

APLICACIONES DE LA MECANICA DEL SUELO A LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS

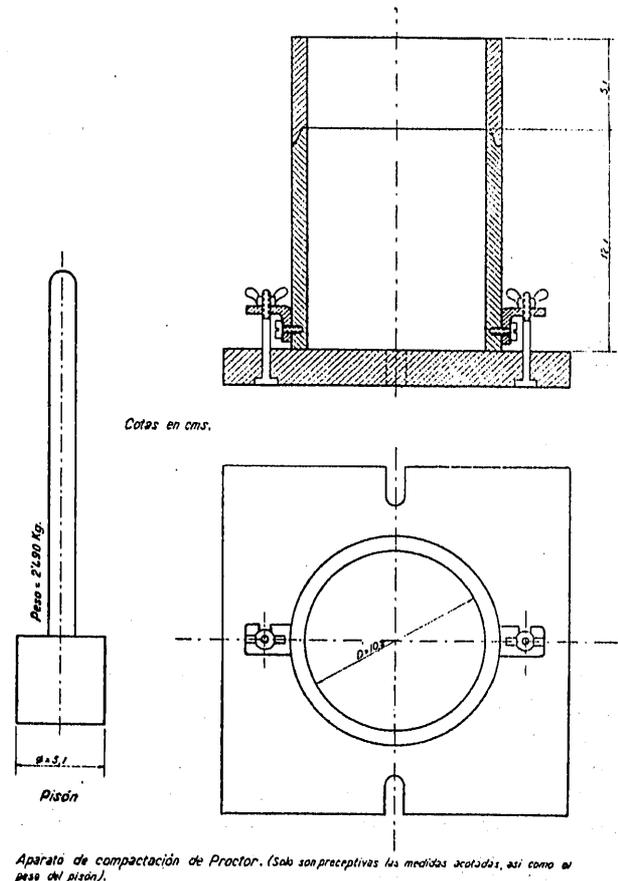
Por JOSE LUIS ESCARIO Y NUÑEZ DEL PINO,
Ingeniero de Caminos.

La divulgación de esta disciplina relativamente joven, como dice el autor al comienzo de su trabajo, ha de ser de gran interés para nuestros lectores y ha de llevar a todos el convencimiento de que es, a estas alturas, indispensable dedicar especial atención al estudio de consolidación de terraplenes y espesor de firmes.

La Mecánica del Suelo, disciplina relativamente joven en el campo de la Ingeniería, tiene una extensa aplicación en la construcción y conservación de carreteras; la utilización de sus conocimientos evita graves errores y permite calcular, con seguridad de éxito, los espesores de los revestimientos, que antes se fijaban... por la experiencia, con recetas sencillas que llevaban, con frecuencia, a errores lamentables; porque una determinación del tipo de suelo, simplemente por una impresión externa, es muy expuesta a equivocaciones, ya que, aparentemente semejantes, dos suelos pueden tener propiedades muy diferentes de resistencia y permanencia ante los agentes atmosféricos. Lo mismo sucede con el comportamiento de las obras de tierra, desmontes y terraplenes, sobre los cuales se asienta la explanación de la carretera; los corrimientos y los asentamientos duran años; si una obra de este tipo se construyó mal, con tierras inadecuadas y con una consolidación deficiente, el trágico cartel de "firme provisional" no se sabe cuánto tiempo podrá durar, y estaremos enterrando dinero en arreglos del firme, que estará, a pesar de nuestros desvelos, siempre en mal estado, hasta que, por la acción del tiempo, los movimientos cesen, después de haber hecho aquél, ayudado por el tráfico y los agentes atmosféricos, lo que se pudo lograr en el acto por muchísimo menos dinero, con un estudio cuidado y un pequeño recargo en el coste de construcción de la obra. Yo invito a los técnicos a hacer números, y les será muy fácil comprobar la economía, que para la obra puede representar el suplemento de las tres pesetas por metro cúbico que viene a valer la consolidación, con toda garantía, de un terraplén, sobre el cual será posible establecer el firme definitivo desde el primer momento. Y no digamos nada del error que puede cometerse, llevando un trazado por una ladera de terreno peligroso, porque, con atrevida inconsciencia, no se midió, al tiempo de estudiar el proyecto, la verdadera calidad del suelo sobre el cual íbamos a apoyarnos.

Hemos visto muchos casos trágicos; hay variante

de ferrocarril que hubo que abandonar totalmente — y en ella había un túnel y un puente importantes — porque no había modo de contener el terreno en que se proyectó; se sustituyó por un nuevo trazado muy poco distante del viejo, y allí no hubo el menor problema. Y más de un desvelo ha costado, al autor de estas líneas, el meter en cintura, enterrando dinero, al terreno por el cual se desarrollaba un trazado, elegido sin tener en cuenta las caracte-



Aparato de compactación de Proctor. (Solo son preceptivas las medidas acotadas, así como el peso del pistón).

Figura 1.ª

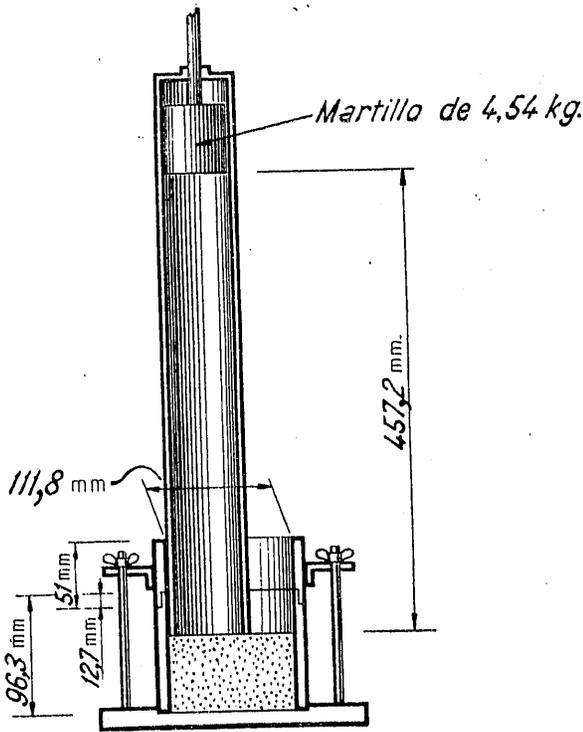


Figura 2.^a

risticas geotécnicas de la zona por la cual se desarrollaba. Y es que, antes de proyectar, lo mismo que se estudia la configuración del terreno, hay que estudiar su naturaleza, procurando huir de aquellos tipos de suelos de mala calidad y de las zonas de constitución geológica peligrosa y, si no hay más remedio que pasar, será necesario adoptar, desde el primer momento, las precauciones imprescindibles. ¡Gastar en estudiar bien, representa una enorme economía! No hacerlo así, proyectando a sentimiento, sin un estudio a fondo de las cosas, es un gravísimo error. Sería muy de desear que de ello se convencieran quienes tienen el deber de velar por la economía nacional; los proyectos hay que estudiarlos bien y gastar en ello cuanto sea preciso, porque representará, en definitiva, una importantísima economía.

Sin perjuicio de examinar, en otra ocasión, el problema del cálculo de espesores de firmes, vamos a ocuparnos en este artículo, aunque sea rápidamente, del problema de la consolidación de terraplenes. Para ello, resumiremos los principios fundamentales de inmediata aplicación práctica al problema que nos ocupa.

Un suelo, en un terraplén, está sometido a las cargas de su propio peso y a las que, a través del firme, transmite el tráfico; a ellas resiste por sus propiedades mecánicas características: cohesión y ángulo de rozamiento interno; por otra parte, las cargas producen una compresión del suelo, que dará origen a una reducción de volumen y, por tanto, a un asiento. Cohesión y ángulo de rozamiento interno, se determinan en el Laboratorio por diferentes pro-

cedimientos: aparatos de Casagrande, Hvorslev y triaxial. En sus valores interviene fundamentalmente la humedad del terreno. Conocidas estas características, es posible determinar la estabilidad de los taludes, desmonte o terraplenes, que normalmente se hace por el método del círculo sueco.

Pero el terraplén no sólo es necesario que sea estable, que no se corra; es preciso, además, que no asiente bajo la acción, aislada y conjunta, de su peso y de las cargas que el tráfico transmite a través del pavimento. Cada tipo de suelo debe alcanzar una densidad máxima, que se determina en el Laboratorio. En ella interviene como fundamental la proporción de humedad del suelo; cuando está seco, es difícil hacer que las partículas deslicen unas sobre otras y la labor de apisonado tiene que ser más intensa para alcanzar la máxima densidad; cuando la humedad es excesiva, habrá que expulsar el agua para lograr la compacidad máxima, lo cual es difícil, especialmente cuando se trata de suelos de granulometría muy fina — arcillas, por ejemplo —; existe una humedad óptima con la cual se logra, para un mismo trabajo de apisonado, la máxima densidad. El ensayo empezó a realizarse en el Laboratorio, utilizando las normas

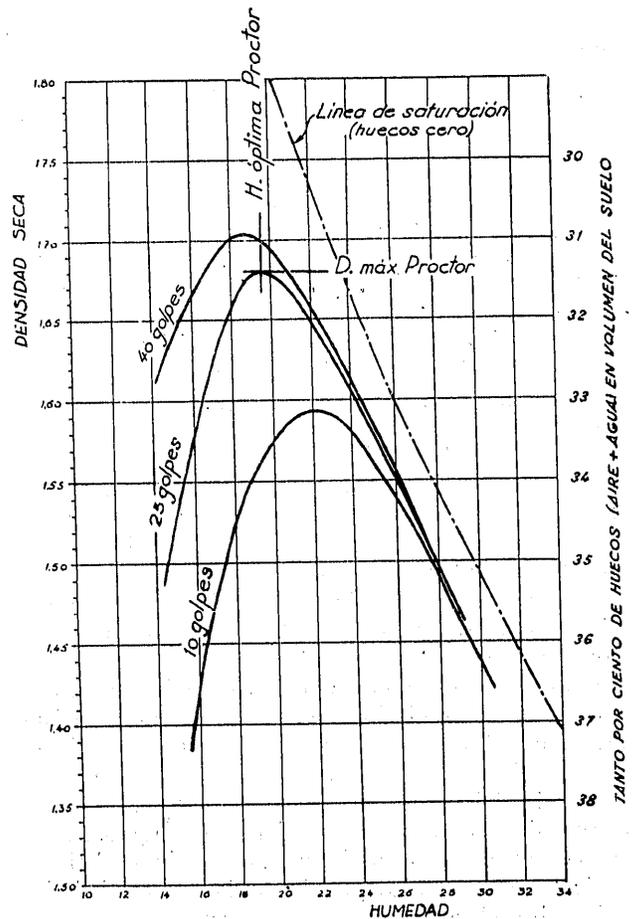
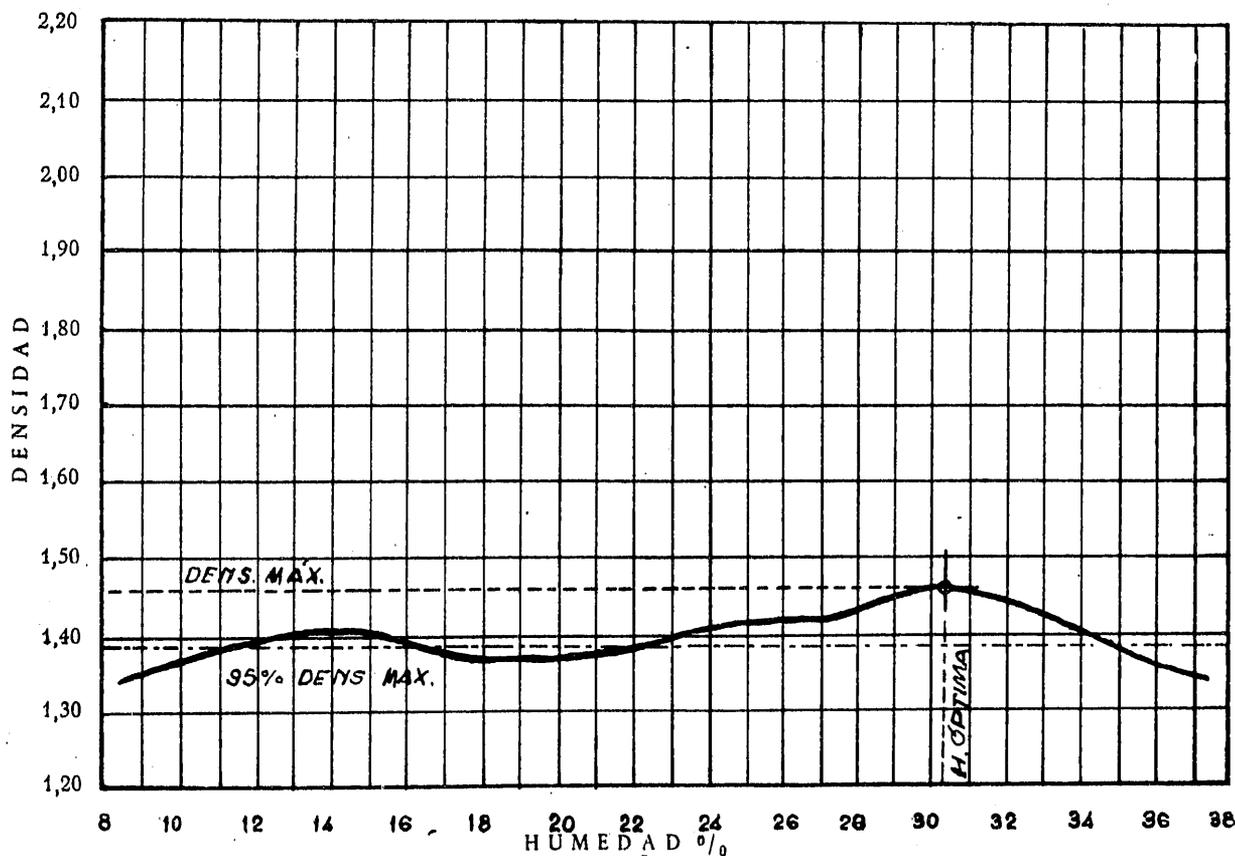


Figura 3.^a

propuestas por Proctor; en un molde de dimensiones determinadas (fig. 1.^a) se apisonan muestras de suelos con distintas proporciones de humedad, utilizando un pisón de peso y dimensiones también determinadas; se dibuja la curva humedad-densidad en seco y se determina la densidad máxima y la humedad correspondiente. Posteriormente, y debido a la necesidad de considerar mayores cargas de tráfico, la A. A. S. H. O. (American Association of State Highway Officials) ha modificado las condiciones del apisonado y del molde, en la forma que puede verse en la fi-

de uno, corresponden a terrenos expansivos de mala calidad, que, si es posible, no conviene emplear; un ejemplo puede verse en la figura 4.^a: el suelo, de límite líquido muy alto, 78,6, sólo alcanza una densidad de 1,46; tenía un 15,40 de $SO_4 Ca_2 H_2O$. La línea que figura a la derecha de las de densidad seca (fig. 3.^a) es la de saturación, que correspondería al caso de que todos los huecos estuviesen llenos de agua (aire cero); esta línea es teórica, pues el aire no puede llegarse a expulsar por completo. En el terreno pueden compactarse las tierras empleando



LA DENSIDAD ESTA REFERIDA AL PESO DEL SUELO SECO

Figura 4.^a

gura 2.^a; las densidades que se obtienen son, dependiendo del tipo de suelo, un 20 por 100 aproximadamente, superiores a las Proctor. Si por cualquiera de los dos procedimientos se apisona con diferente número de golpes, se obtienen curvas de la forma que puede verse en la figura 3.^a; se confirma en ellas lo que antes decíamos: la intensidad del apisonado influye mucho en la densidad obtenida, cuando la humedad es inferior a la óptima; en cambio cuando es mayor, especialmente para proporciones elevadas de agua, se consigue un aumento muy pequeño. Las densidades que se utilizan son las que corresponden a la muestra desecada en estufa a peso constante. Las curvas, sin máximo acusado o con más

medios adecuados, hasta una densidad análoga, y aun superior, a la obtenida en el Laboratorio; en los pliegos americanos para aeropuertos, se exige que la densidad obtenida alcance como mínimo el 95 por 100 de la lograda en el ensayo de la A.A.S.H.O.

La dificultad mayor para llegar a los resultados perseguidos, es el exceso de humedad, especialmente cuando se trata de terrenos cohesivos; si se quiere lograr la densidad fijada, hay que esperar a que se pierda el agua en exceso del terraplén.

La compactación ha de hacerse con los medios mecánicos adecuados; cada uno es recomendable para un tipo de suelo determinado. En España se va introduciendo poco a poco esta técnica, luchando,

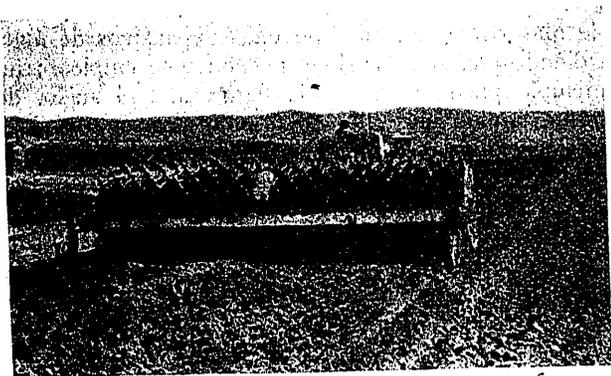


Figura 5.ª

como siempre sucede con cosas nuevas, con el escepticismo de la gente, incluso de los técnicos. A continuación pasamos una rápida revista a los diferentes sistemas que se emplean, comentando los resultados obtenidos en España, por los que han sido utilizados en nuestro país.

Rodillos.

Rodillos lisos. — En España se han empleado mucho, y se emplean todavía, los rodillos lisos para el apisonado de terraplenes, especialmente las mismas apisonadoras empleadas para la consolidación de los firmes de macadam.

Su resultado no es malo, especialmente en suelos que no sean muy arcillosos, pero precisan tongadas muy delgadas, del orden de 10 cm. Su principal inconveniente es que el terreno no queda homogéneamente apisonado, resultando la parte superior de la tongada mucho más compacta que la inferior. La superficie de las tongadas queda también muy lisa, lo que perjudica el enlace de capas sucesivas.

Rodillos acanalados. — Se han empleado en España en la construcción de la Presa de la Sotonera, cuya longitud es de cerca de 4 Km. Esta importante

obra, comenzada en el año 1947, ha sufrido numerosas vicisitudes, y no está todavía terminada hasta su altura total (38,60 m.), sino solamente hasta poco más de la mitad. Sin embargo, presta ya servicios hace muchos años con esta altura reducida.

La parte construída lo ha sido con una mezcla de tierras muy arcillosas y gravas arenosas. La mezcla se hacía *in situ*, con arados, constituyendo tongadas muy delgadas, de 5 a 7 cm. La mezcla se humedecía hasta un grado muy superior a la humedad óptima Proctor.

Los resultados no han sido malos y la presa está en servicio sin ningún incidente; pero, un estudio efectuado recientemente, ha demostrado la existencia de una fortísima anisotropía respecto a la filtración, que es mucho más fácil en sentido horizontal, lo que se atribuye a segregación de las capas.

Los trabajos proyectados para la terminación de esta presa prevén la utilización de rodillos de pata de cabra y prescindien del proceso de mezcla.

Rodillos de pata de cabra (fig. 5.ª). — Su empleo se extiende cada vez más en España, por su excelente resultado, especialmente en suelos muy arcillosos o margosos, en los que son indispensables para desmenuzar los terrones. El tipo corrientemente empleado es, con pocas variantes, el descrito en el *Manual de Presas del Bureau of Reclamation*.

El mayor inconveniente de este aparato es su gran sensibilidad a los excesos de humedad, por encima de la óptima Proctor, lo que hace difícil su empleo en regiones lluviosas, como son las del Norte de España. Incluso en algunos puntos del Sur de España, como es Granada, fué necesario paralizar las obras de construcción de una presa de tierras (Cubillas) durante meses enteros, por esta causa.

Rodillos neumáticos (fig. 6.ª). — Gozan en España de una popularidad creciente, por el excelente apisonado que producen y gran adaptabilidad a todo tipo de terrenos. Se emplean dos tipos: uno, ligero, de 10 ó 12 toneladas, y otro, pesado, de 50 toneladas.

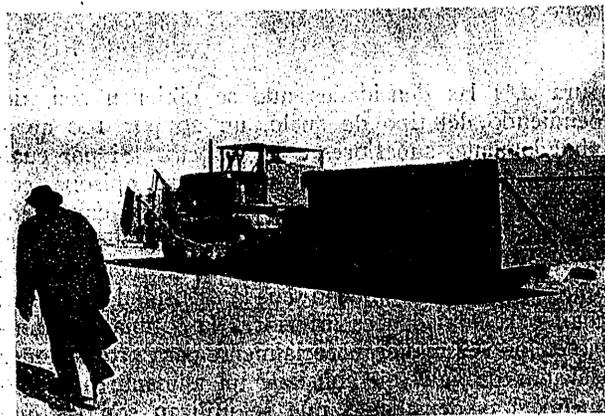
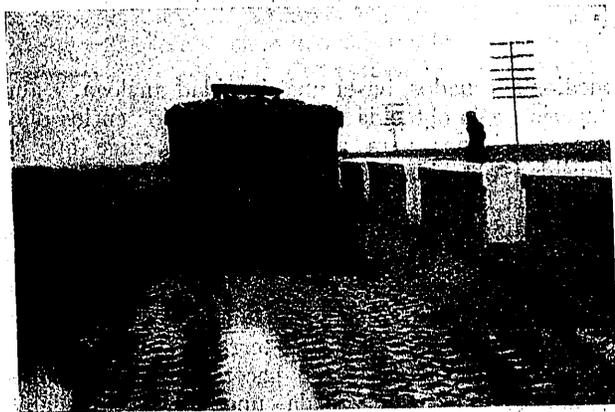


Fig. 6.ª — Rodillo de neumáticos de 50 Tn., apisonando un terraplén en la carretera de Madrid a Cádiz.

Este último apisona tongadas de 40 ó 50 cm. de espesor. Se ha empleado en la formación de grandes terraplenes para carreteras.

El empleo de los rodillos neumáticos se ha limitado, hasta hoy, a terraplenes de carreteras. En presas de tierra no se han utilizado, pues se teme que las tongadas no queden tan bien ligadas como con el pata de cabra.

Pisones.

Pisones a mano.— Se emplean con frecuencia para tareas secundarias, tales como rellenos de zanjas, zonas de unión con fábricas, etc. Los pisones usados tienen, a veces, su superficie inferior plana, o, más frecuentemente, en forma de casquete esférico.

Aun en los casos en que este apisonado se ha hecho con mucho cuidado, ajustando cuidadosamente la humedad y vigilando intensamente la ejecución, los resultados han sido malos, obteniéndose menos del 90 por 100 de la densidad máxima Proctor.

Pisones de explosión (fig. 7.^a).— Se emplean los tipos pequeños (100 Kg.) y también la "Demag-Frosch", de media tonelada. Estos aparatos dan muy



Figura 7.^a

buen resultado, y si no se extienden más, es por dificultades de importación.

Una característica interesante de los mismos, es su adaptabilidad a toda clase de terrenos y su posibilidad de trabajar con grados elevados de humedad. En una presa en el Pirineo, donde las tierras tienen, permanentemente, humedad bastante superior a la Proctor, y en la que, por esta causa, no resultó posible emplear los rodillos de pata de cabra, se está

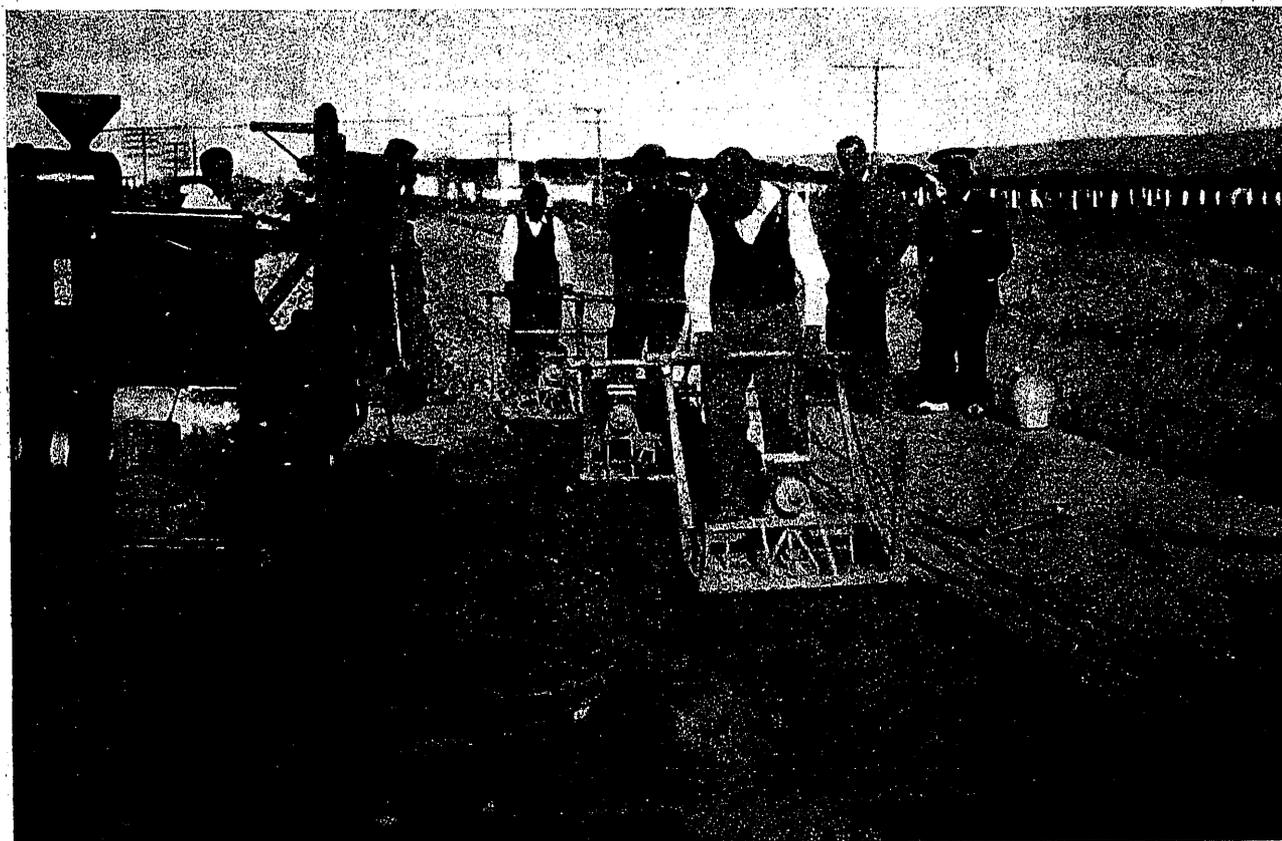


Fig. 8.^a— Vibradores de mano empleados en la consolidación del ensanche de la carretera R. II de Madrid a Barcelona.

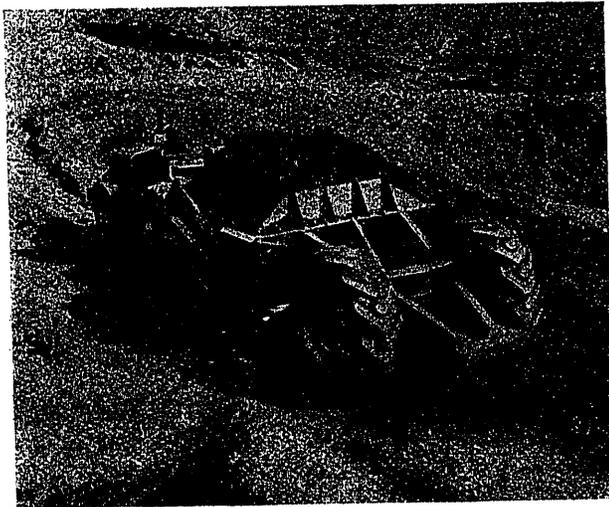


Fig. 9.^a — Trailla de 8 m.² apisonando un terraplén nuevo, al mismo tiempo que realiza el transporte de tierras.

construyendo la obra por medio de la "Demag-Frosch", con excelentes rendimientos.

Pisones neumáticos. — Son muy adecuados para pequeños trabajos, tales como rellenos de zanjas, trasdosado de muros, etc. Como los pisones de explosión, son muy adaptables a circunstancias variadas y trabajan bien con suelos muy húmedos. En la presa del Molinar (Cofrentes), donde las tierras tenían una humedad de cantera muy elevada, se usaron en gran número, aunque esta clase de trabajo no es muy adecuado para ellos, pues su rendimiento, por unidad, es escaso.

Otros tipos de pisones. — En la presa del Molinar (Cofrentes) se empleó una gran masa de hierro, que se levantaba y se dejaba caer por medio de una grúa.

Vibradores.

Este tipo de aparatos es de rendimiento reducido; son especialmente recomendables en suelos granulares; se usaron hace años en la prolongación de la Avenida del Generalísimo con éxito satisfactorio. Recientemente los hemos utilizado en el ensanche del

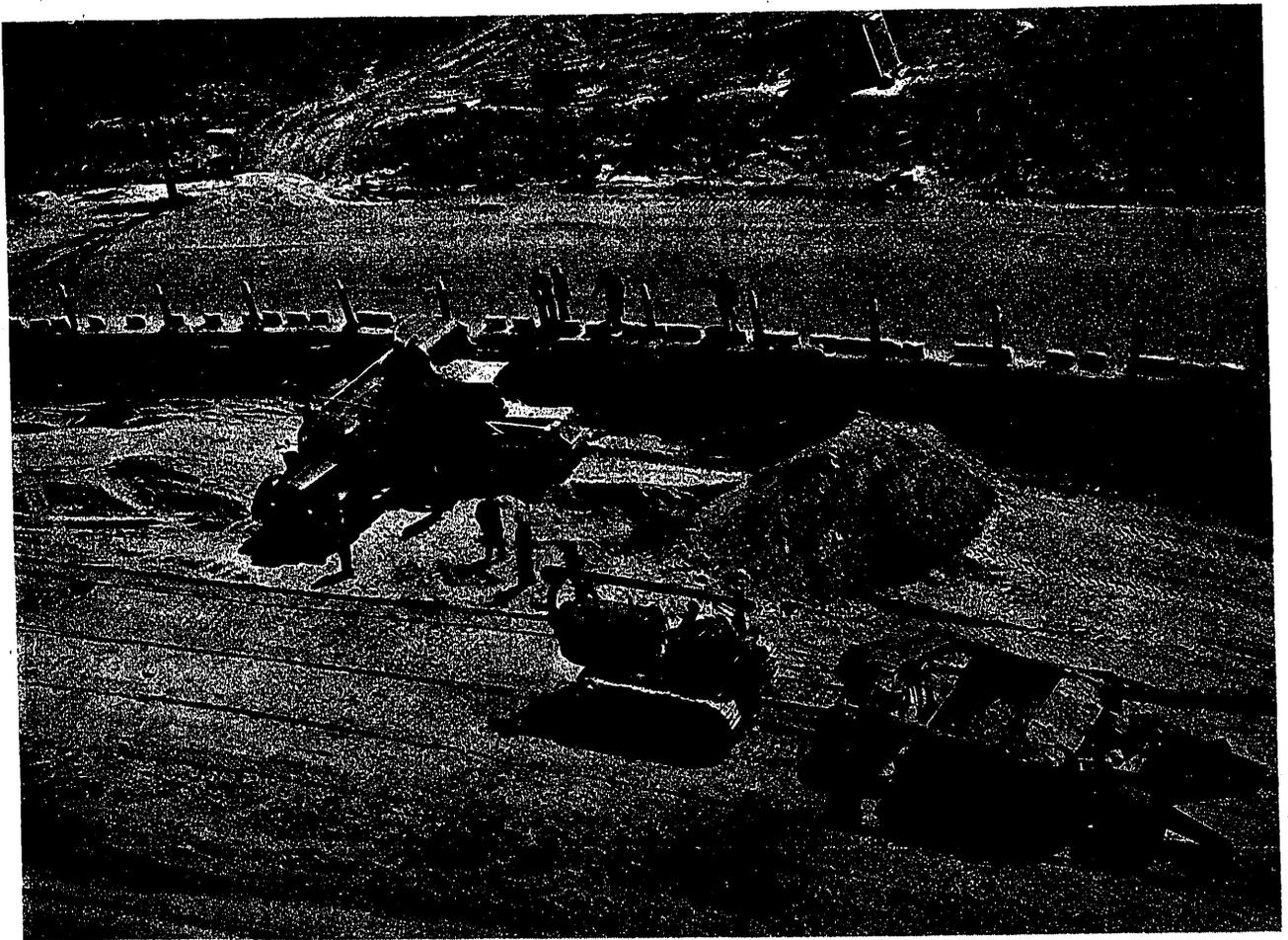


Fig. 10. — Un tractor TD-18, con trailla, trabajando en las cercanías de Madrid, carretera R. I.

macadam de la carretera de Madrid a Barcelona; el apisonado con máquina de una zona estrecha, como era la de este caso, resultaba lentísimo, difícil y poco eficaz; con el vibrador, la obra se hizo fácilmente y con perfecto resultado (fig. 8.^a). Hay vibradores pesados, de procedencia alemana, e incluso un tipo de rodillo apisonador, que tiene uno vibrante; dicen que los resultados son excelentes, pero nosotros no tenemos experiencia personal de ellos.

Circulación de los aparatos de movimiento de tierras (figs. 9.^a y 10.)

Se ha comprobado que el paso de los vehículos empleados para el movimiento de tierras produce, por sí solo, una consolidación muy apreciable, que suele pasar del 90 por 100 de la Proctor, si la humedad es la conveniente.

Este efecto es particularmente apreciable si los aparatos empleados son traillas explanadoras y "tornapulls", etc. Si son camiones, se precisa la actuación constante de un aparato de extendido.

Sin embargo se ha observado, en ocasiones, que la consolidación así obtenida no es homogénea, y, al hacer las determinaciones de densidad *in situ*, se han encontrado, junto a valores excelentes, del orden del 95 por 100 de la Proctor, otros del 85 por 100 en puntos situados a pocos metros de los anteriores.

Esto se debe a que el tráfico no se distribuye uniformemente, sino que forma rápidamente caminos por los sitios más convenientes. Por ello, este método de consolidación debe ser cuidadosamente vigilado y complementado por algún otro tipo de aparatos de los anteriormente descritos. De todas maneras, si la inspección es la adecuada, resulta utilísimo, pues realiza el apisonado a un coste muy reducido.

Material empleado para el extendido.

En España se han empleado para el extendido, casi exclusivamente, o el extendido a mano o la explanadora ("bulldozer"). Se ha empleado, aunque con menos extensión, la motoniveladora, que es muy útil para el reparto de volúmenes de tierra relativamente poco importantes.

Debe prohibirse la distribución con vías y vagonetas como regla general; no realiza apisonado ninguno. Cuando, por razón de orden económico, se emplee, debe vigilarse muy cuidadosamente la operación de igualado y consolidación.

Medida del grado de humedad de las tierras.

Es fundamental para saber si se encuentra o no el terraplén en las condiciones adecuadas para su consolidación; se han utilizado los métodos siguientes:

Método eléctrico. — Se ha empleado un procedimiento consistente en la medida de resistencia eléctrica del suelo, contenido en una célula de unas me-

didias determinadas, que se representa en la figura 11, y apisonado estáticamente mediante un peso de 5 kilogramos. Los resultados son buenos, pero el aparato necesita un previo tarado para cada suelo, lo cual representa un serio inconveniente para su aplicación práctica.

Método del alcohol. — Se efectúa empapando con alcohol, el suelo contenido en una cápsula metálica y prendiéndole fuego. La cápsula está rodeada de un recipiente anular, que también contiene alcohol. Las dimensiones del aparato y cantidad de alcohol empleada se han ajustado para impedir una pérdida de peso excesiva, debida a la pérdida de agua de cristalización de los minerales o a la descomposición de los carbonatos y materia orgánica.

Para precisar la influencia de estas causas de error, se efectuó en el Laboratorio la medida de la humedad en cinco suelos distintos, por el método del alcohol y por el método normal de desecación en estufa a 105° hasta peso constante.

Estos cinco suelos fueron los siguientes:

1. Suelo con una proporción de materia orgánica del 5,15 por 100.
2. Bentonita.
3. Tierra arcillosa pesada.
4. Margas arcillosas de la siguiente composición:

CO ₃ Ca	50,7 %
CO ₃ Mg	40,4 %
SO ₄ Ca2 H ₂ O	0,56 %

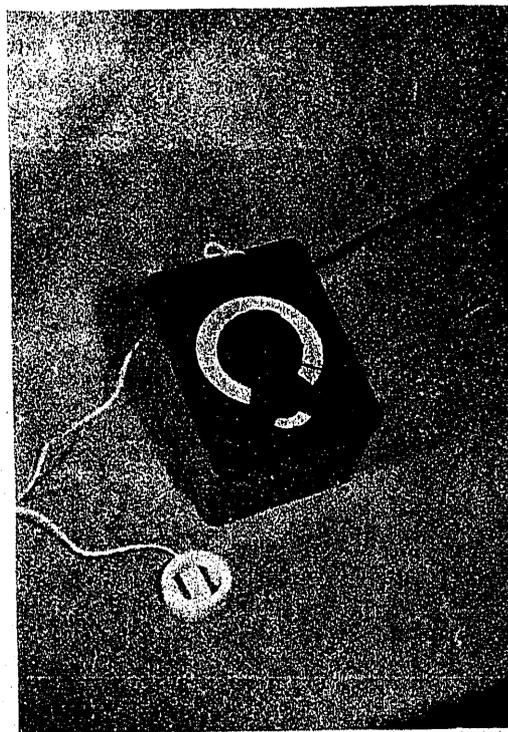


Fig. 11. — Célula de yeso para la determinación de la humedad por resistencia eléctrica.

5. Terreno yesoso, con un contenido del 37,5 por 100 de sulfatos.

Los resultados fueron los siguientes:

SUELO NUM.	1	2	3	4	5
% determinado por desecación en la estufa	34,0	118,8	48,0	83,3	44,2
% determinado por el método del alcohol	33,9	118,2	50,6	83,4	43,1

La aproximación es plenamente suficiente para las aplicaciones prácticas. El método es rápido (un cuarto de hora por determinación), y su único inconveniente es precisar el empleo de una balanza que aprecie el decigramo, lo cual hace que no se pueda utilizar en el campo propiamente dicho, sino en algún local o laboratorio móvil.

Método del carburo de calcio. — Se emplea un aparato de fabricación inglesa, que mide la presión desarrollada por el acetileno que se produce al poner el suelo húmedo en contacto con carburo de calcio. El aparato está construido en forma sumamente práctica para su empleo en obra, y la determinación es rápida y precisa (fig. 12). Los ensayos que con él hemos hecho en el Laboratorio son muy satisfactorios.

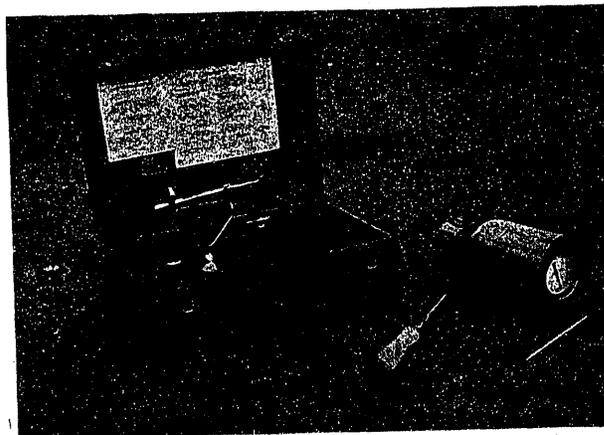


Fig. 12. — Determinación de la humedad por el método del carburo de calcio. En la pequeña balanza que hay en la caja se pesa el suelo; la lectura de la humedad se hace directamente en el cuadrante graduado del recipiente.

Medida de la densidad obtenida por el apisonado.

Es preciso comprobar la consolidación obtenida para ver si se llega o no a la prescrita en el pliego de condiciones; se han empleado los métodos siguientes:

Método del frasco de arena y del aceite. — Son los comúnmente empleados en España. En esencia, consisten en tomar una muestra del terreno, que se pesa, y cuyo volumen se determina llenando la oquedad producida en el terraplén; bien con arena o con aceite. Para que el ensayo dé la precisión necesaria,

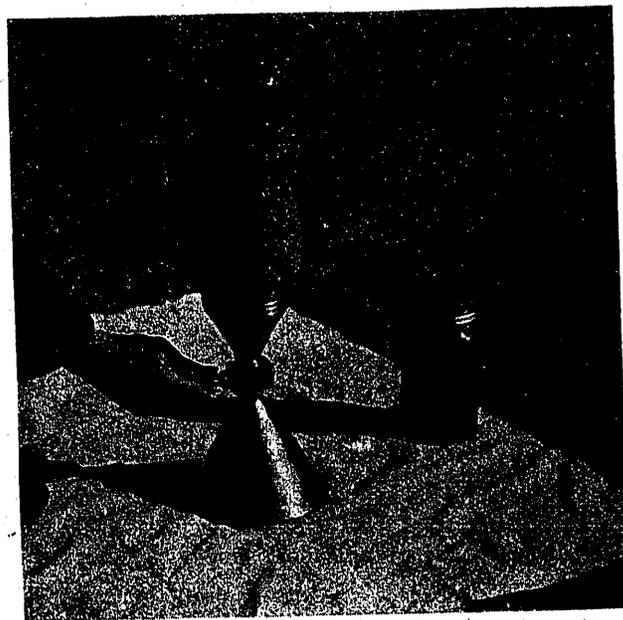
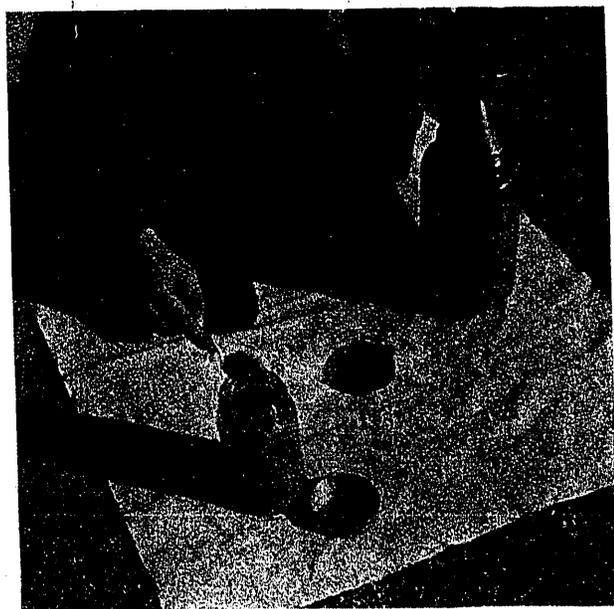
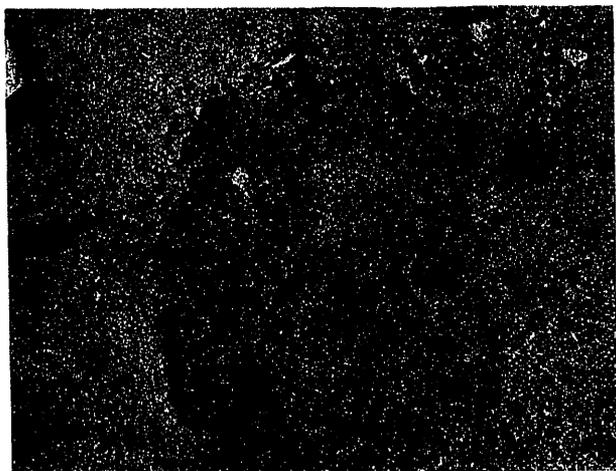


Fig. 13. — Determinación de la densidad en el campo. (Método de la arena.)

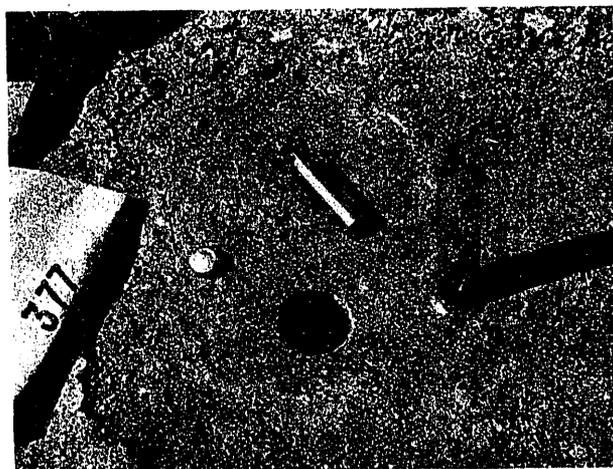
hace falta recoger todo el material extraído, lo cual se hace en la técnica americana por medio de una bandeja rígida. En el Laboratorio del Transporte hemos preferido el uso de una tela de goma, que lleva una boquilla para redondear la oquedad. La medición del volumen se realiza relleno el hueco producido en el suelo con arena o aceite (figuras 13 y 14); el volumen de arena se mide por diferencia del peso del frasco que la contiene, antes y después de rellenar la oquedad; ello obliga a disponer de una balanza, lo cual complica el método para su empleo en el campo. El Laboratorio del Transporte

emplea aceite viscoso, obteniéndose excelente precisión por diferencia de volumen, siempre que se trate de un suelo cohesivo.

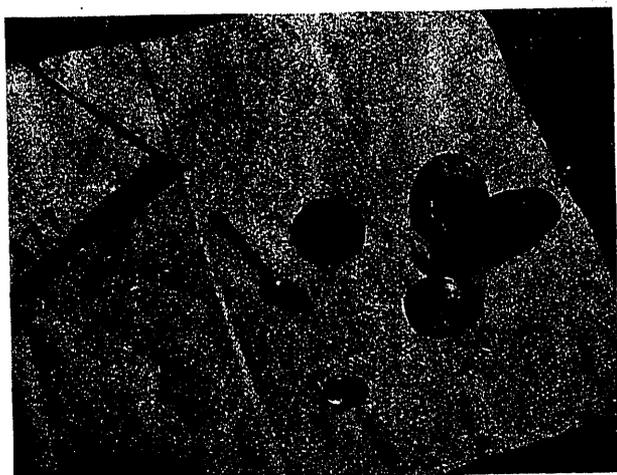
Método del tomamuestras. — En la inspección de la construcción de la presa de Cubillas se empleó un tomamuestras de borde inferior muy afilado y volumen conocido. El método resultó práctico y exacto, pero necesita bastante experiencia para su empleo, pues la más ligera inclinación del tomamuestras durante la hinca produce errores de importancia. No es aplicable en suelos con grava.



a) Se nivela el terreno.



c) Se determina el volumen del hoyo, llenándolo de aceite mineral contenido en una probeta graduada.



b) Se coloca la tela y, con ayuda de una cuchara, se hace un hoyo de sección circular; se recoge la tierra para pesarla, después de seca.



d) Se recupera el aceite.

Fig. 14. — Determinación de la densidad en el campo. (Método del aceite.)

Método de la aguja Proctor. — El método consiste en medir la penetración en las probetas obtenidas en el Laboratorio con diferentes humedades con una aguja Proctor. Se construye la curva humedad-penetración, y, midiendo esta última en el terreno, se reduce la primera. Nuestra experiencia en relación con este método es que da resultados poco exactos, pues interviene mucho el factor personal (figura 15).

Resultados de la consolidación.

Los resultados de la consolidación, cuando se emplean medios adecuados para ella, suelen ser buenos. Esta experiencia ha llevado a la conclusión de que es perfectamente factible exigir, aun en trabajos de pequeña importancia, una consolidación del 90 ó 95 por 100 de la densidad óptima Proctor, según la calidad del suelo y el tipo de la obra. En la figura 16 se representa la distribución estadística de una

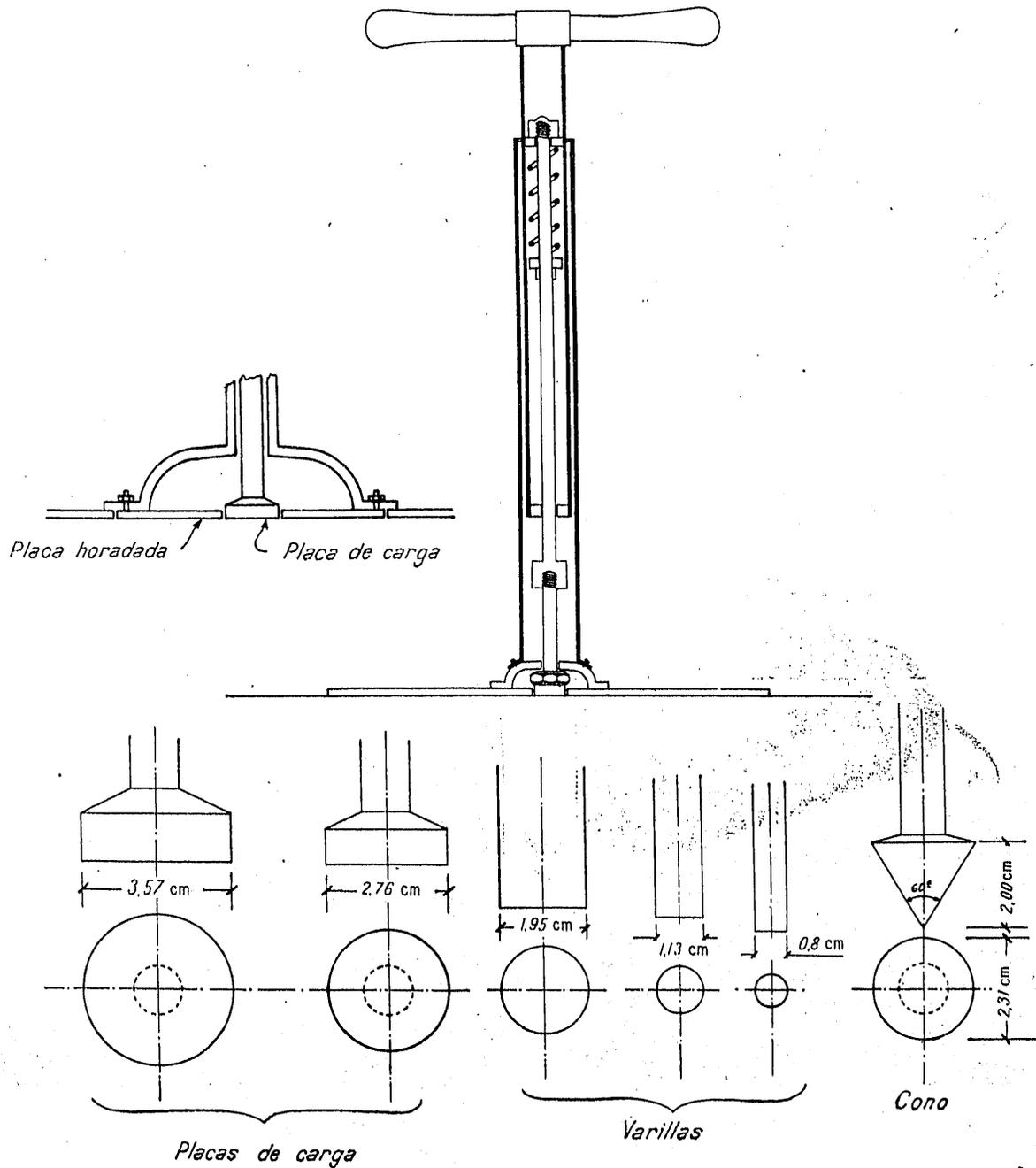


Figura 15.

serie de ensayos efectuados sobre terraplenes de la carretera en construcción de Ciudad Rodrigo a Fuentes de Oñoro. En abscisas se representan los tantos por ciento obtenidos, respecto a la densidad máxima Proctor, y en ordenadas, el número de determinaciones que han dado el tanto por ciento correspondiente de dicha densidad. Estos terraplenes se ejecutaron sin especiales cuidados por diversos contratistas, con medios auxiliares normales (explanadoras, traillas, patas de cabra o rodillos neumáticos ligeros) y, como vemos, la mayoría de las determinaciones dieron resultados comprendidos entre el 90 y el 100 por 100 de la densidad máxima Proctor.

Se ha comprobado repetidamente la gran influencia del tanto por ciento de humedad, lo cual representa, en muchas ocasiones, un grave problema. En las zonas montañosas, la humedad es siempre superior a la Proctor, lo cual produce dificultades para la utilización del material de apisonado.

En el Laboratorio del Transporte se ha estudiado la posibilidad de sustituir el apisonado de Proctor por el criterio, modernamente propugnado por algunos autores, de exigir un cierto tanto por ciento de la saturación de las tierras después de apisonadas; dicen que este dato es el que mejor da idea de la bondad del apisonado propiamente dicho, independiente de que la densidad obtenida sea buena o mala, por haber sido la humedad más o menos próxima a la óptima. Los resultados de los ensayos realizados por nosotros no comprueban este criterio.

El tipo de terreno y la consolidación del terraplén. — El Departamento de Investigación de Suelos

de la American Association of State Highway Officials (A.A.S.H.O.) tiene, según es sabido, una clasificación de suelos, fundada en sus características de composición granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad; esta clasificación se ha aceptado por la mayoría de los laboratorios, porque es sencilla de hacer y define perfectamente los suelos, en relación con sus características para la construcción de carreteras; tiene siete grupos, que denomina desde el A-1 al A-7, y una serie de subgrupos que se obtienen rápidamente de las características antes indicadas; las características de los distintos suelos, desde el punto de vista constructivo, son las siguientes:

Los suelos A-1, A-2 y A-3 son apropiados para la formación de terraplenes; los dos primeros pueden alcanzar gran densidad por apisonado. Los suelos A-3, faltos de cohesión, no pueden consolidarse con rodillo; hay que hacerlo por agua o con vibración.

Los suelos A-4 no son peligrosos, si se manipulan en forma tal, que se asegure su consolidación; predomina el limo, y debido a su defectuosa granulometría, son porosos, aun cuando alcancen la máxima compacidad posible; varían muy extensamente desde los suelos arena-cieno a los arena-limo. Los primeros pueden consolidarse mejor; los arena-limo no pueden consolidarse por su mala composición granulométrica y la falta del material cohesivo (arcilla). Se puede lograr con ellos una buena compacidad si se apisonan con rodillos lisos en capas cuyo espesor no exceda de 15 cm. Poseen poca estabilidad con cualquier grado de humedad y son inestables cuando ésta alcanza

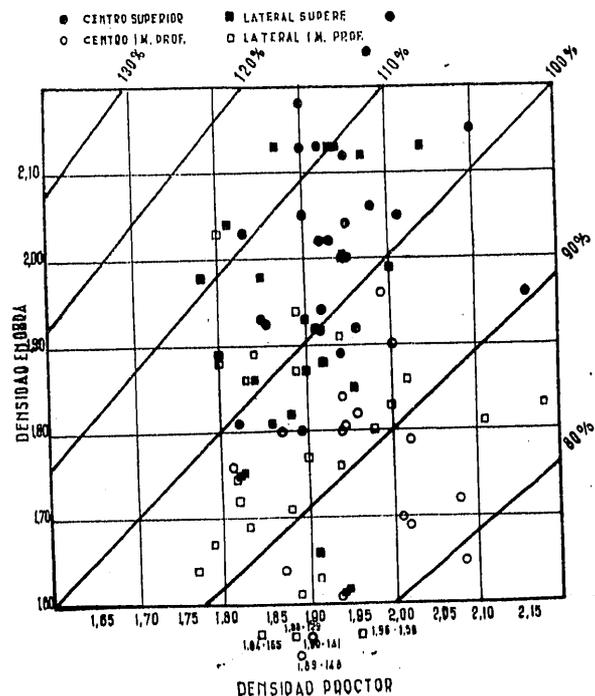
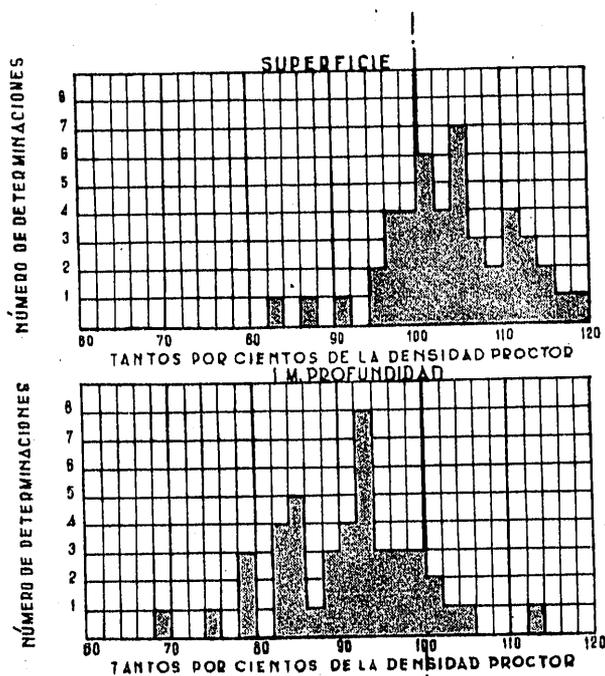


Fig. 16. — Gráficos de distribución estadística.

una proporción elevada, lo que sucede fácilmente en ciertas épocas, debido a su alta capilaridad. Los limo-arcillosos son mejores, por su composición granulométrica más perfecta y porque tienen cohesión; se pueden consolidar eficazmente por percusión o con rodillo de pata de cabra.

Los A-5 son similares a los anteriores, excepto cuando tienen mica; entonces su granulometría es peor y son muy porosos, incluso cuando alcanzan la máxima densidad. Son elásticos, y ello es una grave dificultad para la consolidación; las variedades cohesivas de estos suelos son las mejores, y esta última propiedad se pierde si absorben agua, en cuyo caso adquieren gran plasticidad.

Los suelos A-6 y A-7 son predominantemente arcillosos; los A-7 son peores, más elásticos; cuando están húmedos resultan muy inestables. Deben consolidarse con rodillo de pata de cabra hasta su máxima densidad; si se llega a alcanzar ésta, absorben poca agua y resultan estables.

En condiciones normales de buen drenaje y consolidación adecuada, la resistencia del suelo como cimiento está en relación inversa del "índice de grupo"; el valor 0 indicará, por tanto, buen cimiento, y el 20, un material muy malo.

Por otra parte, el Highway Research Board determina la compacidad que deben alcanzar los terraplenes en relación con la máxima densidad en seco obtenida en el Laboratorio con arreglo a las características que se resumen en el cuadro siguiente:

TIPO I		
Terraplenes de tres metros de altura máxima, no sujetos a excesivas inundaciones		
Máxima densidad en seco, determinada en el Laboratorio <i>Kns./m.³</i>	Consolidación mínima en el campo; tanto por 100 de la máxima densidad en seco	Huecos — Por 100
1 440 ó menos	(1)	más de 45
1 440 - 1 600	95	39 - 45
1 601 - 1 760	95	33 - 39
1 761 - 1 920	90	27 - 33
1 921 - 2 080	90	21 - 27
más de 2 081	90	menos de 21

TIPO II		
Terraplenes de más de tres metros de altura, sujetos a frecuentes inundaciones		
Máxima densidad en seco, determinada en el Laboratorio <i>Kgs./m.³</i>	Consolidación mínima en el campo; tanto por ciento del peso en seco	Huecos — Por 100
1 520	(2)	más de 42
1 521 - 1 600	100	39 - 42
1 601 - 1 760	100	33 - 39
1 761 - 1 920	95	27 - 33
1 921 - 2 080	90	21 - 27
más de 2 080	90	menos de 21

(1) y (2) Suelos de estas características, o peores, no deben usarse en la formación de terraplenes. La máxima densidad en seco se obtiene en el Laboratorio apisonando con la humedad óptima en el molde Proctor y desecando a peso constante.

CARRETERA R. IV DE MADRID A CÁDIZ

PASO SUPERIOR DE TEMBLEQUE

Sección tipo en el terraplen

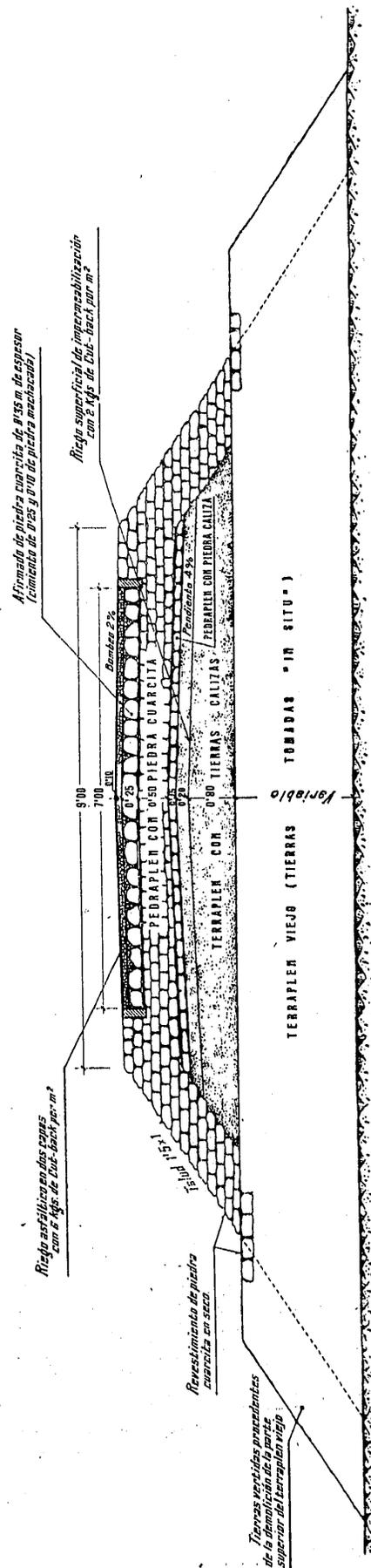


Figura 17.

Los cálculos de este cuadro están hechos a base de una densidad de las partículas de 2,65; si fuese distinta, debería realizarse la oportuna corrección, multiplicando por la relación de densidades.

Como se ve, los terrenos señalados con (1) y (2) no deben usarse; no obstante, hay veces en las cuales se tropieza con una imposibilidad económica para seguir esta regla, pues puede haber zonas en las cuales, para traer tierras que cumplan las condiciones indicadas, habría que llegar a distancias de transporte

prohibitivas. En este caso habrá que adoptar precauciones especiales: llegar a la máxima consolidación del terraplén de tierra mala y sustituir su capa superior por material escogido, adoptando las disposiciones precisas para lograr un drenaje eficaz.

El caso representado en la figura 17 corresponde al terraplén construido para la variante de Tembleque, en la carretera de Madrid a Cádiz; estaba hecho todo él con un terreno de las siguientes características:

CUADRO I

Muestra núm.	LÍMITES DE ATTERBERG			ENSAYO PROCTOR		EN OBRA		Sulfatos SO ₄ Ca. 2 H ₂ O	Carbonatos CO ₂ Ca
	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Densidad máxima	Humedad óptima	Densidad	Humedad		
764	46,3	25,8	20,5	—	—	—	—	4,94	31,2
765	57,0	36,5	20,5	—	—	—	—	0,05	44,8
766	—	—	—	—	—	—	—	0,14	—
1 073	41,6	24,6	17,0	—	—	—	—	—	—
1 106	43,0	25,6	17,4	—	—	1,69	19,8	—	—
1 384	—	—	—	1,64	24,9	1,45	17,5	—	—
1 385	—	—	—	1,63	27,1	1,37	19,4	—	—
1 386	87,6	37,6	50,0	1,52	25,8	1,41	17,1	47,6	1,80
1 387	—	—	—	1,41	30,0	1,25	23,3	—	—
1 388	70,9	37,3	33,6	1,48	25,8	1,54	15,5	65,5	1,69
1 389	95,5	42,5	53,1	1,41	30,1	1,39	17,0	53,2	0,47
1 390	—	—	—	1,53	25,7	1,63	14,9	—	—
1 391	—	—	—	1,51	25,4	1,38	18,5	—	—
1 392	88,4	37,3	51,1	1,50	26,8	1,58	12,1	48,5	10,64
1 393	87,4	41,1	46,3	1,47	27,1	1,25	18,5	52,5	15,80
1 394	—	—	—	—	—	1,71	18,4	—	—
1 395	77,1	40,2	36,9	1,48	27,9	1,46	17,5	60,3	10,10
1 565	78,6	44,9	33,7	1,46	30,4	—	—	41,0	15,40
1 688	—	—	—	1,43	31,5	—	—	0,56	50,7
1 689	—	—	—	1,34	30,6	—	—	1,47	40,4

Como puede verse, se trata de suelos muy expansivos: límite líquido muy alto y fuerte proporción de sulfatos que, en alguna muestra, llegan al 65 por 100. Superficialmente no era impermeable, pues para ello el tratamiento superficial asfáltico no resultaba suficiente; era lógico sucediese lo que ocurrió: después de la primera temporada de lluvias, el terraplén tuvo unos movimientos tan fuertes, que hubo que cerrarlo al tránsito. La labor de reconstrucción ha tenido que ser muy costosa para que resulte definitiva; ha consistido en levantar los dos metros superiores, sustituyéndolos por material escogido, cuya calidad iba me-

yorando a medida que nos acercábamos a la superficie de la carretera. El pedraplén hubiera sido posible sustituirlo por tierras de buena calidad si éstas hubieran existido en un radio económico; pero como no era así, la solución adoptada nos ofrecía un mejor drenaje; el terraplén con tierras calizas se apisonó cuidadosamente, regándose además su superficie con betún y dándole una fuerte pendiente (4 por 100) para la evacuación de las aguas que pudieran filtrarse; el resultado obtenido ha sido plenamente satisfactorio.