

COMPORTAMIENTO DE UN GRAN PEDRAPLEN CONSTRUIDO CON UN TALUD DE 45 GRADOS(*)

Por MIGUEL A. RODRIGUEZ-MIRANDA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Euroestudios, S. A.

ENRIQUE LANCHI MARTI

Licenciado en Ciencias Geológicas.
Dames & Moore Iberia, S. A.

En el presente artículo se describen el diseño, ejecución y posterior comportamiento de un relleno de escollera de unos 50 m de altura, el pedraplén de Istiña, construido con un talud de 45° por condicionantes topográficas. El relleno forma parte de la autopista Bilbao-Behobia y está situado en las proximidades de Deva. Aunque ofreció ciertas dificultades en su construcción, debido a las desfavorables condiciones del terreno, se ha comportado posteriormente de una forma muy satisfactoria; las deformaciones, tanto verticales como horizontales, han sido pequeñas y se produjeron en breve plazo desde la terminación de las obras.

CONSIDERACIONES PRELIMINARES

La autopista Bilbao-Behobia se desarrolla, en general, a través de terrenos de topografía abrupta, que han obligado a realizar un importante movimiento de tierras, así como numerosas estructuras y túneles. Con objeto de buscar una economía sustancial en las obras, se ha intentado reducir al mínimo el número y longitud de las estructuras; consecuentemente, este criterio ha llevado a efectuar numerosos rellenos, algunos de los cuales han presentado importantes dificultades de proyecto y construcción debido a las desfavorables condiciones topográficas y climatológicas de la zona.

En este artículo, los autores presentan las experiencias obtenidas a través del proyecto, construcción y observación posterior del comportamiento del pedraplén de Istiña, que, en bastantes sentidos, cabe considerar como obra singular dentro de los rellenos de la autopista.

El pedraplén de Istiña se encuentra situado, aproximadamente, en el kilómetro 54 de la autopista, a media distancia entre los núcleos de población de Elgóibar y Deva; la altura máxima del relleno es de unos 50 m, y su longitud en coronación, de 100. La característica más destacable es que, debido a la fuerte inclinación de la ladera sobre la que se apoya y con objeto de evitar la ejecución de muros, ha sido preciso construirlo con un talud de 45 grados.

Las circunstancias indicadas dan un carácter de novedad al pedraplén de Istiña, ya que representa la introducción de las técnicas de los grandes rellenos de escollera en la construcción de autopistas y, además, en condiciones bastante estrictas.

CARACTERISTICAS DE EMPLAZAMIENTO

El pedraplén de Istiña se encuentra situado entre los puntos kilométricos 53,920 y 54,020 de la autopista, a la salida de un túnel. La rasante del relleno está a la

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1977.

cota 115, y el pie, a la 65, siendo su altura de 50 m; la longitud en coronación es de 100 m, y su volumen total de unos 150.000 m³. En la figura 1 se presenta la situación en planta y la sección tipo del relleno.

El pedraplén se apoya en una ladera, en la margen derecha del río Deva, que tiene una pendiente hacia el río de unos 35 grados. El río Deva discurre paralelo al relleno unos 100 m por debajo de la autopista, y próximo a él se encuentra la carretera nacional 634, que une Bilbao con San Sebastián. El relleno cruza en sentido transversal una pequeña vaguada cuyas laderas SW y NE tienen una inclinación aproximada de 40 y 30 grados, respectivamente. Al pie del pedraplén existe un camino local que da acceso a los caseríos de la zona.

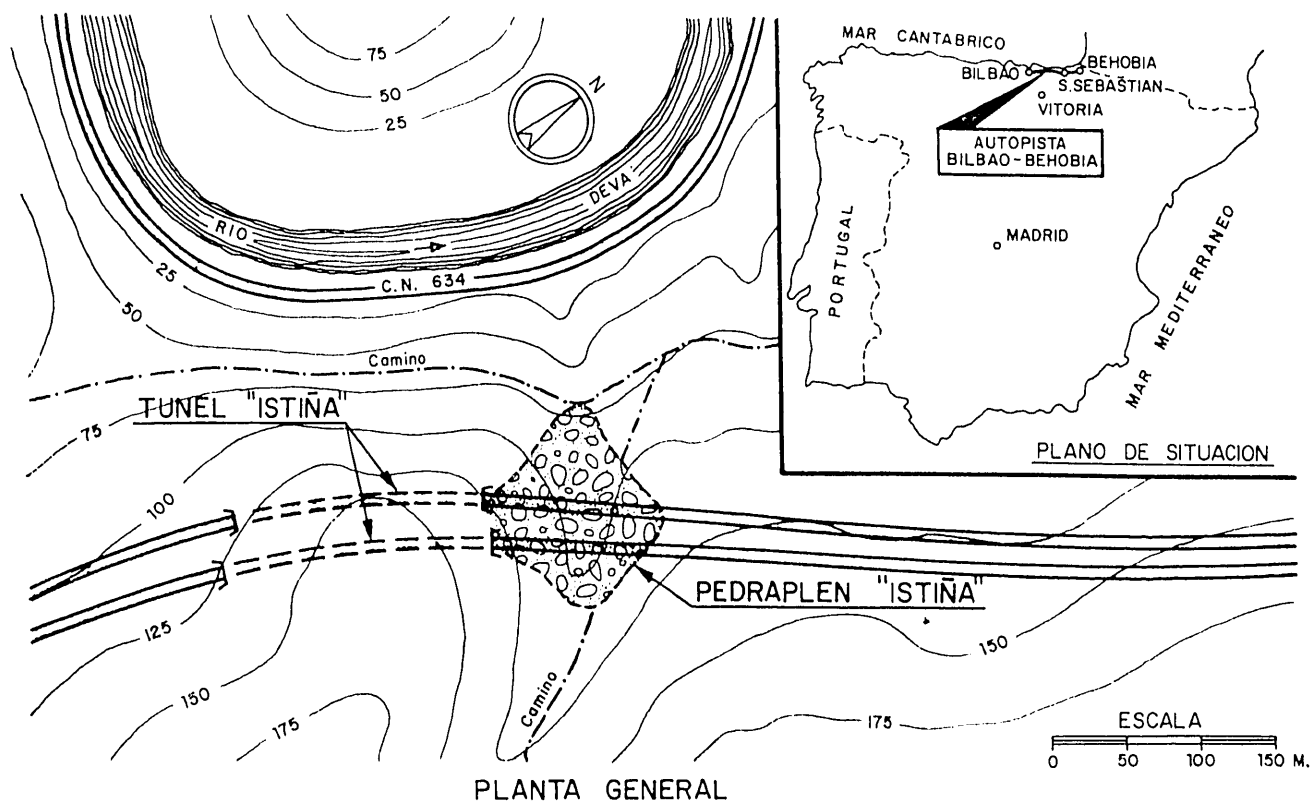


Fig. 1.—Planta general y sección tipo del pedraplén.

En el área de emplazamiento del relleno el terreno presenta, transversalmente a la traza, un cambio de pendiente importante; el cambio se produce, aproximadamente, en la vertical del borde exterior de las calzadas. La pendiente de la zona situada bajo la explanación es de unos 15 a 20 grados, mientras que el terreno

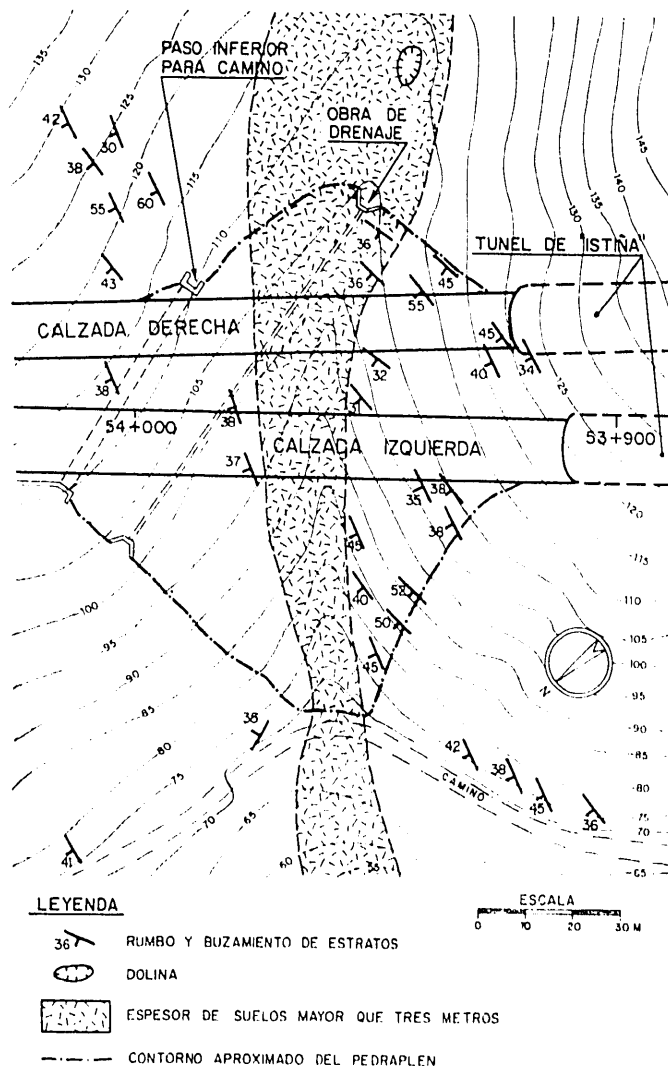


Fig. 2.—Planta geotécnica.

bajo el talud izquierdo del relleno presenta una pendiente del orden o algo superior a los 35 grados.

El recubrimiento de suelos, salvo en zonas localizadas, es reducido, del orden de un metro, y están constituidos por arcilla limosa de origen residual y consistencia firme; a lo largo de la vaguada el espesor de suelos aumenta, llegando a sobrepasar los 3 m. A la derecha del pedraplén existe una zona de calizas karstificadas con espesores de suelo muy variables, pero que pueden superar los 5 m.

El macizo rocoso, en el apoyo del relleno, está constituido por calizas de edad Aptense Inferior, en estratos de 0,5 a 2 m de potencia. Esta caliza está formada por

un 90 a 100 por 100 de carbonato cálcico, y hasta un 10 por 100 de cuarzo, minerales arcillosos y productos orgánicos. La roca sana es de color gris a gris negro, pasando a marrón en la roca meteorizada. La roca presenta una esquistosidad de fractura que da una tendencia a la rotura en forma de lajas; en esta zona la esquistosidad se orienta paralelamente a la estratificación.

El macizo rocoso aparece sano en las laderas de la vaguada y meteorizado, en un espesor de 2 a 3 m, en el centro de la misma. La estructura geológica es muy homogénea, el rumbo medio de la estratificación es Este-Oeste, y su buzamiento, de 40 a 50 grados Norte, por lo que la ladera Suroeste coincide sensiblemente en dirección y pendiente con los planos de estratificación. Estas condiciones geotécnicas del terreno se presentan gráficamente en la figura 2.

No existe circulación superficial de agua por la vaguada, ya que el arroyo desaparece en una cavidad kárstica, situada unos 30 m aguas arriba del pedraplén, y no vuelve a resurgir en la zona ocupada por el relleno; existe, sin embargo, una circulación de agua en pequeña cantidad, a lo largo del contacto suelo-roca, por el fondo de la vaguada.

CRITERIOS DE DISEÑO

Las ventajas de tipo práctico que representaba el movimiento de tierras frente a la realización de una estructura, llevó a considerar la posibilidad de construir un relleno que permitiera salvar la vaguada situada a la salida del túnel de Istiña. La fuerte pendiente del terreno bajo el talud izquierdo, aproximadamente 1 (V) : 1,4 (H), y la necesidad de respetar el camino existente unos 50 m por debajo de la rasante, condicionaban la pendiente del talud izquierdo del relleno a un 1 (V) : 1 (H). Teniendo en cuenta la altura del relleno y la pendiente del talud a realizar, se determinó la necesidad de construir un pedraplén, con roca de buena calidad, extendida y compactada en tongadas y apoyada sobre un cimiento de roca.

Se proyectó construir el relleno sobre roca sana, esto es, eliminando en el área de apoyo todo el espesor de suelos y roca meteorizada; la limpieza tendría por objeto garantizar un contacto roca-pedraplén con una fricción elevada que asegurara la estabilidad del relleno y, además, eliminase la posibilidad de asentos por razones de compresibilidad del cimiento. En el pie del relleno se previó la ejecución de una berma de unos 5 m de anchura, excavada horizontalmente en roca sana, con el fin de facilitar la construcción en dicha zona y añadir una seguridad adicional a esta parte crítica para la estabilidad del conjunto.

Por las condiciones del relleno, se requirió en proyecto una roca de excelente calidad, adecuada para conseguir un pedraplén con buenas características de resistencia e indeformabilidad. Dado que en la zona existían abundantes formaciones de calizas masivas, pertenecientes al Complejo Urganiano, se seleccionó este material para formar el relleno.

La caliza masiva está formada por un 95 a 100 por 100 de carbonato cálcico, y el resto, por minerales accesorios; geológicamente es una roca sedimentaria que pertenece al Complejo Urganiano, siendo de origen esencialmente biológico. Es compacta, resistente y se presenta en bancos o masas potentes de aspecto exterior homogéneo, sin estratificación aparente; es de color gris claro y presenta abun-

dantes recristalizaciones de calcita. Su resistencia a compresión es superior a 1.000 Kg/cm^2 ; se trata, en suma, de una roca con excelentes propiedades de dureza y durabilidad.

De acuerdo con el proyecto, el material debía extraerse con voladuras, y extenderse y compactarse en tongadas de un espesor máximo de un metro. El tamaño máximo del material debía ser tal que ningún bloque proyectara esquinas por encima de la tongada teórica, y la superficie de la tongada fuera suave y adecuada al paso del rodillo compactador.

La compactación debía realizarse efectuando un mínimo de ocho pasadas de rodillo vibrador, con peso estático superior a 10 Tm , al objeto de conseguir una densidad mínima aceptable. Una vez realizada la compactación de la tongada, el material debería presentar una curva granulométrica bien graduada, con menos del 30 por 100 de tamaños inferiores a $2,5 \text{ cm}$ y un 10 por 100 como máximo de material que pasase por el tamiz 200 (ASTM). Para evitar que la falta de compactación en los bordes pudiera afectar a las calzadas, la explanación se diseñó con un sobrecancho de 2 m sobre el valor teórico. En cuanto a la densidad, debía ser la correspondiente a un porcentaje de huecos del 20 por 100, lo que, para el tipo de roca previsto, equivalía a densidades secas de $2,05$ a $2,15 \text{ Tm/m}^3$.

Con objeto de comprobar la estabilidad del diseño se realizaron diversos cálculos de estabilidad, analizando superficies de rotura planas. Para los cálculos, y considerando que el material cumpliría los requisitos del proyecto, se estimó que el ángulo de rozamiento dentro del cuerpo del pedraplén era de 60 grados, y de 35 a 45 para el contacto roca-pedraplén, dependiendo este último valor de si el apoyo era en un plano liso de estratificación o en una superficie cualquiera de roca sana. Los cálculos realizados dieron siempre factores de seguridad iguales o superiores a $1,50$.

Para evitar la necesidad de construir un número elevado de caminos de acceso al relleno, se dio la opción al constructor de realizarlos dentro del propio cuerpo del pedraplén, siempre que el material, la extensión y compactación fueran similares a los requeridos para el propio relleno; estos accesos podían construirse con pendientes de hasta el 15 por 100 y taludes temporales de 45 grados. Al avanzar la construcción, estos caminos quedarían incluidos dentro del relleno general.

En el proyecto se hizo especial hincapié sobre la necesidad de mantener una supervisión muy cuidadosa durante la ejecución del relleno, especialmente en lo relativo al cimiento, calidad del material, compactación y control de asentos, ya que el carácter de novedad que supone el utilizar las técnicas de los grandes pedraplenes en la construcción de autopistas, haría muy difícil entender los problemas que pudiesen ocurrir, y más aún, encontrar formas razonables para solucionarlos, caso de no disponer de datos concretos obtenidos durante la construcción. Se recomendó realizar un control topográfico de asentos en la parte superior del relleno y especial vigilancia de la posible aparición de grietas longitudinales en la coronación del pedraplén.

CONSTRUCCION DEL PEDRAPLEN

La preparación del área de apoyo del pedraplén consistía, según el proyecto, en la limpieza total de suelos y roca meteorizada y también en la excavación de

una plataforma horizontal en roca, en la zona de pie del talud izquierdo del relleno.

A la vista de las condiciones reales del terreno, se consideró posible simplificar la limpieza de los suelos sin reducir la seguridad del relleno. También se estimó que era preciso modificar la berma al pie del relleno, ya que al excavarla se descalzaban los estratos en la ladera SW.

Con objeto de facilitar la construcción, se decidió limpiar los suelos y la roca meteorizada únicamente en la zona de pendiente topográfica fuerte, es decir, bajo la calzada y el talud izquierdo del relleno. Además, en el centro de la vaguada, donde el espesor de suelos y roca meteorizada era considerable, se decidió no limpiar hasta roca sana en aquellas zonas donde la distancia en horizontal desde la superficie del talud al terreno natural fuese igual o mayor que 10 m. En todas las zonas en que no se requería la limpieza hasta roca sana, se consideró suficiente excavar el suelo vegetal y la primera capa de suelos flojos, hasta llegar a un nivel de suelos firmes, aceptable para evitar asentamientos importantes debidos al peso del relleno.

La excavación de la plataforma horizontal se comenzó al pie del relleno, a la altura del camino que daba servicio a los caseríos; esta excavación descalzó los

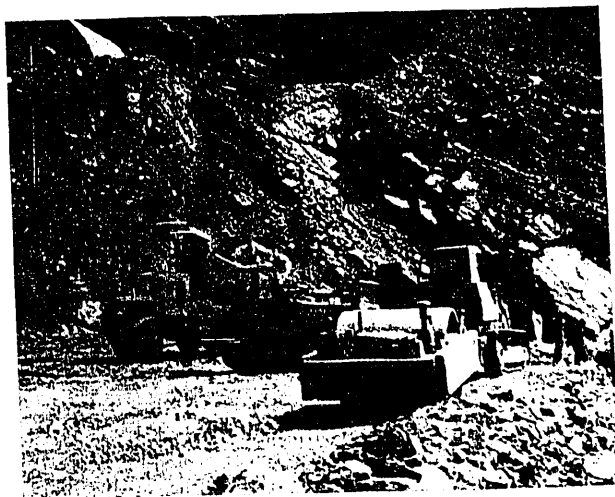


Fig. 3.—Aspecto de las obras. Maquinaria empleada en la construcción.

estratos de roca en la ladera SW, e inmediatamente apareció una grieta a la altura de la rasante de la autopista. Ante el riesgo inminente de una caída de roca que podía llegar con seguridad hasta la carretera nacional, situada unos 100 m por debajo, se decidió construir un contrafuerte temporal de escollera al pie del estrato descalzado, con objeto de tener tiempo para estudiar la solución definitiva del problema. También se situaron estaciones de medida de deformaciones a lo largo de la grieta para poder controlar los movimientos de la roca y prever una caída inmediata. La solución a la que se llegó fue la excavación de la roca movida dentro del área de cimentación; con objeto de evitar nuevos descalces de estratos, se decidió sustituir la berma diseñada en la ladera SW, para el pie del talud izquierdo, por un sobreebanco del pedraplén en aquellas zonas en que la distancia en horizontal entre el borde del talud y el terreno fuese inferior a 3 m.

En la ladera NE, aunque no existía problema de descalce de estratos, la solución de sobredimensionar el relleno resultaba más sencilla que la de excavar la berma. Por esta razón, también se decidió sobredimensionar el relleno en cada tongada, de manera que se permitía una correcta compactación del borde teórico del pedraplén.

La preparación del plano de apoyo del relleno, de acuerdo con estos nuevos criterios de construcción, no ofreció grandes dificultades; la limpieza de los suelos y roca meteorizada se hizo a máquina, y como el espesor no era muy grande, la excavación se iba realizando a medida que progresaba el relleno. En la figura 3 se presenta el aspecto de las obras; puede observarse claramente los estratos que forman el plano de apoyo en la ladera SW.

El material utilizado para la construcción del relleno ha sido, en su mayor parte, caliza masiva procedente de cantera; únicamente en los 15 m superiores situados bajo la calzada derecha, esto es, en las proximidades del talud derecho, se ha utilizado la caliza extraída de los desmontes próximos.

La calidad y granulometría del material utilizado era excelente y no se juzgó necesario realizar ningún ensayo de comprobación, que hubiera supuesto, por otra parte, una interrupción importante en el ritmo de la obra.

El transporte del material desde la cantera al pedraplén se realizó a través del túnel de Istiña. Para la construcción de las primeras tongadas el material fue vertido desde las boquillas del túnel, salvando el desnivel existente mediante dos conos de vertido de 30 y 15 m de altura aproximada. No obstante, la excelente calidad del material se observó una importante segregación en los conos, acumulándose en el pie los bloques mayores, y en la parte superior, los tamaños finos; este fenómeno podría dar lugar a la disminución de calidad en algunas tongadas o a tener que desechar un volumen importante del material transportado. En consecuencia, se suprimió el cono superior, de 30 m de altura, y se prolongó el camino de obra que en algunas zonas alcanzó pendientes del 15 por 100; de este modo, se vertía directamente desde el cono inferior, realizándose acopios en los que el material acumulado representaba un volumen equivalente al de la tongada a construir, y así el cono de vertido era eliminado por completo en la ejecución de cada tongada. Una vez que el pedraplén alcanzó la cota más baja del camino de obra, el material fue volcado directamente en el frente de arranque de cada tongada; el camino se integraba en el cuerpo del relleno a medida que éste era construido, siguiendo el método recomendado en proyecto.

El espesor máximo de tongada, antes de la compactación, ha sido de un metro, y la granulometría del material utilizado ha sido tal que el tamaño máximo de bloque quedaba embebido en la tongada, no sobresaliendo por encima de su superficie al compactar; este límite del tamaño máximo facilitó además las operaciones de transporte y extendido.

La extensión del material se realizó con un tractor FIAT y una pala Cat-995. Debido a la reducida superficie de la tongada y, a la falta de acceso, el tractor y la pala, así como el rodillo vibrador, permanecieron siempre en la tongada, subiendo a medida que se construía el relleno. Esta maquinaria realizó también todas las operaciones de limpieza del plano de apoyo.



Fig. 4.—Método de ejecución del relleno en el borde exterior de cada tongada.

La compactación se hizo con un rodillo vibrador de 12 Tm de peso estático, efectuando ocho pasadas a una velocidad de unos 4 Km/h., número de pasadas doble del que sería requerido en circunstancias normales. No se compactaba el borde del talud, en una franja de una anchura de un metro y medio, con objeto de evitar que se desprendieran bloques desde la superficie de la tongada, que podrían llegar rodando hasta la carretera situada debajo del pedraplén.

Con objeto de conseguir el talud de proyecto, el método empleado por el constructor consistió en situar próximo al borde del talud, en cada tongada, grandes



Fig. 5.—Aspecto final de la superficie del talud.

INSTRUMENTACION DEL PEDRAPLEN

- *Células de asientos*: Estos instrumentos permiten determinar diferencias de cotas, basados en el principio de los vasos comunicantes. En el punto del

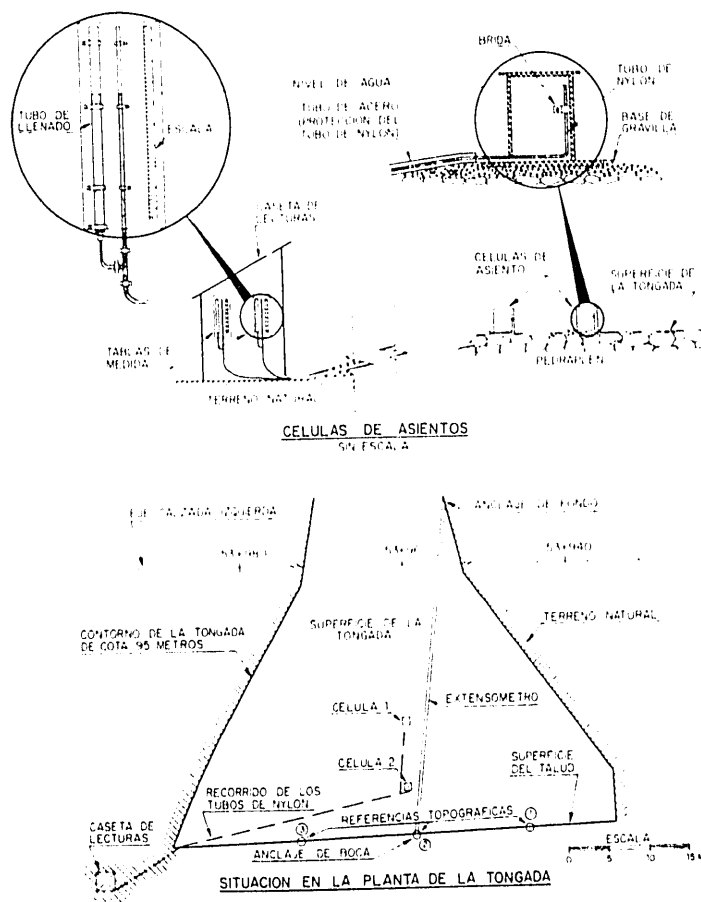


Fig. 6.—Esquema de instalación.

relleno, cuyas variaciones de cota se desea medir, se coloca un recipiente de acero suficientemente robusto que sirve de protección a un tubo de nilón, fijado en su interior mediante una brida que mantiene su extremo en posición vertical; el otro extremo del tubo se saca al exterior del relleno, fijándolo en una tabla de medida, paralelamente a una regla graduada. En la figura 6 se muestra un croquis de las células de asientos, y de su situación dentro del cuerpo del relleno.

- *Extensómetro*: El método de observación de deformaciones en un talud mediante el extensómetro se basa en el control de las variaciones de medida ocurridas entre un punto de referencia fijo y otro punto de referencia superficial afectado por los desplazamientos. Para la instalación de este sistema el punto de referencia fijo se consiguió anclando en la roca sana de la ladera; en la superficie del talud se colocó el punto de referencia exterior. La unión entre ambos puntos se hizo mediante un cable de acero delgado al que se protegió con un tubo de hierro, de unos 10 cm de diámetro, a lo largo de toda la superficie de la tongada.
- *Hitos de hormigón*: Los hitos instalados sobre la coronación del pedraplén consistieron en redondos hincados un metro o metro y medio en el relleno y protegidos por hormigón en su parte superior para que no quedasen cubiertos al extender la subbase; en la parte superior del redondo se situó un clavo de referencia para efectuar las nivelaciones por procedimientos topográficos. En la coronación del relleno se instalaron cuatro hitos, tres en el borde izquierdo y uno en el derecho; en la superficie del talud también se instalaron tres clavos.

Tanto las células de asientos como el extensómetro se colocaron el día 5 de julio de 1973, sobre la tongada de cota superior 95 m; la instalación se realizó en la vertical del perfil transversal 53.960 (calzada izquierda), que es donde el pedraplén alcanza mayor altura. La célula I se situó a 17 m del borde del talud; la célula II, a 10 m. El espesor del relleno existente por debajo de las células era de 8 y 11 m, respectivamente.

Los hitos en el talud se instalaron con fecha 10 de julio, a la misma cota que el extensómetro y en los perfiles transversales 53.945, 53.960 y 53.975 (calzada izquierda). Los hitos de hormigón en la coronación del relleno se colocaron el día 5 de septiembre, después de haber echado la última tongada y antes de extender la subbase; se situaron en los mismos perfiles que los hitos a medio talud.

COMPORTAMIENTO DEL PEDRAPLEN

Las medidas efectuadas, tanto en las células de asientos y extensómetro como en los hitos de hormigón, indican que el comportamiento del relleno es satisfactorio. Los asientos y las deformaciones del talud son poco importantes, y se han producido, casi en su totalidad, durante el período de construcción.

El buen funcionamiento de la monitorización se deduce de la sensible coincidencia de los resultados obtenidos por los diferentes métodos de control, así como por la ausencia de anomalías en las lecturas realizadas periódicamente en cada uno de ellos.

Después de un período de cinco meses el asiento máximo registrado mediante las células ha sido de 53 mm en la célula I y de 35 mm en la célula II; la deformación del talud, en el mismo período de tiempo, ha sido, según el extensómetro, de 38 mm, y según el control topográfico, de 20 mm.

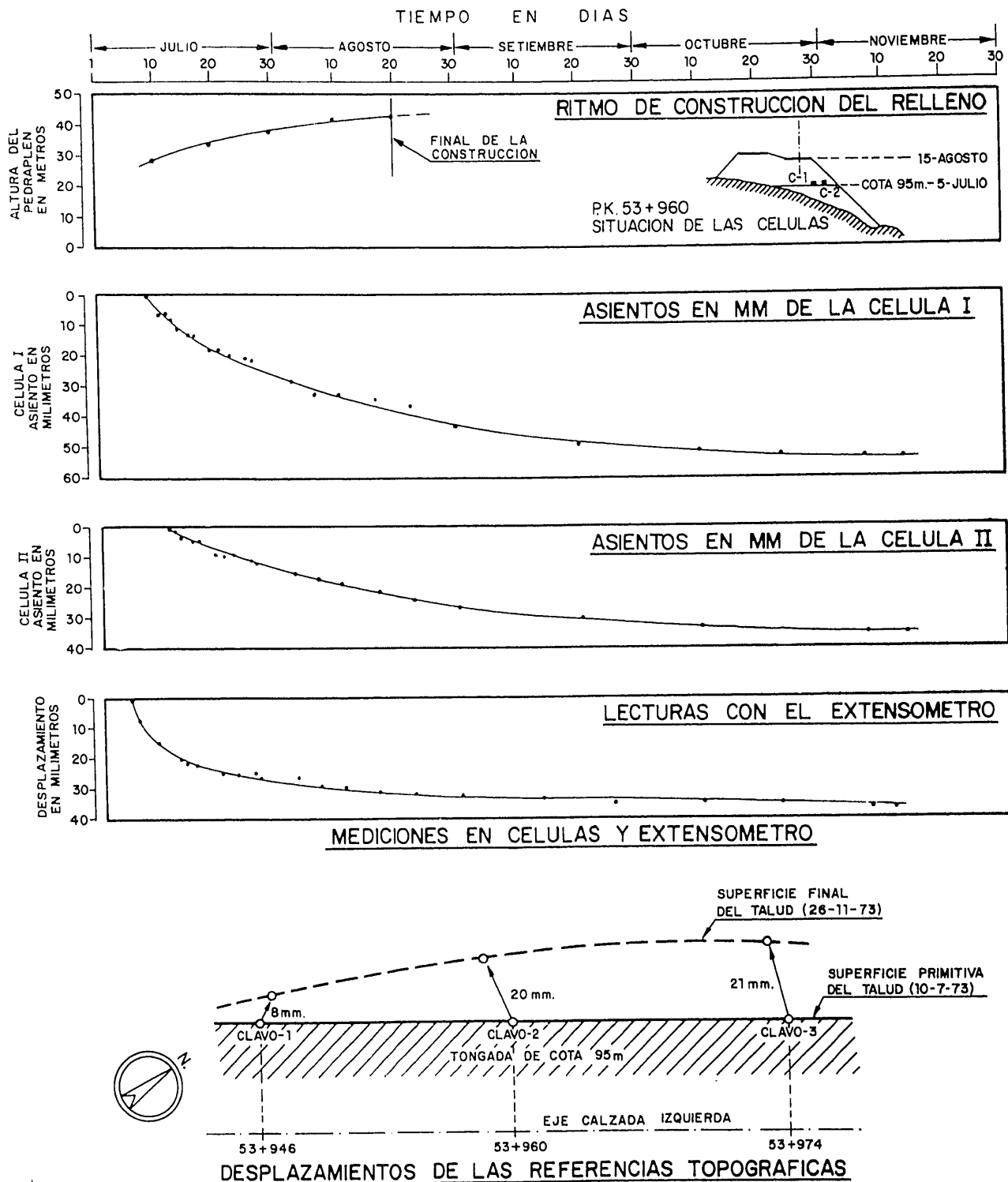


Fig. 7.—Control de deformaciones.

En la figura 7, control de asientos, se presenta el gráfico asientos-tiempos del pedraplén en función de la sobrecarga que se ha ido colocando sobre la tongada en la que se situaron las células. Con las lecturas de asientos disponibles se ha calculado el módulo de deformación del pedraplén durante la construcción, que varía entre 800 y 1.100 Kg/cm².

El valor de los asientos después de la construcción oscila entre 7 y 14 mm, de acuerdo con las lecturas realizadas en los hitos de hormigón o en las células de asientos respectivamente, y en ambos casos se han producido totalmente en los dos meses siguientes a la terminación del relleno. Estas cifras representan, respectivamente, el 0,3 y el 0,6 por 100 de la altura del relleno en los puntos de medida.

Las medidas, mediante el extensómetro, de la deformación del talud se presentan gráficamente en la figura 7, el máximo valor de deformación registrado por este sistema es de 38 mm, que se produjeron, prácticamente en su totalidad, durante el plazo de ejecución. La deformación horizontal del talud, según el control topográfico del clavo situado sobre la cabeza del extensómetro, ha sido de 20 mm.

El orden de magnitud de las deformaciones supone que tanto el diseño de proyecto como la propia ejecución del pedraplén han sido correctos; así, los pequeños asientos ocurridos y la rapidez de los mismos indican una buena preparación del cimientado y un excelente encaje de bloques, consecuencia de haber utilizado una granulometría y un sistema de extendido y compactación adecuados. Las pequeñas deformaciones del talud, señal de la estabilidad del conjunto, son debidas fundamentalmente a la calidad del material empleado, que da lugar a un elevado ángulo de rozamiento, tanto en el propio pedraplén como en el contacto pedraplén-cimientado.

En consecuencia, la aplicación de los criterios de proyecto ha permitido la ejecución de un relleno estable y con un elevado módulo de deformación; no obstante, es necesario reconocer que han surgido divergencias entre la previsión y la construcción, que han podido resolverse adecuadamente mediante un control de las obras y un buen entendimiento entre los responsables del diseño y de la ejecución del relleno.

AGRADECIMIENTOS

En la realización de este pedraplén ha sido básica la colaboración en proyecto y visitas a obra del Sr. Barry Cooke, autoridad de reconocido prestigio internacional en el campo de los rellenos de escollera.

Los autores agradecen a la dirección de EUROPISTAS C.E.S.A. el permiso para la publicación del presente artículo y la eficaz colaboración por parte de FERROVIAL, S. A. en las personas de F. Velasco y J. M. Iturriaga, ejecutores directos de la obra.