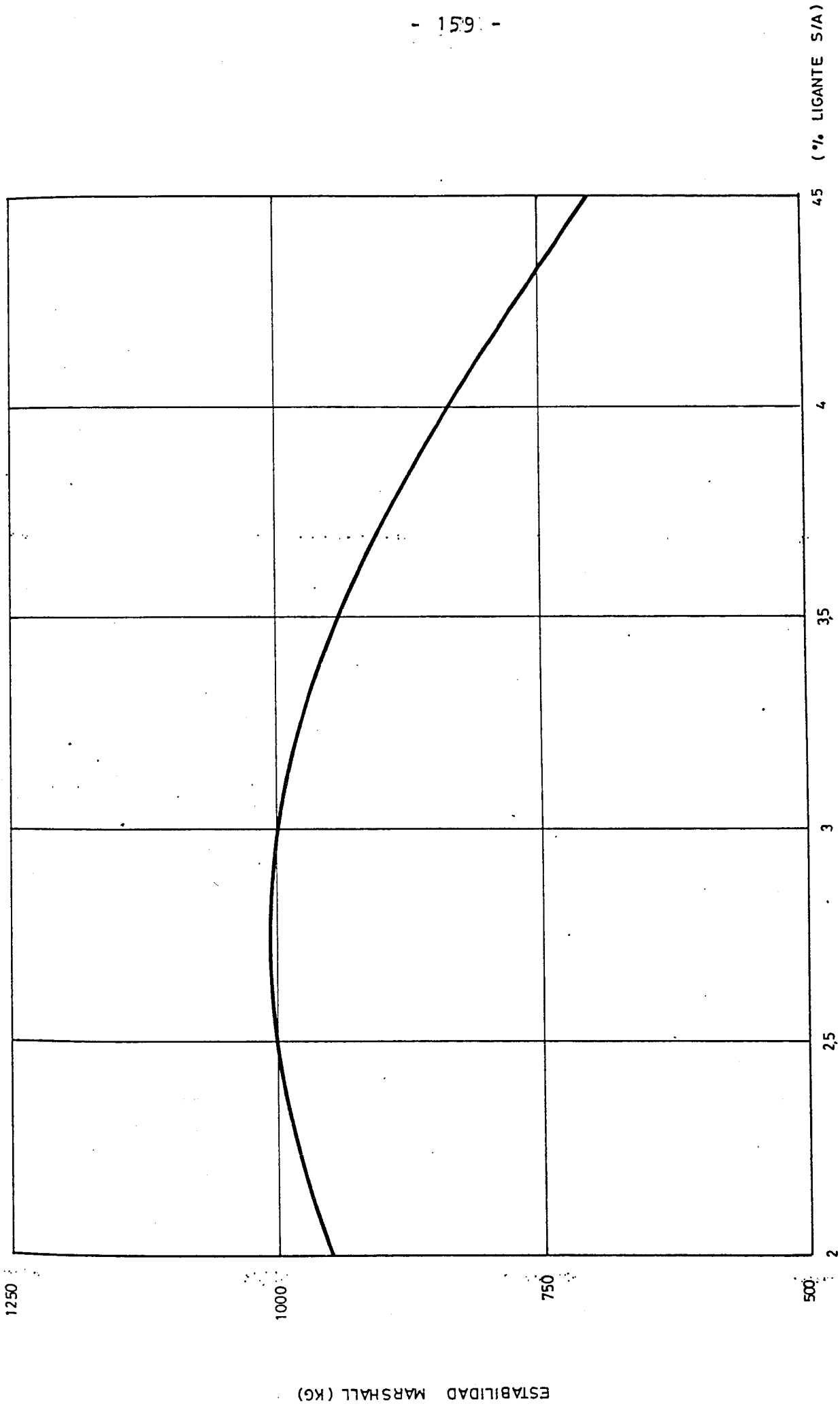


FIG. 3.9.- VALOR DE LA ESTABILIDAD MARSHALL EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE PARA UNA MEZCLA A-12 (L.C.M.)

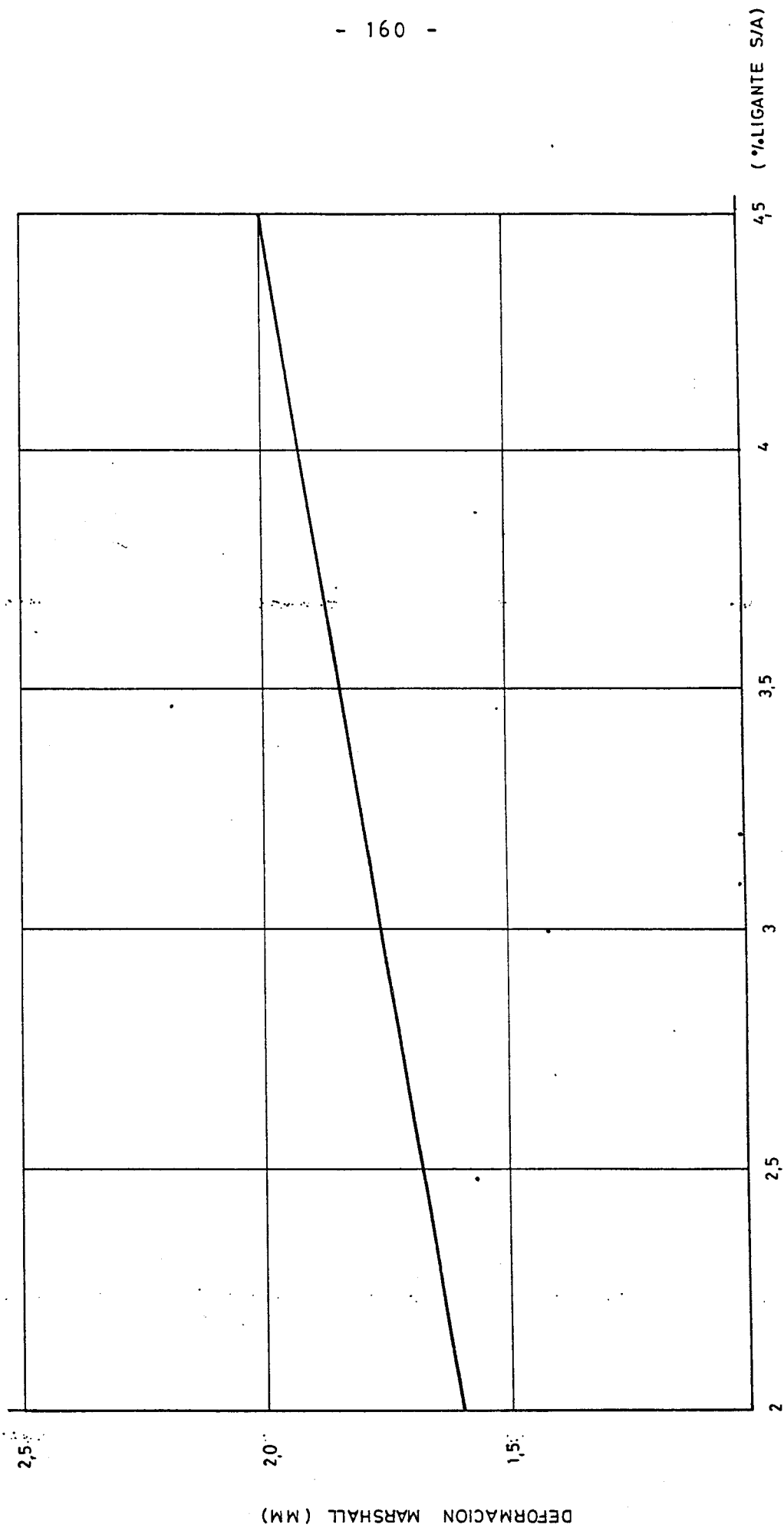


FIG. 3.10.- VALOR DE LA DEFORMACION MARSHALL EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE PARA UNA MEZCLA A-12 (L.C.M.)

da, considerando distintas temperaturas y distintas velocidades de deformación en la realización del ensayo. Las temperaturas ensayadas fueron 15 y 30°C y las velocidades de deformación 0.4-4 y 40 mm/min.

Los resultados que estos ensayos, recogidos en las tablas 3.5 y 3.6 y que han sido representados también gráficamente en las figuras 3.11 - 12 -13 -14, muestran como la resistencia a la rotura por tracción permanece prácticamente constante e independiente del porcentaje de ligante en las seis condiciones de ensayo, y únicamente, se aprecia, mejor a 30°C que a 15°C, un aumento significativo de la deformación de rotura con el aumento del contenido de ligante.

Por otra parte, las dispersiones obtenidas en la medida de la estabilidad y de la deformación son altas y éstas serán mayores cuando se trate de granulometrías con menos finos o mayores tamaño de árido grueso, figuras 3.15 y 3.16.

En la figura 3.14, puede observarse, en las curvas que relacionan la deformación en rotura con el porcentaje de ligante, que sacar conclusiones a partir de los valores medios cuando existan grandes dispersiones, puede dar lugar a conclusiones erróneas; así, la curva obtenida para la velocidad de 40 mm/min parece indicar que las deformaciones en rotura disminuyen al aumentar el porcentaje de ligante, sin que esto sea realmente cierto.

VELOCIDAD DE ROTURA	% BETUN S/A	VALOR MEDIO	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE VARIACION	TEMPERATURA (°C)
0,4	3,5	2,3	0,38	0,165	15
	4,5	2,1	0,07	0,033	
	5,5	2,0	0,26	0,130	
4	3,5	4,7	0,15	0,032	
	4,5	4,5	0,25	0,056	
	5,5	3,9	0,43	0,110	
40	3,5	8,1	0,71	0,088	
	4,5	7,4	0,71	0,096	
	5,5	7,7	0,39	0,051	
0,4	3,5	0,8	0,04	0,050	30
	4,5	0,7	0,02	0,029	
	5,5	0,7	0,06	0,086	
40	3,5	2,0	0,15	0,075	
	4,5	2,0	0,11	0,055	
	5,5	1,8	0,14	0,078	
	3,5	2,1	0,15	0,071	
	4,5	1,9	0,11	0,058	
	4,5	1,9	0,14	0,074	

TABLA 3.5. - ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA TENSION DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y LA TEMPERATURA. GRANULOMETRIA P.10(15,4). BETUN B-60/70.

VELOCIDAD DE ROTURA	% BETUN S/A	VALOR MEDIO	DESVIACION TIPICA	COEFICIENTE VARIACION	TEMPERATURA (°C)
0,4	3,5	0,153	0,11	0,719	15
	4,5	0,257	0,08	0,311	
	5,5	0,313	0,04	0,128	
4	3,5	0,181	0,08	0,442	
	4,5	0,329	0,15	0,456	
	5,5	0,357	0,06	0,168	
40	3,5	0,184	0,11	0,598	
	4,5	0,159	0,08	0,503	
	5,5	0,244	0,06	0,246	
0,4	3,5	0,295	0,09	0,305	30
	4,5	0,306	0,05	0,163	
	5,5	0,484	0,04	0,083	
4	3,5	0,261	0,06	0,230	
	4,5	0,278	0,07	0,252	
	5,5	0,356	0,10	0,281	
40	3,5	0,296	0,08	0,270	
	4,5	0,381	0,16	0,420	
	5,5	0,311	0,13	0,418	

TABLA 3.6 . - ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA DEFORMACION TRANSVERSAL EN LA ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y LA TEMPERATURA. GRANULOMETRIA P.10(15,4). BETUN B-60/70.

GRANULOMETRIA P 10 (15,4)

BETUN B - 60 / 70

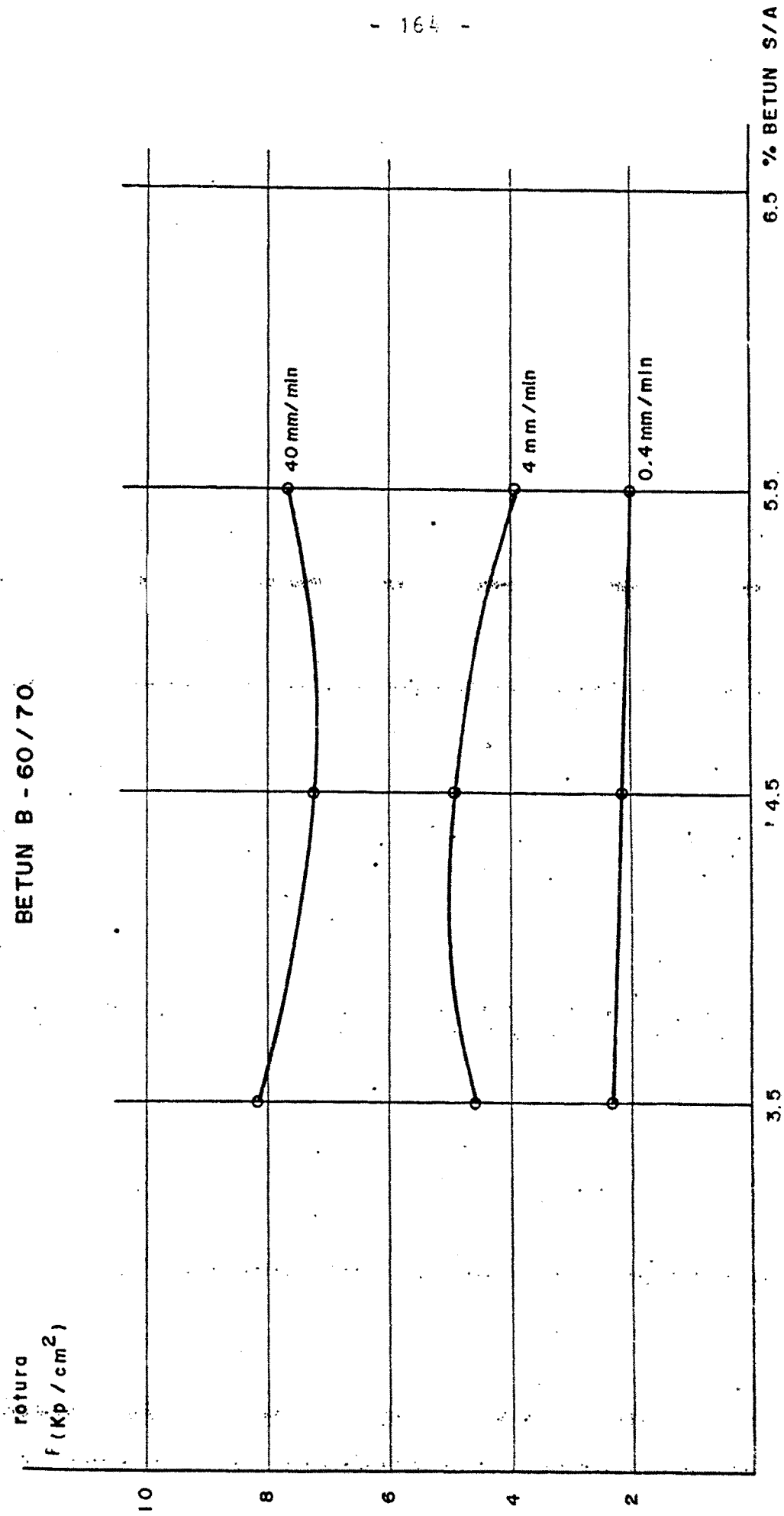


FIG. 3.11. - ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA TENSION DE ROTURA DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y EL PORCENTAJE DE BETUN (TEMPERATURA 15 °C)

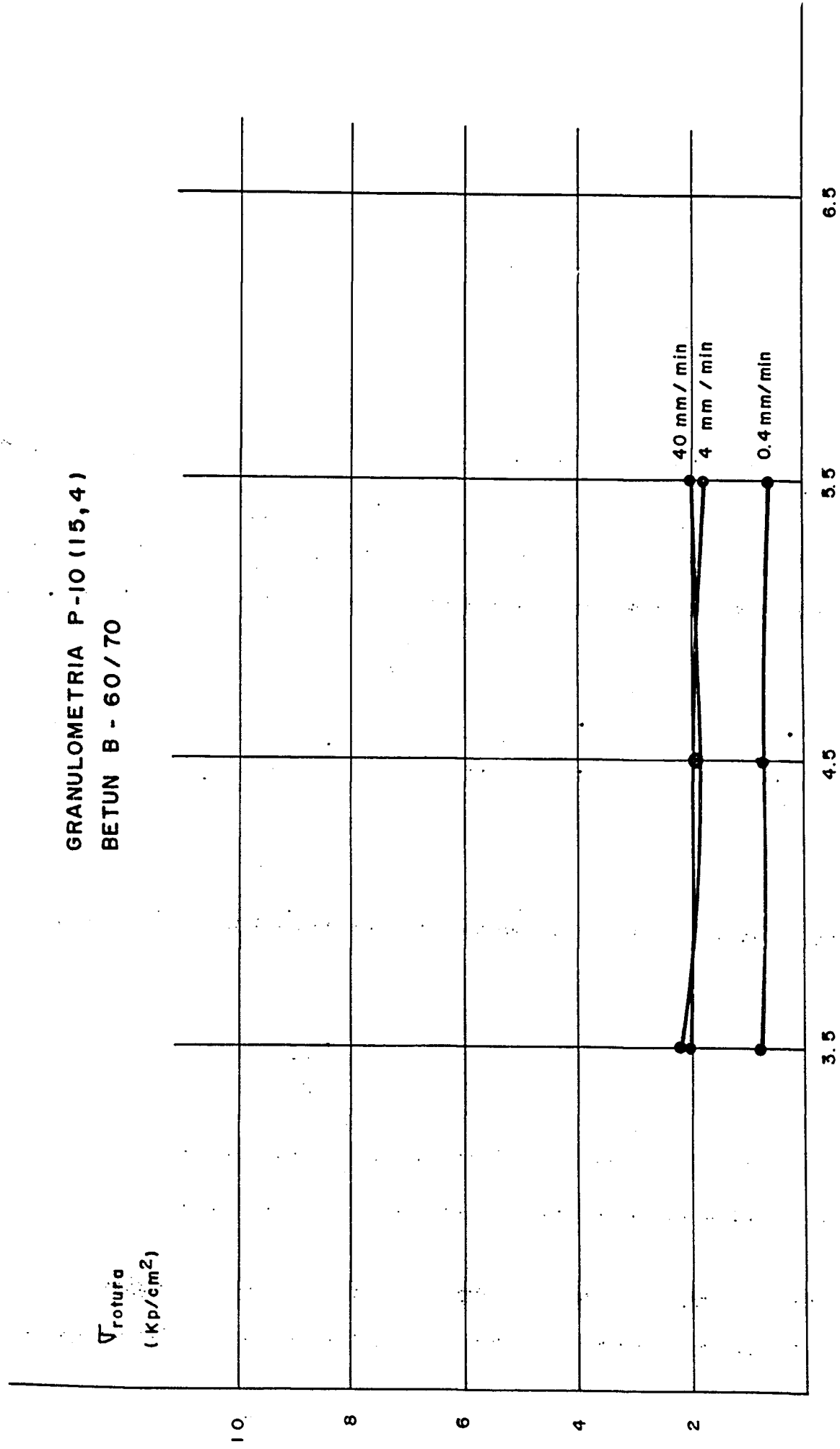


FIG. 3.12.- ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA TENSION DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y EL PORCENTAJE DE BETUN (TEMPERATURA 30 °C)

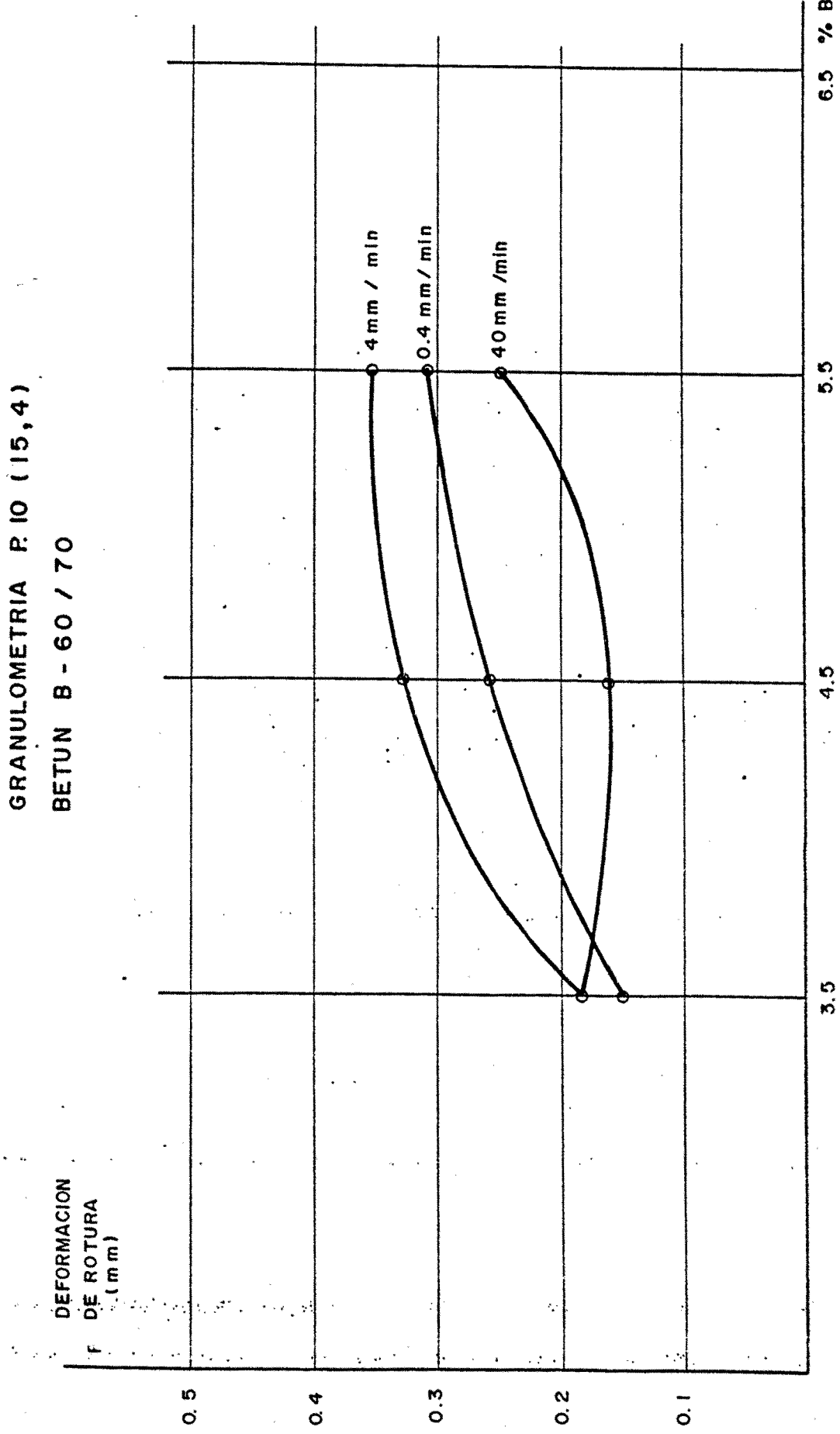


FIG.3.13. - ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA DEFORMACION DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y EL PORCENTAJE DE BETUN (TEMPERATURA 15 °C)

GRANULOMETRIA P. 10 (15,4)
BETUN B -60 / 70

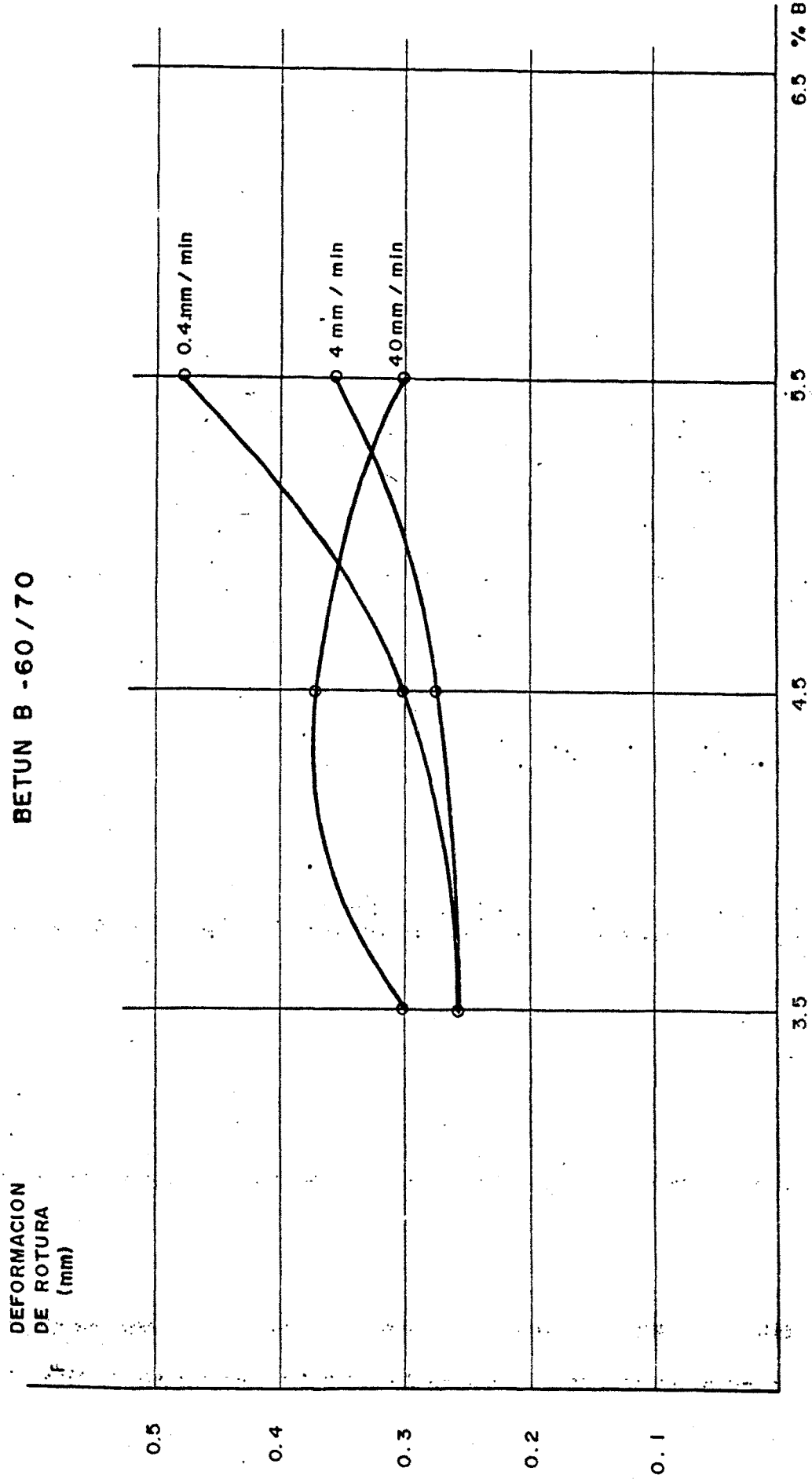
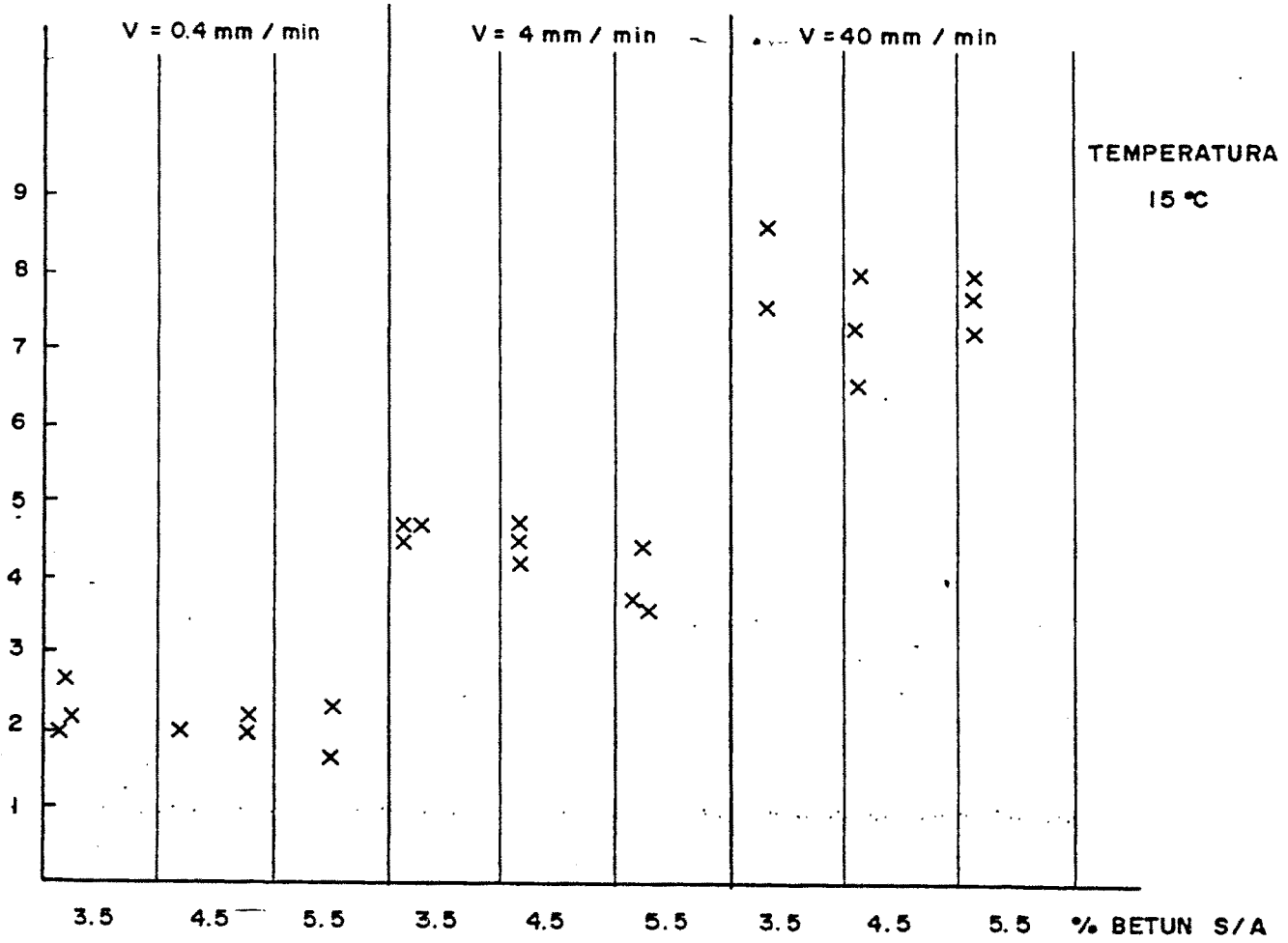


FIG. 3.14. - ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA. VARIACION DE LA DEFORMACION DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y EL PORCENTAJE DE BETUN (TEMPERATURA 15°C)

DEFORMACION TRANSVERSAL (mm)



DEFORMACION TRANSVERSAL (mm)

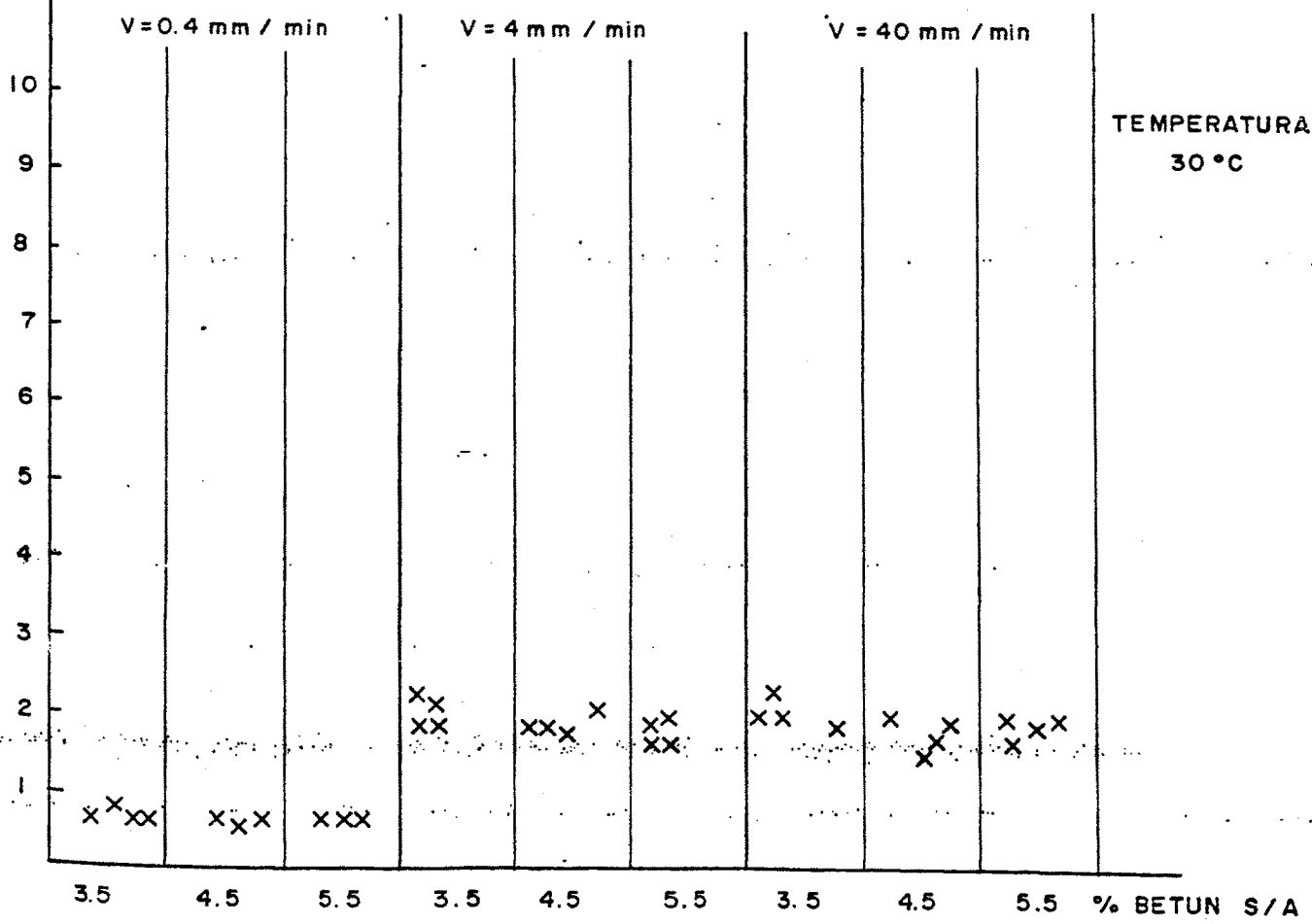


FIG.3.15.- ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA, VARIACION DE LA TENSION DE ROTURA CON LA VELOCIDAD DEL ENSAYO Y LA TEMPERATURA. GRANULOMETRIA P-10 (15.4) B-60/70

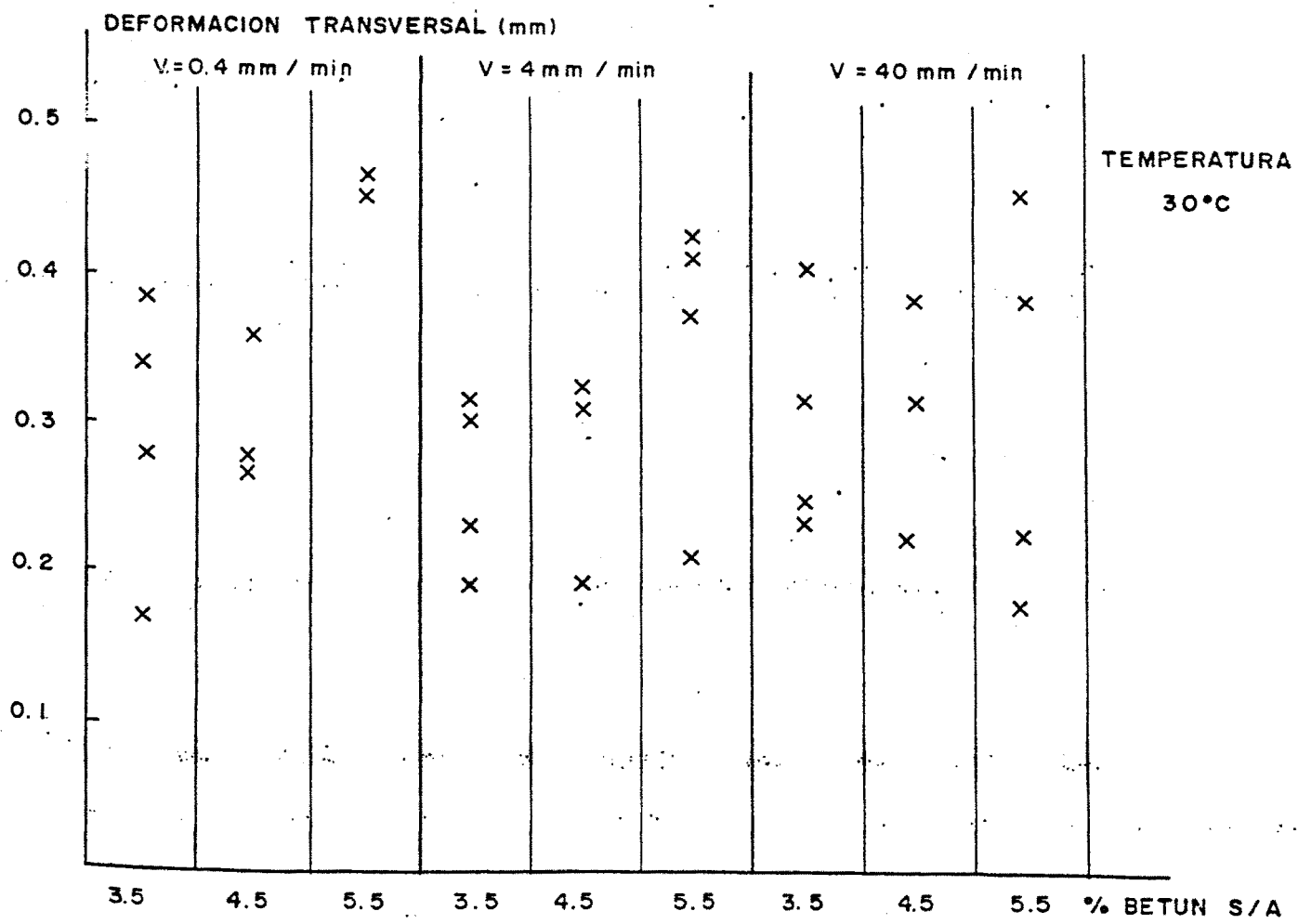
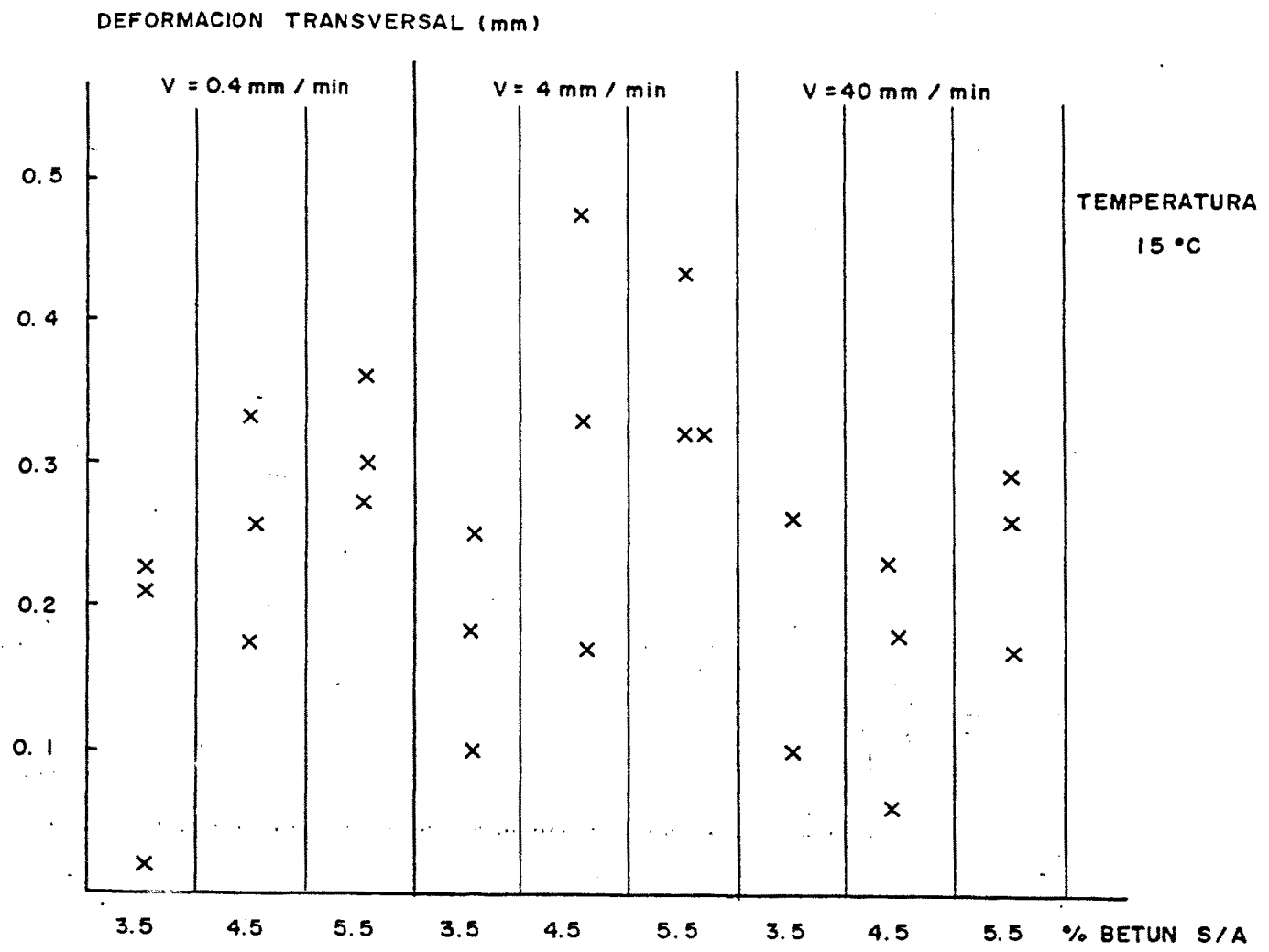


FIG.3.16.- ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA, VARIACION DE LA DEFORMACION TRANSVERSAL EN LA ROTURA

El ensayo de tracción indirecta permite también obtener el módulo de rigidez instantáneo de la mezcla, parametro que ha sido utilizado en la caracterización de mezclas densas, pero sin que hasta el momento se conozca su empleo con mezclas abiertas.

Del análisis de los resultados obtenidos en la determinación de este parámetro, recogidos en las tablas 3.7 y 3.8 y figura 3.17, se observa la gran dispersión de valores obtenidos.

A la misma conclusión se llega cuando se ensayaron otros tipos de mezclas abiertas, con diferentes porcentajes de árido fino o tamaño máximo de árido, tabla 3.9 y figura 3.18.

Como consecuencia de los resultados obtenidos en la determinación del módulo de rigidez instantáneo, se puede decir, que no existe correlación entre estas variables y la composición de la mezcla, especialmente a la variación en su contenido de ligante.

3.1.3. COHESIOMETRO HVEEM

Para estudiar la aplicación del ensayo Hveem en la determinación de la cohesión de mezclas abiertas, se ensayaron dos granulometrías con diferentes porcentajes de arido fino. La granulometria P-10(15,4) ensayada con los procedimientos anteriores y una granulometría P-10(10,4) mas abierta, figura 3.8.

% BETUN S/A	PROBETA	VELOCIDAD DE DEFORMACION		
		0.4	4	40
3,5	I	65.000	6.000	-
	II	12.000	17.000	-
	III	-	-	4.100
	IV	-	-	22.000
4,5	I	28.000	-	41.000
	II	16.000	48.000	-
	III	27.500	7.500	46.000
	IV	-	40.000	43.000
5,5	I	15.000	19.000	70.000
	II	22.000	16.500	28.000
	III	-	-	56.000
	IV	11.500	15.500	-

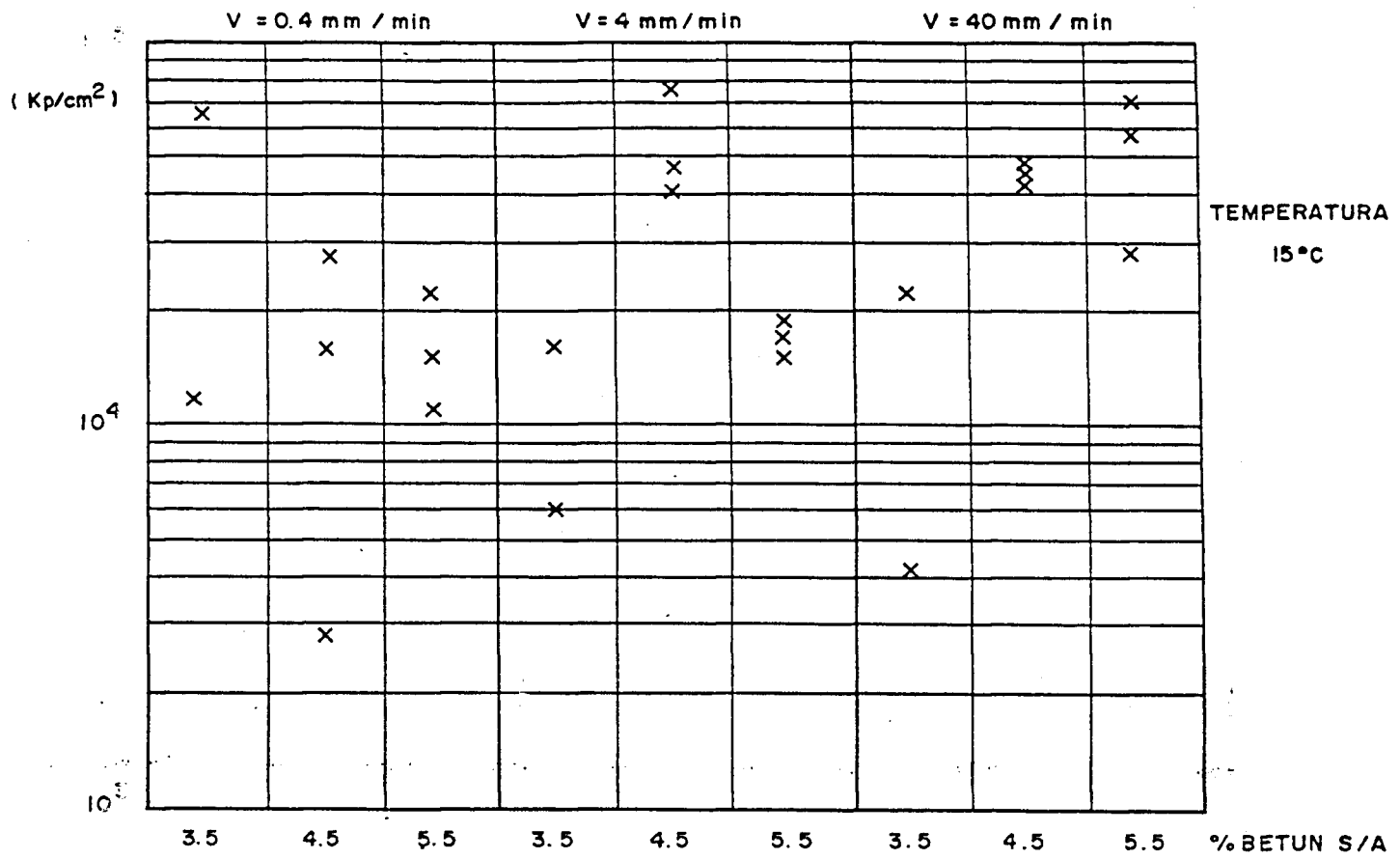
TABLA 3.7 - VARIACION DEL MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEA (Kp/cm²)
CON LA VELOCIDAD DE DEFORMACION. TEMPERATUR DE
ENSAYO 15 °C. GRANULOMETRIA P 10 (15,4)

NOTA: Las rayas significan probetas cuyo ensayo ha resultado defectuoso.

% BETUN S/A	PROBETA	VELOCIDAD DE DEFORMACION		
		0.4	4	40
3,5	I	3.100	10.500	15.000
	II	2.700	8.600	9.500
	III	3.600	8.500	7.750
	IV	2.600	10.500	7.500
4,5	I	-	12.000	1.200
	II	11.500	13.000	3.000
	III	3.600	-	3.200
	IV	3.800	5.800	4.200
5,5	I	1.200	6.500	-
	II	2.400	3.300	8.750
	III	1.000	4.900	1.650
	IV	1.300	1.650	3.200

TABLA 3.8 .- VARIACION DEL MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEA (Kp/cm²)
 CON LA VELOCIDAD DE DEFORMACION. TEMPERATUR DE
 ENSAYO 30 °C. GRANULOMETRIA P. 10 (15,4)
 BETUN B-60/70.

MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEO (Kp/cm²)



MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEO (Kp/cm²)

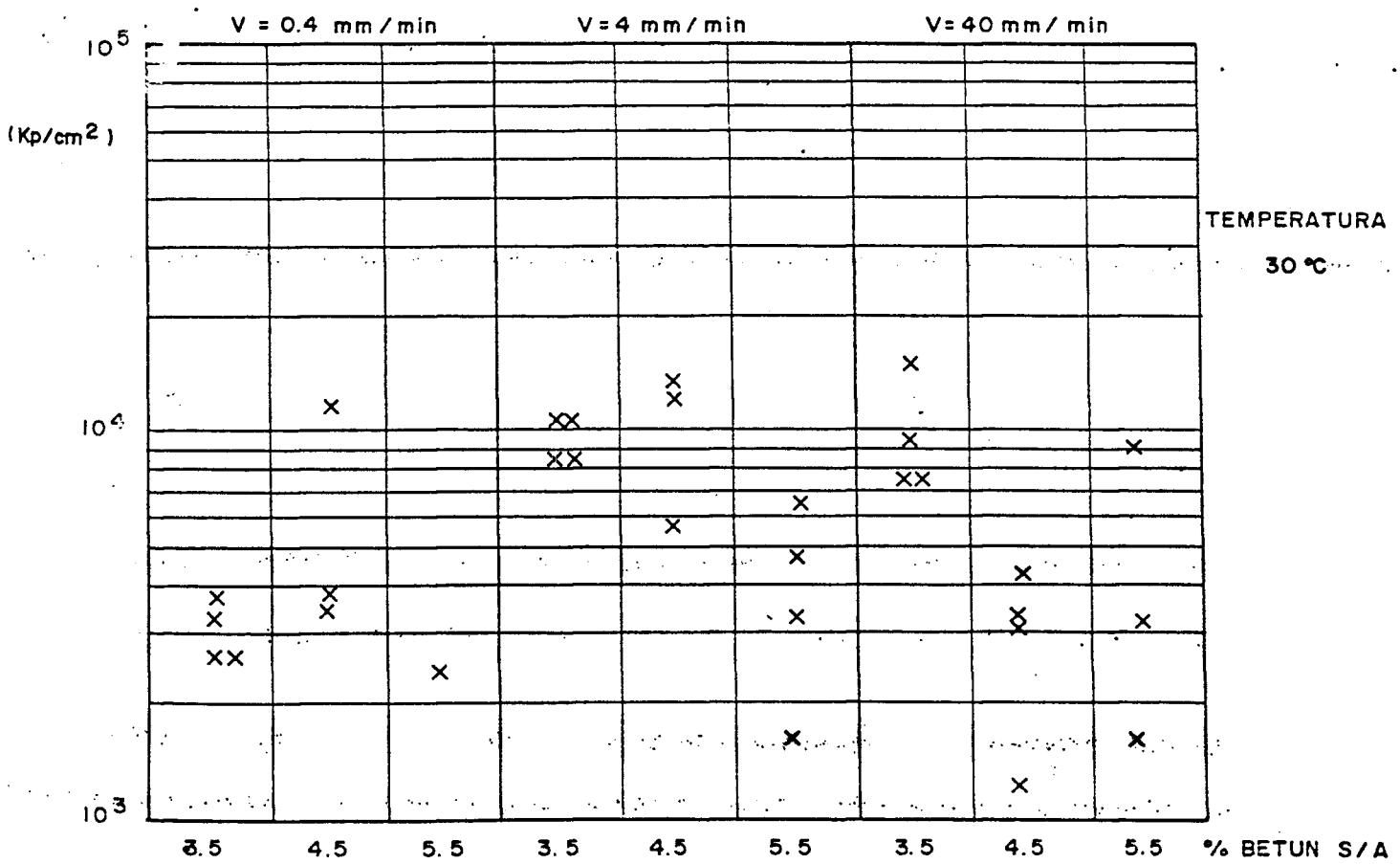


FIG.3.17.- VARIACION DEL MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEO CON LA TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE DEFORMACION. GRANULOMETRIA P-10(15,4) B 60/70

GRANULOMETRIA	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
P.10(10,4)	68.000	15.500	3.500
P.10(15,4)	42.000	45.000	47.000
P.12,5(10,4)	-	6.000	28.500
P.12,5(10,4)	11.000	4.000	5.500
P.20(10,4)	5.200	6.200	35.000
P.20(15,4)	2.600	49.000	-

TABLA 3.9. VALORES OBTENIDOS EN LA DETERMINACION DEL MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEO (KP/CM²)(%DE BETUN 4,5).

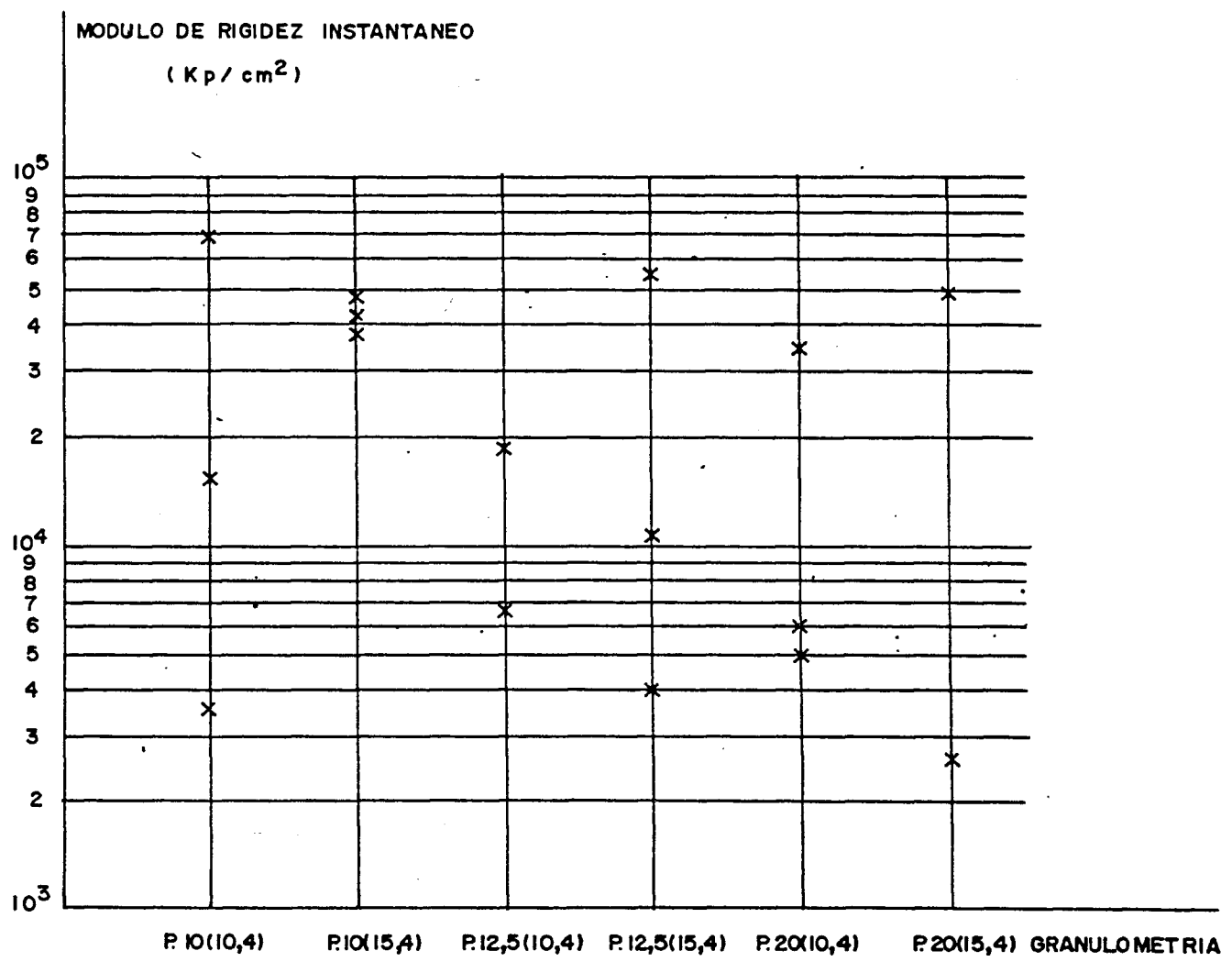


FIG. 3.18.- VALORES OBTENIDOS EN LA DETERMINACION DEL MODULO DE RIGIDEZ INSTANTANEO (% DE BETUN 4.5)

El ensayo se realizó a 25°C para valorar mejor el efecto del ligante en la cohesión de la mezcla.

Los resultados obtenidos, recogidos en las tablas 3.10 y 3.11 y en la figura 3.19, muestran en primer lugar la gran dispersión que tienen los resultados, con coeficientes de variación comprendidos entre 0.08 y 0.17. Esto, unido a la poca sensibilidad del ensayo al contenido de ligante hace que en muchos casos se obtengan los mismos valores con probetas fabricadas con un 3,5% de ligante y otras fabricadas con el 4,5%. Lo mismo ocurre en el caso de emplear porcentajes de ligante de 4,5% y 5,5%.

Esto exige emplear un gran número de probetas, si deseásemos utilizar este ensayo en control de calidad, y queremos reducir la probabilidad de rechazar ó aceptar una muestra de la que estimamos su contenido de ligante mediante el empleo de este ensayo.

En segundo lugar, los resultados muestran una pérdida de la cohesión al aumentar el contenido de ligante. Parece como si el ligante actuase de lubricante y fuese más fácil separar los áridos que habían quedado encajados y trabados en la compactación de la mezcla.

Estas dos conclusiones pueden apreciarse más claramente en las figuras 3.20 y 3.21 donde se representan, para cada una

% b	h(cm)	densidad	huecos(%)	cohesión	
3,5	6,061	2,079	23,5	943	$\bar{x}=910$ $S=71,6$ $CV=0.079$
3,5	6,119	2,069	23,9	856	
3,5	6,172	2,067	24,0	930	
3,5	6,155	2,073	23,8	964	
3,5	6,089	2,095	23,0	858	
4,5	6,135	2,071	22,7	905	$\bar{x}=858$ $S=98,6$ $CV=0.115$
4,5	6,090	2,107	21,3	775	
4,5	6,122	2,083	22,2	911	
4,5	6,086	2,094	21,8	864	
4,5	6,100	2,103	21,5	839	
5,5	6,100	2,111	20,0	735	$\bar{x}=728$ $S=61,6$ $CV=0.085$
5,5	6,110	2,102	20,3	707	
5,5	6,158	2,108	20,1	777	
5,5	6,115	2,106	20,2	700	
5,5	6,188	2,090	20,8	721	

TABLA 3.10. ESTUDIO DE LA COHESION: RESULTADOS GRANULOMETRIA P-10(10,4).

%b	h(cm)	Densidad	Huecos (%)	Cohesión	
3,5	6,004	2,115	22,2	982	$\bar{x}=986$ $S=92$ $Cv=0.093$
3,5	5,951	2,139	21,3	1015	
3,5	5,960	2,132	21,6	918	
3,5	6,024	2,115	22,2	1011	
3,5	6,012	2,111	22,4	1006	
4,5	6,198	2,070	22,7	786	$\bar{x}=790$ $S=104,9$ $Cv=0.133$
4,5	5,964	2,161	19,3	688	
4,5	5,980	2,141	20,0	769	
4,5	5,970	2,155	19,5	819	
4,5	6,052	2,124	20,7	890	
5,5	5,881	2,173	17,6	581	$\bar{x}=678$ $S=119$ $Cv=0.176$
5,5	5,903	2,188	17,1	683	
5,5	5,974	2,170	17,8	689	
5,5	5,888	2,177	17,5	569	
5,5	5,982	2,175	17,6	871	

TABLA 3.11. ESTUDIO DE LA COHESION. RESULTADOS GRANULOMETRIA P-10(15,4).

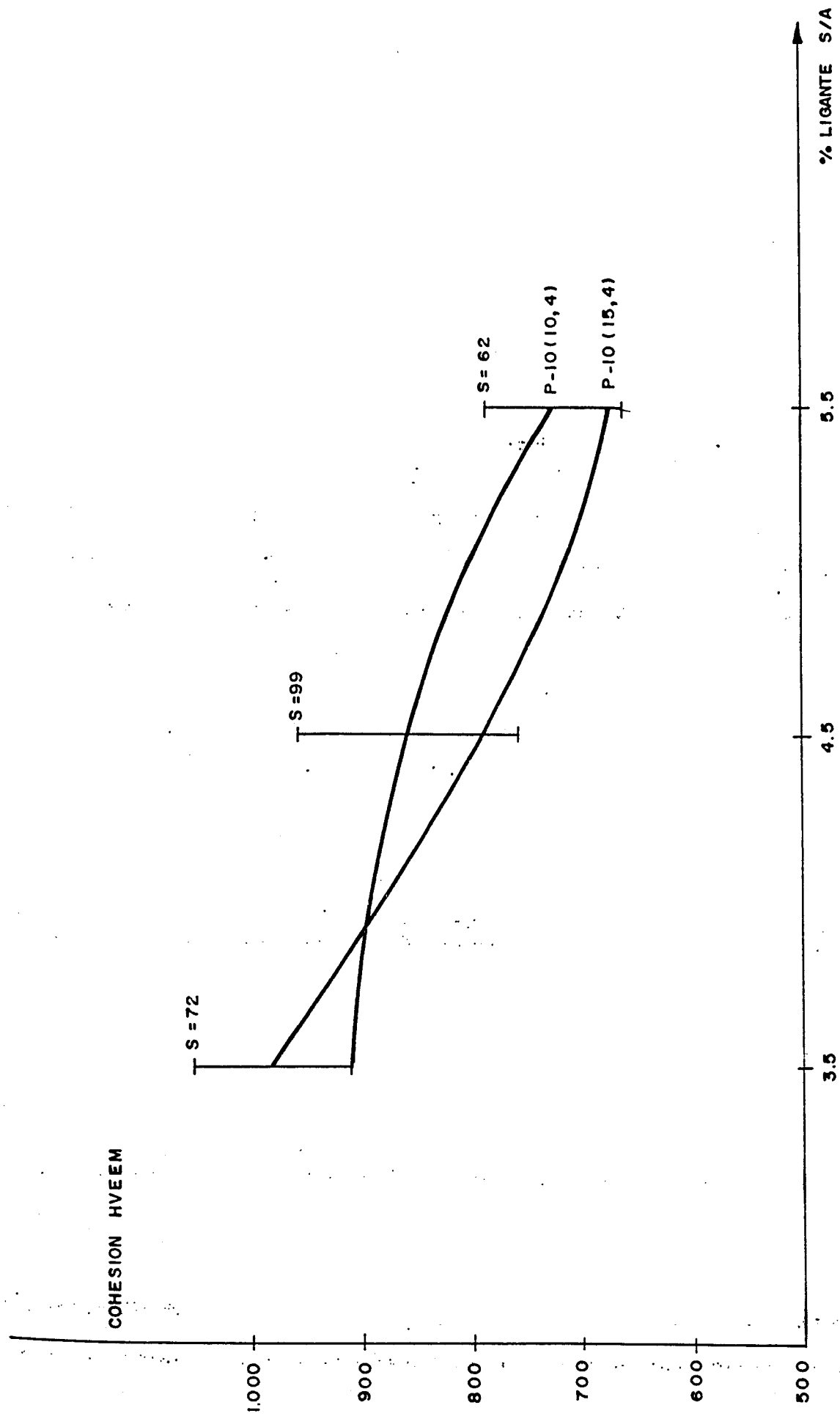


FIG. 3.19.- VARIACION DE LA COHESION HVEEM EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE (25 °C)

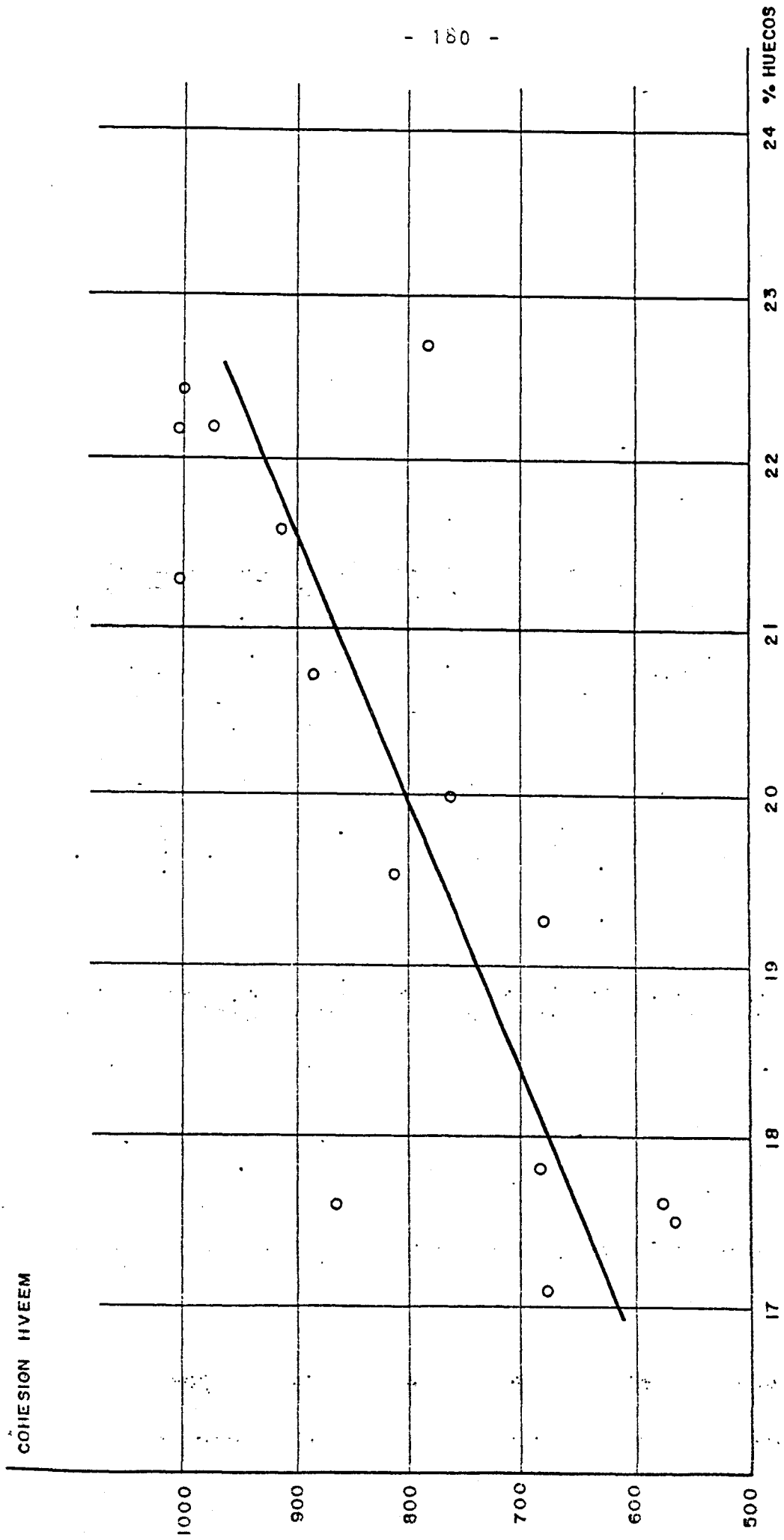


FIG.3.20.- VARIACION DE LA COHESION IVEEM EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE HUECOS EN UNA MEZCLA P-10 (15, 4)

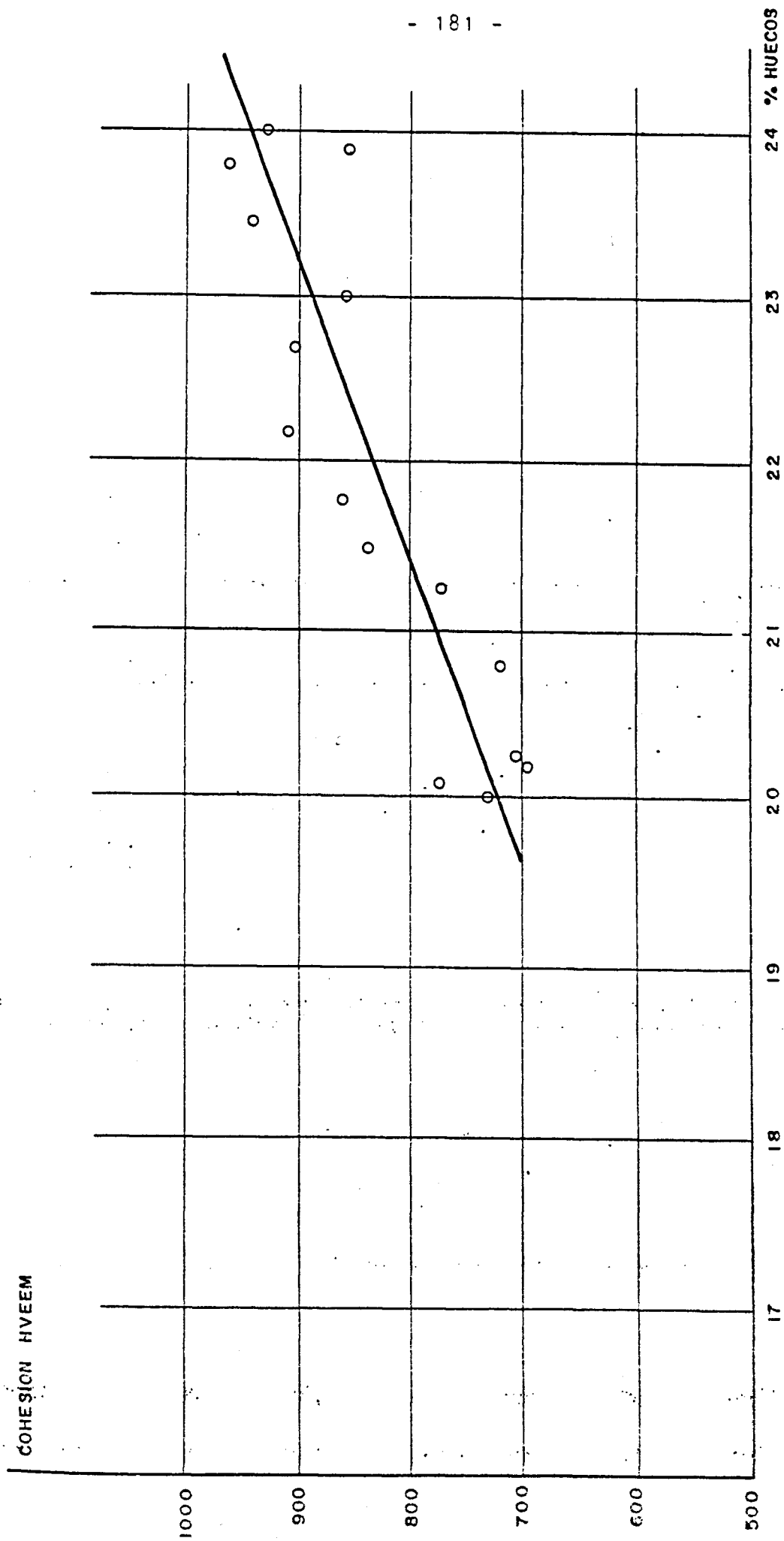


FIG. 3.21.- VARIACION DE LA COHESION HVEEM EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE HUECOS EN UNA MEZCLA P-10 (10, 4)

de las dos granulometrías ensayadas, los valores obtenidos en la rotura de cada probeta y porcentaje de huecos. Se puede observar la gran dispersión de resultados, así como una pérdida de la cohesión a medida que disminuye el porcentaje de huecos con el aumento del contenido de ligante.

Por otra parte, se obtiene menor cohesión Hveem con mezclas fabricadas con mayor porcentaje de finos, mientras que la experiencia muestra que su aumento resulta beneficioso para mejorar su resistencia a la disgregación.

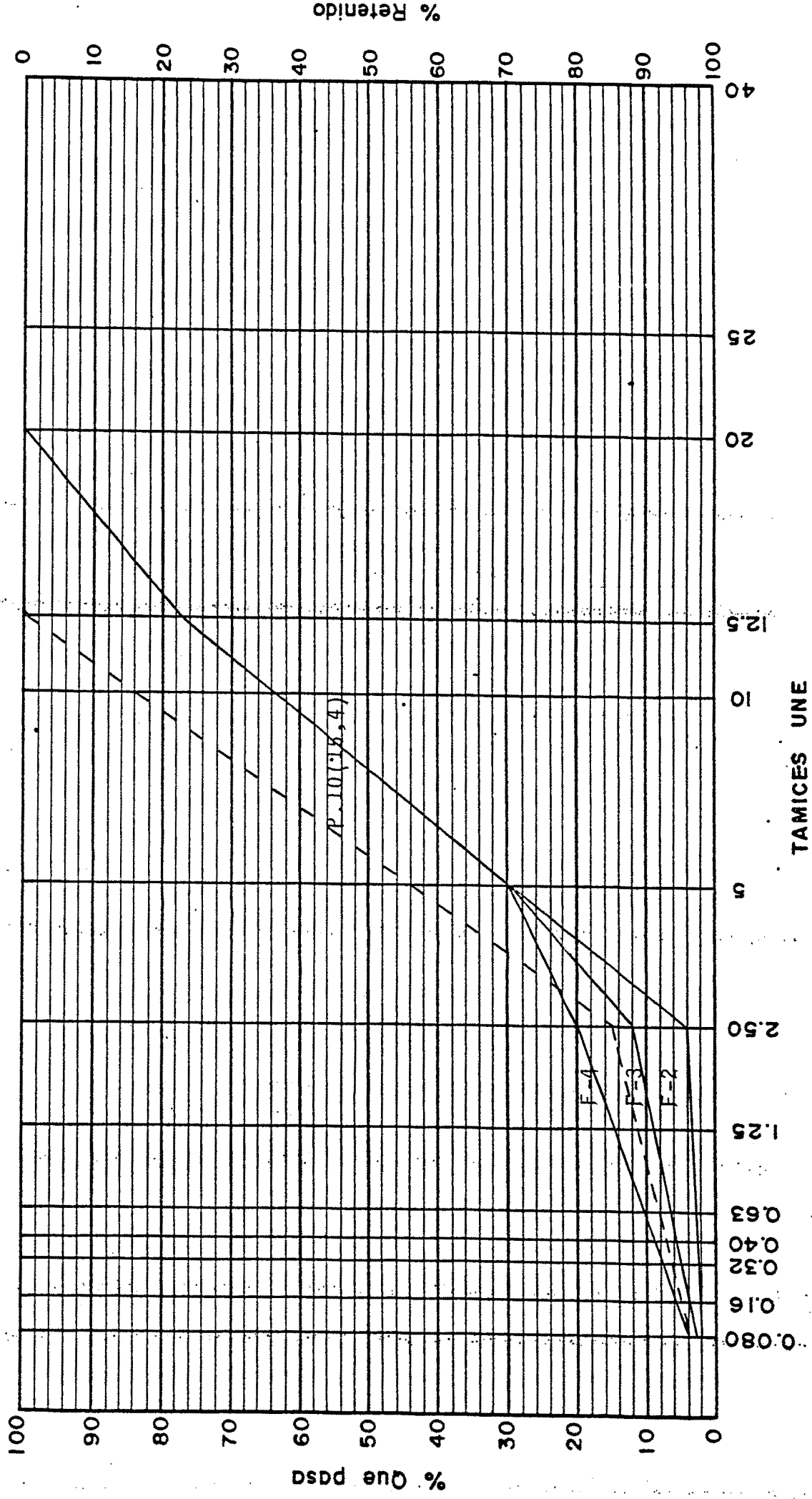
3.1.4. ENSAYO EN PISTA DE LABORATORIO

Recogemos aquí los resultados que sobre el empleo de las mezclas abiertas se han obtenido en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, de Madrid. Son ensayos sobre mezclas similares a las que hemos ensayado en los otros procedimientos y los resultados pueden ser válidos a la hora de establecer conclusiones.

El ensayo se realizó a una temperatura de 60°C, empleando una presión de contacto de 7 Kg/cm². Las mezclas fueron fabricadas con un betún B-80/100 y un árido calizo. La granulometría ensayada se representa en la figura 3.22, junto con la granulometría P-10(15,4) empleada en los anteriores ensayos.

ANALISIS GRANULOMETRICO (ABERTURA TAMIZ 0.45°)

FIGURA 3.22. GRANULOMETRIAS EMPLEADAS EN EL ENSAYO DE PISTA EN LABORATORIO.
(LCM).



Los resultados, recogidos en la figura 3.23, muestran la sensibilidad del ensayo tanto a las variaciones de filler como la de ligante. Pero, aplicadas a la caracterización de estas mezclas, presenta dos inconvenientes. El primero es que corresponden a un modo de deterioro que no es frecuente en estas mezclas, deformaciones plásticas excesivas en la zona de rodadura. Segundo, que la resistencia a la deformación disminuye con el contenido de ligante, mientras que en el caso del empleo de mezclas abiertas en capa de rodadura es precisamente la acción del ligante la que impide que se suelten los aridos y su aumento resulta beneficioso como la experiencia pone de manifiesto.

Por otra parte, el empleo de betunes mas duros, significa una mayor resistencia a la deformación y una mejor respuesta en la máquina de pista, sin embargo, esto no parece ser lo mas conveniente para las mezclas porosas, como la experiencia francesa ha puesto de manifiesto. Se han observado peores resultados, mas pérdidas de aridos y disgregación de la mezcla, empleando betunes B-40/50, que con B-80/100.

3.1.5. ENSAYO EN MAQUINA GIRATORIA

El ensayo en máquina giratoria es uno de los ensayos aplicados en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Escuela de Madrid para la caracterización de mezclas abiertas. Las mezclas ensayadas son las mismas que en el caso anterior, y los

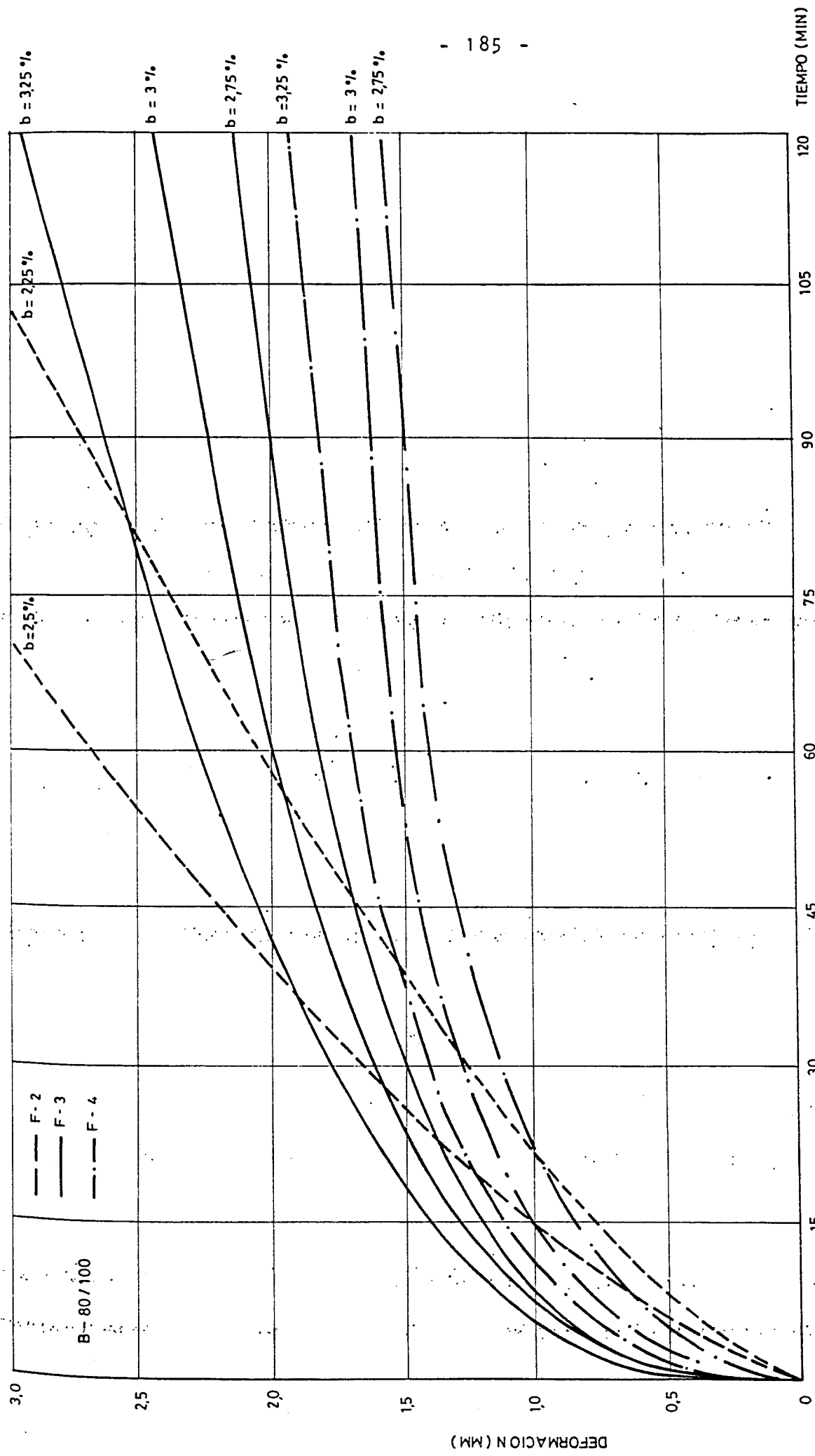


FIG. 3.23.- ENSAYO EN PISTA DE LABORATORIO. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA Y PORCENTAJE DE LIGANTE (L. C. M.)

ensayos fueron realizados a temperatura de 60°C y a una presión de 11 Kg/cm².

Los resultados obtenidos se recogen en las figura 3.24 y 3.25. En la figura 3.24 se representa la variación de la estabilidad giratoria con el número de vueltas y en la figura 3.25 la variación del ángulo giratorio.

Estos resultados muestran la poca idoneidad de este ensayo para la caracterización de mezclas abiertas. El ángulo giratorio permanece constante, independientemente del número de vueltas, granulometría y porcentaje de ligante. La estabilidad giratoria permanece también constante con la variación del porcentaje de ligante y el número de vueltas, y únicamente es ligeramente sensible al porcentaje de filler. Las mezclas con mas filler, más mastic, resultan ligeramente mas deformables.

3.2. ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE

Dada la falta de la idoneidad de los ensayos antes analizados en la caracterización de esta mezcla de granulometría abierta, se pensó en desarrollar en laboratorio un nuevo procedimiento más acorde con el tipo de sollicitaciones a que están sometidas estas mezclas en el firme.

La experiencia que sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas porosas en capa de rodadura existe, pone de mani-

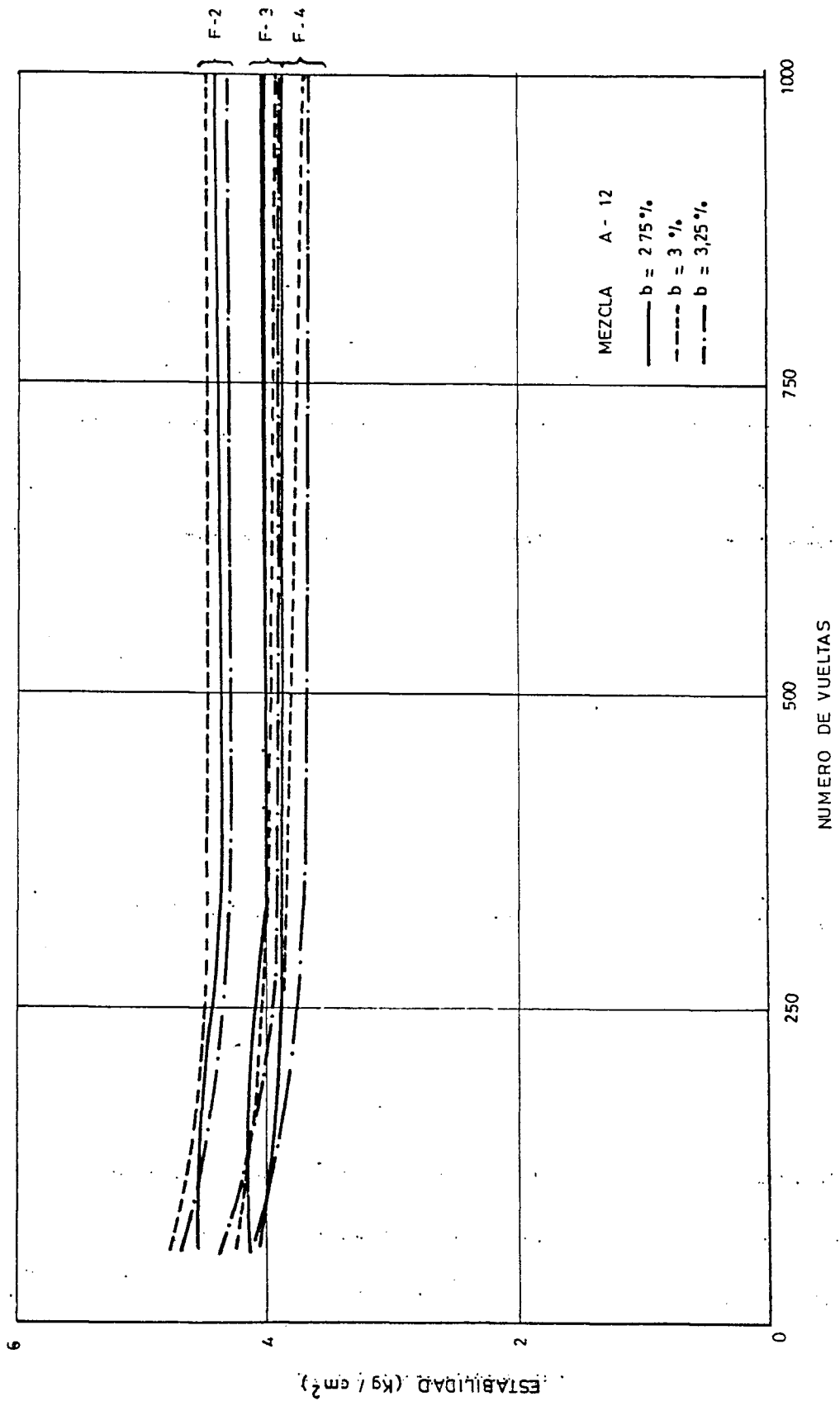


FIG. 3. 24.- VARIACION DE LA ESTABILIDAD GIRATORIA EN FUNCION DEL NUMERO DE VUELTAS APLICADAS A LA PROBETA

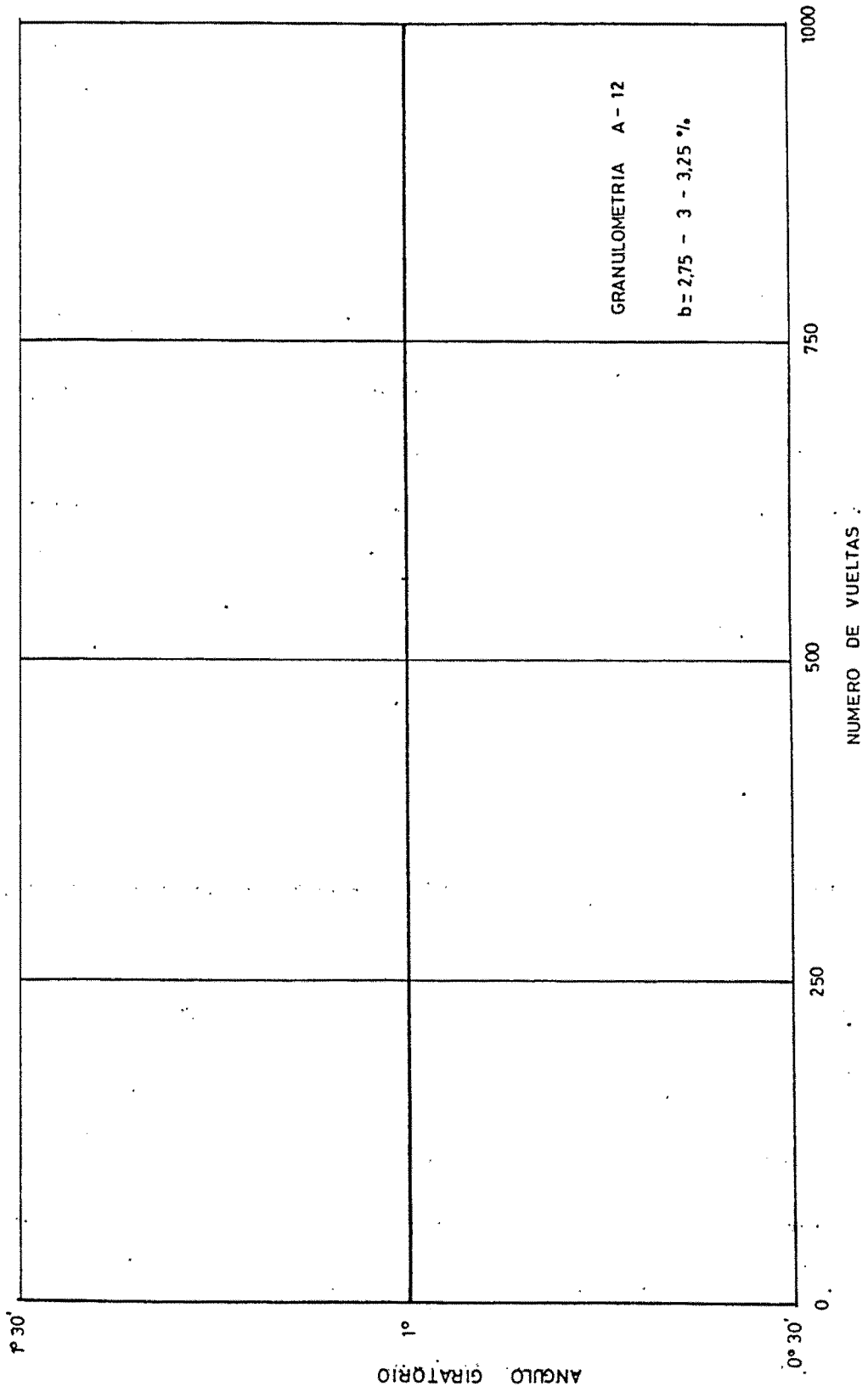


FIG. 3.25.- VARIACION DEL ANGULO GIRATORIO EN FUNCION DEL NUMERO DE VUELTAS
APLICADO A LA PROBETA

fiesto que son las peladuras y pérdida de los áridos los fallos más típicos que se producen en este tipo de aglomerados. La estabilidad de la mezcla suele ser suficiente para soportar sin deformarse las cargas verticales del tráfico, al menos con los espesores de capa utilizados (2-4 cm). Pero, en puntos donde por defectos de dosificación ó ejecución la mezcla no tiene una cohesión suficiente, o no existe una trabazón adecuada del arido grueso, se produce la pérdida de éste por la acción de los esfuerzos tangenciales y de succión del tráfico.

En la fotografía de la figura 3.26, se recoge este fallo ocurrido como consecuencia de la extensión de la mezcla cuando había transcurrido un tiempo apreciable entre la fabricación y el extendido. La mezcla fue rápidamente levantada y disgregada por el tráfico a las pocas horas de su puesta en servicio. Generalmente, no toda la capa se levanta, sino aquellas zonas que corresponden a porciones de mezcla que más se hallan enfriado ó empobrecido de ligante, permaneciendo el resto de la capa sin presentar problemas. Este fallo ocurrió durante la construcción de los tramos de mezclas porosas en la CN-634 de San Sebastián - La Coruña, entre Solares y Beranga.

Por otra parte, en probetas Marshall fabricadas en el laboratorio con pocos finos y escaso ligante se observa como las partículas gruesas pueden ser fácilmente desprendidas del conjunto de la mezcla. Esto hacía pensar que la falta de cohesión se podía poner de manifiesto en algún ensayo que sometie



FIGURA 3.26. Fallo por disgregación.

se a la probeta a algún mecanismo de deterioro que fuese produciendo la pérdida de los aridos mal adheridos, bien sea por impacto, desgaste, abrasión, etc. Por todas estas razones se pensó en someter a las probetas fabricadas en el compactador Marshall a un ensayo similar al utilizado con los aridos para determinar su pérdida por desgaste, ensayo de Los Angeles (NLT-149/72).

Partiendo del ensayo de desgaste de Los Angeles y del cilindro giratorio utilizado en este ensayo, se ha ido desarrollando un nuevo procedimiento para determinar la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas porosas.

El ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se quiere ensayar, una probeta en el compactador Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de Los Angeles a una temperatura dada. Después de un número determinado de vueltas se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo por desgaste parte de los áridos situados en su superficie, y se pesa. Como resultado del ensayo se obtiene la pérdida por desgaste, que se define como:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

donde

P = porcentaje de pérdida por desgaste, en %

p₁ = peso de la probeta antes del ensayo, en g

p₂ = peso de la probeta después del ensayo, en g

Para estudiar la validez de este ensayo aplicado a mezclas bituminosas porosas se comenzó por estudiar su sensibilidad a las variaciones del porcentaje de finos y de ligante de la mezcla. Se ensayaron las granulometrias P-10(5,2), P-10(5,4), P-10(10,2), P-10(10,4), P-10(10,6), P-10(15,2), P-10(15,4) y P-10(15,6), utilizando con cada una de ellas tres porcentajes de ligante: 2,5; 4,5 y 6,5, sobre aridos. El ligante empleado fue betún B-60/70 y las probetas fueron fabricadas a 145°C y compactadas en el compactador Marshall con 50 golpes por cara. En la figura 3.27 se representan las granulometrias ensayadas.

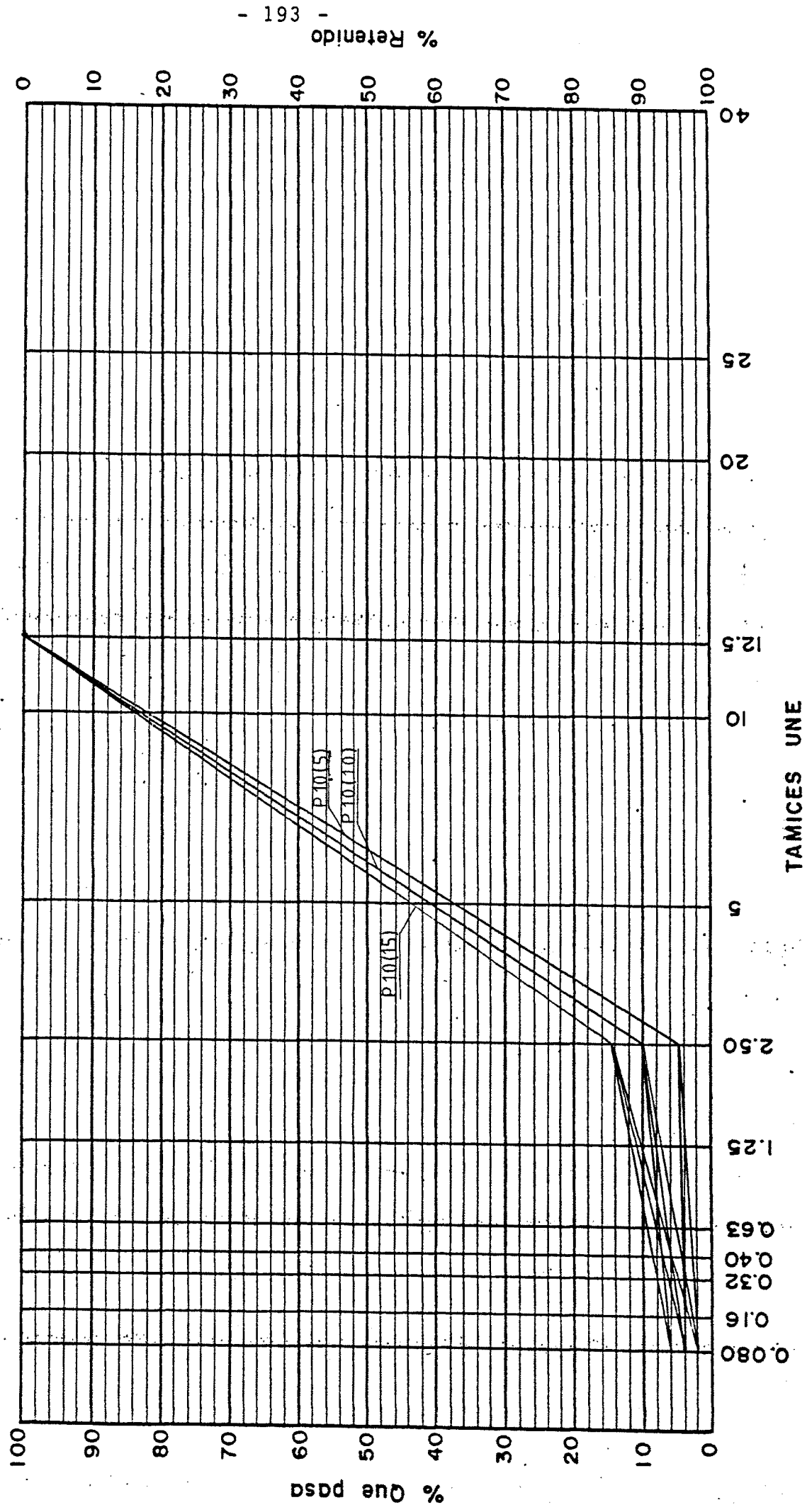
Los ensayos fueron realizados entre 15 y C, valores entre los que oscila la temperatura de camara donde esta instalada la máquina de Los Angeles, en el sotano de la Escuela.

Los resultados de estos ensayos han sido recogidos en las tablas 3.12, 3.13 y 3.14 y en las figuras 3.28, 3.29 y 3.30. En ellas aparecen los valores medios y los coeficientes de variación correspondientes al ensayo de cuatro probetas por cada granulometria y porcentaje de ligante.

Estos resultados claramente muestran que este ensayo es capaz de detectar las pequeñas variaciones que en la cohesión y trabazón de la mezcla pueden suponer las modificaciones del contenido de finos o del porcentaje de ligante de la mezcla.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ABERTURA TAMIZ 0.45)

FIGURA 3.27. GRANULOMETRIAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO DE LA PERDIDA POR DESGASTE.



% FILLER	% BETUN SOBRE ARIDOS					
	2.5		4.5		6.5	
	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION
2	89	0,044	50,5	0,099	36,6	0,081
4	80	0,025	51	0,011	33,4	0,089
6	-	-	-	-	-	-

TABLA 3.12- INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FILLER EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE.
 GRANULOMETRIA CON TAMAÑO MAXIMO 10 mm Y 5% DE FRACCION FINA

%/ FILLER	% BETUN SOBRE ARIDOS:					
	2.5		4.5		6.5	
	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION
2	90,9	0,062	45,4	0,105	31,3	0,083
4	72,3	0,089	27,5	0,123	19	0,115
6	72,4	0,104	25	0,064	14,7	0,183

TABLA 3.1.3- INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FILLER EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE.
 GRANULOMETRIA CON TAMAÑO MAXIMO 10mm Y 10 % DE FRACCION FINA

% FILLER	% BETUN SOBRE ARIDOS					
	2.5		4.5		6.5	
	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION	MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION
2	81,5	0,044	37	0,054	25	0,168
4	70	0,068	24,8	0,173	17,4	0,189
6	75,6	0,026	19,7	0,071	11,6	0,30

TABLA 3.14- INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FILLER EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE.
 GRANULOMETRIA CON TAMAÑO MAXIMO 10mm Y 15 % DE FRACCION FINA

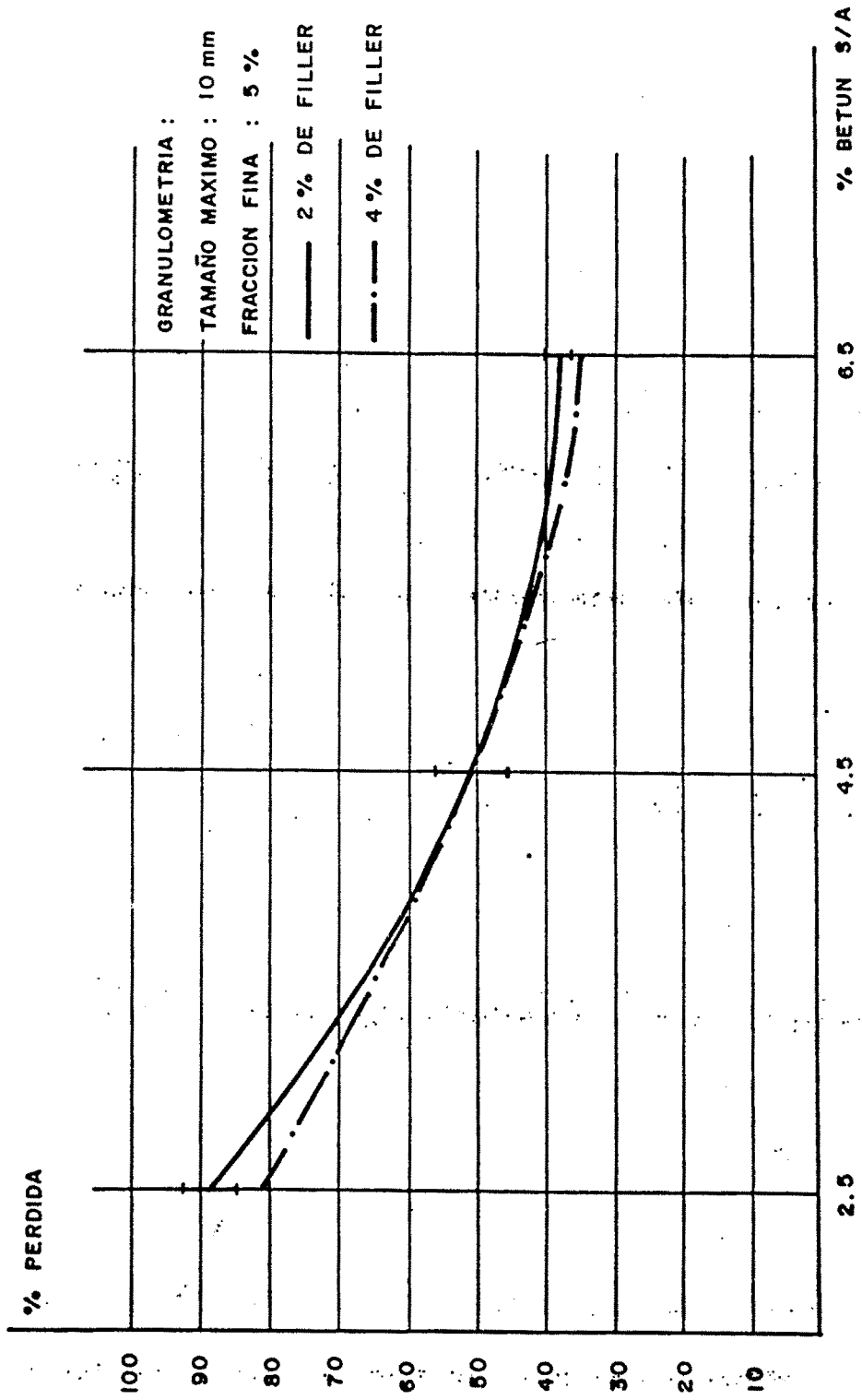


FIG. 3.28.- INFLUENCIA DE LOS PORCENTAJES DE FILLER Y DE LIGANTE EN LA PERDIDA POR DESGASTE

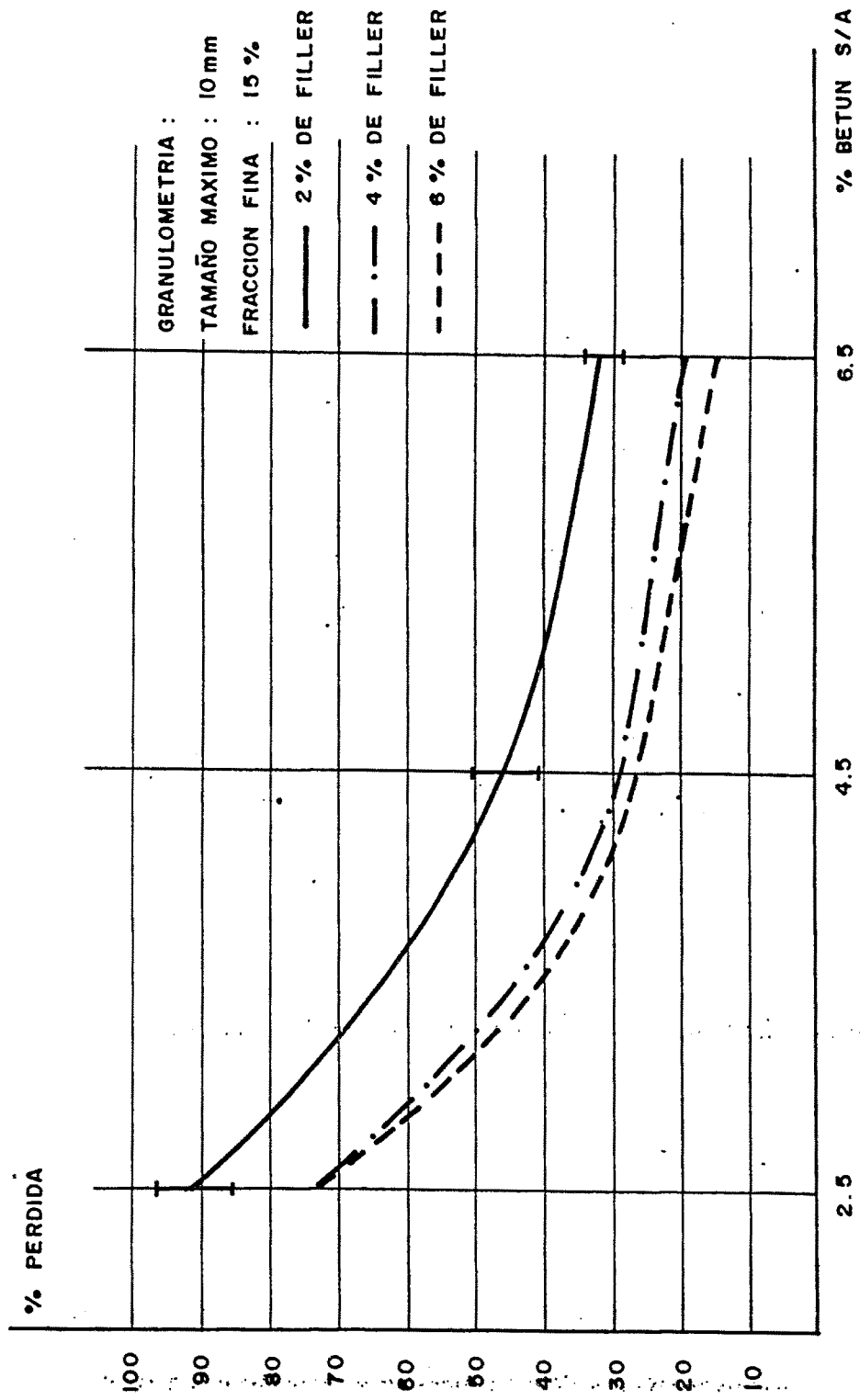


FIG.3.29.- INFLUENCIA DE LOS PORCENTAJES DE FILLER Y DE LIGANTE EN LA PERDIDA POR DESGASTE

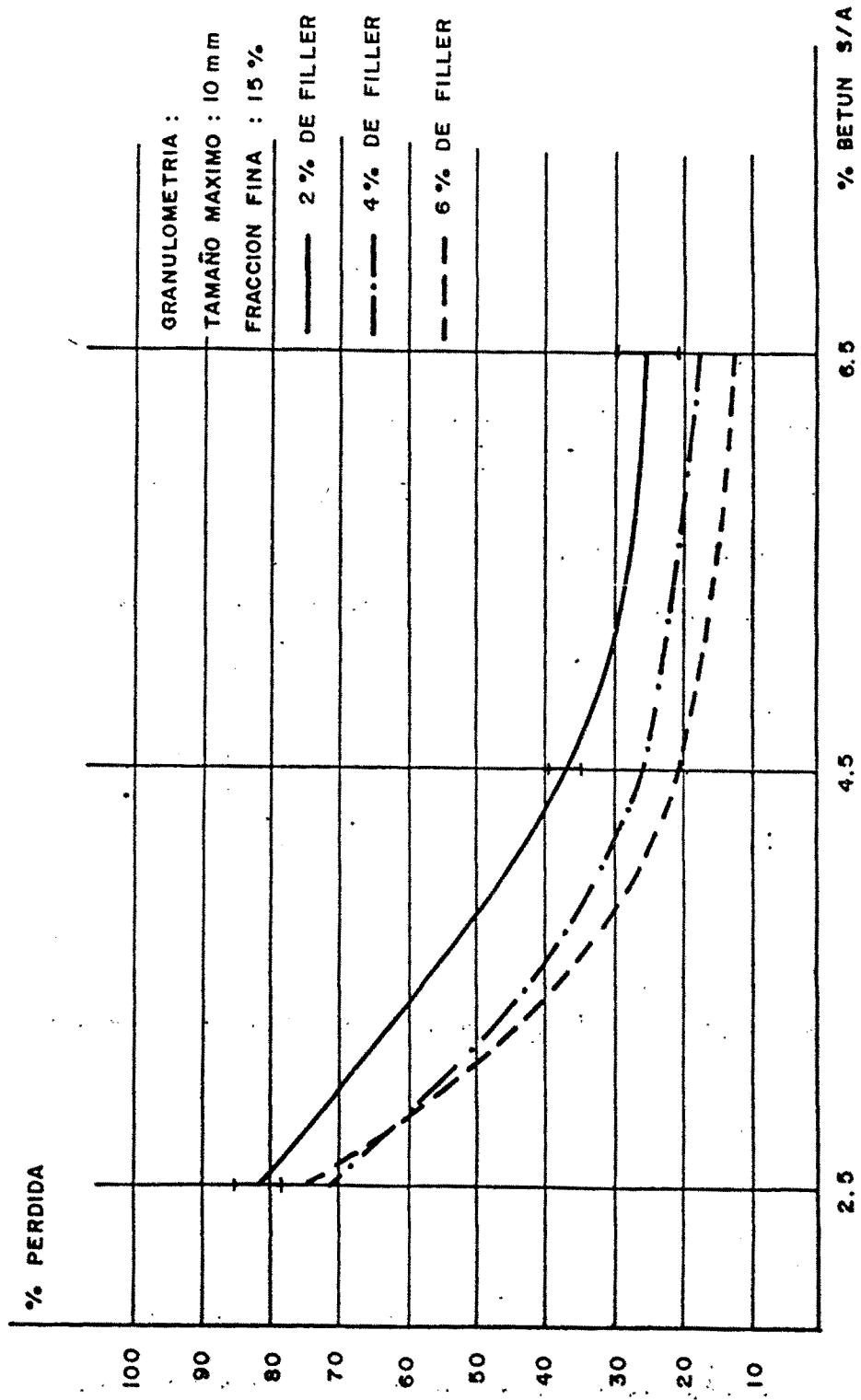


FIG.3.30.- INFLUENCIA DE LOS PORCENTAJES DE FILLER Y DE LIGANTE EN LA PERDIDA POR DESGASTE

Para una mezcla dada, la pérdida por desgaste disminuye a medida que aumenta su contenido de betún, pero esta disminución, que es rápida cuando los contenidos de betún son bajos llega a ser moderada cuando el porcentaje de ligante ha llegado a dar suficiente trabazón y cohesión a la mezcla. Es decir, que se observa un cierto cambio dependiente en las curvas % de pérdida por desgaste % de betún, que podría corresponder a un contenido de ligante suficiente para evitar la disgregación de la mezcla.

En la figura 3.31, 3.32 y 3.33 se han representado es tos mismos resultados, agrupando las granulometrías con el mismo porcentaje de filler, con el fin de apreciar el efecto que el porcentaje de pasa por el tamiz 2,5 UNE tiene so bre la pérdida de desgaste. El ensayo detecta claramente el efecto que los finos tienen sobre la trabazón de la mezcla, disminuyendo el porcentaje de pérdida con el aumento del por centaje del árido fino.

Los resultados obtenidos ponen en evidencia que estamos ante un procedimiento de ensayo que permite detectar las variaciones del comportamiento de la mezcla cuando se modifican los porcentajes de los materiales que la componen y por otra parte, detalle muy importante, está directamente relacionado con uno de los modos de deterioro de estas mezclas.

El valor de este procedimiento es todavía más importante si se tiene en cuenta los obtenidos con los ensayos Marshall

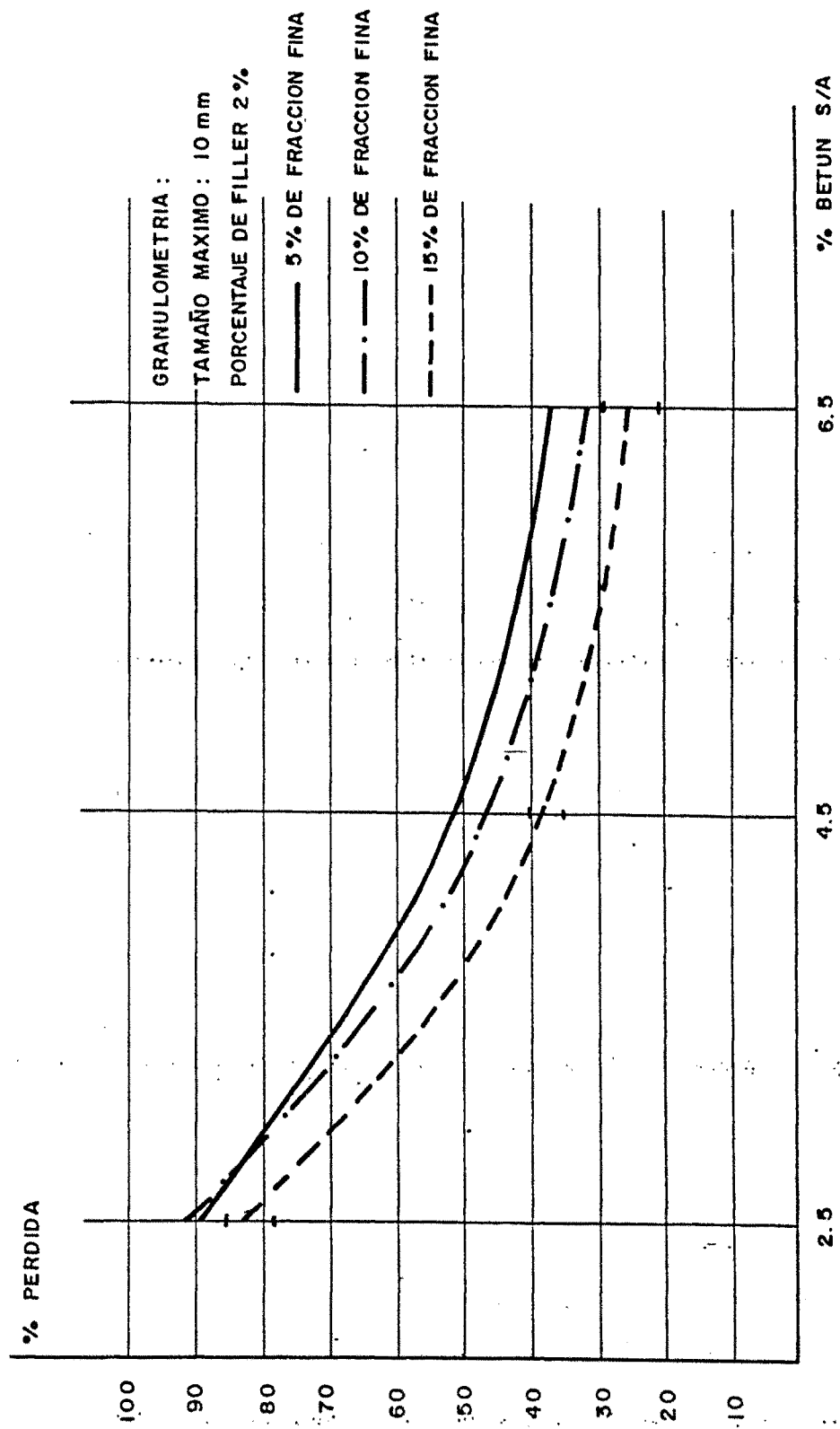


FIG.331.- INFLUENCIA DE LA FRACCION FINA EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE

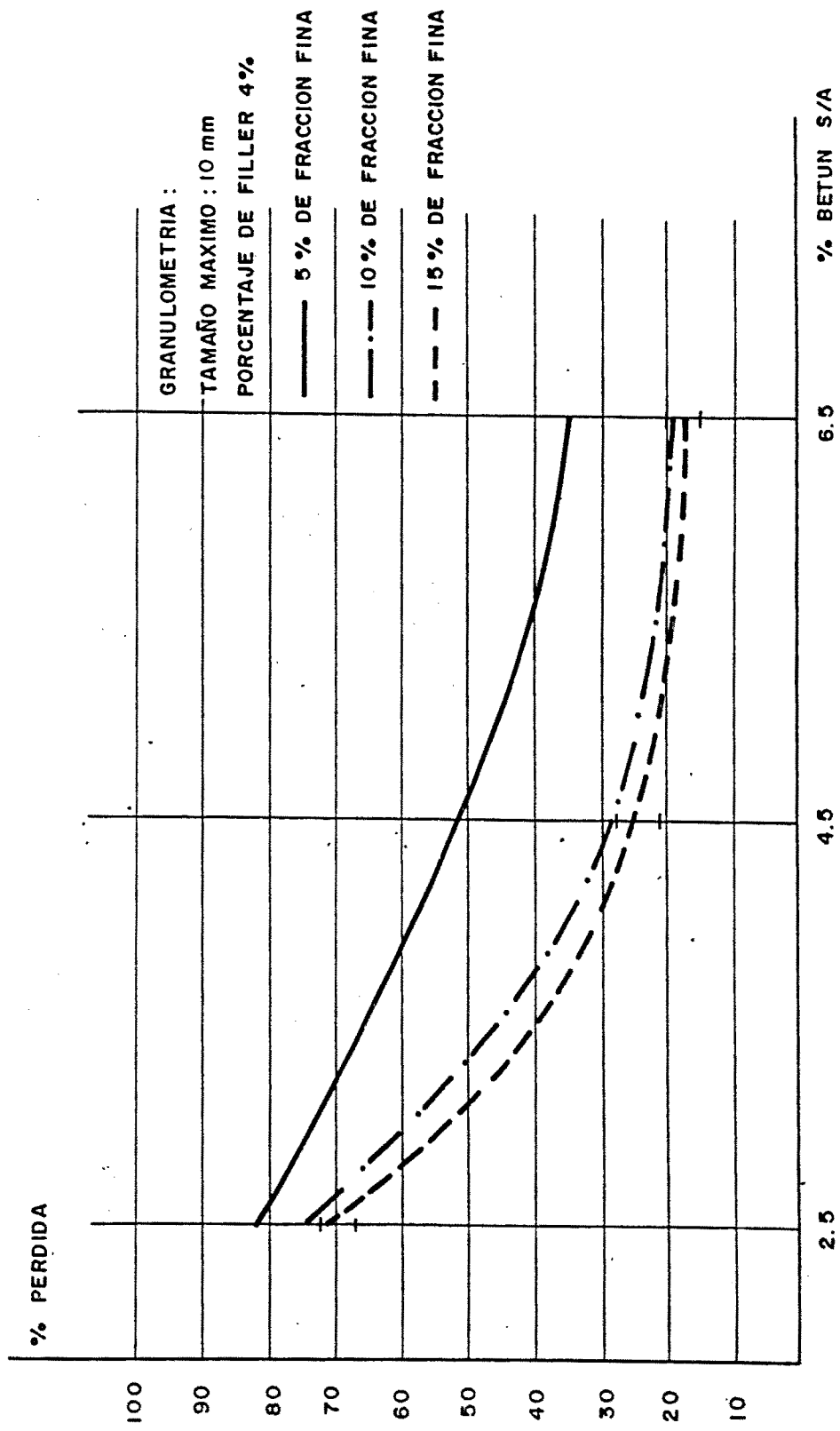


FIG.3.32.- INFLUENCIA DE LA FRACCION FINA EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE

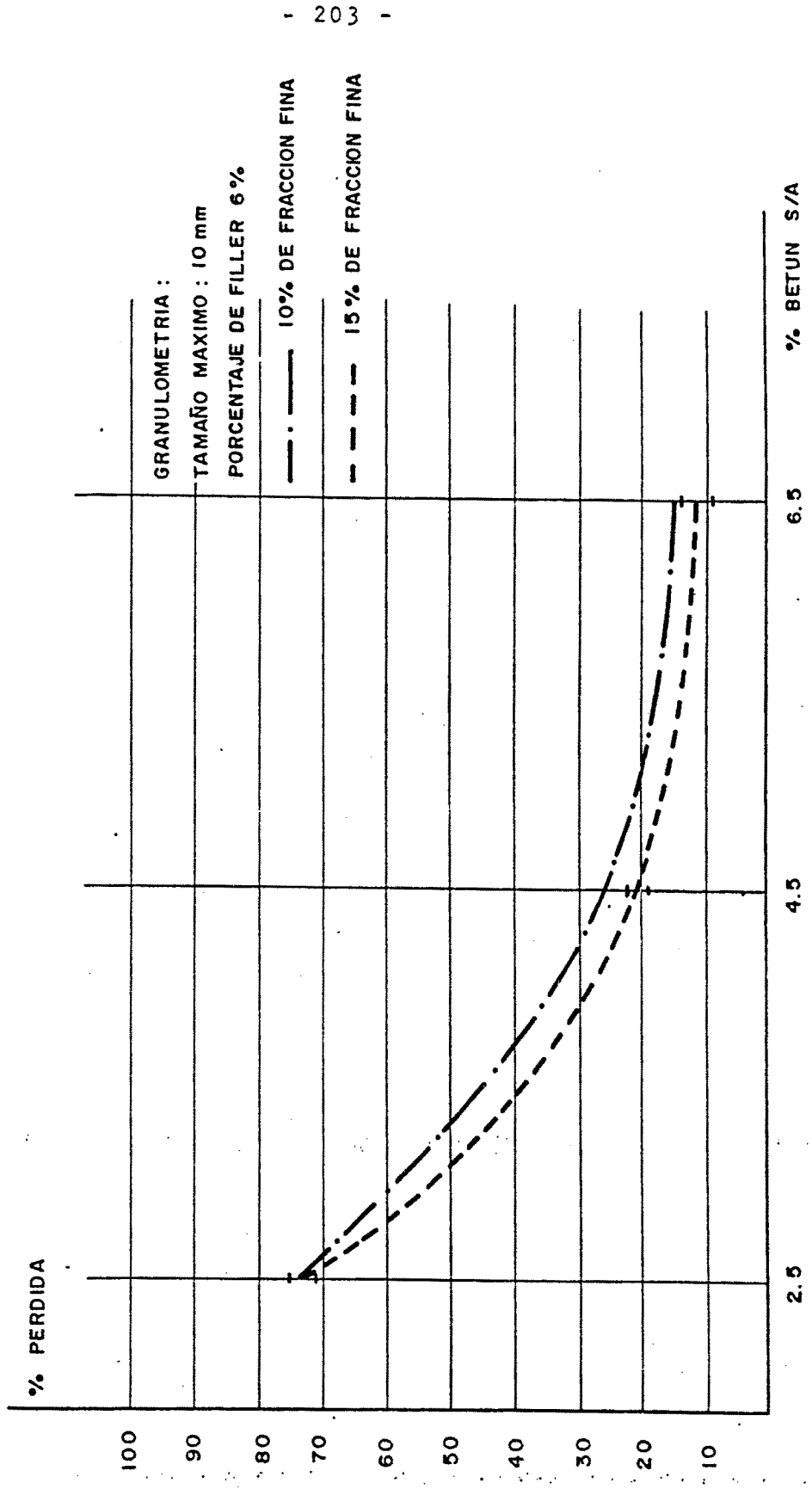


FIG3.33.- INFLUENCIA DE LA FRACCION FINA EN LA PERDIDA POR DESGASTE DE PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA POROSA EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE

cohesiometro Hveem y de tracción indirecta en la caracterización de estas mezclas y, en general, de las de granulometría abierta, para las que no existe en estos momentos ningún procedimiento de dosificación basado en ensayos mecánicos.

Por esto se pensó en este procedimiento de ensayo como un medio para caracterizar la respuesta de las mezclas bituminosas porosas, en especial, para detectar su trabazón, resistencia a la disgregación, y resistencia a la pérdida del árido grueso.

Con vistas a su normalización, se estudió en primer lugar la influencia que la temperatura del ensayo y el número de vueltas pudiera tener sobre los resultados. Este estudio se realizó con la granulometría P-10(15,4) y se utilizaron 5 porcentajes distintos de betún B-60/70: 2,3,4,5 y 6% sobre aridos.

Para estudiar la influencia del número de vueltas se realizó el ensayo a 15°C y se sometieron las probetas a 100, 200, 300, 400, 500 y 600 vueltas, determinándose para cada uno de estos números de vueltas las pérdidas por desgaste sufridas por la mezcla. Los resultados de estos ensayos aparecen en la tabla 3.15 y en la figura 3.34.

Para estudiar la influencia de la temperatura de ensayo, se ensayó la misma granulometría y los mismos porcentajes de

% DE LIGANTE	NUMERO DE VUELTAS					
	100	200	300	400	500	600
2	70,8	87,2	94,5	-	-	-
3	21,1	36,8	49,6	60,5	69,3	73,8
4	7,8	20,9	29,8	39,1	51,3	61,2
5	8,0	14,0	21,3	26,8	35,1	42,8
6	4,1	9,9	12,5	15,4	21,6	24,2

TABLA 3.15. - VARIACION DE LA PERDIDA POR DESGASTE CON EL PORCENTAJE DE LIGANTE Y EL NUMERO DE VUELTAS. GRANULOMETRIA P.10(15,4). TEMPERATURA DEL ENSAYO 15°C.

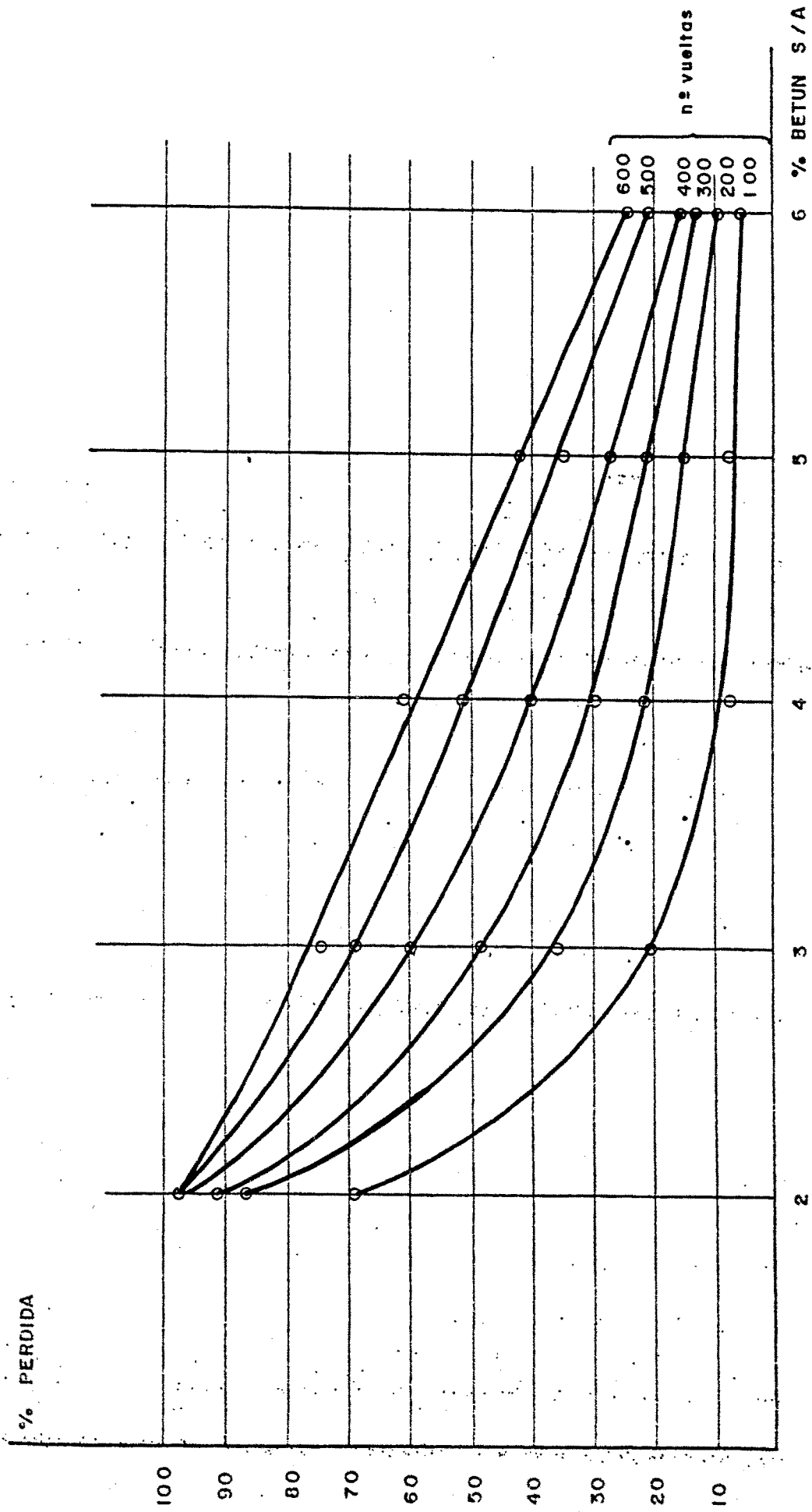


FIG. 3.34. - VARIACION DE LA PERDIDA POR DESGASTE CON EL PORCENTAJE DE LIGANTE Y EL NUMERO DE VUELTAS. GRANULOMETRIA P-10 (15,4) TEMPERATURA DEL ENSAYO 15 °C

ligante a 2, 15, 30 y 45°C, manteniéndose constante el número de vueltas en 300. Los resultados aparecen en la tabla 3.16 y la figura 3.35 .

Los resultados obtenidos variando el número de vueltas muestran como con un número bajo de estas (100 - 200) apenas hay tiempo para poner en evidencia las diferencias existentes en la mezcla con porcentajes altos de ligante. Con un número elevado de vueltas (500 - 600) sólo pueden continuar perdiendo árido las probetas con alto contenido en betún, no siendo ya significativo el ensayo para los porcentajes bajos de ligante. Por esto se fijó en 300 vueltas, como el valor más indicado para la realización del ensayo. .

Con el aumento de la temperatura se produce prácticamente en todos los casos, una disminución de la pérdida por desgaste. Lo que pone de manifiesto la relación de este ensayo con la fragilidad de la mezcla y su capacidad para absorber los impactos dinámicos, de abrasión y desgaste que le produce el tráfico. Probablemente, con temperaturas superiores a las ensayadas, la viscosidad del ligante fuese insuficiente para mantener la cohesión de la mezcla y se produciría su disgregación total.

A la vista de estos resultados se pensó que las variaciones de la temperatura dentro de la cámara donde se halla emplazada la máquina de desgaste en el laboratorio, comprendida

TEMPERATURA °C	% DE LIGANTE					
	2	3	4	5	6	
2	81,8	49,5	34,0	31,5	24,0	
15	94,5	49,5	29,8	21,3	12,5	
30	81,2	38,3	19,1	7,0	3,8	
45	92,2	35,6	11,0	3,7	1,4	

TABLA 3.16. VARIACION DE LA PERDIDA POR DESGASTE CON EL PORCENTAJE DE LIGANTE Y LA TEMPERATURA DEL ENSAYO. NUMERO DE VUELTAS 300. GRANULOMETRIA: P.10(15,4).

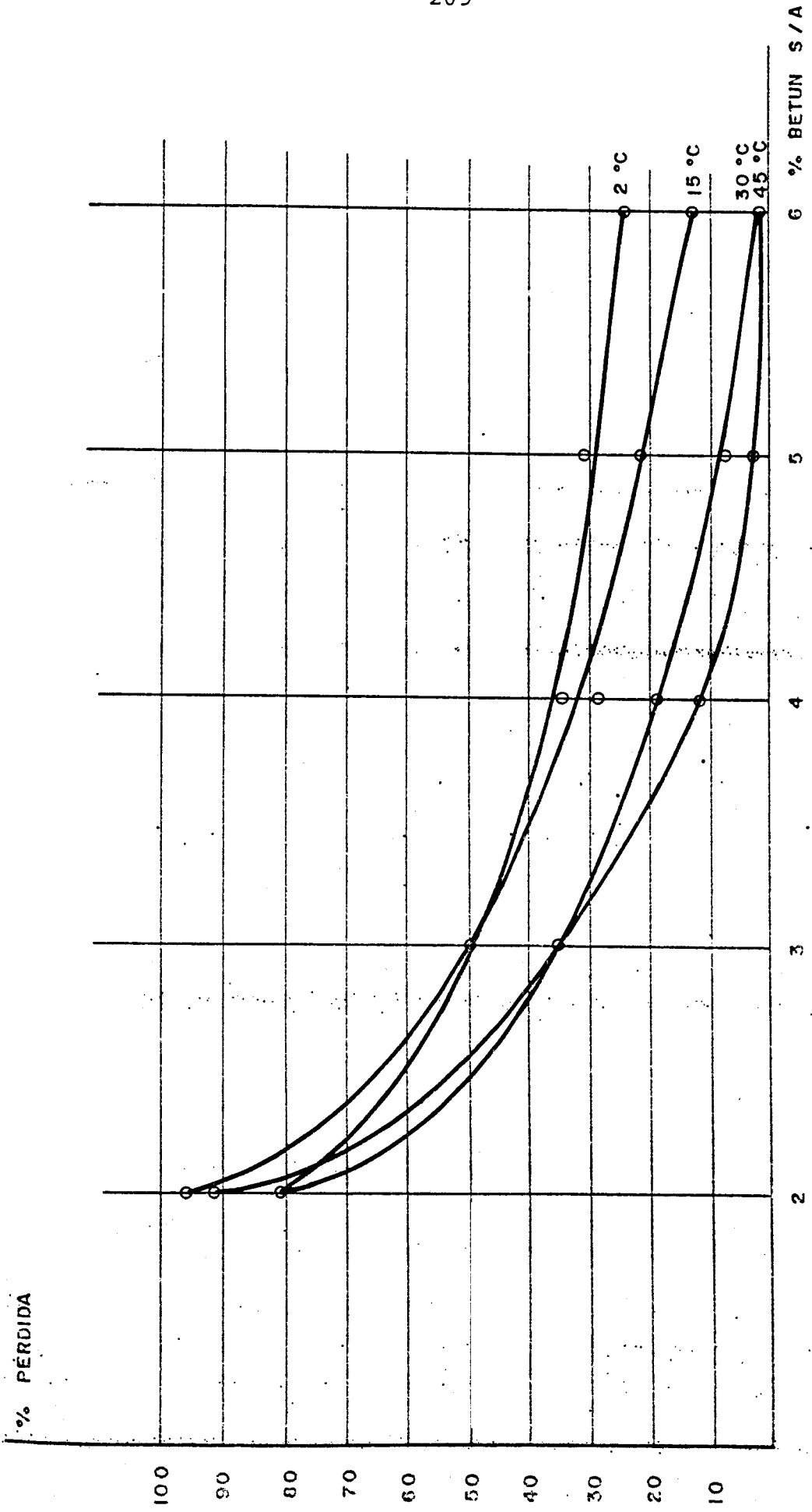


FIG.3.35. - VARIACION DE LA PERDIDA POR DESGASTE CON EL PORCENTAJE DE LIGANTE Y LA TEMPERATURA DEL ENSAYO. GRANULOMETRIA P-10 (15,4)

entre 15 y 18°C, apenas podría influir en los resultados. Por ello se decidió realizar los ensayos a temperatura ambiente, sin emplear ningún tipo de estufa ó acondicionador que permitiese fijar los límites de variación de la temperatura de ensayo en unos márgenes mas estrechos.