

TERRAPLENES Y PEDRAPLENES (*)

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Se refiere el autor a las grandes explanaciones de las obras de carreteras, aludiendo a las modernas normas para el apoyo y formación de terraplenes y pedraplenes. La influencia de la mecanización intensiva, a base de grandes equipos, ha permitido reducir considerablemente los ritmos de ejecución y los precios unitarios. Los sistemas de compactación y el control de ésta son puntos muy importantes que el ingeniero debe considerar conjugando el resultado de los ensayos con su experiencia personal.

1. Introducción.

Hasta hace no muchos años se decía que el terraplén era el talón de Aquiles de la carretera. En efecto, el paso del tráfico pesado sobre capas desigualmente compactadas producía deformaciones importantes, asientos diferenciales que se reflejaban en irregularidades superficiales y agrietado de la capa de rodadura.

Tal fenómeno se puso singularmente de manifiesto en nuestro país en la década de los 50 con las variantes del Plan de Modernización de Carreteras, que, por hallarse en los itinerarios de mayor tráfico, estaban sometidos al paso de grandes cargas, que empezaban a alcanzar cierta frecuencia; con ello se detectaba la insuficiente resistencia del terraplén, mucho menos advertida en años anteriores cuando el tráfico era bastante más ligero.

Este problema de inseguridad en la infraestructura de la carrera fue superado cuando se introdujeron las nuevas técnicas de construcción y control, con prescripciones definidas respecto a la calidad de los suelos que se podían emplear en la explanada o en el cuerpo del terraplén y los grados de compactación que se exigían en función de densidades patrón para cada suelo empleado, determinadas por ensayos normalizados.

Tales medidas, que como ahora vemos son absolutamente imprescindibles, se introdujeron en España en 1956 (**) en algunas obras piloto. Después, en la década de los 60, se generalizaron los nuevos procesos constructivos de las

obras de explanación al menos en los tramos de la Red Principal, estableciéndose los correspondientes laboratorios, que, en lo que se refiere a los terraplenes, controlan los tipos de suelo, la humedad máxima y la densidad óptima.

Las prospecciones que se llevan a cabo para el estudio del proyecto sirven para definir la posible utilización de los suelos procedentes del desmonte, y en caso de que éstos no alcancen el volumen suficiente, los préstamos más próximos que cumplan las condiciones exigidas en granulometría, plasticidad y capacidad portante.

2. Formación de terraplenes.

Al construir un terraplén de carretera, el objetivo esencial, sino único, es llegar a la mínima compresibilidad y a la máxima resistencia al corte. Este problema lo resolvió por primera vez Proctor, y la idoneidad de su ensayo está acreditada por la gran difusión del mismo, ya que se utiliza prácticamente en todos los países con ligeras variantes en la normalización operativa o en las correcciones de conversión; se aplican estas con suelos de elementos gruesos, separando las partículas mayores y empleando fórmulas empíricas o racionales para la conversión de densidades.

El terreno de apoyo es un eslabón más, y por ello, el terraplén no soportará mayores cargas que las que soporte su cimiento. Si éste no tiene la suficiente capacidad portante se podrán producir asientos, que, transmitidos a la calzada, dan lugar a ondulaciones y cuarteos y pueden causar la ruina de la obra.

Debe atenderse, pues, especialmente a la preparación de la base de apoyo. Los principales inconvenientes que puede ofrecer un cimiento en mal estado, si no se toman las debidas precauciones, son:

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1974.

(**) Anteriormente se habían empleado en las obras de carreteras y aeropuertos de las bases hispano-norteamericanas de utilización conjunta.

1. Agua en forma de manantiales o filtraciones.
2. Suelos de poca resistencia, saturados o inadecuados por otra causa.
3. Planos de corrimiento inclinado, generalmente lubricados con agua.
4. Pendientes inclinadas, especialmente si son muy lisas o cubiertas con vegetación.

En general, el agua es la causa principal de las condiciones desfavorables de sustentación. Por tanto, el punto más importante en la preparación de un cimiento de terraplén es el establecimiento de un buen drenaje. La solución de los problemas del agua superficial suele ser sencilla; sin embargo, descubrir la presencia y origen de las aguas subterráneas y tomar las medidas necesarias para contrarrestar sus efectos perjudiciales puede resultar difícil. De todos modos estos problemas no deben descuidarse. El subdrenaje, si está debidamente dispuesto, será generalmente suficiente para resolver el problema. Cuando las capas que contienen el agua están a bastante profundidad, de modo que el subdren sea ineficaz, se recomienda el empleo de drenes de arena.

Si incluso en seco, el material de cimentación es muy malo, el único remedio será sustituirlo por otro más adecuado. Esto es aplicable especialmente a suelos de turba y fango y algunos de tipo arcilloso, plástico y expansivo. En algún caso los suelos plásticos se han tratado con ligantes hidráulicos (*). En general, los suelos que son inadecuados para la formación de terraplenes son igualmente desfavorables para servir de cimiento, aunque en el último caso están favorecidos por un apoyo lateral más eficaz.

Aun cuando el terreno de apoyo parezca satisfactorio en su estado natural inalterado, la situación puede cambiar considerablemente cuando el suelo está sujeto a la presión del peso muerto del terraplén y a las cargas, impacto y vibraciones del tráfico. Estas fuerzas pueden originar importantes esfuerzos cortantes, causar corrimientos en los planos subterráneos lubricados con agua, originar una compactación adicional causante de asentamientos e incluso forzar al agua que envuelve a las partículas de suelo a filtrarse como agua libre por el terreno, lo cual puede ser peligroso. Si el suelo inadecuado está suficientemente seco y firme, puede extraerse

(*) El cimiento del terraplén de la autopista de Torrejón, donde el trazado cruza una vega inundable por el desbordamiento de arroyos, se trató con cal.

por medio de *bulldozers*, excavadoras o traíllas.

Generalmente, sin embargo, el material será demasiado blando o estará muy húmedo para emplear tal equipo. Las dragalinas pueden resultar, entonces, eficaces. En otros casos, la extracción se realizará más económicamente con el empleo de explosivos. Si es zona de arbolado, los tocones tendrán que ser arrancados antes de emplear la maquinaria, pero si se han de emplear explosivos, los tocones pueden ser volados al mismo tiempo.

Elegidos los suelos "adecuados" o "tolerados" de acuerdo con las prescripciones contractuales y extendidas las capas con el espesor que aconseje su naturaleza y los equipos disponibles se procede a la humectación y compactación. La compactación es, sin duda, la fase más importante en la formación de terraplenes. Sólo un control de densidades, con suficiente frecuencia, que asegure una homogeneidad y unos valores por encima de los límites impuestos, podrán garantizar la estabilidad del terraplén y en consecuencia la de la calzada que sustenta. Como es sabido, la humedad es un factor fundamental en los suelos a compactar y en ella influyen las condiciones atmosféricas, que es preciso considerar en toda su importancia.

La gran sensibilidad de las obras de tierra a las variaciones de humedad ambiente condicionan los períodos óptimos de ejecución. Por ello, se recomienda su iniciación en primavera.

En las grandes obras se aprecia claramente una beneficiosa evolución de los procesos de compactación basada principalmente en una maquinaria cada vez más potente y eficaz, fruto de una bien orientada investigación que ha permitido conocer a fondo el fenómeno físico de la densificación bajo presión que lleva consigo los de saturación, lubricación, orientación, disminución de rozamiento entre partículas e imbricación de éstas en orden a conseguir la máxima resistencia a la deformación y al esfuerzo cortante.

Hemos asistido en los últimos años al desarrollo de una amplia gama de compactadores vibratorios en tipos y pesos, singularmente de rodillos autopropulsados.

En estos compactadores vibratorios a una carga estática, el peso del rodillo se superpone una carga dinámica, la fuerza centrífuga de un peso excéntrico. La ventaja principal de la compactación por vibración estriba en que se pueden compactar capas de mayor espesor que

con los rodillos estáticos, lo que se traduce en rapidez y economía del proceso constructivo (*). La eficacia de la compactación por vibración está en razón inversa de la cohesión del suelo, llegándose en suelos de grava-arena a compactar capas de espesor triple que con rodillos estáticos.

Las prescripciones contractuales no suelen concretar respecto a los equipos de compactación de que debe disponerse en obra y el con-

y por ello un gran rendimiento como requieren los actuales ritmos de ejecución de los grandes tramos de autopista.

Con rodillos vibratorios de llanta lisa de 13 toneladas se compactan capas de terraplén de un metro a 50 centímetros de espesor. El espesor máximo corresponde a suelos gravoarenosos; si la fracción de suelos cohesivos es importante no conviene pasar de 50 centímetros. Existe una relación entre el espesor de la capa y el

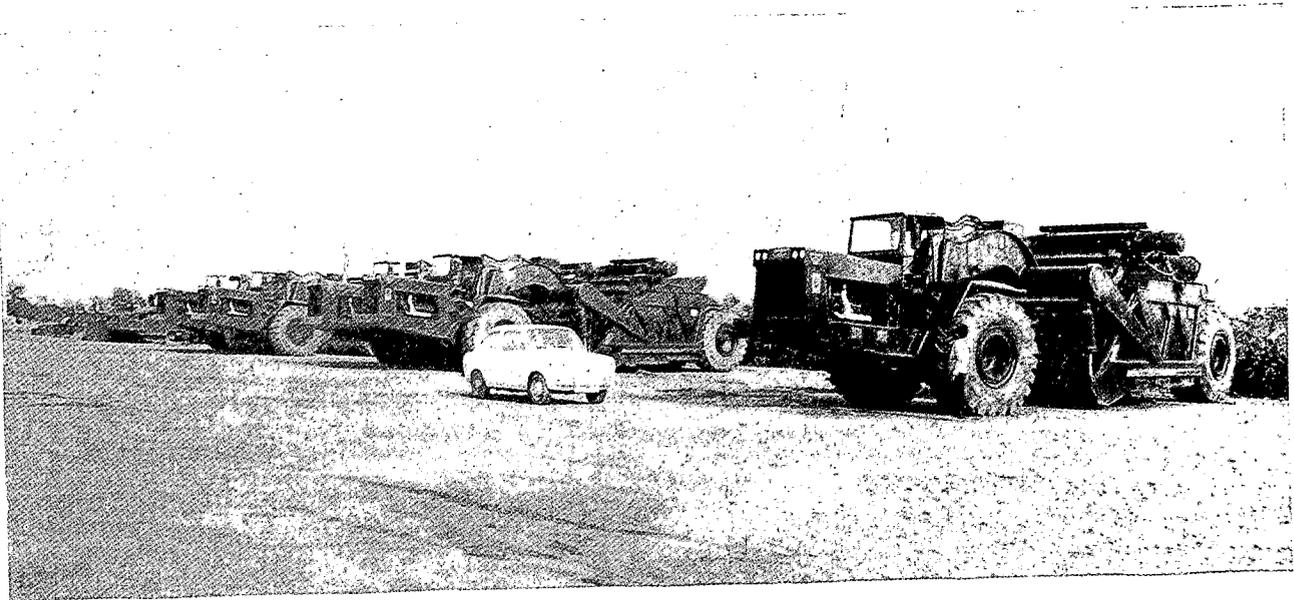


Fig. 1. — La mecanización intensiva a base de grandes equipos ha permitido reducir los plazos de ejecución y los precios unitarios. La fotografía muestra el parque de mototraillás de las obras de una de nuestras autopistas.

tratista, en consecuencia, tiene libertad para la elección.

Para la determinación del espesor de las capas, de modo que sea posible obtener a buen precio la densidad especificada, es preciso el criterio del Ingeniero, basado en los resultados de los ensayos y en la inspección visual de la obra.

La tendencia actual es el empleo de compactadores vibratorios autopropulsados de 12 toneladas o más y grandes rodillos de pata de cabra, para suelos arcillosos, con peso de hasta 20 toneladas. Estos últimos también son autopropulsados, lo que les da una gran movilidad

(*) Respecto a la teoría de la compactación por vibración y sus aplicaciones, puede verse nuestra conferencia sobre el tema incluida en la publicación "Compactación de terrenos. Terraplenes y pedraplenes". Editores Técnicos Asociados, S. A. Barcelona, 1966.

número de pasadas y se puede aumentar aquél siempre que se den más pasadas. A medida que aumente la fracción fina de un suelo este crecimiento es menos acusado y de ahí que a partir de un cierto número de pasadas no aumenta de manera sensible la densidad de la capa.

3. Influencia de la mecanización.

Los grandes equipos de maquinaria han modificado los supuestos antiguos sobre la construcción de carreteras y han permitido una transformación espectacular en la organización, rendimiento y costes.

Pero, además, han permitido la realización de obras que antes hubieran sido imposibles —la explanación de autopistas es uno de los ejemplos más elocuentes—, obras que por otra



Fig. 2. — El cimientó de los terraplenes necesita una preparación en cuanto a resistencia y drenaje para asegurar su estabilidad.

parte son necesarias para la infraestructura del país. Las grandes cotas de desmonte y terraplén exigen estos grandes equipos, cuyas ventajas son esencialmente tres: posibilidad de ejecución, calidad de realización y gran beneficio económico. Haremos notar que en esto último, más que el ahorro que puede obtenerse con la reducción de precios de las unidades de obra, desde luego muy importante con los modernos equipos, supone el de reducción de plazo que permite la explotación de la obra en fecha anticipada, aumentando, en consecuencia, la rentabilidad socioeconómica de la inversión y disminuyendo los intereses intercalares.

Como idea de los grandes volúmenes que exigen las explanaciones de las modernas autopistas, puede fijarse un mínimo de 700.000 metros cúbicos por kilómetro, si bien pueden pasar con cierta remencia de 250.000 m³/Km.

Estamos entrando en una etapa de mecanización superintensiva y con ello nos acercamos cada vez más a la industrialización de las obras públicas.

Se puede disponer de máquinas especiales para trabajos del más variado tipo y hay una beneficiosa sensibilidad en las facultades creadoras de los fabricantes, para que los diseños se adapten a la cambiante demanda de las grandes obras. Hay una evolución rápida en este aspecto y con ella una competencia de mercado de la que resultan unos precios de equipo asequibles para el constructor.

Por otra parte, el aumento de rendimientos ha sido espectacular; se han multiplicado por 8 las capacidades de las palas cargadoras, por 5 las de los *dumper*, por 3 las capacidades de las mototrallas, y éstos sólo son algunos ejemplos de las grandes dimensiones alcanzadas por los modernos equipos de maquinaria.

Con estos medios se pueden alcanzar actualmente unos resultados inconcebibles hace sólo diez años, como es un movimiento de tierras, de dos millones de metros cúbicos en un mes.

Estas posibilidades que brinda el mercado actual de maquinaria, además de permitir tan altos rendimientos, contribuye también a una notable disminución de los costes, ya que las inversiones en máquinas de mayores dimensiones no son proporcionales a su capacidad, sino notablemente inferiores, lo que se une a una simplificación del trabajo y a una notable reducción de la mano de obra.

El siguiente ejemplo cuantificado constituye una muestra elocuente de lo que acabo de decir. Los estudios que se han realizado en la Dirección General de Carreteras con la valiosa colaboración de las grandes Empresas constructoras permiten llegar a valores reales, puesto que se apoyan en una amplia experiencia y en una variada casuística.

Citaré el caso de la explanación de un tramo de autopista, con un volumen de 16 millones de metros cúbicos, a realizar en un plazo de dos años. Corresponden los datos a un estudio realizado, con diferentes tipos de equipos, desde los más convencionales a los que comprenden la maquinaria más avanzada. Indicaré sola-

mente los costes resultantes para tres de ellos, los extremos y el medio:

Equipo más convencional.	78 ptas./m ³
Equipo intermedio	49 ptas./m ³
Equipo más moderno	23 ptas./m ³

Vemos que el coste del metro cúbico de tierra movida con el equipo más moderno no llega ni a la tercera parte del resultante si se empleara el equipo más convencional, ni a la mitad del correspondiente a un equipo de tipo intermedio.

4. Prescripciones para los pedraplenes.

El empleo de los productos procedentes del desmonte en roca en formación de pedraplenes, por consideraciones económicas, para llegar a la máxima compensación volumétrica sobre el perfil, hizo necesario el estudio de unas normas que aseguren la estabilidad de pedraplenes de gran cota. La técnica inglesa que es quizá la más completa, se basa en la experiencia de tramos de autopistas como la Motorway 62, en Yorkshire, con 7.000 millones de metros cúbicos de explanación en roca y cotas de 70 metros de desmonte y 55 metros de terraplén.

Para el desmonte en roca se emplea cuando es posible el *ripado*; esta operación ha ampliado su campo a rocas más duras con los *scrapers* vibratorios y el empleo de tractores de gran potencia. También el rendimiento de las voladuras se ha mejorado con la técnica preparatoria del *precorte*, con la que se crean planos de rotura en el macizo rocoso, previamente al barrenado. Se disminuyen así las creces de la excavación y los posibles daños en las edificaciones o servicios públicos próximos al trazado; por ello, y por la reducción de cargas de explosivo en la voladura final, compensa lo que se invierte en esta operación preparatoria.

Combinando el precorte con la voladura general se trata de obtener un material de desmonte con una macrogranulometría conveniente para la formación de pedraplenes, que exige una graduación de tamaños relativamente continua, y con dimensión máxima de 0,60 metros —con tolerancia de un 10 por 100— para capas de 0,90 metros de espesor, o excepcionalmente de un metro.

La extracción de los productos rocosos procedentes del desmonte suele hacerse con palas de 2 a 3 metros cúbicos de capacidad y el transporte al punto de empleo con *dumpers* de 25 a 40 toneladas. Con las nuevas técnicas de vola-

dura se trata de reducir al mínimo el taqueo de los grandes bloques que se salgan de las prescripciones, ya que es antieconómico *per se* y además puede causar destrozos en maquinaria o instalaciones próximas.

Existen también unas normas para el extendido del material que proscriben la descarga de los bloques directamente del *dumper*. Se recomienda descargar a unos tres metros del punto de empleo y empujarlos hasta éste con un *bulldozer*. La razón es que si el material se descarga directamente se produce un efecto de puente entre los bloques grandes, que se apo-



Fig. 3. — Explanación de una carretera en terreno rocoso.

yan unos sobre otros y en el proceso de vibración se logra solamente un relleno parcial de los grandes huecos por los elementos de tamaño inferior.

Si tiene mucha importancia la forma y tamaño graduado del material, más aún tiene la compactación suficiente para evitar posteriores asentamientos diferenciales. Como es sabido, la innovación más eficaz en la construcción de pedraplenes es la compactación vibratoria. El gran efecto de este sistema de compactación se mostró primero en las presas de escollera y gracias a él se ha llegado, aún todavía hace muy pocos años, a soluciones que antes no podían compararse con las presas clásicas de tierra y fábrica en el aspecto económico-funcional. La influencia de los compactadores vibratorios no ha supuesto, en consecuencia, sólo la mejora o modificación de una técnica de construcción, sino la posibilidad de nuevas soluciones con ventajas económicas.

En los pedraplenes, más aún que en los terraplenes, se ha comprobado la eficacia de los

compactadores vibratorios y se han ido aumentando progresivamente los pesos de éstos a la vista de su correlación con el número de pasadas. Para las capas normales de 90 centímetros de espesor, las equivalencias para conseguir las condiciones especificadas son del siguiente orden: 12 pasadas de rodillo de 5 toneladas, equivalen a 8 de 8 toneladas o a 4 de 12 toneladas. Ahora es cada vez más frecuente el empleo de compactadores de 16 toneladas.

La compactación se mejora con el regado abundante, pues el agua produce un efecto lubricante que favorece el encaje y acuíñamiento de los bloques al mismo tiempo que ayuda a la distribución de la fracción fina que debe rellenar los huecos.

En la construcción de pedraplenes ha habido una notable evolución durante los últimos años. Cuando empezaron los grandes tráfico, en peso y frecuencia, se manifestó un temor general a este tipo de obra que trataba de eludirse, sustituyéndolas por terraplenes, aún a costa de notables incrementos en el presupuesto debidos a la dificultad de encontrar tierras apropiadas a distancia económica, y en volumen suficiente, en las zonas de montaña donde los perfiles longitudinales exigen grandes cotas.

Las nuevas normas de ejecución van siendo cada vez más conocidas y aplicadas; por ello, es conveniente seguir los resultados de las grandes obras de ensayo e informarse de las últimas recomendaciones que de ellas se deducen para, dentro de lo posible, hacerlas figurar en los pliegos contractuales y en todo caso tenerlas presentes como orientación en obra. De hecho se ha vencido la prudente resistencia al pedraplén y cada vez se utilizan en mayores volúmenes aprovechando los productos del desmonte de la traza, en las zonas de terreno rocoso.

Pero aún se siguen estableciendo demasiadas diferencias entre terraplenes y pedraplenes y esta separación da lugar a que, a veces, se prescindiera del empleo de materiales friables aunque debidamente compactados, y con una humedad óptima para la fracción fina, darían lugar a obras suficientemente estables. Con ello se pierden alternativas interesantes desde el punto de vista económico para la formación de pedraplenes.

5. Conclusión.

Constituye lo que antecede un breve repaso de ideas en el que hemos querido poner de ma-

nifiesto la importancia de una buena ejecución del movimiento de tierras, en cuanto a terraplenes y pedraplenes.

Para cualquier obra, y dentro de la diversidad que puede presentarse, habrá que tener en cuenta la elección de materiales, su empleo y la coordinación entre las diferentes fases (preparación del cimient, drenaje, extensión de las capas, etc.) considerando las circunstancias climáticas dada la sensibilidad de las tierras a las variaciones de humedad ambiente.

El proyecto debe ser muy detallado y concreto en cuanto a los materiales a emplear y las normas del proceso constructivo: espesor de las capas granulométricas y tamaños límites, equipos de compactación, tipo y frecuencia de los ensayos de control, etc.

La técnica de la formación de terraplenes es mucho más conocida, responde a directrices estrictas fruto de una larga experiencia y no presenta dificultades ni en cuanto las prescripciones a imponer ni en cuanto a su cumplimiento en obra.

No puede decirse lo mismo de los pedraplenes de más difícil normalización, si bien en este campo la tecnología ha avanzado notablemente en la última década, tanto en la operación de desmonte, para conseguir un tamaño bien graduado en el material, aproximándose a una macrogranulometría ideal, como en el extendido y compactación de las capas. Asimismo, se han puesto a punto métodos para el control de obra, determinando densidades o midiendo asientos. Los pedraplenes experimentales son muy útiles para definir las prescripciones óptimas de una obra, de acuerdo con los productos del desmonte que van a aprovecharse y el equipo de compactación disponible.

No es necesario insistir en la importancia de la compactación, lo que es una preocupación dominante en todos los Ingenieros de construcción; la manera de caracterizar ésta en lo que se refiere al pedraplén es muy importante para los tramos cuyo trazado se desarrolla por terreno rocoso y se trata de conseguir, con materiales de gran tamaño, una infraestructura suficientemente estable para que no se produzcan asientos diferenciales bajo las pesadas cargas del tráfico de hoy. Esto es fundamental para que se mantenga la carretera con buen índice de servicio.