

EJECUCION DE UN NUCLEO IMPERMEABLE EN UNA PRESA DE TIERRA

Por EMILIO ASENSIO OLITE,
Ingeniero de Caminos,

Se hace un rápido examen de los problemas que surgen en la compactación de los núcleos impermeables para presas de tierra y de los métodos de control utilizados en ellos.

Las grandes presas de tierra son muy poco frecuentes en España. Buscar las causas de esta escasez estaría fuera de los límites de este artículo, pero quizá una de ellas radique en lo apriorísticos que han sido siempre los métodos de construir terraplenes. Durante muchos años, los mayores terraplenes han sido los de ferrocarril, y se hacían vertiendo en toda su altura y dejando que la consolidación se hiciera por la acción del tiempo. En carreteras, se daba paso con un firme provisional, que se sustituía por uno definitivo cuando, pasados meses o años, se juzgaba que no iban a producirse más asentos.

La necesidad de utilizar las obras inmediatamente después de su construcción, exige eliminar esta servidumbre de tiempo, que, aunque en muchos casos no puede suprimirse por completo, sí puede reducirse a un punto en que su acción no produzca alteraciones que afecten al buen servicio de la obra ejecutada. Si bien en este artículo nos vamos a referir exclusivamente a una clase de terraplenes, los que forman el núcleo impermeable de una presa de tierra, la mayor parte de lo que digamos es aplicable a los que tengan otra misión diferente, bien sea en carreteras, en aeropuertos e incluso en ferrocarriles, si bien en éstos los asentos son de menor importancia por el frecuentemente largo plazo transcurrido desde su construcción hasta su puesta en servicio.

De la exigencia de acelerar la consolidación de los terraplenes nació la compactación de los mismos. Estas dos palabras, consolidación y compactación, las hemos visto usadas con frecuencia indistintamente, pero corresponden a dos fenómenos diferentes. Es regla general llamar consolidación de un terraplén o de un suelo a la disminución de volumen que experimenta a lo largo de un plazo de tiempo relativamente largo. Esta disminución de volumen puede ser debida a la pérdida de parte del agua intersticial, pero también se ve aumentada por el efecto de las cargas, bien del terraplén suprayacente, o bien de las sobrecargas fijas o móviles que sobre él actúan.

La compactación de un terraplén consiste en aplicar, durante su construcción, cargas lo suficientemente elevadas para producir una disminución apreciable del volumen de huecos y, por tanto, del volumen total. Parece lógico, por tanto, que los sistemas de compactación se hayan ido desarrollando parale-

lamente a la mecanización de las obras, ya que la aplicación de las grandes cargas necesarias exige una maquinaria adecuada, en potencia y movilidad. Por esto no es de extrañar que casi todo lo que se sabe hoy día, sobre compactación, proceda de la experiencia norteamericana, que ha unido su poderío industrial con la disponibilidad de emplazamientos aptos para grandes obras de tierra.

La posibilidad de construir terraplenes aptos inmediatamente para prestar servicio, unida a la facilidad de mecanización total inherente a una obra de movimiento de tierras, ha hecho que, en muchos casos, se vean desplazadas las presas de fábrica por las de tierra, en tanta mayor proporción cuanto más elevado sea el grado de industrialización de un país. En nuestra patria se ha reservado a la tierra las presas que, por dificultades de cimentación o por otras causas análogas, resultaban casi imposibles en hormigón. En un país muy mecanizado puede darse el caso de que, sea el que fuere el emplazamiento, resulte siempre más económica la solución presa de tierra, aunque a veces convenga abandonarla por las dificultades en ubicar las obras anejas, tomas, aliviaderos, etc. Pero en todos los casos, antes de desecharla, deberá estudiarse, pues puede ser más económica y más rápida. Piénsese que una presa de tierra puede comenzarse al día siguiente de su adjudicación, pues la maquinaria a emplear es de gran movilidad e independencia.

Admitida la posibilidad de construir una presa de tierra con mayor economía y rapidez que una de fábrica, no quedaría más problema que la comprobación de su buena ejecución. Actualmente se dispone de métodos de control que, si bien no están muy perfeccionados — y de esto hablaremos después —, permiten conceder un margen de confianza suficiente. El mayor inconveniente de las presas de tierra es el peligro de submersión. Si una obra de este tipo llegara a ser rebasada por las aguas, está claro que su destrucción sería cosa de pocas horas. Es por esto por lo que los aliviaderos deben proyectarse con un margen de seguridad superior al que se adoptaría para una presa de fábrica. En un estudio económico comparativo, habrá que tener en cuenta, por tanto, el aumento de coste producido por este aumento de la capacidad de evacuación del aliviadero.

Presa de tierra.

Una presa de tierra puede ser homogénea o estar formada por zonas diferentes. Las razones para adoptar una u otra solución se basan en los materiales disponibles. Si en las proximidades del emplazamiento no existe más que un solo tipo de tierras, nos veremos obligados a hacer una presa homogénea. Pero, en general, esto no será así, y la mejor solución será construir un núcleo impermeable, y apoyados en él, uno o más espaldones a cada lado que aumentarán la estabilidad. Estos espaldones serán, por tanto, más permeables que el núcleo, y si son varios, a cada lado deberá aumentar su permeabilidad a medida que se alejen del núcleo. Se pondrán capas filtrantes en la separación de dos zonas y se proveerá en el paramiento de aguas arriba un revestimiento capaz de resistir la acción del oleaje del embalse.

Insistiendo en el limitado propósito de este artículo, vamos a referirnos a los problemas que plantea la ejecución del núcleo impermeable, para lo que nos apoyaremos en muchos casos en la experiencia recogida por nosotros en la construcción de la presa del Pantano de la Sotonera, ejecutado en la actualidad por TERMAC, Empresa Constructora, S. A., y cuya terminación, en curso, comprende un núcleo de arcilla de un millón de metros cúbicos y dos espaldones semipermeables, de grava, con un volumen superior al millón de metros cúbicos. Estos volúmenes, como hemos dicho, corresponden al proyecto de terminación, con lo que la cubicación total de la obra será de unos cinco millones de metros cúbicos. Esto nos indica que también en España se hacen grandes obras de tierra, utilizando la maquinaria adecuada y aplicando un control sistemático a la obra ejecutada.

Núcleo impermeable de presa de tierra.

I. MATERIAL A EMPLEAR.

Cuando se habla de un núcleo impermeable, se piensa y se dice núcleo de arcilla. Esta expresión no es correcta, ya que la arcilla pura es material muy malo para construir un terraplén, sea para el fin que sea.

La solución ideal será adoptar una tierra que tenga una curva granulométrica continua, con los finos suficientes para reducir al mínimo el volumen de huecos. Pero esto no quiere decir que sea la única solución, y en general, habrá que aprovechar el material disponible en la proximidad del emplazamiento, a fin de conseguir una obra lo más económica posible.

Desde el punto de vista de la impermeabilidad, los ensayos de laboratorio hechos sobre muestras compactadas fijarán el espesor del núcleo para conseguir así reducir las pérdidas por filtración a proporciones admisibles, que serán distintas según la finalidad de la obra, pues lógicamente admitiremos menos pérdida

de agua, cuando el fin de la presa sea almacenarla que cuando se trate simplemente de corregir las crecidas. Teniendo esto en cuenta, podemos afirmar que casi todas las tierras son aptas para construir un núcleo impermeable, exceptuándose las arenas de granulometría uniforme por su elevado volumen de huecos; las arcillas de gran plasticidad, por la gran dificultad en compactarlas y su probable fisuración, y las tierras orgánicas o con materias solubles en agua.

Teóricamente, el tamaño máximo de los granos no constituiría ninguna limitación, pero sí lo es según el método de compactación que haya de emplearse. Con rodillos de pata de cabra no puede admitirse grava muy gruesa, siendo práctica americana no permitir tamaños superiores a los 12 cm. Igual limitación produce la cantidad relativa de tamaños gruesos, habiéndose visto por experiencia que más del 40 por 100 de elementos de 5 a 120 mm. se compacta mal con el rodillo citado, por lo que, en estos casos, se aconseja utilizar otro sistema de compactación.

Adoptado el material a emplear, según las disponibilidades en las zonas próximas al emplazamiento, la ejecución del terraplén deberá hacerse de forma que se cumplan las siguientes condiciones:

- a) Impermeabilidad suficiente.
- b) Resistencia al esfuerzo cortante.
- c) Escasa posibilidad de asentamientos de importancia.

Para una tierra dada, estas tres condiciones se cumplen, tanto más cuanto mayor sea el grado de compactación alcanzado. Por tanto, en principio se ve que interesa compactar hasta el máximo posible económicamente.

Vamos, antes de hablar de los sistemas de compactación, a dedicar unas líneas a la humedad, por ser un factor de importancia.

2. HUMEDAD.

Compactar una tierra no es más que disminuir su volumen de huecos aplicando cargas exteriores. Una medida de la compactación será la expresión del peso de la materia sólida contenida en la unidad de volumen, lo que se conoce con el nombre de densidad seca. La medida de la densidad seca *in situ* de un terraplén se hace por el conocido procedimiento de practicar un hoyo sensiblemente cilíndrico, recogiendo el material extraído. El volumen del pocillo se determina vertiendo aceite o arena de recipientes tarados y calculando el volumen vertido por diferencia de los pesos del recipiente antes y después. Conocida la densidad, se obtiene el volumen. El peso de la materia sólida se determina en la balanza restándole al peso obtenido el que corresponde al agua que lleve, determinado como porcentaje, pesando previamente una pequeña muestra, desecándola en la estufa hasta peso constante y volviéndola a pesar después.

En el laboratorio se compacta la tierra por medio del cilindro Proctor, aparato que no creemos necesario

describir por estar muy extendido su uso. La energía aplicada para compactar una muestra de tierra en el cilindro Proctor la podemos hacer variar, o bien variando la altura de caída de la maza o bien variando el número de golpes.

esta curva presentará un máximo, lo que nos da la máxima densidad seca correspondiente a la energía empleada y, por tanto, la máxima compactación. A la humedad correspondiente a dicho máximo se le da el nombre de humedad óptima. Aparece aquí ya

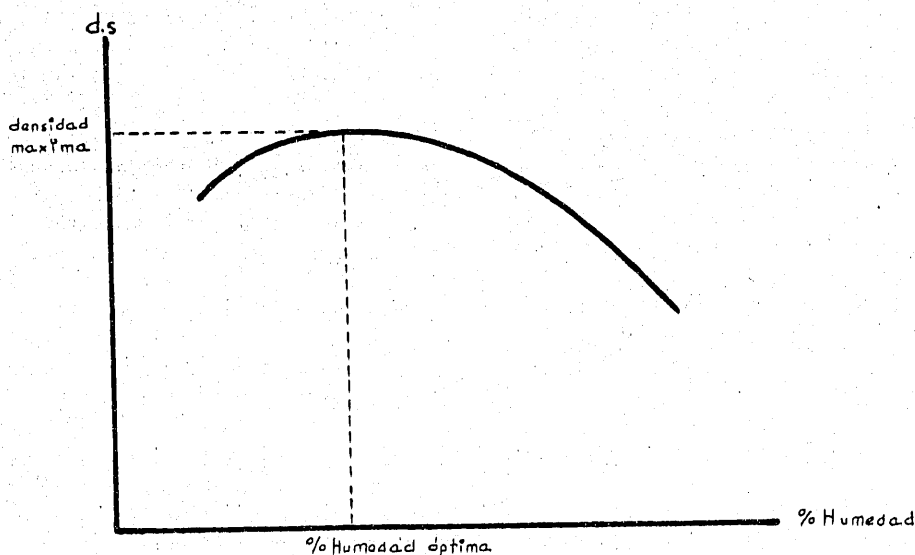


Figura 1.ª.

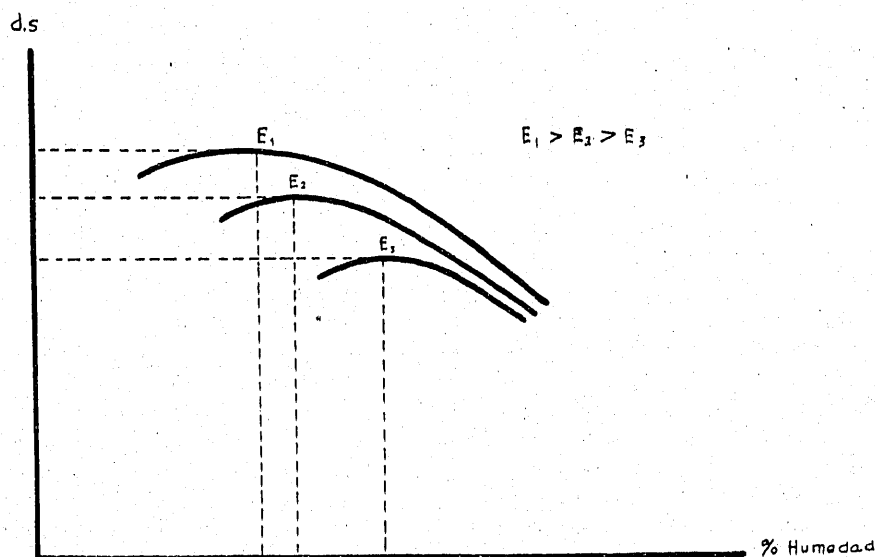


Figura 2.ª.

Veamos ahora cómo se ha determinado experimentalmente la importancia del porcentaje de agua.

Si en una serie de ensayos mantenemos fija para una misma tierra la energía de compactación, y en cada ensayo variamos el tanto por ciento de humedad, podremos dibujar una curva llevándola sobre el eje horizontal los porcentajes de humedad y sobre el vertical las densidades secas (fig. 1.ª). Normalmente,

la importancia del porcentaje de agua en una tierra que debe ser compactada.

Si ahora hacemos varias series de ensayos como el descrito, variando para cada serie la energía de compactación, obtendremos la correspondiente serie de curvas — porcentaje de agua — densidad seca. Dibujadas en un mismo diagrama (fig. 2.ª), observaremos que:

La densidad seca máxima crece con la energía de compactación. La humedad óptima decrece al aumentar la energía. Por tanto, llegamos a la conclusión de que la humedad óptima depende de la energía utilizada para compactar.

El agua, al actuar como lubricante de las partículas, facilita una mejor imbricación entre ellas. Pero si hay exceso de agua, parte del esfuerzo aplicado se va en expulsar el agua. Aparece, pues, lógica la existencia de un porcentaje óptimo.

Esta misma experiencia de laboratorio puede hacerse en la obra, eligiendo una superficie de ensayo y haciendo actuar el equipo de compactación sobre zonas con humedad diferente. Si a la vez variamos el número de pasadas del equipo, podremos dibujar una serie de curvas análogas a la obtenida en el laboratorio. Estas curvas pueden dar indicaciones muy valiosas acerca de la mejor utilización del equipo de compactación, ya que para obtener la densidad seca exigida podrá actuarse sobre la humedad de la tierra, lo que no suele ser económico; sobre el número de pasadas del equipo o sobre las características del propio equipo.

Las curvas obtenidas con la superficie de ensayo se pueden llamar "curvas en el campo". Se intentaron hacer en la presa de Cachuma, California, pero la gran dispersión de los resultados impidió llegar a su obtención. Pero pueden hacerse aumentando el número de pruebas.

La humedad de la tierra no es constante en la cantera y puede variar entre límites muy amplios. La corrección del porcentaje de agua es difícil y no suele poder hacerse con uniformidad. De dos modos podría corregirse la humedad, en la cantera o en la obra.

Para aumentar el contenido de agua en la cantera, deberá inundarse ésta algún tiempo antes de su explotación, a fin de que el agua vaya penetrando en su masa. Si la cantidad de agua a añadir es elevada, puede favorecerse su infiltración con un sistema de pozos para aumentar la superficie. La adición de agua en la obra se hace regando por aspersión una vez extendida la tierra, conviniendo disponer de algún medio que permita mezclarse con uniformidad.

Mayor problema es la eliminación del exceso de agua. Si se conoce con tiempo, podría realizarse un sistema de drenaje en las canteras. En cuanto a esperar que se evapore el exceso, con la tierra extendida en la presa, no es práctica aconsejable, pues retarda la marcha de los trabajos y sólo podrá hacerse cuando se disponga de gran superficie de vertido.

En resumen, la corrección de la humedad de la tierra es una operación difícil y costosa, por lo que debe evitarse siempre que sea posible. De aquí se deduce la conveniencia de utilizar energías de compactación elevadas, ya que, a medida que dicha energía es mayor, pueden conseguirse densidades secas superiores en un campo de humedades más amplio.

La experiencia enseña que es preferible compactar con defecto que con exceso de humedad. Una tierra con elevado porcentaje de agua, puede llegar a la saturación antes de alcanzar la densidad seca exigida. La eliminación de agua será muy lenta, dada la escasa permeabilidad de la tierra. Por otra parte, un terraplén saturado, al que se le siguen aplicando cargas, está en malas condiciones de trabajo, ya que aparece una presión hidrostática interna que produce el efecto aparente de disminuir el coeficiente de rozamiento. En efecto, aplicando nuevas cargas verticales, éstas serán soportadas por el agua intersticial y el terraplén se comportará ante una fuerza horizontal de igual forma que antes de aplicarle las nuevas cargas verticales. Es decir, el efecto aparente será una disminución del coeficiente de rozamiento interno.

Otro efecto perjudicial del exceso de humedad se comprueba en un terraplén con el paso frecuente por un mismo punto de un equipo pesado de transporte. Dada la gran extensión de las presas de Sotonera, ha habido puntos donde, sin verter nuevas tierras durante mucho tiempo, los camiones de transporte han pasado durante muchas horas. Se produce en este caso una destrucción que se ha comprobado ser de dos formas muy diferentes.

Cuando el terraplén que servía de camino estaba con poca humedad, la destrucción era superficial, por un efecto de desgaste, con la consiguiente formación de polvo y avance de la destrucción de arriba hacia abajo, iniciándose la formación de baches, lo que hacía aumentar más, por el impacto, la velocidad de desgaste.

Si el terraplén, por el contrario, tenía exceso de humedad, antes de notarse exteriormente ninguna señal de destrucción, cambiaba el color pasando a más húmedo. El paso de los camiones producía una deformación elástica que cesaba una vez que había pasado la carga. Y el final era la destrucción de zonas localizadas en una profundidad que, a veces, llegaba a 25 ó 30 cm. Aparentemente, la destrucción era simultánea en toda la altura.

La causa de este fenómeno parece ser debida a lo siguiente: el repetido paso de vehículos pesados (tén-gase en cuenta que en Sotonera hay camiones cuyo eje trasero carga hasta 14 toneladas) producía una supercompactación, alcanzando la tierra su saturación. Continuando la aplicación de cargas exteriores, el agua busca la salida, lo que normalmente resultaba más fácil en sentido horizontal que en otro cualquiera. Este movimiento horizontal del agua intersticial produce una exfoliación del terraplén en capas de pequesímo espesor que, una vez iniciada su destrucción, se disgregan muy rápidamente. Este fenómeno de destrucción producido por el equipo de transporte ha hecho que, en algunos pliegos de condiciones, se limite el peso de los vehículos de carga.

En resumen, vemos la importancia tan extraordinaria que tiene el porcentaje de humedad en una

tierra que se va a compactar. Suponiendo que conocamos la humedad óptima, una norma muy extendida es intentar trabajar con una diferencia en menos de un 2 por 100 respecto a dicha humedad óptima. La corrección de la humedad es muy difícil, ya que la mezcla de tierra y agua necesita mucha labor para que sea homogénea. En este aspecto de la cuestión, los rodillos de pata de cabra son superiores a los cilindros de alma llena o a los neumáticos, ya que las patas realizan una eficaz labor de mezcla. Pero,

son de poca aplicación en materiales coherentes. Igualmente no consideramos el compactado por medios manuales, aunque sea con pisonés mecánicos, ya que suelen usarse en pequeñas zonas donde no pueden aplicarse los rodillos corrientes. Los sistemas más corrientes se basan en el empleo de rodillos, bien arrastrados, bien automotores. Podemos hacer con ellos dos grandes grupos:

a) Rodillos que producen grandes cargas unitarias sobre pequeñas superficies.

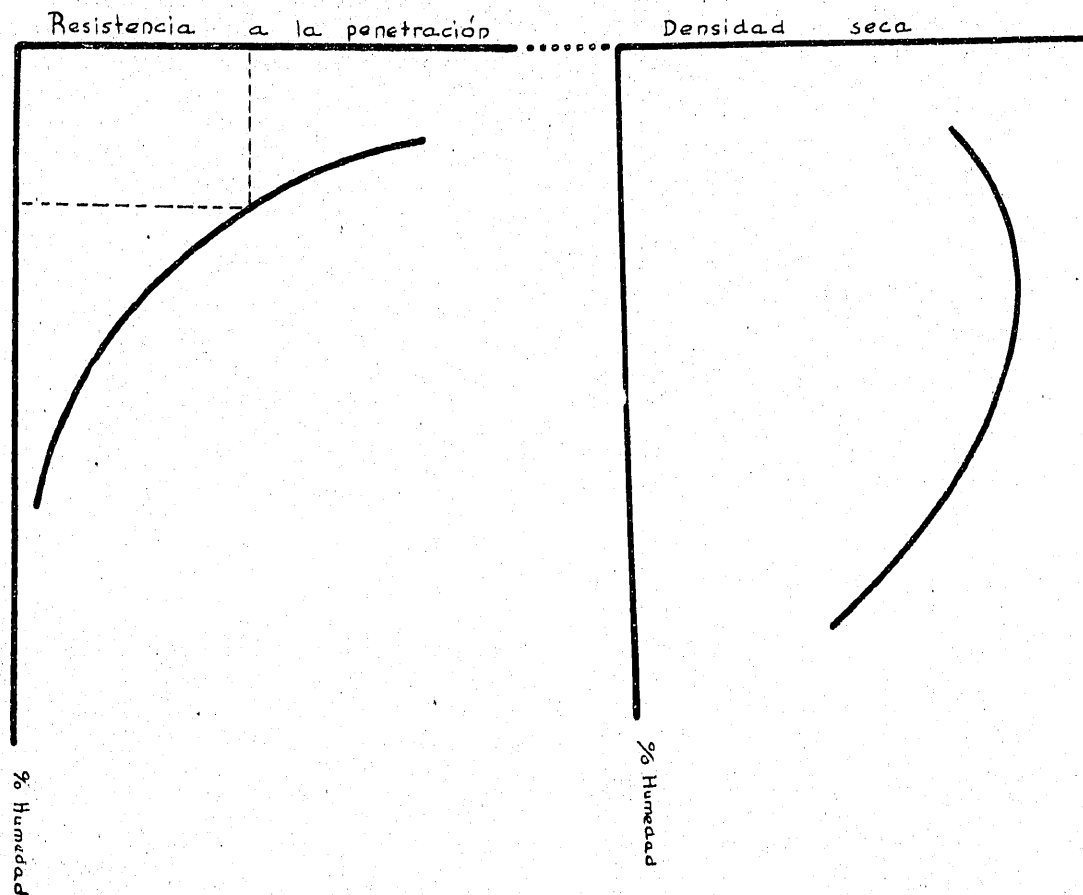


Fig. 3.a. — Determinación indirecta de la humedad, midiendo la resistencia a la penetración de una muestra compactada con la energía *standard* en el cilindro Proctor.

en general, los riegos sobre el manto antes de compactar, no debe tener más objeto que corregir las pérdidas superficiales por evaporación. Será preferible aumentar el peso del equipo de compactación si se ve que la tierra viene de las canteras con defecto de humedad, o bien aumentar el número de pasadas.

3. SISTEMAS DE COMPACTACIÓN.

Hemos dicho que compactar una tierra es disminuir su volumen de huecos por aplicación de fuerzas exteriores. La forma de aplicar dichas fuerzas hace nacer los distintos sistemas de compactación.

Prescindimos de los sistemas por vibración, pues

b) Rodillos que producen menores cargas unitarias, pero sobre superficies mayores que en el caso a).

En el primer grupo se incluyen, principalmente, los rodillos pata de cabra. Existen otros tipos que pueden englobarse en dicho apartado, como son los rodillos de rejas, que no son, en suma, más que un emparrillado de barras de acero con la sección suficiente para soportar el esfuerzo a realizar.

En el segundo grupo incluimos las clásicas apisonadoras, ya sean de rodillos lisos, acanalados u ondulados, y los rodillos neumáticos. Estos últimos tienen limitada su carga unitaria por la presión de inflado, pero tienen la ventaja de una acción más eficaz en profundidad, como veremos más adelante.

Para juzgar sobre la eficacia de un rodillo, es corriente hablar de la carga unitaria que produce. Según esto, no habría comparación posible entre la pata de cabra y cualquier otro tipo. Pero la realidad es que se usan todos y todos pueden dar buenos resultados si su utilización es la adecuada. Una consideración de importancia para juzgar acerca de la eficacia de un rodillo es la distribución de cargas en profundidad, por lo que vamos a analizar este factor.

La distribución de las cargas en un terreno, al aplicar en su superficie una serie de ellas sobre una placa rígida, puede hacerse siguiendo la hipótesis de Boussinesq. Para los efectos aproximados que perseguimos ahora, simplificamos el problema admitiendo una repartición uniforme en las áreas horizontales y un aumento de las áreas de apoyo, según generatrices rectas apoyadas sobre el perímetro de la superficie de carga, formando dichas generatrices un ángulo α con la vertical.

Con estas hipótesis simplificativas, supongamos que compactamos cargando sobre una superficie rectangular, cuya área es S_s y su perímetro l . Si δ_s es la carga unitaria, el peso total será $S_s \cdot \delta_s$.

A la profundidad p , la superficie de apoyo habrá aumentado hasta el valor S_p , que será, si prescindimos de los pequeños cuadrantes aparecidos en los vértices:

$$S_p = S_s + p \cdot l \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

La relación entre las cargas unitarias será la recíproca de las superficies, por lo que, si llamamos δ_p a la carga unitaria correspondiente a la profundidad p , se tendrá:

$$\frac{\delta_p}{\delta_s} = \frac{S_s}{S_p} = \frac{S_s}{S_s + l \cdot p \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{1}{1 + \frac{l}{S_s} p \cdot \operatorname{tg} \alpha}.$$

El valor $\frac{l}{S_s}$ depende exclusivamente de la forma y dimensiones de la superficie de apoyo. Introducimos un concepto análogo al radio hidráulico de las secciones de canales y llamamos:

$$\rho = \frac{S_s}{l},$$

dando a ρ el nombre de "espesor de la pisada", que será, por definición, la relación de la superficie de apoyo a su perímetro. Y así podremos escribir:

$$\frac{\delta_p}{\delta_s} = \frac{1}{1 + \frac{p}{\rho} \operatorname{tg} \alpha}.$$

En esta fórmula ya vemos que la carga unitaria disminuirá en profundidad, tanto más lentamente cuanto mayor sea ρ .

Con el carácter aproximado de esta fórmula aparece un factor a considerar en los sistemas de compactación. No sólo se deberá tener en cuenta el valor de la carga unitaria, sino también el del "espesor de la pisada".

Se ve ya la mayor eficacia de un rodillo de neumáticos sobre otro de llantas rígidas con igual carga unitaria y peso total, ya que la sección de apoyo de un neumático tendrá un valor de ρ superior al de una llanta rígida por el pequeño valor en ésta de la dimensión paralela a la dirección de la marcha.

No son éstas las únicas consideraciones a hacer para comparar los sistemas de compactación. Vamos a razonar la forma de trabajar de un rodillo pata de cabra (figs. 4.^a en adelante).

Cuando se ve trabajando un rodillo de este tipo, puede tenerse la impresión de que revuelve la tierra. La realidad es otra, aunque haya algo de verdad en la primera impresión. Si el rodillo está bien dimensionado y la tierra en buenas condiciones, donde pisa una pata queda tierra compactada en gracia a la elevada carga unitaria. Al salir la pata a la superficie, especialmente en las primeras pasadas, revuelve precisamente la tierra advacente que está sin compactar, parte de la cual cae sobre la propia pisada. De aquí la frase común de que estos rodillos compactan "de abajo arriba". Al cabo de un cierto número de pasadas, tendremos la parte inferior del manto terminada. Pero será necesario continuar dando pasadas para dejar acabado todo el espesor. Ahora bien, cuando éste es pequeño, el rendimiento por volumen baja, pues la carga tan elevada es superior a la necesaria y desaprovechamos energía, ya que el rodillo deberá seguir trabajando hasta que vuelva a pisar toda la superficie, si es que queremos que quede compactada toda la tierra. Y de aquí ha surgido otra frase común, que los rodillos pata de cabra dejan sin acabar un espesor de 3 a 5 cm. Y no es que puedan acabarlo, sino que no suele interesar hacerlo así.

Este fenómeno, al que en el lenguaje de obra llamamos "subir el manto", es interesante de estudiar.

Es evidente que un manto que queda compactado en toda su altura, produce mejor aspecto a la vista que otro que no ha "subido" del todo. En rigor, este hecho debe carecer de importancia, pues al verter un nuevo manto y realizar su trabajo los rodillos, compactarán la zona suelta del anterior. Pero una observación superficial de la obra no se da por satisfecha con esta apreciación. Es difícil saber las causas de que unas tierras "suban" rápidamente y otras no, y estas últimas obligan a emplear muchas más horas de rodillo, hasta alcanzar una altura apreciable. Parece estar relacionado con la carga unitaria y con las dimensiones de las patas, por lo que sería necesario disponer de patas intercambiables, según la clase de tierras que viniesen de cantera y según su humedad. Una gran ventaja de la rápida "subida" del manto es la mayor facilidad en arrastrar el rodillo.

Este problema que hemos vivido en Sotonera, y que nos hizo adoptar diferentes dimensiones para las patas de los rodillos de las que primitivamente tenían, lo hemos visto aludido recientemente en un artículo de Jack W. Hilf, y en el que leemos que, de 33 presas del B. of R. relacionadas, solamente en 12 se dió

pasando por un punto, no deja terminada la compactación, siendo necesario que pase varias veces. Y será necesario pasar menos veces, cuando la capa sea de menor espesor. Esta es una ventaja de los rodillos continuos, ya que su acción se puede aumentar por incrementos menores. Por esto es práctica corriente

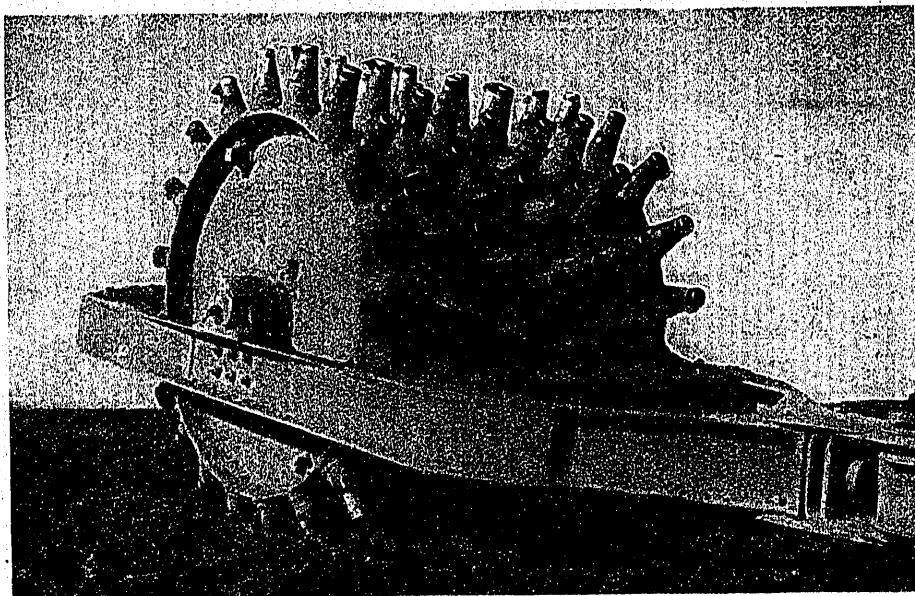
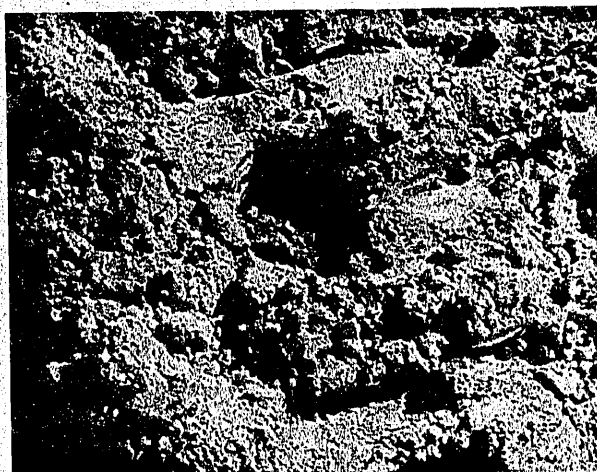


Fig. 4.^a. — Penetración de las patas del rodillo en la primera pasada.



Figs. 5.^a y 6.^a — Huellas del rodillo pata de cabra en su primera pasada.

un franca subida del manto. El sistema seguido por el B. of R. era de exigir 12 pasadas de su rodillo.

Volviendo a nuestro propósito, vemos que el rodillo de pata de cabra, una vez que ha pisado en un punto, deja el suelo compactado, excepto la tierra que vuelve a caer en el punto de pisada.

Por el contrario, un rodillo de superficie continua,

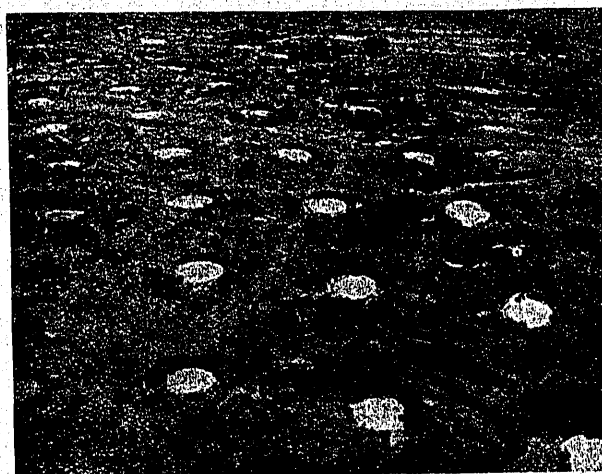
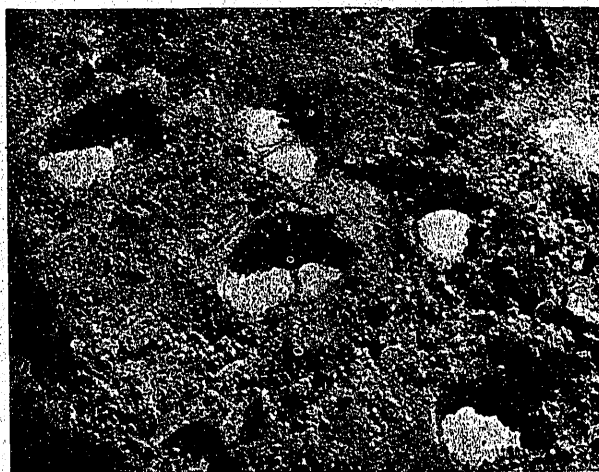
terminar los mantos con una o varias pasadas de rodillos continuos, después de haber trabajado los de pata de cabra.

La ventaja mayor atribuida a los rodillos de pata de cabra es la ausencia de estratificación, ventaja muy considerable en los terraplenes a que nos referimos, es decir, a los de presas, pero de la que no

hay necesidad en los dedicados a otros fines. Precisamente para evitar la estratificación será conveniente, en las presas, dejar el manto sin acabar, para que sea compactado con el manto suprayacente.

Ahora bien, sea la que sea la altura a que ha llegado la compactación en un manto, para verter el

rior y se compactará éste en unión del suprayacente. Donde ya se hubiera compactado bien el manto inferior, ocurrirá que, si bien desde el punto de vista de la densidad no habrá ninguna anomalía, sí la habrá a efectos de la unión entre mantos. Habremos anulado, o al menos disminuído, una de las mayores



Figs. 7.^a, 8.^a y 9.^a. — Huellas del rodillo sobre un manto ya compacto.

siguiente deberá ser pisado por el equipo de transporte. Este equipo producirá una compactación de la tierra suelta y debemos juzgar si dicha compactación es beneficiosa o no.

Si la tierra está en adecuadas condiciones de humedad, es claro que se podrán alcanzar densidades altas en la parte superior pisada por los vehículos. Esta acción no será uniforme en superficie, pues el equipo de transporte efectuará sus maniobras *para verter y no para recorrer todo el manto*. Al compactar el manto siguiente, la unión entre mantos será mucho mejor cuanto menos haya sido pisado el infe-

ventajas del rodillo de pata de cabra. Parece ser que, con exceso de humedad, existe menos perjuicio por lo que respecta a la unión entre capas, por lo que convendrá regar abundantemente la superficie de vertido. Es decir, si el equipo de transporte realiza una buena labor de compactación, se pierde unión entre capas. Los rodillos de pata de cabra pueden mejorar estas condiciones al pisar sobre el manto superior.

La elección del sistema de rodillos a emplear debe ser concienzudamente estudiada, ya que el acierto puede producir considerable economía, además de una

mejor ejecución. Aparte de las propiedades intrínsecas de cada sistema, debe considerarse el material que se trata de compactar.

Para tierras con cohesión apreciable son más útiles los rodillos de pata de cabra que los de neumá-

5 y 120 mm. es superior al 40 por 100, el comportamiento de los rodillos de pata de cabra es defectuoso. Los rodillos de neumáticos tienen su mejor utilización en terraplenes no coherentes de arena o grava; estos materiales sueltos no se emplean para los núcleos



Fig. 10. — Toma de muestras.



Fig. 11. — Zona de vertido y extensión. Al fondo, zona en fase de compactación.

ticos. Pero si en estas tierras hay abundancia de grava, puede llegar a ser difícil la compactación con este sistema. Desde luego, los elementos de diámetro superior a 12 cm. ya hemos dicho que es conveniente arrojarlos fuera, y si la proporción de granos entre

impermeables, por lo que podemos decir que, en general, estos núcleos se compactarán mejor con rodillos de pata de cabra.

En el caso de que el material impermeable comprenda gran variedad de tamaños, llegando a tener

elementos clasificados como gravilla o grava, será cuando convenga utilizar rodillos continuos, mejor de neumáticos que de llantas rígidas.

Si el terraplén coherente solamente tiene granos finos, los rodillos de neumáticos también pueden usarse, pero vigilando su comportamiento, pues puede ocurrir que se compacte una corteza superficial, sin llegar bien su acción a las zonas inferiores por producirse un efecto arco. Como es lógico, la dispersión de cargas en profundidad deberá considerarse, por lo que habrá que tener en cuenta el valor del "espesor de pisada" definido anteriormente, determinando así el espesor más adecuado para el manto, a fin de que la carga unitaria sea suficiente para producir una buena compactación en toda la altura del manto.

Como complemento a estas observaciones, indicaremos que los rodillos de pata de cabra deben poderse lastrar a fin de conseguir una carga unitaria mayor. Los existentes en Sotonera, tal como han trabajado normalmente, responden a las siguientes características:

RODILLOS	Número 1	Número 2	Número 3	Número 4	Número 5	Número 6
Número de patas	120	120	120	120	88	88
Longitud de pata (mm.)	240	240	240	254	190	190
Diámetro exterior rodillo (mm.)	1.480	1.480	1.480	1.480	1.000	1.000
Ancho exterior rodillo (mm.)	1.530	1.530	1.530	1.530	1.194	1.194
Peso aproximado, con lastre (Kg.)	10.000	8.000	8.000	8.000	4.000	3.400
Superficie de pisada de una pata	Circular 78,5 cm. ²	Circular 78,5 cm. ²	Circular 78,5 cm. ²	Circular 39,5 cm. ²	Circular 36 cm. ²	Circular 36 cm. ²
"Espesor de la pisada"	25 mm.	25 mm.	25 mm.	17,8 mm.	14,4 mm.	14,4 mm.
Carga unitaria teórica en la superficie de apoyo, considerando el 5 % de las patas (Kg./cm. ²)	21	17	17	34	25	21

Los rodillos núms. 5 y 6 se han utilizado poco, pues a pesar de su elevada carga unitaria, sólo eran aptos para mantos de pequeño espesor, o bien como complemento a los otros rodillos. Se comprende viendo el pequeño valor de ρ .

Con los rodillos núms. 1, 2, 3 y 4, el espesor medio de los mantos, después de compactados, era de 15 cm.

4. CONTROL DE LA COMPACTACIÓN.

La forma más extendida de controlar la eficacia de la compactación consiste en comparar la densidad seca alcanzada en el terraplén con una *standard*. Esta última es la máxima obtenida en el cilindro Proctor para la energía tipo, es decir, altura fija de caída y número determinado de golpes.

Ya hemos descrito antes el método de calcular la densidad seca *in situ*.

La determinación de la densidad seca se hace sobre el material que pasa por el tamiz núm. 4 de la serie Tyler, a fin de eliminar la influencia de los elementos gruesos. Expresando en tanto por ciento la relación entre la densidad seca *in situ* y la máxima de laboratorio, obtenemos el porcentaje de compactación. Los pliegos de condiciones exigen que este porcentaje sea superior a una cifra determinada: 90, 95 ó 100, según los casos.

Para un suelo determinado, las condiciones de impermeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante y poca compresibilidad, se cumplirán tanto mejor cuanto mayor sea la densidad seca conseguida. Tomando la de laboratorio como tipo, se ha visto que exigiendo un 95 por 100, el terraplén se comporta perfectamente, y este porcentaje es el más corrientemente exigido.

Pero antes de fijar un porcentaje a exigir, deben estudiarse tanto la tierra a emplear como los fines

a cumplir por la obra. Las propiedades de una tierra compactada al 95 por 100 no tienen por qué estar representadas por cifras que sean precisamente el 95 por 100 de las correspondientes a la tierra compactada a la densidad tipo. Terraplenes que han de soportar grandes cargas, pueden exigir ser compactados hasta el 100 por 100. Proctor por esta razón.

Esta falta de proporcionalidad se explica claramente. Supongamos una tierra cuyo peso específico real sea 2,60 Kg. por decímetro cúbico.

Si la densidad máxima de laboratorio es 1,90 kilogramos/dm.³, el volumen de huecos será el 27 por 100.

Compactada una muestra al 95 por 100 Proctor, su densidad seca será 1,805 Kg./dm.³ y su volumen de huecos 30,6 por 100. Por tanto, si en vez de comparar la materia sólida contenida en la unidad de

volumen de cada muestra, comparamos los volúmenes huecos, resultará que el suelo compactado al 95 por 100 Proctor tendrá un volumen de huecos igual al 113 por 100 del de la muestra de laboratorio. Vemos, por tanto, que las propiedades relacionadas con el volumen de huecos deberían variar en más del 5 por 100. La realidad es que estos porcentajes no tienen otro valor que dar una expresión numérica a un fenómeno. Una vez conseguido representar la compactación con una cifra, la determinación del valor mínimo admisible deberá hacerse por medio de ensayos de laboratorio.

La impermeabilidad y la resistencia, estudiadas en el laboratorio para una tierra determinada, podrán fijar un mínimo a exigir para la densidad seca.

Donde parece que el porcentaje Proctor refleja mejor el fenómeno físico es en la capacidad de asiento de un terraplén, precisamente por la forma de obtener la densidad tipo. Pero aun en esto hay controversia. Si se observa un terraplén antiguo, consolidado por la acción del tiempo, y se mide su densidad seca cuando ya está estabilizado, y después compactamos otro para el mismo fin, hasta alcanzar la misma densidad seca, este último es muy probable tenga asientos al ponerlo en servicio. Es decir, parece que tenga influencia el estado inicial del terraplén. Desde luego se comprende que para una misma tierra y una misma densidad seca, haya infinidad de maneras de distribuirse las partículas sólidas.

Vemos que el control de la compactación por medio de la densidad seca no es perfecto, pero sigue usándose por no encontrar otro mejor.

Otro sistema de control utilizado es el ensayo de penetración. Por medio de la aguja Proctor, que suponemos conocida por nuestros lectores, se determina la resistencia a la penetración. Es claro que una misma muestra de tierra compactada tendrá distintos valores de la resistencia a la penetración, según sea su porcentaje de humedad. Por tanto, se toma como valor característico la resistencia a la penetración con muestra saturada. Para determinar esta cifra, sin necesidad de saturar la muestra, se recurre a la curva de saturación y a la curva densidades secas humedad. No explicamos aquí el método a seguir por no creerlo de interés y salirse de los limitados propósitos de este artículo.

El ensayo de penetración, donde encuentra más aplicación, es en la determinación rápida del porcentaje de agua. Tomando una cierta cantidad de tierra, se la compacta en el molde Proctor con la energía *standard*. Una vez compactada, se mide su resistencia a la penetración. Si previamente hemos tomado una serie de valores de dicha resistencia, sobre las muestras empleadas para dibujar la curva — porcentaje de agua — densidad seca, la curva obtenida nos dará la humedad existente (fig. 3.^a).

En general, el método comúnmente empleado es la medida de la densidad seca y su comparación con la obtenida en el laboratorio como máxima. El mayor inconveniente de este método es su lentitud, ya que precisa conocerse con exactitud el porcentaje de humedad a fin de obtener el peso de la materia sólida. La necesidad de conocer el resultado de la compactación rápidamente en muchos casos, para poder verter una nueva tongada, ha hecho pensar en poner en práctica métodos más rápidos.

Uno de éstos se basa en la absorción por las partículas de suelo de los rayos gamma emitidos por una fuente radiactiva. La absorción es proporcional a la masa de la materia atravesada; mediremos así la masa sólida y líquida, por la que será preciso obtener la humedad, lo que también se hace por medios radiactivos, con una fuente de neutrones lentos y un contador de neutrones. Siendo éstos absorbidos por los átomos de hidrógeno, podremos deducir, por la concentración de éstos, la cantidad de agua.

Otro sistema en estudio está basado en la medida de la deceleración máxima producida al chocar con el suelo en estudio un objeto pesado.

Como una variante al método, ya clásico, del porcentaje de densidad seca máxima, hemos leído recientemente un artículo basado en un trabajo de Mr. Chester McDowell, Ingeniero de Suelos, del Departamento de Carreteras de Texas. En vez de definir la calidad de la compactación por el cociente, expresado en porcentaje, entre la densidad *in situ* y la densidad máxima, se define introduciendo el valor de la densidad del material suelto, es decir, antes de comenzar a trabajar el equipo de compactación. Se llama "razón de compactación" al valor

$$\frac{D_T - D_s}{D_M - D_s} \times 100,$$

siendo:

D_T = densidad seca en el terraplén compactado.

D_M = densidad seca máxima deducida del ensayo de Proctor.

D_s = densidad seca del material suelto.

Este valor, así definido, pretende reflejar el esfuerzo de compactación empleado, mejor que el porcentaje clásico. El pliego de condiciones exigirá un valor mínimo admisible para la razón de compactación de acuerdo con el material de que se trate.

En resumen, y como ya hemos dicho, el método más extendido consiste en exigir que el porcentaje de compactación no sea inferior a un valor determinado. La inspección de la obra deberá cuidar, además, de que la unión entre capas sucesivas sea buena para evitar planos privilegiados de filtración o de desliza-

miento. Asimismo se evitará el exceso de humedad, especialmente en las zonas que hayan de soportar todavía grandes alturas de terraplén. Se procurará, por esta causa, que las aguas de lluvia se evacuen con facilidad, evitando los encharcamientos prolongados, dando al perfil transversal la pendiente suficiente para este fin. Cuando se reanude el trabajo, después de un período prolongado de suspensión, se removerá la capa superficial y se volverá a compactar.

Conclusión.

Creemos que el número de presas de tierra irá en aumento, pues existen muchas razones para preferirlas en determinados casos. Sólo hemos esbozado alguno de los problemas prácticos que pueden plantearse en la ejecución de un terraplén impermeable, pues el estudio completo exige mucho más espacio. La complejidad de los factores que intervienen en el comportamiento de un terraplén hace que se prescindiera de los menos importantes, pero para esto es

preciso conocer la importancia relativa de cada uno de ellos.

Como consejo a quien se encuentre ante una obra de este tipo, diremos que tenga mucho cuidado con el agua. Para compactar hace falta humedad, pero esto no quiere decir que haya que echar agua "como si fuera regalada". Cuando después de una lluvia fuerte hemos hecho pasar los rodillos para "ver" cómo estaba la tierra, hemos apreciado lo que vale el dar con la proporción adecuada. Un rodillo pata de cabra, trabajando con gran exceso de humedad, no compacta absolutamente nada, sólo sirve para remover la tierra y acelerar su desecación.

Otro consejo: al estudiar el precio de coste de una compactación, deben tenerse en cuenta todos los problemas que plantea el apartamiento de la tierra de su humedad óptima. Pueden ser muchos los días del año en que no pueda trabajarse, obligando a tener parada una maquinaria costosa. Un día de lluvia trae a continuación varios días de suspensión, agravada por la necesidad de realizar trabajos complementarios de removido y limpieza.