

GEOLOGIA APLICADA A LAS OBRAS LINEALES**OBRAS VIARIAS. CARRETERAS. AUTOPISTAS Y FERROCARRILES**

El texto que se muestra a continuación corresponde a un tema de la asignatura de Geología Aplicada a las Obras Públicas que el autor daba en tercer curso de Ingenieros de Caminos de la Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM de Madrid.

Fue redactado en 1999 por lo que es posible que algunos datos debieran actualizarse hoy dada la evolución habida en las obras de Autopistas y Línea de Alta Velocidad Ferroviaria, pero se ha preferido mantener el formato original.

El hecho de que fuera redactado para alumnos que estaban a mitad de su carrera y con conocimientos elementales de las obras, justifica que se abordara de una manera generalista y de que, a pie de página, se incluyan explicaciones de algunos términos usados en el texto.

No obstante, creemos que conceptualmente puede ofrecer una visión ilustrativa del tema.

GEOLOGÍA APLICADA A LAS OBRAS LINEALES.
OBRAS VIARIAS. CARRETERAS, AUTOPISTAS Y FERROCARRILES

1.- INTRODUCCIÓN

Las carreteras son obras diseñadas para el transporte de mercancías y pasajeros por medio de vehículos que se apoyan en ruedas con neumáticos.

Para ello deben de tener las siguientes propiedades:

- Resistir sin apenas deformación a lo largo de su vida útil la carga que las ruedas les transmiten (2 a 10 k/cm²)
- Ofrecer una superficie de rodadura lo suficientemente regular y uniforme para permitir una conducción cómoda y que no dañe o moleste a lo que se transporta.
- Ofrecer una textura superficial lo suficientemente rugosa para que sin ser incómoda, permita una conducción segura en determinadas condiciones ambientales y de velocidad.
- Tener un trazado cuya geometría en planta y alzado permita que un tráfico de una determinada intensidad pueda mantener cierta velocidad en condiciones de seguridad.
- Tener una sección transversal de anchura y peralte adecuados para complementar los requerimientos anteriores: velocidad, capacidad de tráfico, seguridad, durabilidad...

Estos requerimientos se consiguen:

- Con unas adecuadas geometrías o formas (pendientes, curvaturas, peraltes, transiciones, anchuras, espesores de capas).
- Con la construcción de la obra con los materiales adecuados y dispuestos de la forma correcta.
- Construyendo obras auxiliares que permitan o ayuden a que la obra se mantenga en las condiciones previstas de servicio durante de la vida útil de la obra. La mayor parte de estas obras están relacionadas con el drenaje interno o externo.

Las carreteras se proyectan para una determinada intensidad de tráfico resultante de la demanda existente o prevista y para una velocidad específica. De aquí surge la necesidad de un determinado número de carriles en cada sentido, de que sean calzadas separadas, surge una anchura de calzada, unos radios de curvatura y pendientes etc...No siempre todo los requerimientos son compatibles con la orografía del territorio en que se desarrolla esta vía-, es fácil imaginar la dificultad de construir una carretera de calzadas separadas, para una intensidad de tráfico muy alta, con una velocidad específica de 120 km/h, en una zona muy montañosa. No es que sea imposible sino que su coste resultaría elevadísimo.

Conviene distinguir entre vida de la carretera y período al cabo del cual deben llevarse acabo operaciones de refuerzo de firme importantes. La vida de estas obras debe ser muy alta y proyectarse previendo la evolución del tráfico. El período o vida del firme puede ser mucho más corto. Cuando se trata de intensidades de tráfico bajas con vehículos ligeros, pueden conseguirse carreteras con firmes ciertamente longevos si se cuidan con un mínimo mantenimiento aunque es probable que para éllo tengan que sobredimensionarse en cuanto a la calidad de los materiales. Pero cuando se trata de intensidades de tráfico altas y con vehículos pesados, una vida razonable del firme de la carretera puede ser del orden de 7 a 8 años. Transcurrido ese tiempo pueden ser necesarias reparaciones o refuerzos de importancia.

Desgraciadamente, mucho antes que se quede viejo el firme de una carretera, no es infrecuente que aparezcan ciertos problemas que lleguen a inutilizar parcial o totalmente algún tramo de carretera. Deslizamientos de taludes de desmonte o de terraplenes, asentamientos de estos terraplenes por consolidación del propio relleno o del cimientado sobre los que se apoyan, hinchamientos de la plataformas etc... son algunos de los problemas que, si no han sido previstos, pueden ser la causa de dicha inutilización.

Y en estos problemas es donde la geología juega un papel importante si no el que más pues las características, comportamiento y disposición de los diferentes terrenos son la causa primera de aquellos problemas; y aún más, en el deterioro del firme, la calidad de los materiales empleados es también pieza importante.

Los ferrocarriles, en su infraestructura, apenas se diferencian de las carreteras. Las diferencias fundamentales están en:

- Las ruedas de los vagones se apoyan en carriles que, a su vez, lo hacen en traviesas que descansan en un balasto similar a las bases granulares de las carreteras.
- Las pendientes longitudinales están limitadas generalmente a valores más reducidos que en las carreteras por problemas de tracción de las locomotoras. Pendientes máximas del 2 por ciento son habituales.
- La rasante de la vía tiene que ser mucho más regular y no admite las deformaciones que el automóvil en la práctica permite. La seguridad es más restrictiva.

2.- ASPECTOS O ELEMENTOS DE UNA OBRA VIARIA DONDE EL TERRENO JUEGA UN PAPEL IMPORTANTE.

2.1.- MOVIMIENTO DE TIERRAS

Apenas que la orografía sea ligeramente ondulada, las carreteras y ferrocarriles exigen generalmente excavaciones y terraplenados para conseguir una planta y un perfil determinado. Cuando los materiales excavados son válidos para construir los rellenos, se intenta encajar un trazado que compense "las tierras", es decir que el volumen de desmonte sea similar al de los rellenos. Teóricamente basta con que sea algo menor pues el esponjamiento que sufren al excavar no siempre se consigue recuperar al ser compactados en los terraplenes.

En terrenos llanos o suavemente ondulados puede que los desmontes prácticamente no existan y que la carretera o ferrocarril sea una sucesión de pequeños terraplenes. Incluso en este caso son necesarias excavaciones para extraer los materiales con que construir los terraplenes.

Llamamos movimiento de "tierras" ¹ a las operaciones de excavación en **desmonte** o en zonas de "préstamo", a su transporte hasta las zonas de **terraplén** o vertederos, así como a su extendido y compactación

2.1.1. DESMONTES

En los desmontes los aspectos críticos son:

¹ Empleamos el término de "tierras" de una forma genérica englobando en él tanto a los suelos de consistencia terrosa como a las rocas.

- Talud estable a dejar en la excavación, durante las obras y en la fase de servicio.
- Estabilidad del terreno por encima y más allá de la coronación del desmonte.
- Excavabilidad, técnicas y maquinaria necesaria para su excavación
- Aprovechamiento de los productos de la excavación.
- Alteración de los niveles acuíferos producidos por la excavación.
- Estabilidad de la plataforma cara a resistencia y deformabilidad

Son formaciones inestables en un desmonte:

Los suelos arcillosos, plásticos y húmedos - o susceptibles de humedecerse - que ofrecen una baja resistencia al corte y exigen taludes muy suaves de excavación. Existen arcillas miocenas en la depresión del Guadalquivir que son inestables hasta con taludes de excavación de 15 a 20 °. No es fácil combatirlos y la mayor parte de las medidas estabilizadoras, amén de taludes suaves, van encaminadas a evitar la saturación con drenajes superficiales y profundos.

Las arcosas típicas del Weald Cretácico por ejemplo, la alternancia de capas arcillosas con arenosas del Paleozoico (???) o de otros pisos, generan situaciones de inestabilidad al saturarse las arcillas con el agua aportada por los niveles arenosos que las enmarcan.

Los suelos limosos secos y arenas limpias, susceptibles de erosionarse con facilidad. La inestabilidad asociada no corresponde a una rotura global sino a una degradación progresiva de la superficie del talud que exige un mantenimiento de cunetas importante. El tratamiento para evitar la erosión suele residir en revestimiento de los taludes con plantaciones, hidrosembras, o revestimientos artificiales.

Son formaciones tradicionalmente inestables, los derrubios de ladera y pies de monte cuando están poco cementados por carbonatos y la resistencia sólo se debe a la fricción, algunas rañas pliocuaternarias.

Las rocas marcadamente estratificadas o con discontinuidades de otra índole (diaclasas, pizarrosidad) en las que la excavación se hace paralelamente a la discontinuidad. Cuando la resistencia al corte de la discontinuidad medida en términos de ángulo de rozamiento sea menor que el buzamiento, y el buzamiento sea hacia la excavación, ésta necesitará taludes más suaves que el del buzamiento. Cuando el buzamiento es muy suave soluciones de anclajes cosiendo las capas pueden ser válidas. Cuando los buzamientos son medianos o altos, si no se quiere tender el talud las soluciones de anclajes obligan a unas fuerzas de anclaje muy altas. Cuando las capas buzan en contra, hacia el interior del macizo rocoso, existen algunas situaciones, en general para buzamientos de 50 a 70 °, en el que el riesgo de inestabilidad se traduce en un cabeceo o vuelco de las capas. Pizarras, esquistos, calizas margosas o margas tableadas, formaciones tipo flysch con alternancia de capas areniscosas o calcáreas con capas pelíticas o arcillosas, dan lugar a estas situaciones.

2.1.2.- TERRAPLENES

En los terraplenes, los aspectos críticos son:

- Estabilidad del cimiento bajo el peso del terraplén. Resistencia y deformabilidad.
- Talud estable del terraplén para los materiales utilizables.
- Compresibilidad a largo plazo del propio terraplén.
- Alteración del drenaje superficial del terreno de apoyo. Obras de desagüe.

- Estabilidad de la plataforma de coronación del terraplén. Su resistencia cara a soportar las acciones que le transmiten las cargas de tráfico.
- Técnicas y maquinaria de construcción del terraplén con los materiales previstos para tal fin.

Los suelos de marismas o de estuarios de ríos, o de recientes depósitos en las vegas de los ríos, o en zonas lagunares de deficiente drenaje, dan lugar muy frecuentemente a problemas de estabilidad bajo el peso de un terraplén. La alta compresibilidad de estos suelos se traduce en asientos que se manifiestan en la superficie del terraplén y, en la mayor parte de los casos, a lo largo de un período muy largo. En las marismas del estuario del Júcar, con depósitos de turbas y arcillas orgánicas se ha medido asientos de más de un metro a lo largo de 20 años. La Autopista del Mediterráneo se ha proyectado y construido para convivir con estos asientos habiéndose registrado descensos de varios decímetros en los últimos 15 años.

Cuando el terraplén se apoya en laderas inclinadas, la presencia de un suelo eluvial arcilloso y saturado, o de un suelo de baja densidad ocasiona también estos problemas aunque aquí la influencia de la pendiente de la ladera puede ser la causa más importante del deslizamiento. En las ya mencionadas arcillas del Guadalquivir, numerosos terraplenes a media ladera han deslizado o han necesitado de obras importantes de estabilización o de drenaje para mejorar la resistencia al corte del suelo de apoyo.

Cuando la obra se desarrolla en una media ladera, los terraplenes van cortando sucesivas vaguadas. Aunque se construyen las obras de desagüe de los cursos de agua interceptados no debe despreciarse el agua subválvea cuya presencia está favorecida por las formas del terreno. Los terraplenes se apoyan entonces en terrenos con agua a escasa profundidad e inclinados generando situaciones de inestabilidad.

El talud de los terraplenes, y por tanto la estabilidad propia del terraplén, depende en gran medida también de la calidad de los materiales que lo forman. Suelos arcillosos y finos exigen taludes suaves del orden de 2H:1V a 3H:1V; Suelos granulares y rellenos de tipo pedraplén pueden llevar taludes más pinos de 3H:2V hasta próximos a 1:1. En la Autopista Bilbao-Behobia se construyeron grandes rellenos con areniscas y argilitas y taludes de 1:1.

2.2.- FIRMES Y BALASTOS

Se entiende como firme de una carretera el conjunto de capas que descansando sobre el terraplén consiguen la estructura necesaria para soportar el tráfico previsto. Comprenden, de arriba hacia abajo las capas siguientes:

- Pavimento, de aglomerado asfáltico o hidráulico (de hormigón). Es frecuente el uso de las denominaciones firme negro o blanco. En el caso de aglomerado asfáltico suelen disponerse varias capas: de rodadura, intermedia y de base.
- Bases granulares, normalmente compuestas de áridos de machaqueo.
- Subbases granulares, de áridos de machaqueo o naturales. Éstas descansan sobre la capa de coronación o explanada con que se finaliza el terraplén o los fondos de desmonte.

Un firme de hormigón es mucho más rígido que uno asfáltico por lo que resiste peor las deformaciones que se puedan producir bajo él. Por lo tanto cuando la obra discorra por terrenos blandos y deformables no será conveniente su empleo. Tampoco lo es cuando se proyecten terraplenes muy altos y que se vayan a construir con materiales locales arcillosos o pedraplenes con

rocas blandas (margas, argilitas, arcosas, pizarras arcillosas, yesos) baja en los que son de esperar grandes asentamientos por compresibilidad propia del terraplén.

Las subbases granulares, a veces, pueden estar formadas por áridos naturales provenientes de depósitos aluviales del lecho de los ríos o de sus terrazas fluviales, pudiendo estar algunas de ellas a considerable distancia de los cursos de agua actuales. Aunque es menos frecuente, también pueden encontrarse áridos en depósitos de pie de monte y coluviones si bien suelen estar acompañados de arenas y finos arcillosos o limosos que obligan a un cribado y selección previa a su utilización.

Las bases granulares suelen formarse con áridos de machaqueo a los que se les exige un mínimo de caras de fractura en cada partícula. Se les exige mayor resistencia y dureza² que a las subbases.

Los áridos que forma las capas de aglomerado asfáltico deben tener aún mayor resistencia y, sobre todo, dureza que las bases y subbases. Se les exige además que liguen bien con los asfaltos que les aglomeran. A los áridos para capas de rodadura se les exige una durabilidad temporal que garantice la rugosidad prevista³

Los áridos de las capas de firme se buscan entre las rocas de gran dureza como las ofitas, cuarcitas, basaltos, andesitas o algunas calizas. Para bases y subbases, además de los anteriores, suelen ser aceptables áridos resistentes y algo menos duros, como los calizos, areniscosos y graníticos.

En las vías férreas las traviesas se apoyan y quedan envueltas por el Balasto que debe estar formado por rocas resistentes y duras, incluso más que en el caso de las dedicadas áridos de firmes de carreteras ya que se ven sometidas a cargas dinámicas más fuertes. Cuarcitas, ofitas, basaltos son áridos comúnmente utilizados para balasto.

Bajo el balasto se extiende lo que se denomina subbalasto, muy similar a las bases granulares de los firmes de carreteras.

2.3.- DRENAJE

Por una parte, comprende el conjunto de tubos, marcos, tajeas, pontones e, incluso, grandes puentes que se construyen para conseguir que los cursos de agua atravesados continúen al otro lado de la obra lineal.

Por otra parte, bajo el epígrafe de drenaje de una carretera o ferrocarril también se entiende el conjunto de obras u elementos que facilitan la evacuación del agua de lluvia que cae sobre las calzadas o sobre la plataforma de la vía y sobre las superficies de los taludes de desmonte y terraplenes. En este caso están formadas por:

² Para medir la dureza de los áridos destinados a las capas de los firmes se utiliza el ensayo de Desgaste Los Angeles que mide la reducción de tamaño de los áridos al golpearse, tanto entre sí como con unas bolas de acero, en el interior de un recipiente parecido a una hormigonera al cabo de un número determinado de giros.

³ El Coeficiente de Pulido Acelerado (CPA) es el parámetro que mide esta durabilidad.

- Cunetas de guarda en la coronación de los desmontes para recoger y encauzar el agua que corre por las laderas y que caería sobre los taludes de desmonte. El problema es más grave en los desmontes en suelos que en roca.
- Cunetas de pie de desmonte, de pie de terraplén o al lado de la calzada o de la vía férrea.
- Drenes que, en forma de tubos o zanjas, corren bajo o junto a las cunetas anteriores. Recogen el agua infiltrada a través del firme de las carreteras o por sus juntas, y mucho más en el caso de los balastos de ferrocarril, y que corre por las bases y subbases granulares con pendiente hacia dichos drenajes.

Uno de los objetivos primordiales de estos drenajes es evitar que el agua sature los materiales que forman parte de las capas que soportan directamente las cargas de tráfico ya que podrían perder su resistencia.

También hay que mencionar las obras o elementos que consiguen rebajar el nivel freático en los desmontes, bajo los terraplenes o bajo las capas del firme o del balasto. Como ya se ha mencionado antes, y en los terraplenes se ha insistido, la presencia del agua es una de las más frecuentes causas de inestabilidades y desórdenes en las obras viarias. En los desmontes que interceptan un terreno saturado, la presión del agua contenida en los poros (que vendrá marcada por el nivel piezométrico) disminuye la presión efectiva entre las partículas con lo que la resistencia por fricción es menor y la estabilidad al deslizamiento puede verse comprometida. Con la perforación de drenes⁴ desde la superficie del talud podemos "drenar" el terreno y hacer descender el nivel piezométrico y, por tanto, aumentar las presiones efectivas entre partículas y las fuerzas de rozamiento.

También se construyen zanjas drenantes (reciben el nombre de drenes franceses) al pie de los desmontes en estos terrenos saturados para rebajar el nivel piezométrico bajo las calzadas plataformas de vía e impedir que el agua se infiltre a las capas de firme o del balasto desde el interior de su cimiento.

2.4.- OBRAS DE FÁBRICA O ESTRUCTURAS.

Bajo este epígrafe englobamos las obras construidas normalmente de hormigón en masa o armado y que permiten reponer caminos o carreteras atravesados a distinto nivel o salvar grandes vaguadas y cursos de agua. En ellas la geología entra en juego en lo relativo a las cimentaciones de pilas y estribos de dichas estructuras. Las cimentaciones deben proyectarse para que el terreno bajo sus acciones resista sin romperse ni sin deformarse excesivamente. Estas deformaciones se transmitirían por las pilas al tablero y, en función de su hiperestatismo, serían admisibles o no. Si se trata de un puente con vanos construidos con vigas apoyadas, es decir isostático, los asentamientos admisibles son mayores que en el caso de un puente con tablero continuo, es decir hiperestático. En terrenos resistentes y poco deformables tienen sentido cimentaciones directas, en superficie, y puentes de tablero continuo. En terrenos compresibles los puentes deberían ser de vanos independientes y en caso contrario, serían necesarias cimentaciones especiales (profundas en general) que reduzcan las cargas o que transmitan a terrenos menos deformables.

⁴ Los drenes consisten normalmente en taladros perforados, de 5 a 10 cm de diámetro y una longitud comparable a la altura del desmonte. En ellos se introduce una tubería ranurada a veces envuelta en una lámina geotextil similar a un fieltro.

2.5.- TÚNELES

Es la obra en la que la geología es el aspecto fundamental hasta el punto de que, en el proyecto de un túnel, el estudio geológico ocupa más de la mitad de su contenido. Una síntesis de los aspectos que deben estudiarse es la siguiente:

- Excavabilidad. Técnicas y equipos de arranque del material.
- Estabilidad de las paredes (hastiales) y del frente en las longitudes excavadas. Necesidad de colocar un determinado sostenimiento primario o entibación.
- Necesidad de construir un revestimiento definitivo, resistente o no.
- Presencia de agua durante la construcción y durante la explotación del túnel.
- Posibilidad de que aparezcan puntos o tramos de peor comportamiento, tales como fallas o zonas muy tectonizadas, con mayor presencia de agua, etc...
- Posibilidad de que aparezcan deformaciones en el entorno, sobre todo en la superficie del terreno en túneles poco profundos o en las boquillas.
- Problemas de comienzo del túnel en las bocas en terrenos más decomprimidos o con recubrimientos tales como pies de monte, derrubios de ladera, coluviones etc..

La excavabilidad de los terrenos está ligada a su resistencia y a su fracturación. Son excavables con medios mecánicos de baja energía los suelos y las rocas muy fracturadas aunque tengan una alta resistencia; mientras que se necesitarán explosivos en las rocas tenaces y masivas.

La estabilidad de la sección excavada en suelos depende de su resistencia a compresión y tracción medida por su cohesión y ángulo de rozamiento. La estabilidad de la excavación en macizos rocosos más que de la resistencia de la roca matriz, depende de la resistencia al corte de las juntas que compartimentan el macizo y de la abundancia y disposición de estas juntas.

Tanto en suelos como en rocas, debe tenerse en cuenta también su módulo de deformación o de elasticidad pues aunque la excavación se mantenga estable es posible que la deformación de las paredes sea excesiva para la finalidad de la obra.

Cuando se prevea que la sección excavada no va a ser estable o va a tener unas deformaciones inadmisibles, se coloca una entibación o sostenimiento primario consistente en alguno o alguna combinación de **bulones⁵**, **cerchas metálicas⁶**, **gunita⁷**, **hormigón in situ o prefabricado** etc...

⁵ Un bulón es una barra o tubo, normalmente de acero, que se coloca en una perforación previa; parte de su longitud se adhiere a las paredes de la perforación mediante una inyección de cemento o resina. En la punta que sobresale de las paredes se coloca una placa que es apretada contra el terreno mediante una tuerca que enrosca en el extremo mecanizado de la barra. De esta forma se sujetan bloques inestables o se consigue que las paredes del túnel recién excavado estén en un mejor estado de compresión.

⁶ Se entiende por cercha metálica un perfil de acero con sección similar a una U o, incluso, perfiles típicos en doble T, que previamente se conforman según la sección a entibar y que se divide en tres o más partes para facilitar su colocación y apriete contra el terreno. En ocasiones, entre cercha y cercha se colocan tablas, placas o barras que transmiten los empujes a los perfiles.

⁷ El término "gunita" se aplica a un hormigón o mortero proyectado contra las paredes, techo o solera del túnel con aditivos que facilitan su agarre a la superficie tratada y aceleran su fraguado. Cada capa colocada no suele superar los 7-8 cm de espesor. Su resistencia es similar a la de un mortero u hormigón convencional.

La presencia de agua durante la excavación del túnel además de ser una de las mayores causas de la merma en la resistencia del terreno constituye intrínsecamente una dificultad para los equipos humanos y materiales. Si su aparición está prevista y con caudales conocidos se puede achicar con los medios de bombeo necesarios. El problema puede ser más grave si el agua irrumpe bruscamente o con caudales no previstos que obliguen a parar la construcción. Los túneles en los que se prevé la aparición de agua deben ser proyectados con un perfil longitudinal que permita drenar el agua por gravedad hacia las bocas de entrada por donde se ha atacado la excavación. En los túneles hidráulicos a presión suele ser sencillo conseguir este perfil longitudinal en pendiente y, mejor, a dos aguas. En túneles viarios y en canales (agua en lámina libre) la pendiente del túnel puede venir impuesta por condicionantes funcionales por lo que deben preverse las labores de achique para cuando se ataque el túnel a favor de la pendiente. Los túneles en rocas tales como las endógenas y algunas volcánicas en general (granitos, basaltos, andesitas etc), las sedimentarias arcillosas (arcillas, margas), las metamórficas tales como las pizarras, esquistos, gneises, son rocas bastante impermeables que si no están muy fracturadas dan pocos problemas de agua. El agua en los túneles excavados en estas formaciones suele asociarse a la presencia de fallas o de zonas muy tectonizadas. Si las rocas son arcillosas, pizarrosas o esquistosas, el milonito de falla o la alteración de la roca en las zonas fracturadas puede dar lugar a una peor calidad de terreno que dificulte el avance del túnel, más por la necesidad de un sostenimiento denso que por la dificultad de la propia excavación. Las alternancias de rocas permeables con las impermeables en estructuras geológicas favorables (sinclinales) son causa de la formación de acuíferos que confinan agua y pueden afectar a la construcción. Se conocen muchos taponazos de agua que se han producido cuando avanzando por el flanco arcilloso o margoso de un sinclinal en sentido del eje, ha aparecido una capa muy permeable calcárea ocupando el núcleo del pliegue. En las arcosas, arenas y areniscas arcillosas típicas del albense, del Weald e incluso, de formaciones terciarias, es probable la existencia de agua confinada en las capas más arenosas. El agua puede llegar a saturar las arcillas que la confinan y cuando se descomprime al aproximarse el frente se crean situaciones de inestabilidad, que se ven agravadas cuando aparecen zonas falladas. El túnel del Talave, en el trasvase Tajo-Segura, fue testigo de accidentes de este tipo, alguno muy importante que costó vidas humanas y daños materiales cuantiosos; el cruce de la falla de La Gloria fue uno de estos casos.

Como se puede ver, la presencia de fallas o zonas muy diaclasadas que minoren la resistencia del macizo rocoso, constituye uno de los problemas que condicionan la construcción de un túnel, tanto más en los casos que afecten a macizos rocosos de menor resistencia y cuando es posible la presencia de agua. Por ello es vital la identificación de estas zonas tectonizadas en los reconocimientos de campo, de visu, con sondeos mecánicos o geofísicos, y con la interpretación fotogeológica.

Las boquillas son puntos conflictivos pues en ellas ocurre que la roca está más decomprimida, más meteorizada, con las juntas más abiertas y, frecuentemente, existen recubrimiento de coluviones, derrubios y pies de monte, todo ello de peor comportamiento que la roca en el interior. La definición del punto donde comienza el túnel propiamente y se acaba el desmonte de acceso es, frecuentemente, un equilibrio entre la resolución de problemas de inestabilidad que ocasiona una boquilla muy somera y el impacto ambiental que pudiera ocasionar un desmonte de acceso para situar el portal en la roca más sana. Las obras lineales viarias tiene una cierta rigidez en planta que les impide moverse para buscar la mejor boca; la flexibilidad es mayor cuanto menos rápida sea la carretera o ferrocarril. En las autovías y, sobre todo, en los ferrocarriles de alta velocidad no siempre es posible conseguir la mejor boquilla geológica.

En el capítulo específicamente dedicado a los túneles se abordará con mas detalle estos aspectos.

2.6. MATERIALES

Tal como ya se ha apuntado en los apartados anteriores es necesario, como en casi todas las obras de ingeniería, un estudio de los materiales a utilizar en la construcción. En las obras de tierra hoy en día se distingue entre rellenos de tipos terraplén, pedraplén y todo-uno. Los primeros están constituidos por lo que normalmente llamamos tierras o suelos con tamaños máximos de algún centímetro. Los segundos son rellenos pétreos con fragmentos de hasta varios decímetros y con partículas finas en proporción inferior al 35 %. Los de tipo Todo-uno son rellenos intermedios entre ambos. En cualquiera de los tipos el relleno ideal debería estar formado por partículas que pudieran extenderse con facilidad, compactarse hasta alcanzar densidades altas y ofrecer una buena resistencia al corte y una baja deformabilidad. Hoy en día, por economía, se tiende a utilizar cualquier material disponible adoptando las medidas necesarias para que su comportamiento sea aceptable. Estas medidas serán analizadas en cursos posteriores cuando se tengan mayores conocimientos del comportamiento de los materiales. Por hoy, diremos que los suelos arcillosos y plásticos son difícilmente compactables y no puede alcanzar las adecuadas densidades y resistencias, siendo además muy deformables. Así mismo hay rocas blandas de suficiente resistencia para no transformarse en suelos tras su excavación pero suficientemente "blandas" como para evolucionar en el tiempo en el interior de un relleno pétreo. Bordes y aristas evolucionan en el tiempo y producen readaptaciones en el relleno que se traducen en asientos en superficie. En la capa de coronación o explanada así como en las bases, subbases, subbalastos y balastos bajo pavimentos y traviesas, los materiales tienen que ser de mejor calidad que en el núcleo ya que van a soportar más directamente las cargas de tráfico. También deben ser de cierta calidad los materiales a colocar en los taludes y en el cimiento, siendo relativamente menos importantes los materiales del núcleo.

Los materiales a utilizar en las capas del pavimento de carreteras y en los balastos de las vías férreas tiene que ser resistentes fundamentalmente al desgaste tanto por estar sometidos a la rodadura de los automóviles, como para resistir los esfuerzos de fricción entre partículas de la misma capa muy importantes si consideramos las cargas dinámicas del ferrocarril. La resistencia necesaria para soportar las cargas de tráfico obliga a una alta densidad de compactación y a que los áridos sean de procedencia de machaqueo. Tanto si el pavimento es de aglomerado asfáltico como de aglomerado hidráulico, los áridos tienen que ser compatibles con el ligante (betún o cemento); o, por el contrario lo que es más inusual, el ligante o cemento debe ser compatible con los áridos.

3.- ESTUDIO GEOLÓGICO

A la vista de las consideraciones anteriores los estudios de geología deberían desarrollarse con una metodología como la siguiente:

3.1.- Recopilación y análisis de cartografía y documentación existente

En España existe numerosa documentación geológica publicada o consultable de gran parte del territorio, que nos puede servir de punto de partida del estudio. Entre ella podemos citar las siguientes:

Mapa Geológico de España. Escala 1/200.000. Síntesis de la cartografía existente. Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE).

Mapa Geotécnico de Ordenación Territorial y Urbana. Escala 1/100.000. Existe en muchas zonas urbanas. ITGE.

Mapa Geotécnico General de España. Escala 1/200.000. ITGE.

Mapa de Rocas Industriales. Escala 1/200.000. ITGE.

Mapa Geológico de España. Escala 1/50.000. 1ª y 2ª series. ITGE.

Estudios Previos de Terrenos. Escala 1/50.000. Formato antiguo. Dirección Gral. de Carreteras. Antiguo MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). Son estudios geológicos de franjas amplias de terreno por las que analiza la posibilidad de mejorar o establecer una importante vía de comunicación.

Es posible que en la zona donde se desarrolle la obra viaria existan otros estudios de obras públicas cuya información geológica complemente o aporte datos de partida interesantes.

Con esta información puede tenerse una primera idea de las diferentes unidades geológicas y geomorfológicas que afectan al trazado en estudio o a su entorno.

3.2.- Estudio fotogeológico.

Sobre la base de la documentación anterior se realiza después un estudio fotogeológico sobre pares estereoscópicos de fotografías aéreas. En el Servicio Geográfico del Ejército existen disponibles fotogramas de vuelos realizados en los años 1957, a escala 1/33.000; y en el Instituto Geográfico Nacional se pueden solicitar fotogramas a escalas 1/18.000 y 1/33.000 de un vuelo realizado en 1982, con los que se pueden complementar, ajustar o modificar los resultados obtenidos del análisis anterior.

La antigüedad del vuelo disponible no suele ser inconveniente para una adecuada identificación de litologías y estructuras; incluso, a veces, es mejor trabajar con fotogramas antiguos cuando se han podido producir transformaciones agrarias o urbanas que hayan podido enmascarar parcialmente las diferencias entre unidades. La propia comparación de fotografías de diferentes años puede ser ventajosa para observar el comportamiento de algunas formaciones con el paso del tiempo, fundamentalmente en lo relacionado a aspectos geomorfológicos: evolución del cauce de los ríos, deslizamientos de laderas, erosión de terrenos, transformaciones antrópicas (grandes movimientos de tierras, escombreras, etc)...

El objetivo fundamental de la fotointerpretación deberá ser el estudio de las formaciones superficiales delimitando zonas real o potencialmente problemáticas para la obra, tales como zonas deslizadas o con riesgo de deslizamiento, de baja capacidad portante por tratarse de vertederos, zonas de hundimientos etc... Además se podrá obtener información sobre la tectónica global y de detalle (depende de la escala manejada) de la zona.

3.3.- Reconocimiento preliminar "de visu"

Con el análisis de toda la información anterior se confecciona un borrador de cartografía geológica que nos servirá de base de partida para el reconocimiento que emprenderemos a continuación, consistente en un recorrido de campo en el que se identifican sobre el terreno las diferentes

unidades geológicas, geomorfológicas y tectónicas, matizando descripciones, ajustando o modificando contactos e introduciendo cuantas observaciones creamos necesarias para el alcance requerido de la definición de la geología para este Estudio Informativo.

La amplitud de la zona a reconocer depende de la definición de las bandas o corredores a estudiar. Si estamos en la fase de un estudio previo o un anteproyecto en los que el trazado no estuviera claramente definido, y nos interese elegir uno ó más corredores o trazados alternativos, parece razonable realizar una primera aproximación a escala 1/200.000, y una segunda fase a escala 1/50.000 sobre corredores o trazados seleccionados en la fase anterior, bien por razones geológicas o por razones funcionales.

Es posible que como consecuencia del propio reconocimiento resulten zonas de gran complejidad geológica que puedan suponer problemas constructivos de importancia que, en algún caso, justificarían un reconocimiento a una escala más detallada, pues podrían llegar a eliminar un trazado o a originar desviaciones importantes del trazado previamente escogido.

3.4.- Definición de corredores preferenciales y zonas conflictivas

Con los resultados del reconocimiento preliminar se confecciona después un borrador de planos, que toman como base los esbozados después del estudio fotogeológico y se retocan o modifican con las confirmaciones que resulten de este reconocimiento. De esta forma se delimitan grandes zonas de análogo comportamiento y fundamentalmente las zonas con problemas que puedan condicionar los trazados.

Este primer borrador de planos servirá para orientar adecuadamente el encaje de las alternativas a estudiar en las sucesivas fases del estudio, y en cualquier caso es necesaria para programar adecuadamente los siguientes reconocimientos.

Después de esta fase del estudio uno o mas trazados son seleccionados.

3.5.- Reconocimiento geológico específico de los trazados

Elegido el o los trazados a estudiar, será necesario reconocer con más detalle una zona centrada con el eje de una anchura fijada por las posibles desviaciones del eje por razones geológicas. Normalmente basta con reconocer franjas de unos 400 ó 500 m de anchura, para representar los datos a una escala menor que las anteriores. Es frecuente representarlos a escala 1/5.000 aunque igual que se ha indicado antes, podrá ser necesario el estudio a escalas más detalladas, 1/1.000, en zonas de complicada geología que puedan poner en duda la viabilidad del trazado previsto.

Entre estos reconocimientos de detalle citamos como posibles los siguientes:

- Reconocimiento geológico a la escala de la cartografía prevista.
- Toma estadística de datos geomecánicos en afloramientos rocosos, definiendo la orientación de las familias de discontinuidades más frecuentes y aquéllas que, aún no siendo muy frecuentes, pudieran ser importantes por su desfavorable posición; se anotan además otros datos como la continuidad de la superficie que define la junta, espaciado entre unas juntas y otras de la misma familia, rugosidad, abertura entre los dos lados de la junta y si existe algún relleno entre ambas superficies.
- Calicatas con una pala retroexcavadora.

- Sondeos mecánicos a rotación con testificación continua.
- Prospección geofísica sísmica.

Queremos destacar, además de estos reconocimientos específicos directamente sobre la banda del trazado previsto, la conveniencia de realizar una inspección de las obras viarias existentes en la proximidad del trazado o de aquellas, que aunque estando lejanas, se desarrollan por análogas formaciones geológicas.

La experiencia es una de las mejores herramientas de trabajo, sobre todo en lo referente a las ciencias de la tierra. La mayor parte de las teorías hoy en práctica en el campo de la Geología aplicada, tienen prácticamente su origen en la observación del comportamiento de los diferentes terrenos en distintas situaciones. Es decir, son ciencias en gran medida experimentales. Por esta razón todas las conclusiones que podamos sacar del comportamiento de los terrenos que atraviesan la obra viaria a estudiar en situaciones conocidas, y mejor si están próximas, son de total aprovechamiento para nuestro estudio. Así mismo, la experiencia de realización de obras similares en los diferentes terrenos que atravesará el trazado, es una buena base para buscar las soluciones más apropiadas en comparación con aquellos.

3.6.- Cartografía geológica de las soluciones

Como consecuencia de este reconocimiento más detallado se dibujan planos de planta a la escala seleccionada (se había hablado de 1/5.000) de las diferentes soluciones propuestas, en los que se refleja:

- Litología.
- Estructura de los macizos rocosos que la manifiesten claramente.
- Tectónica general de la zona
- Grado de alteración de la roca en superficie y espesores del recubrimiento.
- Aspectos hidrogeológicos o relacionados con el drenaje: zonas encharcadas o de nivel freático alto, cursos de agua, pozos, surgencias etc.
- Situación de los reconocimientos efectuados y de los puntos de toma estadística de datos de discontinuidades.
- Y, finalmente, también se deben reflejar como conclusión del estudio las zonas que suponen un riesgo geológico.

Los planos de planta se acompañarán de un perfil geológico longitudinal a escalas 1/5.000, horizontal, y 1/500, vertical (u otras escalas apropiadas a la de la planta) y de perfiles transversales que, en conjunto, ilustren sobre todos los aspectos necesarios para la comprensión de cómo está formado el subsuelo.

Puede ser muy interesante la confección de bloques diagramas con perspectivas de determinadas situaciones en zonas con problemas o de cierta complejidad estructural, con el fin de hacer más fácil la comprensión final.

3.7.- Estudio de detalle de las distintas partes que integran la obra viaria.

3.7.1.- Desmontes

En el apartado 2.1.1 ya se han expuesto los aspectos que interesa estudiar y definir en la excavaciones en desmonte.

En lo referente a la **Estabilidad**, para los desmontes en roca, se realiza un análisis de la estructura del macizo rocoso y de sus propiedades resistentes. Para ello se utilizan los datos geomecánicos tomados en el reconocimiento a escala 1:5000 y, si no son suficientes, se amplían con más detalle ceñidos específicamente en la zona del futuro desmonte.

Para desmontes en suelos, si no se ha realizado en la fase anterior, se perforan ahora sondeos con una profundidad tal que llegue a la rasante del proyecto. En estos sondeos, entre otras cosas se analizará la presencia y profundidad del nivel freático y se tomarán muestras para su posterior análisis. Se realizarán ensayos de resistencia para la determinación del ángulo de rozamiento y la cohesión del material estudiado.

En cuanto a la **Excavabilidad** - aspecto importante en los desmontes en roca - es decir las técnicas y equipos para excavar el desmonte, debe estudiarse la variación del grado de alteración de la roca con la profundidad. Es usual el estudio de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas obtenidas a partir de una prospección geofísica sísmica.

En cuanto al **aprovechamiento de materiales**, no es fácil a priori determinar su viabilidad para ser utilizados en otras partes de la obra. Si se trata de "suelos" o formaciones rocosas blandas que pueden ser fácilmente desmenuzables durante todo el "movimiento de tierras" el estudio es más fácil. Se realizan sondeos y calicatas someras que permitan extraer suficiente muestra para determinar su compactabilidad y resistencia posterior. Debe mencionarse que los ensayos de compactación que se realizan en Laboratorio necesitan una importante cantidad de muestra, frecuentemente más de 40 kg por ensayo lo cual obliga a perforar los sondeos con diámetros muy grandes lo cual es costoso y no siempre viable a partir de una determinada profundidad. Las calicatas con retroexcavadora sí permiten extraer la muestra necesaria pero tienen la limitación de que sólo permiten reconocer los primeros 4 o cinco metros superficiales.

En los desmontes en roca es mucho más complicado ensayar muestras representativas del "producto final". Por una parte, las técnicas de excavación (explosivos, ripper) influyen en el tamaño de los fragmentos y, por otra parte, no es fácil ni económico montar aparatos de laboratorio que permitan ensayar muestras con alguna dimensión mayor de un metro. En estos casos, recordando lo que hemos dicho en el apartado 2.6, Materiales, es importante determinar la resistencia de los fragmentos de roca y su posibilidad de que evolucionen en el tiempo, pues si evolucionan desfavorablemente, los rellenos efectuados con estas rocas sufrirán deformaciones.

3.7.2.- Rellenos⁸

En el apartado 2.1.2 se han expuesto aspectos condicionantes de esta parte de la obra. Cuando son de temer problemas de inestabilidad del cimiento o de deformabilidad, por la existencia de suelos

⁸ Es habitual emplear el término genérico de Rellenos en vez del de Terraplenes y distinguir entre Rellenos de tipo Terraplén, de tipo Pedraplén y rellenos Todo-uno.

poco resistentes o por que el apoyo es una superficie inclinada o por la presencia de agua las investigaciones serán del tipo de las siguientes:

- Para rellenos en laderas inclinadas se puede usar la geofísica sísmica para determinar espesores de los suelos o rocas meteorizadas. Se pueden realizar sondeos y calicatas con el mismo fin y para tomar muestras con las que determinar sus propiedades resistentes y deformacionales. Asimismo, en los sondeos y calicatas se puede determinar la presencia de agua en el subsuelo.
- Para rellenos sobre suelos blandos los reconocimientos pueden consistir en sondeos mecánicos, en calicatas y también en ensayos de penetración⁹.

3.7.3.- Cimentación de obras de fábrica

Si la roca aflora y es resistente, el reconocimiento para el estudio de la cimentación se reduce a la observación visual y, como mucho, al análisis de las discontinuidades presentes por si alguna de ellas pudiera suponer una merma en la resistencia o se pudiera producir alguna situación de inestabilidad por deslizamiento en las proximidades de un talud o un ladera muy pronunciada.

Si la cimentación es en suelos, o la roca no aflora, habrá que hacer sondeos, calicatas y ensayos de penetración para determinar la profundidad del terreno resistente o para tomar muestras y determinar, en laboratorio, las características de resistencia y deformación de todas las capas del subsuelo.

En los cauces de los ríos debe estimarse el poder erosivo de la avenida de cálculo y la socavación potencial con el fin de decidir si son necesarias cimentaciones profundas en los casos en que el riesgo de erosión de una cimentación superficial fuera importante.

3.8.- ESTUDIO DE MATERIALES

A diferencia de los reconocimientos geológicos del trazado propiamente dicho, el Estudio de Materiales no se ciñe a una banda próxima al eje, sino que debe desarrollarse hasta una distancia impuesta por la existencia de yacimientos de material apropiado que, económicamente, puedan ser utilizados en la construcción de la obra.

En primer lugar debe hacerse una recopilación bibliográfica de los yacimientos y canteras existentes en la zona y, posteriormente, un recorrido de campo con el que se completa un inventario de todas aquellas zonas en las que exista un material útil en la construcción, tanto si actualmente están en explotación como si, en algún caso, serían explotables.

Del análisis de la información recopilada al respecto, se obtienen las áreas fuente de materiales que podrían ser apropiados para la construcción.

En el caso de canteras o yacimientos granulares en explotación, es bueno obtener del propietario datos sobre uso y calidad de los materiales explotados, así como los resultados correspondientes a ensayos de laboratorio.

⁹ Los ensayos de penetración consisten en la medición de la resistencia a la hinca de un varillaje acabado en una puntaza generalmente cónica. Pueden ser "estáticos" en los que se hinca mediante la aplicación de una presión continua; pueden ser también "dinámicos" en los que la hinca se realiza mediante el golpeo del varillaje con una maza (50 a 65 kg) que cae desde una cierta altura (50 a 75 cm), midiéndose en este caso el número de golpes necesario para avanzar un determinada longitud, 20 a 30 cm.

Si no se obtuviera tal información por parte del propietario o empresa que lo explota, una vez seleccionados los yacimientos o canteras susceptibles de ser utilizados, deben tomarse muestras para realizar dichos ensayos en el laboratorio.

Se debe indicar la ubicación de cada uno de los aprovechamientos detectados, sobre la planta a escala 1/50.000 ó 1/200.000 que refleje además los distintos trazados.

FASES DE UN ESTUDIO GEOLÓGICO DE UNA OBRA LINEAL

ACTIVIDAD	INFORMACIÓN MANEJADA	CONCLUSIÓN
* RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN	* MAPAS PUBLICADOS * ESTUDIOS SIMILARES	* IDEA PRELIMINAR
* ESTUDIO FOTOGEOLOGICO	* PARES ESTEREOSCÓPICOS DE FOTOS AÉREAS	* PLANO FOTOGEOLOGICO * BORRADOR DE GARTOG. GEOLÓGICA
* RECONOC. PRELIMINAR DE VISU A 1:200.000 O 1:50.000	* TERRENO IN SITU	* 2º BORRADOR CARTOG. GEOLÓGICA * DELIMIT. ZONAS DE ANÁLOGO COMPORTAMIENTO * DELIMIT. ZONAS CONFLICTIVAS
* ENCAJE DE TRAZADO O VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS	* TRAZADOS Y GEOLOGÍA	* SELECCIÓN DEL O DE LOS TRAZADOS
* RECONOCIMIENTO DEL TRAZADO	* INSPECCIÓN VISUAL * TOMA DATOS GEOMECÁNICOS * SONDEOS MECÁNICOS * CALICATAS * GEOFÍSICA SÍSMICA O ELÉCTRICA * ENSAYOS DE LABORATORIO	* PLANTA GEOLÓGICA 1:5.000 * PERFIL LONGITUDINAL 1:5.000 / 1:500 * PERFILES TRANSVERSALES * BLOQUES DIAGRAMAS * MEMORIA CON CONCLUSIONES SOBRE COMPORTAMIENTO GENERAL
* RECONOCIMIENTO DE OBRAS SINGULARES		
Desmontes	(Los anteriores con más detalle)	* Excavabilidad * Estabilidad de los taludes * Drenaje * Aprovechamiento de los materiales
Rellenos	(Los anteriores con más detalle)	* Estabilidad del cimientto * Materiales empleados. Su procedencia. * Estabilidad del propio relleno. Taludes recomendables. * Compresibilidad del cimientto y del relleno
Cimentación de estructuras	(Los anteriores con más detalle)	* Resistencia y deformabilidad del terreno
Drenaje	(Los anteriores con más detalle)	* Situación del nivel freático * Permeabilidad del terreno * Necesidad y posibilidad de drenaje.
Materiales	(Los anteriores con más detalle)	* Zonas de extracción de áridos para firmes y balastos * Zonas de extracción de áridos para hormigones * Zonas de préstamo de materiales para rellenos