

# TRAMO EXPERIMENTAL DE ENSAYO EN LA CARRETERA R.II.

Por JOSE LUIS ESCARIO

Ingeniero de Caminos,  
Director del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.

*El autor da cuenta del proyecto de tramo de carretera de ensayo, cuyas obras de movimiento de tierras están terminadas; el tema es de especial interés, pues de los estudios que se realizan se espera llegar a conclusiones importantes para la técnica de la carretera. A este artículo de presentación del propósito seguirán otros de detalle de las diferentes experiencias, para tener a los lectores al tanto de los resultados que se vayan obteniendo en este importante trabajo.*

La ciencia del camino se ha complicado enormemente en los últimos treinta años. Aquel "servicio ordinario" de nuestros tiempos de la Escuela es hoy una de las técnicas más complejas del ingeniero; en ella interviene, como fundamental, la mecánica del suelo, pues no hay que perder de vista que sobre él se apoya el firme; la palabra "revestimiento" tiene una significación acertadísima. A la complicación propia de la técnica, muy reciente, del suelo, hay que añadir, en el caso de la carretera, la gran variedad de los que en un trazado de cierta longitud se presentan, lo que obliga a emplear medios rápidos de identificación, sin perjuicio de profundizar con técnicas más precisas en las zonas realmente peligrosas. Los problemas de drenaje, de importancia decisiva, cambian no sólo con el tipo de suelo, sino con la forma general del terreno. Su acertada resolución es fundamental para la conservación del firme, pues, como es sabido, la resistencia se puede ver afectada en forma decisiva por la proporción de humedad que el suelo contenga.

En el firme, los problemas son de análoga complicación; sobre el suelo, con las características técnicas previamente determinadas, van la sub-base y la base del espesor preciso para que, unidas al revestimiento, no lleguen al suelo, en las peores condiciones, cargas superiores a las que pueda soportar. El espesor total es variable entre límites amplísimos: desde un mínimo de 20 cm. por razones constructivas, hasta 100 cm. o más. Se comprende por ello la importancia económica del cálculo del espesor de los firmes, el cálculo que presenta, teóricamente, dificultades enormes por la forma de sustentación y el carácter viscoelástico de muchos firmes. Por último, existe el problema de los revestimientos en sí: no sólo hay que calcular el espesor, sino que es preciso proyectar la mezcla. Y hay que saber cómo se comporta el firme y

por qué en algunos casos se fracasa. La vergüenza a confesar los fracasos es una rémora para el progreso; hay fracasos que son falta de técnica del proyectista, pero hay otros que son debidos a ignorancia colectiva, a que la técnica actual es imperfecta; solamente estudiando cuando la imperfección se acusa, el porqué de la misma, es posible progresar. Se debe tener vergüenza de acusar un fracaso cuando hubo falta clara en la aplicación de una técnica normal. Pero hay obligación de aprovechar los fracasos en los cuales no hubo falta de celo, sino una laguna de la técnica, para investigar las causas de lo ocurrido y buscar los remedios.

El problema de los firmes bituminosos es muy complicado: tienen la ventaja de que, si no hubo falta grave, es posible el arreglo. Pero se sabe hoy mucho menos del ligante negro que del cemento. Dentro de los productos bituminosos hay sensibles diferencias que no se detectan por los ensayos normales. La técnica del espectro infrarrojo ofrece grandes posibilidades, que es de esperar dé luz a muchos problemas que nos preocupan. Por último, hay un aspecto que el ingeniero no debe olvidar: el económico. En teoría, aun con las imperfecciones de la técnica actual, es posible, ¿quién lo duda!, hacer obras perfectas y de gran duración, pero pueden resultar económicamente injustificadas. En este problema hay que buscar el mínimo de la carga anual, suma de tres conceptos:

carga de establecimiento + conservación + gastos  
de explotación.

El segundo sumando tiene una importancia trascendental en carreteras; una obra bien atendida en dinero y en tiempo durante su explotación, puede admitir soluciones de establecimiento mucho menos onerosas, y producir, en definitiva, una carga al Erario público mucho menor.

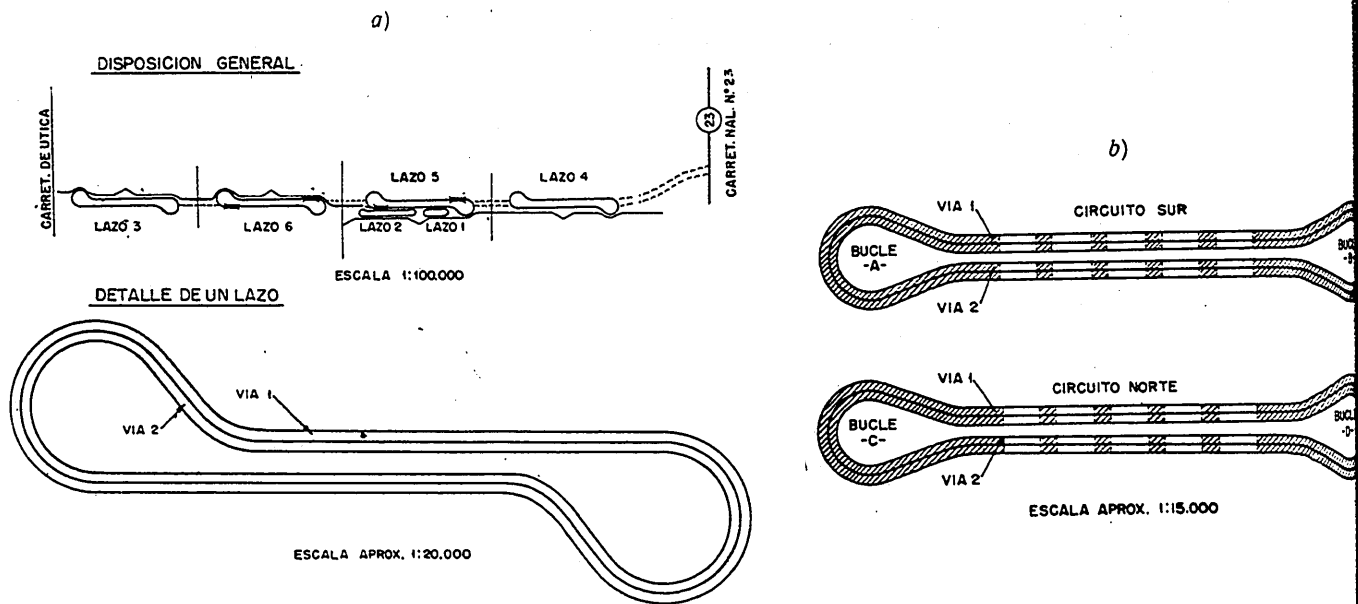
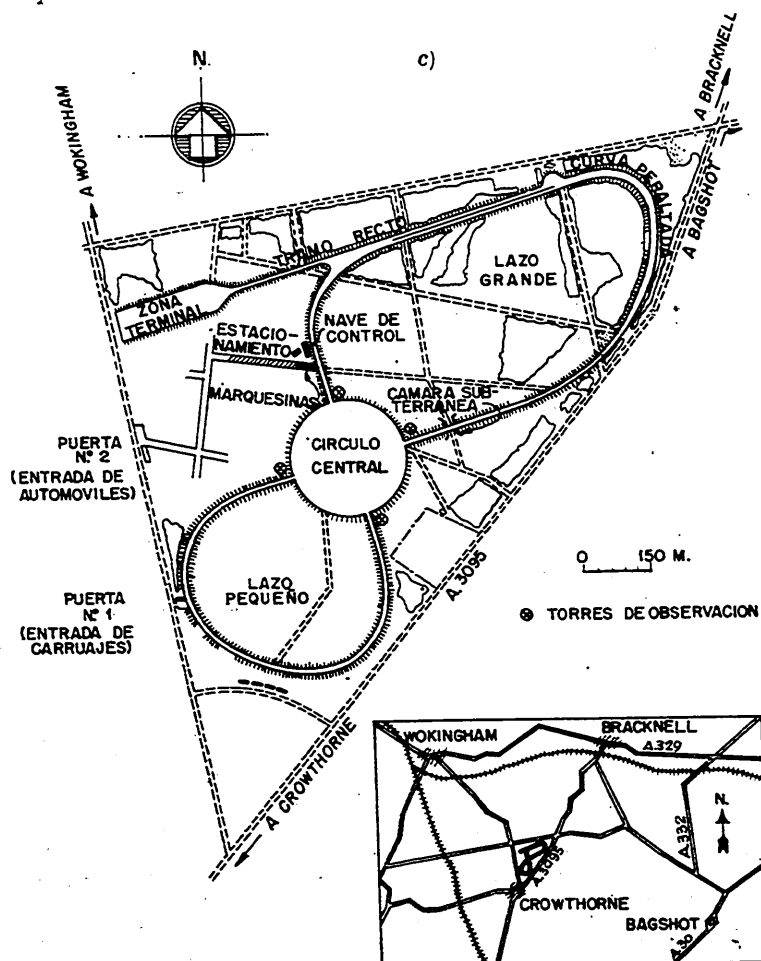


Fig. 1.<sup>a</sup> — Circuitos de ensayos de algunos tramos experimentales: a) AASHO, b) WASHO, y c) Road Research Laboratory, en Crowthorne.



El tercer sumando, los gastos de explotación, tiene una trascendental importancia: su consideración es la que permite pagar los peajes en las modernas carreteras de este tipo. En este sumando pesa mucho la consideración, en los vehículos industriales, de la carga máxima por eje; este punto ya lo hemos tratado en las páginas de la REVISTA (1), y hay que tener presente que los gastos de explotación del transporte por carretera se elevan a cifras que oscilan alrededor del 10 por 100 de la Renta Nacional. Así, pues, el problema, en su conjunto, adquiere unas dimensiones económicas de gran volumen, y el ahorro que puede lograrse es muy importante si las soluciones no se improvisan y se realizan los estudios precisos antes de lanzarse alegremente a proyectar y construir. La técnica del laboratorio de investigación se ha hecho imprescindible y debe tener una amplia visión del problema; ha de estudiar a fondo todos los matices que antes hemos señalado. No puede quedar encerrada en sus gabinetes de estudio; debe salir al campo, y en el campo ha de estar con la constante intranquilidad de ver si las hipótesis que en el estudio teórico hizo, son reales y se cumplen. Debe trabajar en equipo con los proyectistas y realizadores de la administración. Un ejemplo notable en el mundo de esta forma de actuación y de la eficacia que así puede lograrse, es el Road Research Laboratory inglés, que abarca, dentro de su organización, el estudio de todos los aspectos técnicos y económicos, y que aun dependiendo administrativamente de Departamento ministerial distinto del que proyecta y ejecuta las obras, trabaja en estrecha colaboración con ellos.

La necesidad de enfocar en la realidad los estudios, ha llevado a establecer tramos de ensayo de firmes. Fueron los norteamericanos los primeros que se lanzaron a construir pequeñas pistas, donde ruedas con una carga determinada simulaban el tráfico, permitiendo estudiar en modelo reducido sus efectos. Yo recuerdo la primitiva pista de Arlington, cuando visitamos Estados Unidos por vez primera en 1929. Pero aquellos ensayos, siempre muy imperfectos, fueron inaceptables cuando aparecieron los grandes camiones; no es posible reproducir su efecto en modelo reducido con suficiente exactitud. Por otra parte, el revestimiento es solamente la parte visible del firme; el cimientó y el suelo tienen una importancia trascendental y decisiva, que sólo es posible estudiar en la realidad. Por ello se empezaron a construir tramos de ensayo de firmes, primeramente, para estudiar el comportamiento de tipos de firmes determinados. En Inglaterra y Estados Unidos existen secciones de carreteras con soluciones especiales, cuyo comportamiento se siguió por los Laboratorios y Centros de Investigación, para intentar llegar a conclusiones sobre puntos concretos. El interés de

(1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de julio 1946, febrero 1956, mayo 1960, publicación núm. 7 del Laboratorio del Transporte. Conferencia en el Colegio Nacional de Economistas. Diciembre 1959.

estas investigaciones fragmentarias llevó al convencimiento de la utilidad de construir tramos de ensayo de importancia, especialmente preparados para la investigación.

En Estados Unidos, a este fin, se han construido dos grandes tramos de ensayo. Son lazos (fig. 1.<sup>a</sup>) en los que el tráfico, especialmente preparado para el ensayo, circula en unas condiciones determinadas: carga, velocidad, separación de vehículos, etc.; en el ensayo de la A.A.S.H.O., 60 camiones con cargas por eje sencillo de 1 a 15 Tn. y por eje doble de 12 a 24 Tn., circularán, durante dos años, dieciocho horas por día; en seis días por semana, se ensayarán 836 secciones de firmes. En este ensayo, el más importante en ejecución, hay presupuestado gastar \$ 2 millones. Se comprende que parte muy importante del gasto es el que supone el tráfico artificial. Por otra parte, los lazos proyectados no tendrán luego utilización alguna. Con análogo criterio al de éste, aunque con menor presupuesto, se construyó el tramo de la WASHO. En Europa, excepto en Alemania, donde existió un pequeño tramo exclusivamente experimental, que hubo que abandonar por el coste del tráfico especial para la experimentación, no se han proyectado tramos con tráfico únicamente para este fin. Si exceptuamos el de Crowthorn en Inglaterra (figura 1.<sup>a</sup>), recientemente inaugurado y que no es para ensayo de firmes, sino para estudios de circulación — curvas, deslizamiento, iluminación, etc... —, los tramos europeos son tramos de carretera actual, en los cuales, aunque el firme o los firmes se hayan construido expresamente para experimentación, el tráfico es el normal de la carretera. De los tramos europeos existentes, uno de los más completos es el de Alconbury Hill, cerca de Londres. Tiene una longitud de 2,5 millas, de las cuales, 1,5 son de firmes flexibles y 1 de firme rígido; el proyecto consiste en doblar la carretera existente, construyendo para experimentación una nueva sección con dos circulaciones.

En Francia, Bélgica, Alemania y otros países europeos, existen también tramos de experimentación, la mayoría para estudiar un tipo de firme de especial interés.

El problema de las carreteras españolas, de gran volumen económico, bien merecía la pena de tener una experiencia propia, intentando dilucidar una serie de problemas de gran importancia técnica y económica, no sólo por cuanto se refiere al suelo, cimientó y pavimento, sino a los sistemas constructivos y eficacia de la maquinaria empleada. En este sentido, elevamos, con fecha 30 de junio de 1958, una moción al Patronato del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, para construir un tramo de ensayo entre los kilómetros 10,551 y 17,049 de la carretera de Madrid a Francia, por la Junquera (figura 2.<sup>a</sup>). Las condiciones que cumplía el tramo elegido eran excelentes: la carretera actual es insuficiente para el tráfico que hoy soporta; era absolutamente

imprescindible doblarla. Por ello, la obra a realizar tenía una indudable utilidad, aparte de la experimentación. El tráfico actual de la carretera es grande; tiene un I.M.D. de 10 500 vehículos, de los cuales, el 24,5 por 100 son camiones. Este tráfico es más que suficiente para la experimentación; pero es que si en un momento se quisiese hacer algún estudio que exigiese mayor volumen de tráfico, se puede hacer pasar fácilmente la totalidad por el tramo de ensayo. Este tráfico se puede elegir, es decir, que en un día previsto, para hacer una experiencia, se puede dejar

Valdés, en representación de la Dirección General de Carreteras, y el ingeniero encargado de la carretera, de la Jefatura de Obras Públicas de Madrid, D. Luis Sierra Piqueras. Fué, además, especialmente nombrado para el tramo por parte del Laboratorio, el ingeniero D. Gonzalo Navacerrada.

Se empezó por estudiar muy cuidadosamente el proyecto de trazado y movimiento de tierras: el tramo actual está en estado aceptable, por lo que se decidió, con el fin de no recargar el presupuesto, conservarlo prácticamente sin modificación. Pero al mismo tiempo,

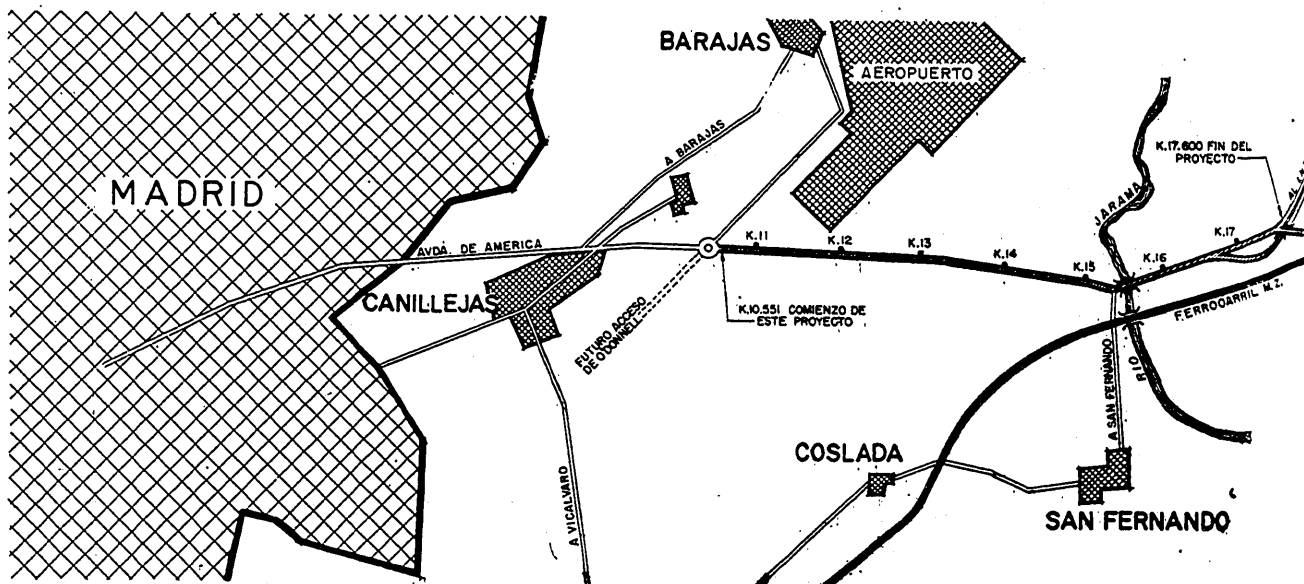


Fig. 2.ª — Situación del tramo de ensayo.

pasar por el tramo de ensayo solamente un número y tipo determinado de vehículos. Por otra parte, la situación ofrece la ventaja de estar muy cerca del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, por lo cual es fácil atender rápida y eficazmente al tramo, auxiliando al laboratorio de obra que ha sido montado en el kilómetro 14.

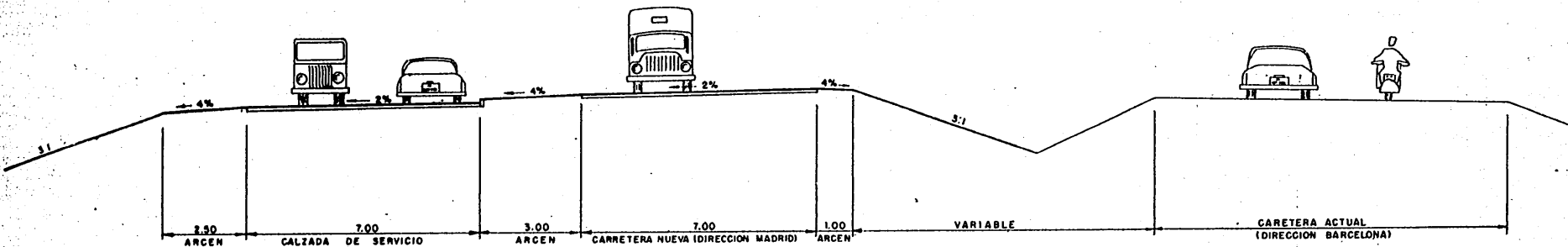
Existe además, por estar el tramo lindante con el aeropuerto de Barajas, una completísima información meteorológica, de trascendental importancia para los estudios a realizar.

El Patronato, en su sesión de 9 de julio de 1958, aprobó la moción, y el Sr. Ministro, el día 23 del mismo mes y año, firmó la O. M. aprobando la construcción del tramo de ensayo y creando, para dirigir su construcción y la experimentación subsiguiente, una Comisión mixta que, presidida por el autor de estas líneas, está compuesta por los Sres. D. José Antonio Jiménez Salas, D. Antonio Lleó, D. Enrique Balaguer y D. Ventura Escario, respectivamente, Subdirector del Laboratorio del Transporte y Jefes de las Secciones de Tráfico y Economía del Transporte, Pavimentos y Mecánica del Suelo; D. Antonio

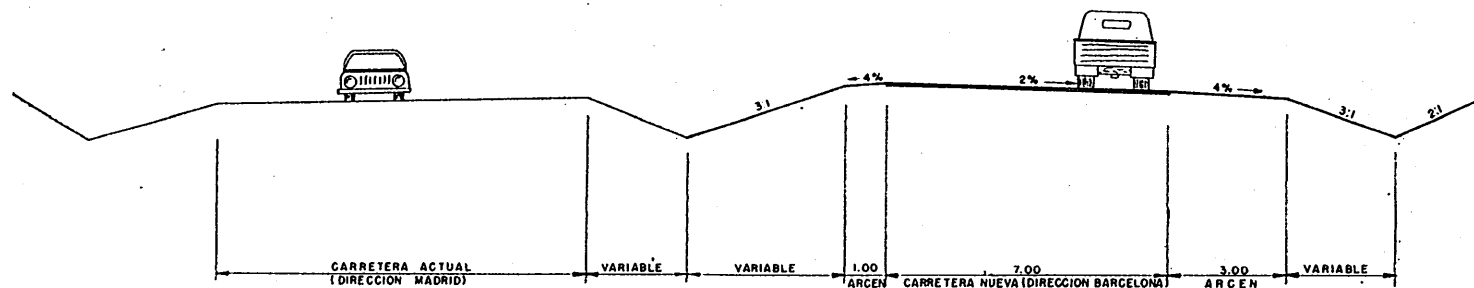
po, no se podía proyectar una carretera moderna con los defectos en planta y perfil que, como es lógico, tiene la actual; por ello se ha hecho un trazado al parecer independiente, pero no es así, sino que es el que viene impuesto por lo que la carretera ha de ser el día de mañana. En las figuras 3.ª y 4.ª puede verse las secciones transversales actuales y futuras. Hasta el puente de San Fernando (Km. 15), la carretera tiene un carácter de vía rápida urbana, razón por la cual se ha proyectado con calle de servicio. Esta solución, que es la correcta desde el punto de vista del tráfico, tiene, además, la ventaja de ofrecer un tramo de unos 5 kilómetros, en el cual, sin molestar al tráfico general, se podrán, en la calle de servicio, hacer ensayos *arriesgados*, llevando hasta límite de rotura las condiciones técnicas.

Los elementos geométricos del trazado están calculados para una velocidad de 120 Km./hora, excepto en el puente del río Jarama, donde se reduce a 80 kilómetros/hora.

¿Cómo se ha concebido la experimentación? Hubiera sido posible construir una explanación con tie-

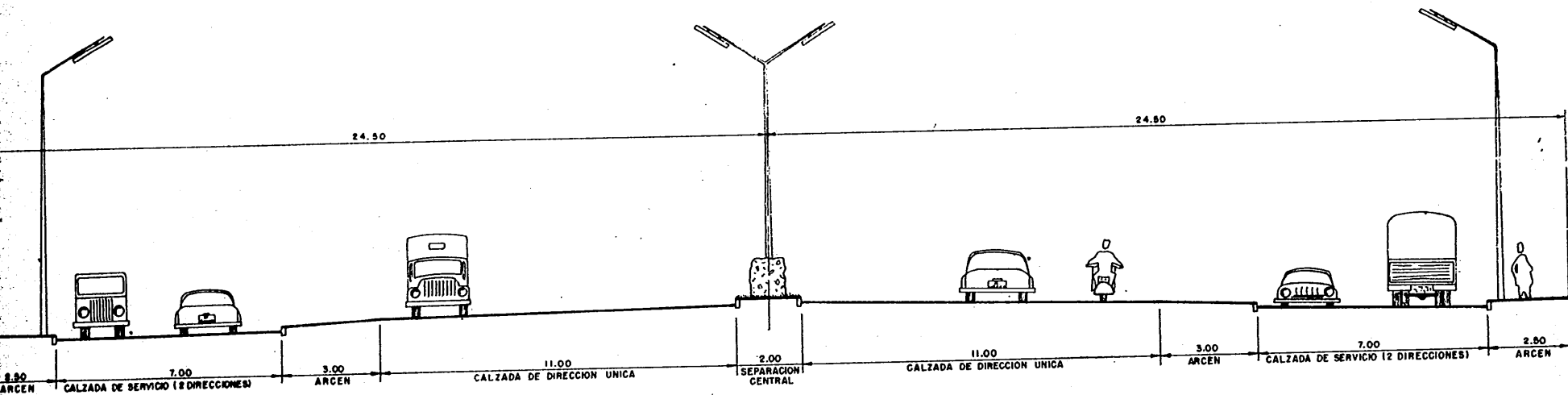


DESDE EL KM. 10,551 AL KM. 15,000 (PUENTE SOBRE EL RIO JARAMA)

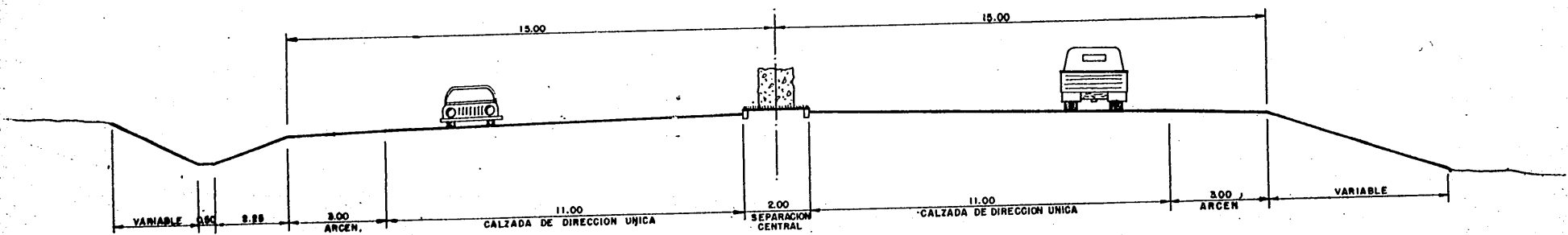


DESDE EL KM. 15,000 (PUENTE SOBRE EL RIO JARAMA) HASTA EL KM. 17,600

Fig. 3.<sup>a</sup> — Secciones transversales del proyecto actual.



DESDE EL KM. 10,500 AL KM. 15,000 (PUENTE SOBRE EL RIO JARAMA)



DESDE EL KM. 15,000 (PUENTE SOBRE EL RIO JARAMA) HASTA EL KM. 17,500

Fig. 4.ª — Secciones transversales de la autopista futura.

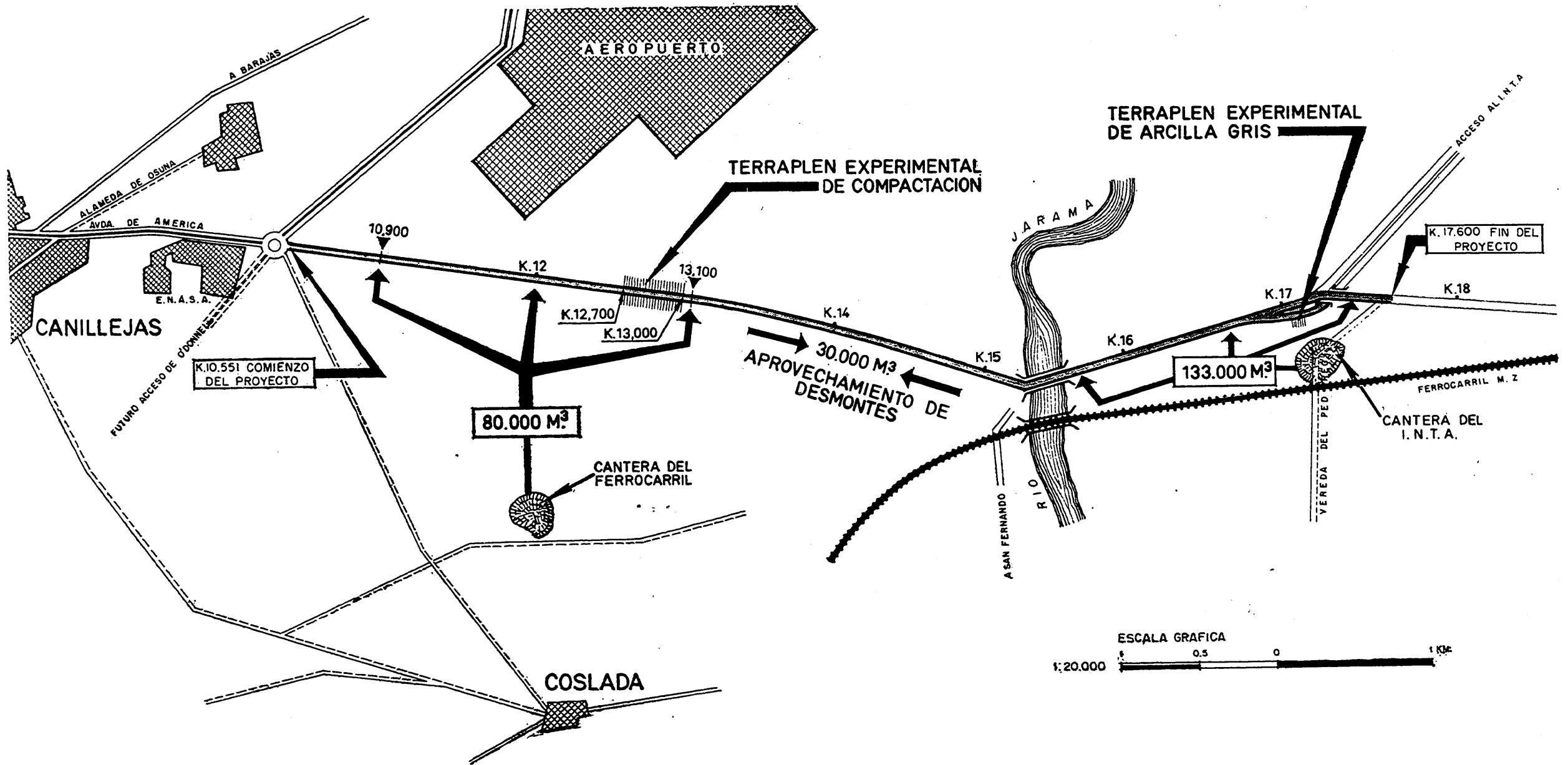


Fig. 5.ª — Distribución de desmontes y terraplenes.

rras expresamente escogidas de calidades muy distintas, para formar un cimiento en el cual hubiera un gran número de variables — suelo — que hubiese permitido estudiar su influencia en el comportamiento del firme; pero aparte de su coste muy elevado, hubiera complicado enormemente la experimentación, pues la combinación de un gran número de variables suelo, con otro grande, por fuerza también, de tipos de pavimentos, hubiera llevado a la necesidad de un número elevadísimo de pequeños tramos: la experimentación hubiera sido costosísima y además poco eficaz, pues los tramos de firme, para que las conclusiones puedan ser correctas, tienen que ser de bastante longitud. Por estas consideraciones, la Comisión decidió proyectar la obra de movimiento de tierras buscando la mayor uniformidad posible en el suelo

espesor variable, pero normalmente pequeño. Aquéllos están formados por arcillas o limos muy plásticos, de un color preponderantemente grisáceo, con límite líquido que sobrepasa, a veces, el 80 por 100. Los depósitos cuaternarios son menos plásticos, pero de una gran variabilidad no solamente a lo largo del trazado, sino también dentro de una misma vertical. Se pasa así, en pocos decímetros, de arenas limpias hasta limos o arcillas bastante plásticos. La dificultad de seleccionar con la moderna maquinaria los terrenos más aptos para los terraplenes, ha obligado a buscar canteras de préstamos en los cerros próximos, en donde la erosión no ha llegado a profundizar en el terciario, dejando así al descubierto estratos más potentes de acarreo cuaternarios.

Se han escogido dos puntos más importantes como

CUADRO 1. — Valores extremos de los límites de Atterberg de la fracción de suelo inferior a 0,42 cm. (Tamiz núm. 40, serie A.S.T.M.)

ZONAS DE PRESTAMO	Límite líquido		Límite plástico		Índice plasticidad	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Cantera de los enlaces ferroviarios .....	No plástico.	43,7	No plástico.	22,0	No plástico.	21,9
Cantera del I.N.T.A. ....	No plástico.	62,8	No plástico.	32,9	No plástico.	38,6

CUADRO 2. — Valores extremos de la densidad máxima y humedad óptima del ensayo Proctor normal.

ZONAS DE PRESTAMO	Densidad máxima		Humedad óptima	
	Mínima	Máxima	Máxima	Mínima
Cantera de los enlaces ferroviarios .....	1,67	1,89	19,7	12,0
Cantera del I.N.T.A. ....	1,57	2,10	20,9	5,4

con excepción del tramo de arcillas grises, del que se habla más adelante.

El volumen total de tierras que ha sido necesario remover y transportar asciende a 338 000 m.<sup>3</sup> repartidos de la siguiente manera:

Desmontes ..... 125 000 m.<sup>3</sup>  
Terraplenes ..... 249 000 »

Debido a la mala calidad, como elemento para la formación de terraplenes, del subsuelo sobre el que se halla situado el trazado de la carretera, sólo ha sido posible el aprovechamiento para terraplenes de unos 30 000 m.<sup>3</sup> de desmontes. El terreno de cimentación está constituido, en términos generales, por depósitos terciarios, cubiertos por estratos del cuaternario, de

zona de préstamos. La primera (fig. 5.<sup>a</sup>), se halla situada a unos dos kilómetros de la carretera actual, a la altura del kilómetro 12 y a su derecha; con ella se han realizado todos los terraplenes comprendidos entre los kilómetros 10,900 y 13,100. La segunda en otro cerro cuaternario, ubicado en las proximidades de la carretera de desviación al Instituto de Técnica Aeronáutica, cerca del kilómetro 17. Con las tierras procedentes de este último se ha completado la explotación entre los puntos kilométricos 15,100 a 17,600.

La naturaleza de ambas canteras es netamente distinta, estando formada la del ferrocarril por arenas arcillosas, y la del I.N.T.A. por gravas también ligeramente arcillosas. Las zonas granulométricas dentro de las cuales se encuentran ambas, pueden verse en la figura 6.<sup>a</sup>. En los cuadros 1 y 2 se dan las cifras extremas, entre las que varían los límites de Atter-

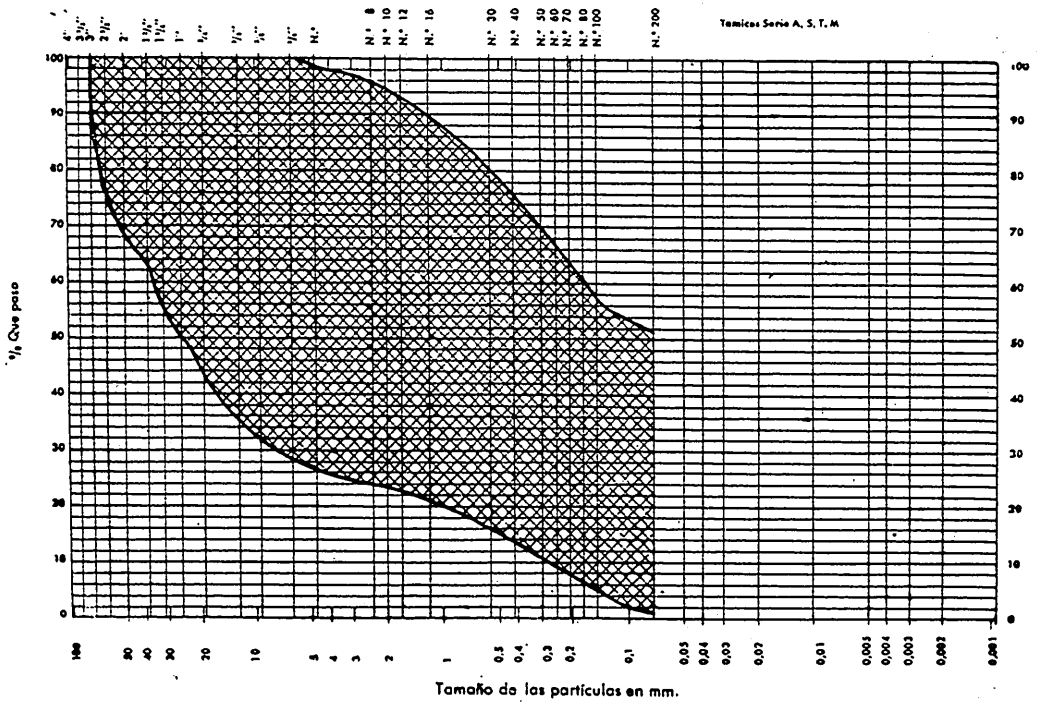


Fig. 6. a. — Zona ocupada por las líneas granulométricas de los suelos procedentes de la cantera del INTA.

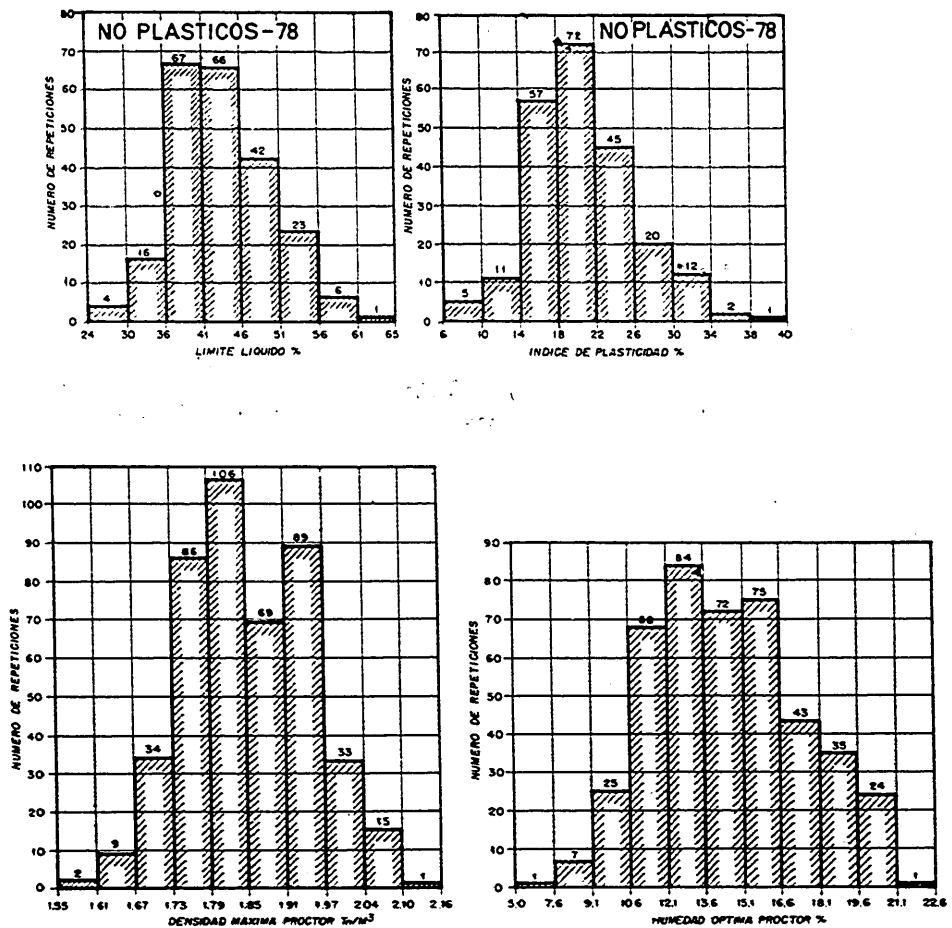


Fig. 6. b. — Distribución estadística de las propiedades del material de la cantera del INTA.

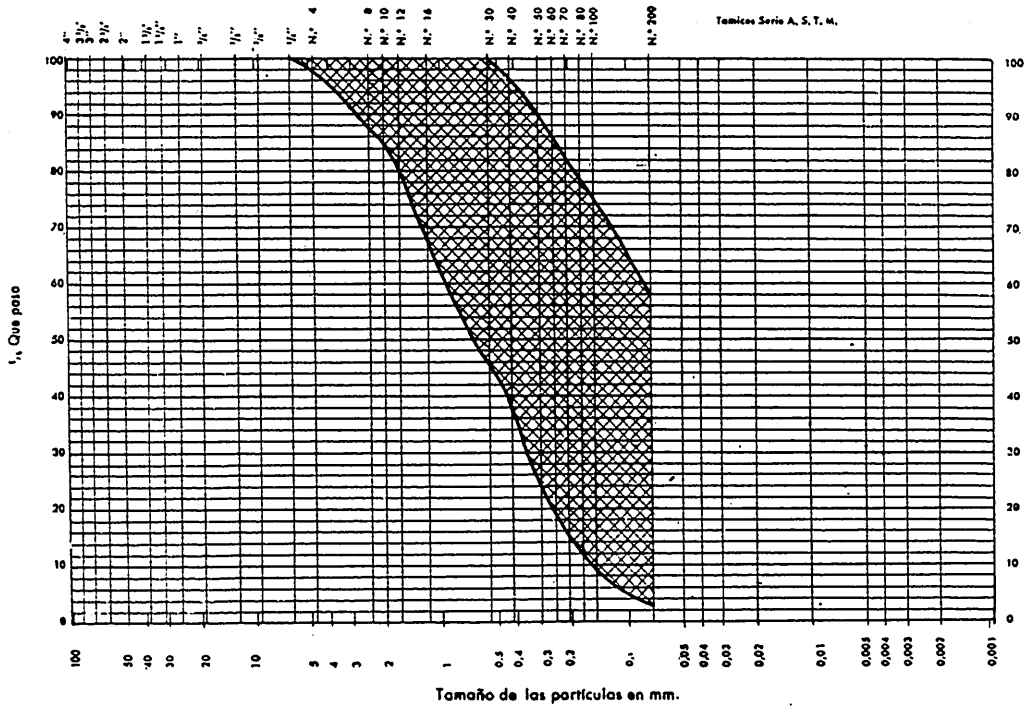


Fig. 6.<sup>a</sup>, c. -- Zona ocupada por las líneas granulométricas de los suelos procedentes de la cantera del ferrocarril.

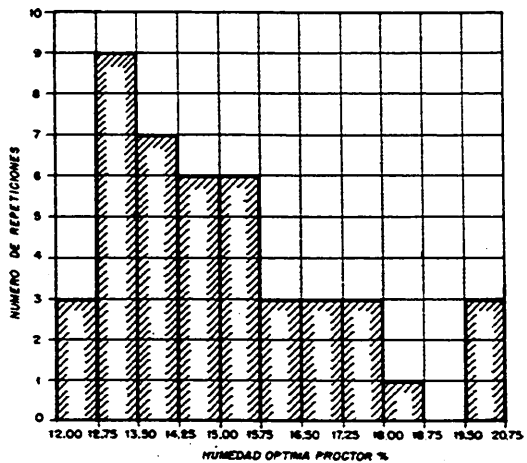
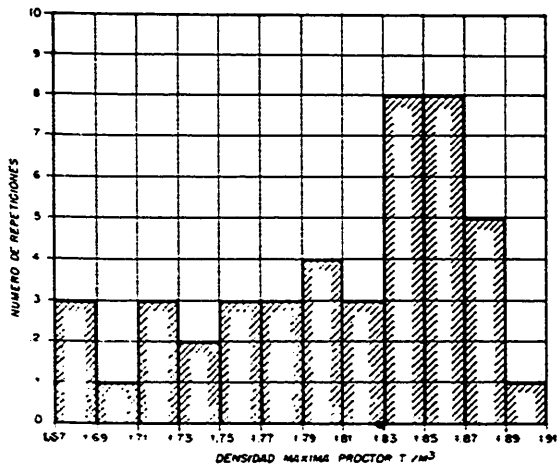
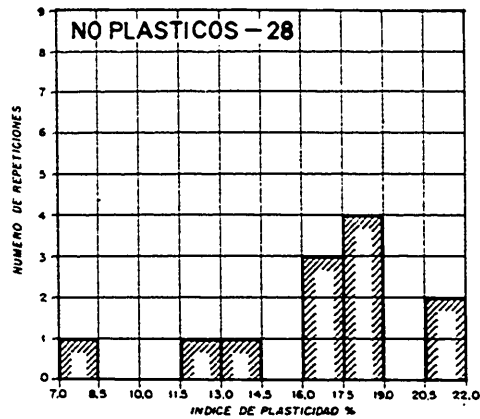
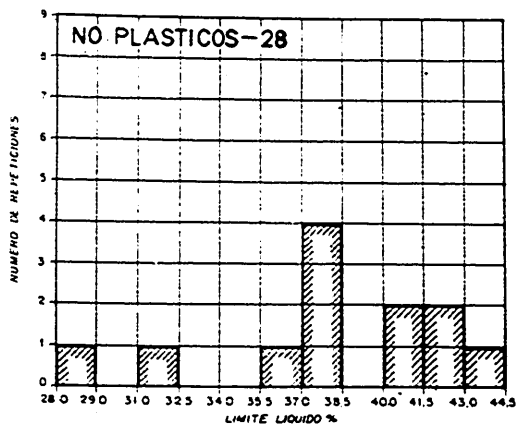


Fig. 6.<sup>a</sup>, d. -- Distribución estadística del material de la cantera del ferrocarril.

berg y los valores característicos del ensayo Proctor normal.

De estas dos canteras se ha extraído la totalidad del material para los terraplenes, a excepción de los 30 000 m.<sup>3</sup> antes citados, producto de los desmontes de la explanación y que han sido utilizados entre los kilómetros 13,100 al 15,600. Con objeto de estudiar la compactación y posterior comportamiento bajo las cargas del tráfico de las arcillas grises terciarias, tan abundantes en esta zona y muy corrientes en España, se ha construído con ellas un terraplén experimental de 5,25 m. de altura y unos 40 m. de longitud, aprovechando unos estratos bastante homogéneos que aparecen bajo el cuaternario de la desviación al I.N.T.A. Se ha elegido precisamente el nuevo acceso a esta entidad, por ser en él menos perjudicial al tráfico cualquier interrupción que se produjese como consecuencia de un defectuoso comportamiento del terraplén.

— ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL —

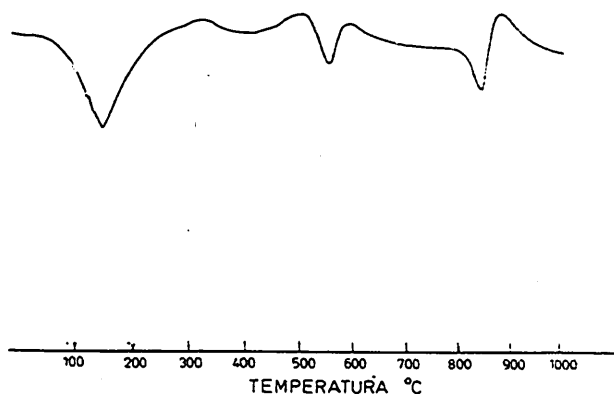


Fig. 7.<sup>a</sup> — Análisis térmico diferencial.

Con ligeras variaciones, las características más típicas de estas arcillas son las siguientes:

Límite líquido .....	68	a	91	%
Índice de plasticidad .....	35,8	a	57,1	%
Densidad máxima Proctor .....	1,25	a	1,45	Tm./m. <sup>3</sup>
Humedad óptima Proctor .....	28,6	a	39,2	%

Como en los análisis de rutina no era posible conocer a fondo la naturaleza de esta arcilla, se ha realizado en ella el estudio de la fracción < 2 micras por medio del análisis térmico diferencial, los espectros de absorción infrarroja y la difracción de rayos X.

En el análisis térmico diferencial se miden las diferencias de temperatura entre la muestra y una sustancia inerte sometidas ambas a un calentamiento progresivo. Estas diferencias de temperatura son debidas a reacciones térmicas que tienen lugar en la arcilla durante el calentamiento, tales como: eliminación del agua absorbida, pérdida en forma de agua de los

iones OH que forman parte de la estructura cristalina y formación de nuevos compuestos. Las dos primeras reacciones son endotérmicas y se presentan por debajo de 200° C. la primera de ellas y entre 500 y 700° C. la segunda. La tercera reacción es exotérmica y se produce por encima de 800° C.

Dependiendo del tipo de mineral, estos procesos se presentan a distintas temperaturas y con distinta intensidad y pueden, por lo tanto, servir como un método de identificación.

En la figura 7.<sup>a</sup> se ha representado la curva de análisis térmico diferencial de una muestra de arcilla del tramo experimental. Los efectos endotérmicos se representan hacia abajo y los exotérmicos hacia arriba.

En esta curva se aprecian tres efectos endotérmicos cuyos máximos se encuentran a 160° C. el primero, 560° C. el segundo y 850° C. el tercero. Este último va seguido inmediatamente de un efecto exotérmico cuyo máximo se encuentra a 890° C. La posición de estos máximos corresponden a la del mineral illita. Sin embargo, no puede excluirse la existencia de minerales del grupo de la montmorillonita, pues aunque éstos dan, por lo general, el segundo pico endotérmico entre 600 y 700° C., la posición exacta depende de la composición y en algunos casos se presenta a temperaturas más bajas.

La absorción de la radiación infrarroja tiene su origen en la vibración alrededor de sus posiciones de equilibrio de los átomos que forman una molécula o un cristal.

Al hacer incidir sucesivamente sobre una muestra irradiación infrarroja de diferente frecuencia, cuando esa coincide con la frecuencia propia de vibración del compuesto, se produce una banda de absorción.

Los espectros de absorción infrarroja se dan en tantos por ciento de transmisión o de absorción en función de la longitud de onda o del número de ondas en cm.<sup>-1</sup>.

Estos espectros son característicos de cada sustancia, de tal manera, que la menor variación en la composición o en la estructura produce cambios sensibles en la posición o intensidad de las bandas de absorción registradas. Por esta razón son de gran interés para fines de identificación.

En la figura 8.<sup>a</sup> se dan los espectros de absorción infrarroja entre 4 000 y 650 cm.<sup>-1</sup>, obtenidos con el espectrofotómetro Perkin-Elmer 221 del Laboratorio, de una muestra de arcilla del tramo experimental. En ordenadas se expresan los tantos por ciento de transmisión y en abscisas los números de onda (inverso de la longitud de onda) en cm.<sup>-1</sup>.

En el espectro de absorción infrarroja aparecen bandas que pueden atribuirse a la presencia de illita y otros, en general, de menor intensidad, que corresponden a una montmorillonita. El aspecto general del espectro es típico de la illita, mientras que las bandas a 1 100, 880 y 745 cm.<sup>-1</sup>, corresponden a la montmorillonita. La banda a 915 cm.<sup>-1</sup> que en el espectro aparece como un hombro, suele presentarse en las

montmorillonitas como una banda bien definida y de intensidad media. Teniendo en cuenta la intensidad relativa de las bandas en uno y otro tipo de mineral, parece ser que el componente mayoritario es la illita.

propiedad de estos minerales de absorber entre las láminas un número fijo de capas moleculares de ciertos alcoholes, tales como glicerina, etilen-glicol, etc., fijándose entonces el espacio interlaminar.

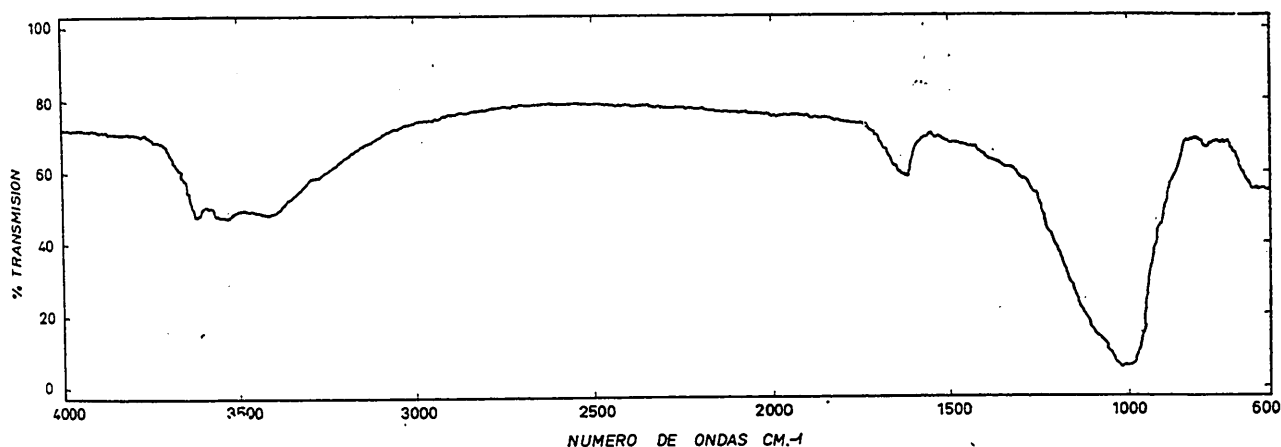


Fig. 8.ª — Espectro de absorción de rayos infrarrojos.

Puesto que la diferencia fundamental entre estos dos minerales consiste en que la montmorillonita es hinchable y la illita no, se utilizó para su identificación el método de difracción de rayos X.

La difracción de rayos X por los cuerpos cristalinos nos revela las distancias entre los planos de átomos de un cristal. Para cada especie cristalina las distancias entre las series de planos de átomos son distintas y, por tanto, cada una de ellas producirá un diagrama de rayos X característico.

En el caso de las arcillas, las reflexiones más im-

En la figura 9.ª se representa el diagrama de rayos X de una muestra de la arcilla estudiada del tramo en estado natural y después de tratarla con

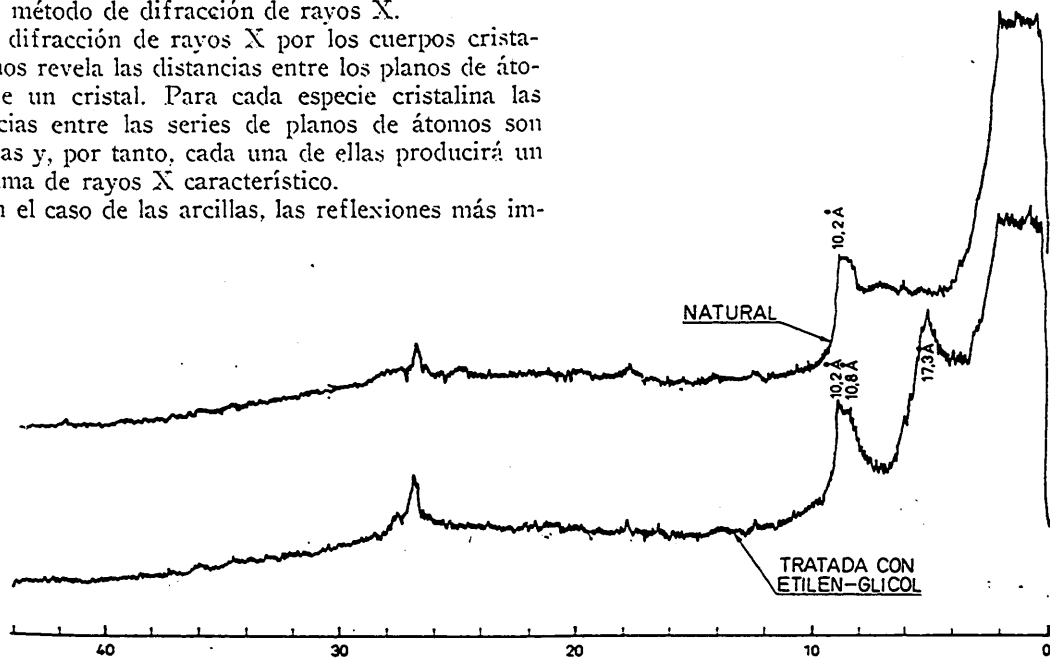


Fig. 9.ª — Diagrama de rayos X.

portantes son las basales, que miden las distancias entre planos semejantes de dos láminas contiguas del mineral. Cuando el mineral es hinchable, esta distancia varía con la cantidad de agua absorbida. En este caso, para fines de identificación, se aprovecha la pro-

etilen-glicol, a fin de determinar la presencia de materiales hinchables. En abscisas se representan los valores dobles del ángulo  $\theta$  que forma el haz incidente con los planos de átomos del cristal y en ordenadas la intensidad de los efectos de difracción. A partir de

los valores del ángulo  $\theta$  y de la longitud de onda de la radiación X empleada es posible calcular el valor de las distancias entre los planos de átomos. Estas distancias, expresadas en unidades angstrom ( $10^{-7}$  cm) se indican en la figura para algunas de las reflexiones obtenidas.

La muestra natural presenta un efecto de difracción alrededor de  $10 \text{ \AA}$  ( $2\theta = 8,70$ ), característico de la illita. Este pico es poco definido y está ensanchado hacia los espaciados mayores (ángulos más pequeños), lo que indica que el mineral o al menos parte de él está mal cristalizado y en proceso de degradación, es decir, que parte de sus láminas están hidratadas. Además, existe un efecto muy difuso para valores de  $2\theta$  entre 6 y  $8^\circ$ , que debe corresponder a minerales más hidratados.

Al tratar con etilen-glicol, aparece un pico a  $17,3 \text{ \AA}$ , característico de montmorillonita. El efecto que aparece en la muestra natural alrededor de  $10 \text{ \AA}$ , se divide en dos: uno a  $10,2 \text{ \AA}$ , bien definido, que corresponde a la illita no hidratada, y otro, más difuso, a  $10,8 \text{ \AA}$ , que debe ser producido por el material parcialmente hidratado.

Parece, pues, que esta muestra se compone de una illita en proceso de degradación a montmorillonita, existiendo una cierta proporción de esta última, así como de material intermedio.

Son, pues, materiales que pueden dar lugar a hinchamientos y retracciones de cierta consideración con los cambios de humedad.

En otras muestras de arcilla gris analizadas también en el Laboratorio, parece ser que el proceso de degradación es más avanzado y la proporción de montmorillonita es mayor.

Se trata de un suelo que no debía emplearse con arreglo a las normas americanas, pero como es bastante frecuente en España y su no utilización en ciertas zonas puede ser muy caro, vale la pena de hacer este ensayo en una zona como la que nos ocupa, en la que cualquier dificultad no es un grave trastorno.

Todo el movimiento de tierras fué realizado con palas excavadoras y camiones de 16 Tn.

Los volúmenes totales de movimiento de tierras en esta primera parte de la explanación, ha sido:

#### Desmontes:

Acceso al puente de San Fernando .....	42 000 m. <sup>3</sup>
Desviación del I.N.T.A. ....	38 000 »
Varios .....	45 000 »
<b>TOTAL .....</b>	<b>125 000 »</b>

#### Terraplenes:

Procedentes de la cantera del ferrocarril:	
P. 10 900 a P. 13 100 .....	80 000 m. <sup>3</sup>
Procedentes de la cantera del I.N.T.A.:	
P. 15 600 a P. 17 600 .....	133 000 »
Procedentes de desmonte:	
P. 13 100 a P. 15 600 .....	30 000 »
Terraplén experimental de arcilla gris.	6.000 »
<b>TOTAL .....</b>	<b>249 000 »</b>

*Control y experiencias efectuadas sobre la compactación.* — La compactación se llevó a un ritmo rápido del orden de los 1 500 m.<sup>3</sup> por día. En los tramos en los cuales no existía dificultad especial en relación con la calidad del suelo — suelos tipo granular —, se hicieron los ensayos normales de control de humedad y grado de compactación. La investigación minuciosa se concentró en dos tramos: el comprendido entre los puntos kilométricos 12,700 y 13,000, en los cuales va el terraplén de mayor cota, 7 metros, y el tramo de arcillas grises. El primero está realizado con arenas arcillosas procedentes de la cantera del ferrocarril, material suficientemente homogéneo, para poder estudiar el proceso de compactación. El segundo tramo el de arcillas grises de características difíciles y totalmente distintas del suelo del tramo de arenas arcillosas. En ambas secciones se han llevado a cabo los siguientes estudios:

a) Control de la humedad de las tierras a su llegada al punto de extendido y su eventual corrección por riegos sobre terraplén o cantera. Análisis de la eficacia conseguida por estos dos procedimientos.

b) Espesor de las tongadas, una vez efectuado el extendido, y después de dar por terminada la compactación.

c) Determinación de la humedad antes y después de la compactación.

d) Ensayo de identificación, granulométricos y límites de Atterberg de cada una de las capas o del suelo vertido en cada día.

e) Ensayo de compactación, Proctor, normal o modificado, en las mismas condiciones que las de identificación.

f) Determinación de la densidad y humedad resultante de la compactación; resultados de compactación en función de las pasadas del elemento de consolidación. Se ha realizado la comparación de los diferentes métodos clásicos, arena, estufa, alcohol, con otros no tan corrientemente empleados, como son el picnómetro de aire y el más reciente de la utilización de isótopos radiactivos. El equipo necesario para la realización de estos últimos, recientemente adquirido por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, compite ventajosamente con el resto de los procedimientos hasta ahora utilizados por su mayor ra-

**SIMBOLOS**

- CELULA DE YESO
- ♂ TERMOMETRO
- ⊙ TUBERIA PARA MEDICION DE HUMEDADES PROFUNDAS POR ISOTOPOS RADIOACTIVOS
- PIEZOMETRO
- ▭ PLACA DE ASIENTO

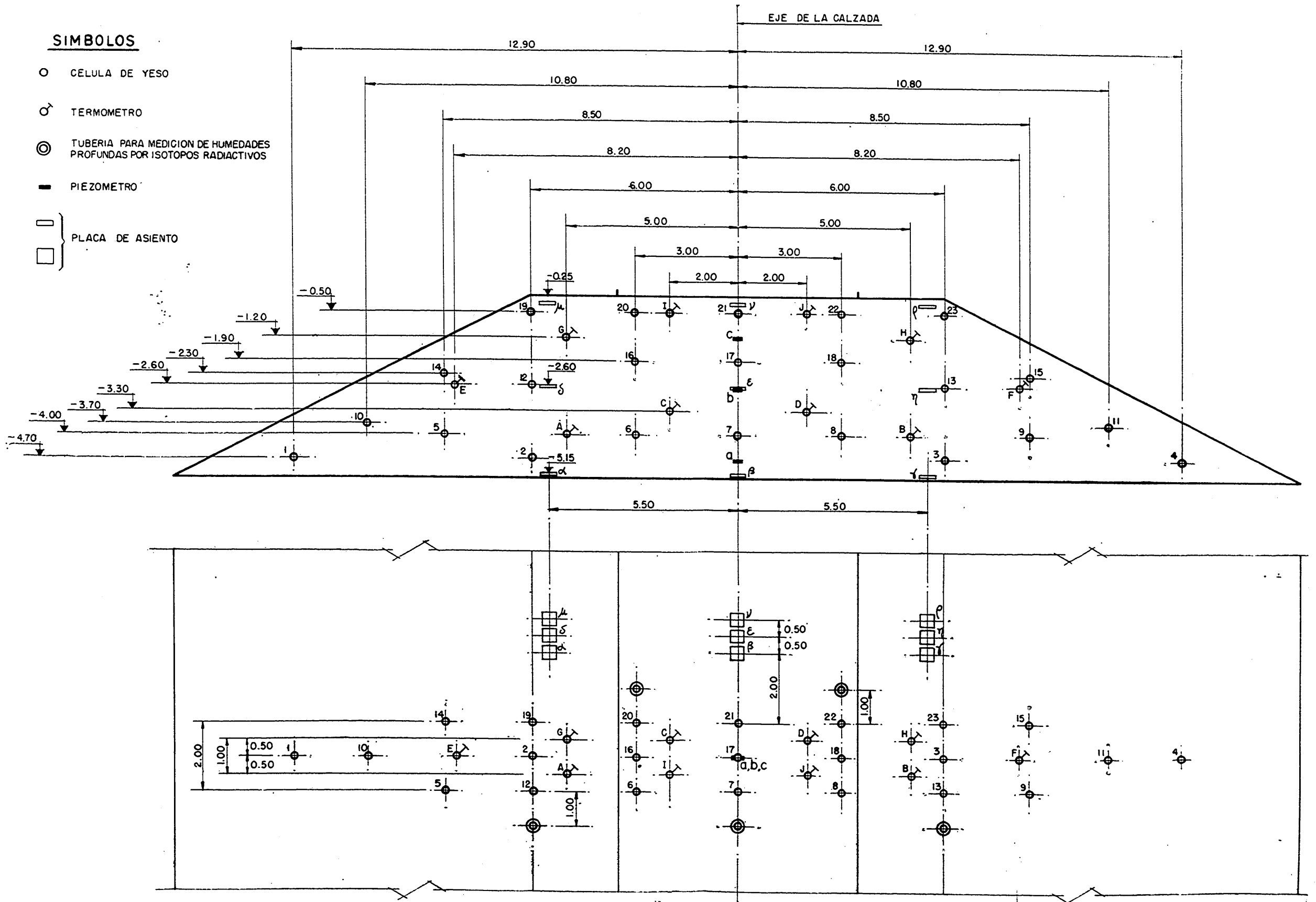
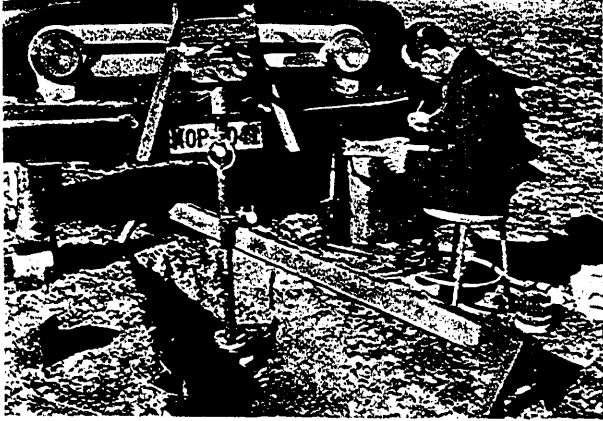
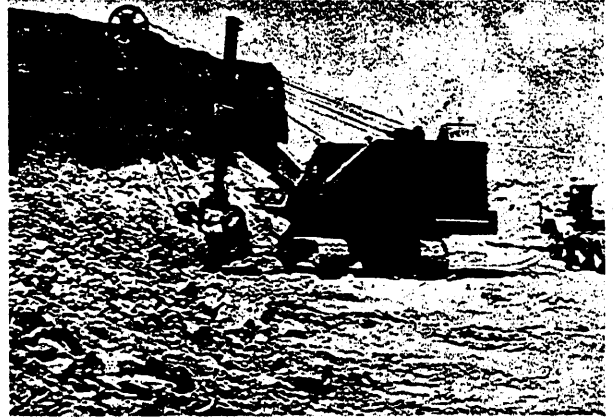


Fig. 11. — Distribución de los dispositivos de control en el terraplén de arcilla gris.



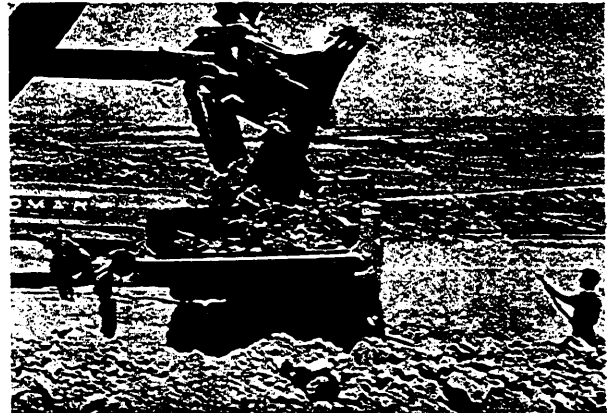
Ensayo de placa de carga  
en la futura explanación.

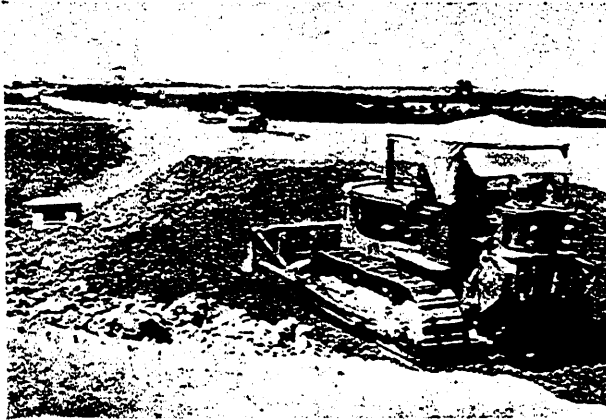
Vista parcial de la cantera  
del Ferrocarril.



Vista parcial de la cantera  
del INTA.

Riego de las tierras en cantera.





Construcción del terraplén experimental de arcilla gris.

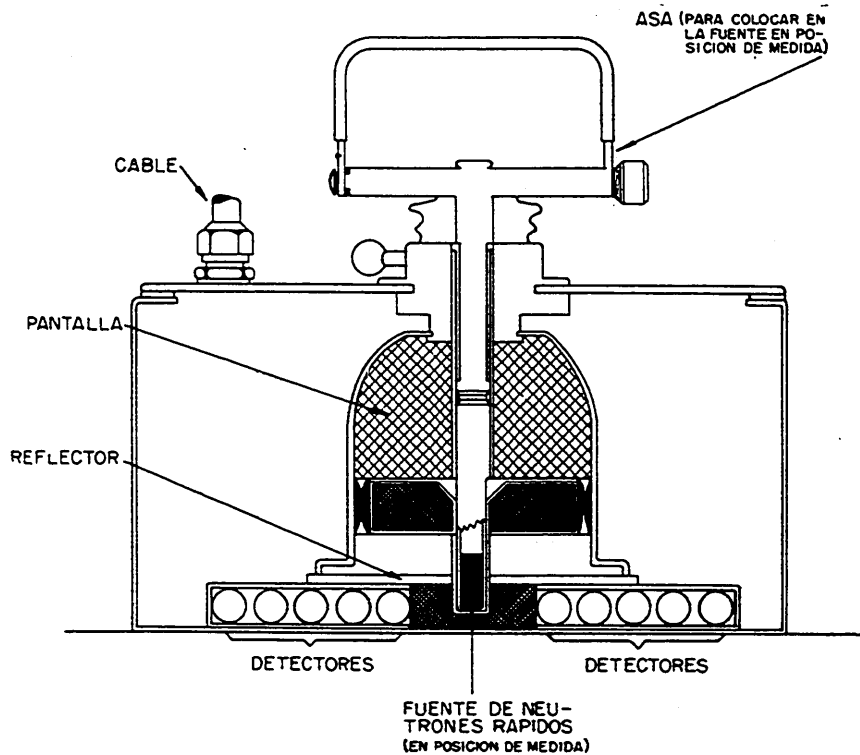
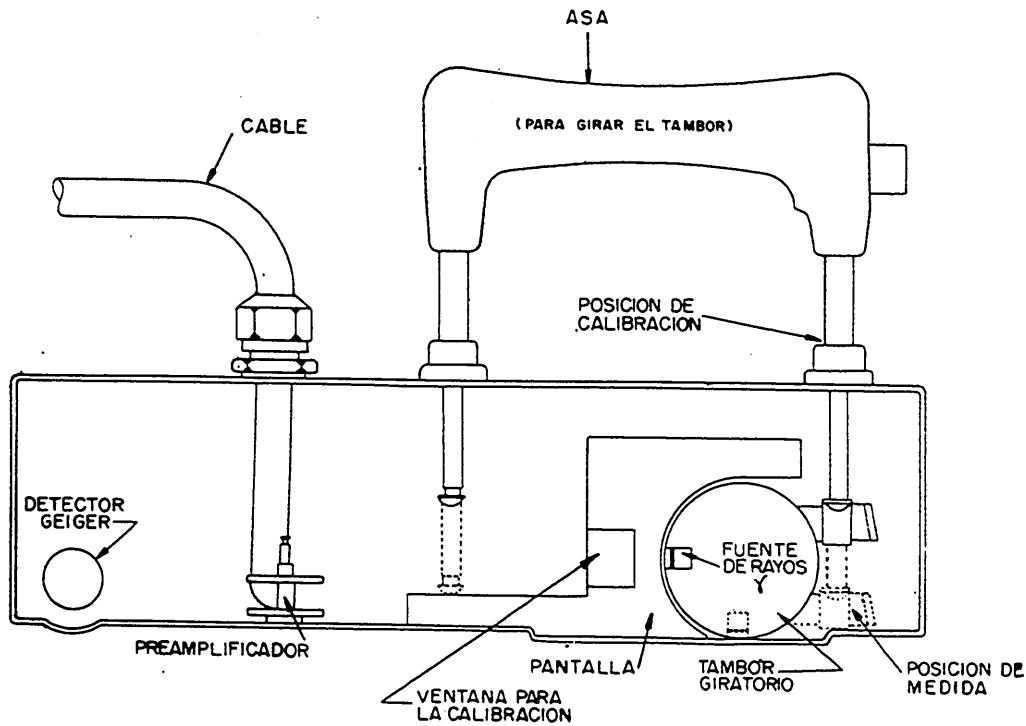
Colocación de una referencia de nivelación en el interior de un terraplén.



Medición de las deformaciones del muro de contención de viguetas prefabricadas

Aspecto de la explanación terminada.





10. — a) Sección longitudinal de aparato para medidade densidades superficiales con rayos  $\gamma$ . b) Sección transversal del aparato para medida de la humedad superficial con neutrones rápidos.

pidéz, tanto para la determinación de humedades y densidades superficiales como profundas (fig. 1)

Todos estos ensayos se han realizado tomando como variables el tipo de maquinaria de compactación, que después reseñamos; el número de coberturas o pasadas de cada uno de ellos y el espesor de la tongada a compactar.

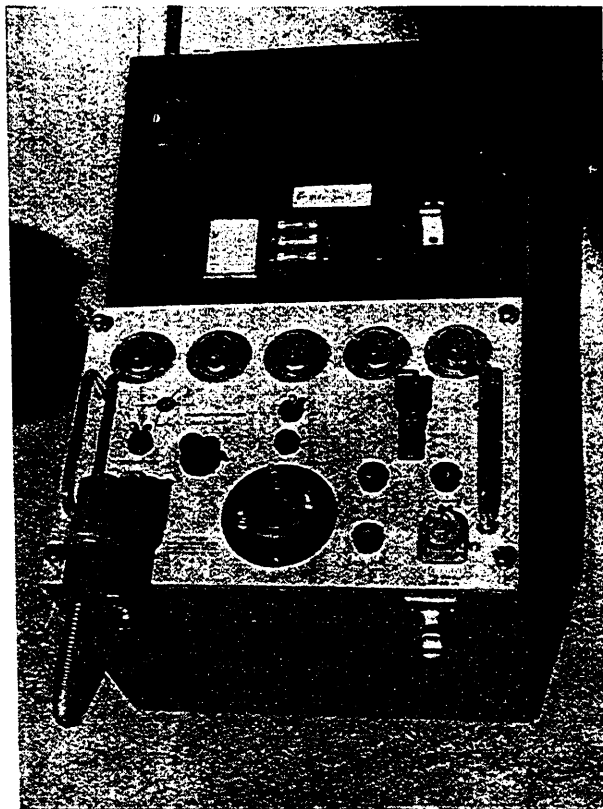
Se ha hecho un gran número de sondeos y se han determinado en los suelos todas las características normales, inclusive CBR, *in situ* y en el laboratorio y ensayos de placa de carga.

La tarea de clasificación y análisis de los resultados obtenidos se está realizando actualmente. Las conclusiones de ellos derivadas se publicarán en breve.

Para investigar la distribución de temperaturas y humedad en la sección transversal de los terraplenes y la influencia que en ella ejerce la construcción del pavimento, se han instalado en



Medición de la densidad superficial con isótopos radiactivos.



Contador de impulsos para la medición de humedad y densidad con isótopos radiactivos.

dos perfiles, uno en el terraplén experimental de arcilla y otro en el P.12.800 células de yeso, termómetros y piezómetros. En el primero de ellos y con objeto de determinar los cambios volumétricos de las arcillas bajo las diferentes condiciones climáticas, se ha colocado asimismo placas de asiento (fig. 11).

La maquinaria de compactación empleada ha sido:

Rodillo de pata de cabra de 8 Tn. ....	3 tambores de 1,00 × 1,25.
Rodillo de pata de cabra de 11 Tn. ....	2 tambores de 1,50 × 1,83.
Compactador de neumáticos de 50 Tn. ....	4 neumáticos a presión variable.
Rodillo vibratorio de 3,5 toneladas .....	1 tambor de 1,00 × 1,45.
Compactador de neumáticos de 10 Tn. ....	13 neumáticos oscilantes a presión variable.

*Ensayos e investigaciones sobre la rasante definitiva de la explanación.* — En esta primera fase de la obra, y con objeto de que la superestructura de la carretera se apoye sobre un cimiento no alterado por los agentes atmosféricos u otras causas externas, la rasante de la explanada se ha dejado a 50 cm. por debajo de la definitiva en los tramos situados en terraplén y 20 cm. por encima en los de desmonte. Cuando, previamente a la construcción del firme, se realice la explanación definitiva, se ha previsto las siguientes pruebas:

- a) Ensayos de placa de carga, para la determinación del módulo de reacción del terreno.
- b) Ensayo de CBR *in situ* en diversas condicio-

nes de humedad, y toma de muestras para determinación del CBR en laboratorio.

c) Ensayos dinámicos.

d) Ensayos de humedad, identificación y compactación, de los puntos en los que se han verificado las pruebas anteriores.

e) Ensayos de permeabilidad *in situ*.

Con estas pruebas, amén del dimensionamiento definitivo de la superestructura de la carretera, pretendemos comparar entre sí las diversas tendencias en el cálculo de pavimentos, buscar una posible correlación entre el índice CBR y el módulo de reacción según el tipo de terreno, tanto estático como dinámico. Finalmente, se podrá disponer de un perfil geotécnico completo de la explanación a efectos de estudiar su influencia sobre el comportamiento del firme.

La obra de movimiento de tierras fué adjudicada a Agromán, S. A., el 6 de junio de 1960, con un presupuesto de 18 349 000 pesetas; ha quedado terminada a primeros de octubre de 1961.

### Pavimentación.

El proyecto de pavimentación, aprobado con un presupuesto de 22 269 180,07 pesetas para el firme de hormigón y 15 046 428,59 pesetas para el firme asfáltico. Comprende dos tramos de firmes de tipo total-

mente diferenciado, pero que es de un gran interés, no sólo comparar en coste, sino en comportamiento; entre los kilómetros 10,551 y 15,100, con una longitud de 4 559 metros, se proyecta un firme de hormigón hidráulico del cual 2 110 metros serán de hormigón pretensado y el resto de hormigón en masa, en su forma normal, armado y sin armar. Desde el p.k. 15,110 al 17,500, es decir, en 2 390 metros, se proyecta firme de aglomerado asfáltico. En cada clase de firme se han proyectado diversos tipos de soluciones, procurando que la longitud del tramo sea suficiente para que la experiencia sea correcta. El criterio seguido para elegir las soluciones ha sido el siguiente:

1.º Realizar las obras en la nueva calzada con todas las garantías que la técnica puede ofrecer, efectuando en ellas los ensayos que permiten estudiar a fondo los distintos elementos que la constituyen, pero sin correr más que el riesgo normal, por cuanto al firme se refiere.

2.º Utilizar las calzadas laterales para efectuar los ensayos de firmes que pudiesen representar un cierto riesgo; firmes nuevos, ajuste al mínimo de los coeficientes de seguridad, etc.

3.º Colocar los dispositivos convenientes para concentrar el tráfico durante un cierto período sólo en una calzada, realizando así un ensayo acelerado.

En un próximo artículo daremos detalles de todo cuanto al proyecto de pavimentación se refiere.