



Procedimiento SAPS: Zona de la «escama» del Lías.

## desviación en túnel de la línea férrea, en el Principado de Mónaco

GEORGES VIÉ, ingeniero de minas

579-12

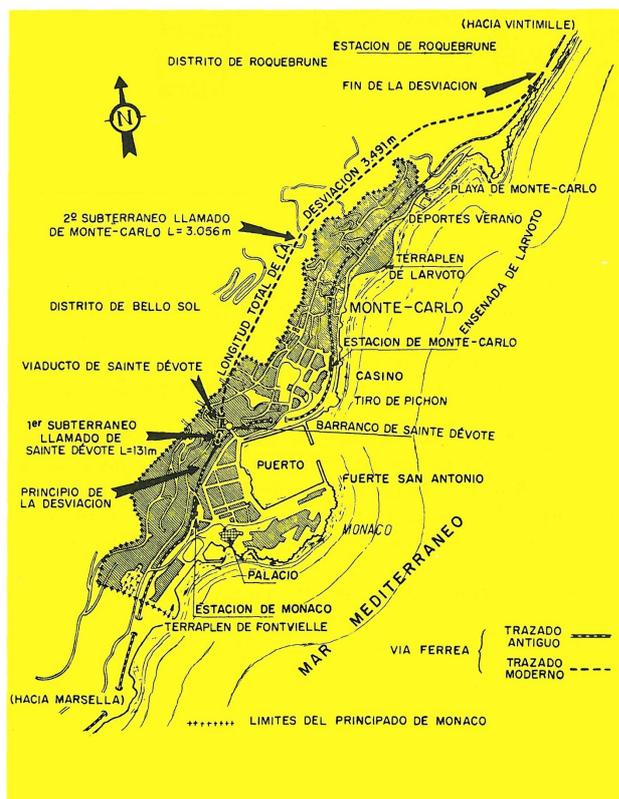
### sinopsis

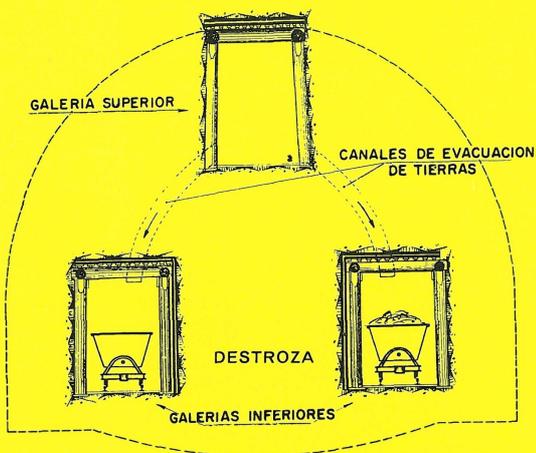
La renovación del contrato de explotación del tramo de la vía férrea Marsella-Vintimille que atraviesa el Principado de Mónaco, ha motivado la introducción de variantes en el trazado del recorrido. La reducida superficie del Principado y las exigencias de la vida moderna han obligado a las autoridades monegascas a buscar una solución que permitiera recuperar parte de los terrenos que entonces atravesaba el ferrocarril.

El nuevo trazado, a lo largo de un recorrido de 3.491 m, se ha construido en su mayor parte en subterráneo y comprende dos túneles separados por un barranco. El de Monte-Carlo, de más de 3.000 m, ha constituido una fuente continua de problemas, originados casi todos ellos por las malas condiciones geológicas del terreno.

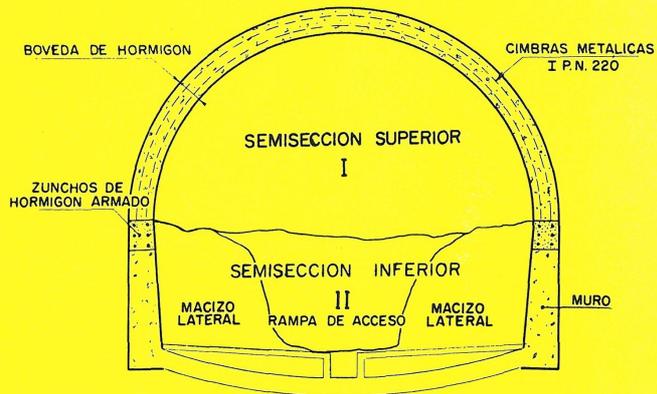
Más de 280.000 m<sup>3</sup> de tierras removidas se han aprovechado para ganar superficie utilizable al mar.

Habiendo sido anexionado a Francia el Condado de Niza, en 1860, para formar el departamento de los Alpes Marítimos, la línea férrea que une Marsella con la frontera italiana fue puesta en servicio en 1863-64.

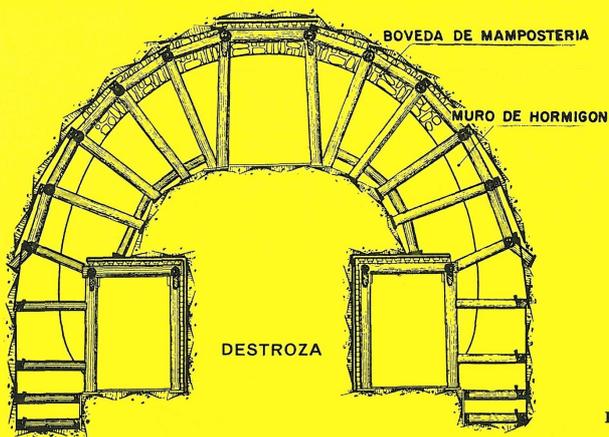




Progresión en la marga: Disposición de las tres galerías.



Fases de apertura por media sección.



Progresión en la marga: En segundo plano, la bóveda terminada.

La construcción de esta línea, a cielo abierto, a través del Principado de Mónaco, fue autorizada bajo el régimen de concesión centenaria, y a su término, hacia 1959, fue solicitada la renovación correspondiente.

En esta ocasión, las autoridades monegascas pidieron una modificación del trazado, que se desarrollaba hasta entonces al borde del mar, a lo largo de una estrecha banda litoral de unos 4 km de longitud.

El Principado, por razones de distribución, de urbanismo y de encarecimiento del terreno, deseaba recuperar las superficies pertenecientes a las empresas de la doble vía Marsella-Vintimille, entre las estaciones de Mónaco y Roquebrune-Cap Martin. Con miras a la construcción de una desviación en túnel bajo la casi totalidad de la travesía de Mónaco, fue estudiado un nuevo convenio entre el Gobierno monegasco y la Société Nationale des Chemins de Fer Français.

Esta desviación mide 3.491 m, comprendiendo:

- El túnel de Sainte-Dévote, de 131 m de longitud, a la salida de la estación de Mónaco (origen de la desviación).

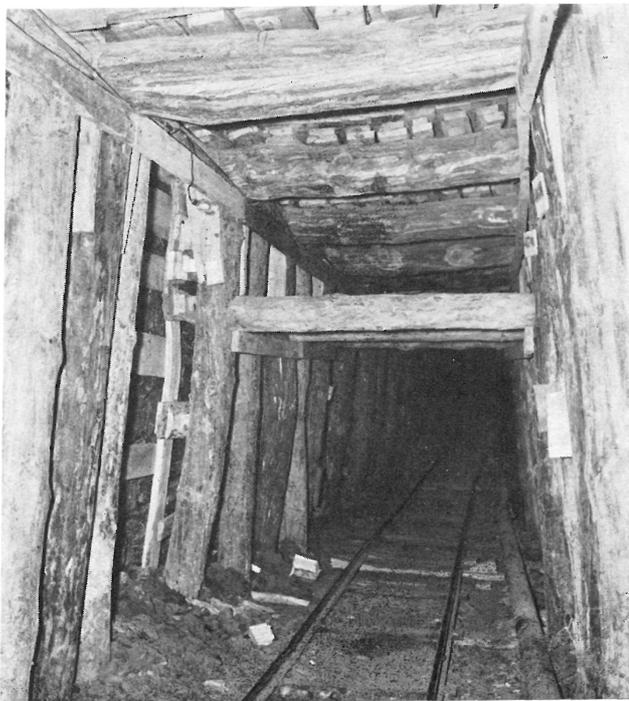
- El puente de fábrica, de 21 m de luz, que franquea el barranco de Sainte-Dévote.
- El gran subterráneo de Monte-Carlo, de 3.056 m de longitud.

Además fueron construidos importantes muros de contención en los dos extremos del empalme con la antigua plataforma, así como una trinchera cubierta bajo el jardín exótico Gastaud, en el lugar llamado La Vieille, junto a Roquebrune.

Los estudios geológicos realizados en 1956-57 evidenciaron la necesidad de alejar el trazado cuanto fuera posible de la zona costera, con el fin de evitar los desmoronamientos y las margas alteradas sobre las pendientes. También interesaba penetrar lo más posible en el interior del macizo montañoso, para excavar el subterráneo de Monte-Carlo bajo una zona menos habitada y con una cubierta de más espesor, aunque menos plástica por la acción de las aguas de superficie.

La tectónica del macizo Mont Agel-Beausoleil-Monte-Carlo es de una gran complejidad de detalles, de donde se derivan características mecánicas muy diferentes de una formación sedimentaria a la otra, con importantes avenidas de agua en las zonas de contacto, tránsitos de margas plásticas hinchadas, de desmoronamientos inestables, etc.

En muchos puntos del subterráneo de Monte-Carlo las dificultades encontradas fueron mucho más graves y costosas de lo que el proyecto había podido prever. Este fue el caso que se presentó concretamente al atravesar, en una longitud de más de 1.000 m, una zona de margas cenomanenses poco estables, hasta la falla de Larvoto, después de una zona de margas calcáreas del Turonense-Senonense, con bancos margosos predominantes en unos 1.150 m, incluyendo hacia el kilómetro 3 una concreción de calizas eocenas con desmoronamientos, después calizas jurásicas más o menos fragmentadas y, por último, una zona de bloques calizos fragmentados sobre 150 m de desarrollo cerca de la entrada de Roquebrune.



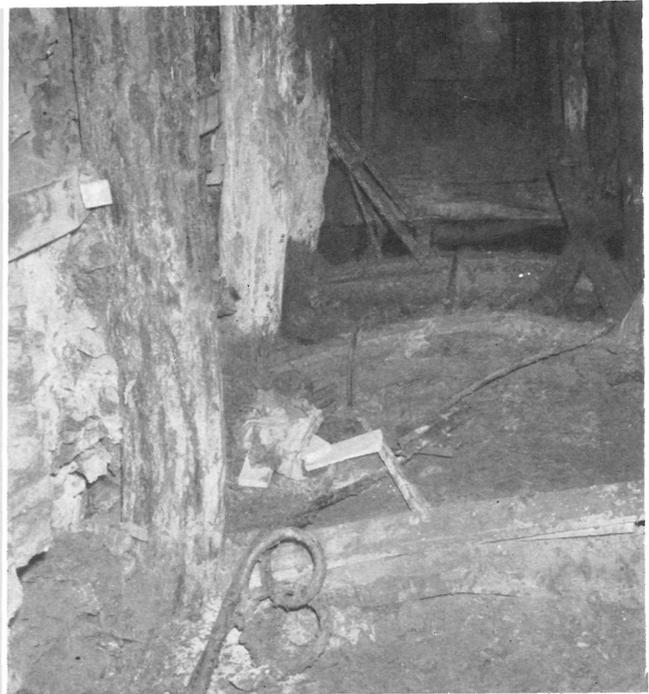
Pasaje a través de las margas hinchadas: Desorden en los cuadros de la galería en el lado del mar (a partir del cuadro 46) y refuerzo de la entibación.



Galería del lado del mar: Vista de la galería antes de instalar el saneamiento p. k. 1,431 a 1,470.



Galería del lado de la montaña: Varios «sombreros» rotos, p. k. 1,431 a 1,469.



P. k. 1,431 a 1,470: Detención del avance; desprendimiento de las soletas rotas; continuación del maderamen con vistas al restablecimiento de las vías de servicio sobre un suelo hormigonado.

Por el contrario, a la salida de la estación de Mónaco la desviación penetra en calizas jurásicas a lo largo de 850 m. Este tramo no ha causado ningún problema, salvo en los comienzos de los trabajos realizados en las calizas agrietadas, con bloques aislados y grietas rellenas de arcilla.

La pared rocosa a cielo abierto ha tenido que ser consolidada con machones de hormigón armado anclados con cables pretensados (40 Mp) colocados en la roca por medio de perforaciones de 70 mm  $\varnothing$  y 2,50 m de longitud, inclinados 20° sobre la horizontal, sellados e inyectados después de someter los cables a tensión.

En los subterráneos, el perfil de la sección revestida ha sido determinado de forma que permita la instalación, por el techo, de las catenarias de tracción eléctrica, con corriente alterna de 25 kV a 50 ciclos.

Este perfil también goza de la propiedad de poder colocar la bóveda sobre cimbras sin que el gálibo disminuya, es decir, sin molestias para los trenes que circulan por el túnel.

Después de atravesar los 131 m de calizas dolomíticas de Sainte-Dévote, las voladuras se hicieron con explosivo, a plena sección, con un revestimiento de hormigón de 0,40 m de espesor en clave.

Debido a la magnífica estabilidad mecánica de dichas calizas, este espesor podría parecer excesivo; pero se han querido evitar desprendimientos eventuales de bloques por efecto de las trepidaciones originadas por el paso de los trenes.

La excavación del gran túnel de Monte-Carlo se ha realizado a partir de dos frentes de ataque opuestos. El del lado de Mónaco comienza en el barranco de Sainte-Dévote y se prolonga 500 m en las calizas. Se ha avanzado a plena sección, con un revestimiento delgado de hormigón, como en el pequeño túnel de Sainte-Dévote. Pero inmediatamente después del punto kilométrico (p. k.) 0,800 (a partir del origen de la desviación del lado de Mónaco) las margas cenomanenses hicieron su aparición en el techo de la galería.

El avance prosiguió hasta el p. k. 1,100 con la caliza a media altura y las margas coronando la galería, debido al contacto sub-horizontal de estas dos formaciones. Por último, la marga llegó a ocupar toda la sección del túnel y las dificultades empezaron a manifestarse con un carácter especialmente grave.

A partir del p. k. 0,800 el avance tuvo que realizarse a media sección, entibando con cimbras metálicas.

La presencia en el casquete superior de una marga fracturada, que provocaba fuertes empujes en presencia de agua, ha causado tres derrumbamientos en cadena en los alrededores del p. k. 0,900, a pesar de todas las precauciones tomadas.

El revestimiento en bóveda fue reforzado por la incorporación de las cimbras metálicas del entibado, alcanzando el espesor del hormigón los 0,80 metros.

A partir del p. k. 1,100 se modificó nuevamente el método, organizando el avance según tres galerías de pequeña sección: una, cerca de la bóveda, y las otras dos, laterales; dejando entre ellas una destroza.

Las galerías laterales servían como galerías piloto y su avance precedía siempre en una veintena de metros al de la galería superior. Las tres galerías estaban entibadas con cuadros. Cuarenta metros hacia atrás, dichas galerías se hallaban unidas entre sí por excavaciones reforzadas y entibadas con planchas de 3,20 m de longitud.

Los muros fueron hormigonados (hormigón vibrado), teniendo que ejecutarse toda la bóveda en mampostería.

Una pala mecánica procedía entonces a levantar la destroza, y la solera era hormigonada por medios anillos sucesivos de 4 metros.

Las condiciones, que ya eran difíciles, se volvieron todavía más a partir del p. k. 1,300, cuando el avance vino a tropezar con la terminación en bisel de un considerable lentejón de caliza y dolomía del Lías y del Infralías, constituyendo en su culminación, la cumbre llamada «Cresta de las Mulas».

Esta verdadera «escama» del Lías estaba muy fracturada, *dando paso a importantes* venas de agua, interrumpiendo momentáneamente todo avance hacia el interior del macizo.

Hacia el p. k. 1,335, las tres galerías paralelas fueron excavadas a base de taponés de fábrica, con objeto de preparar, con perforaciones e inyecciones, la estanqueidad de los terrenos en el avance.

Las primeras perforaciones determinaron la importancia de las aportaciones de agua y proporcionaron las indicaciones necesarias para el programa del tratamiento a adoptar.

En conjunto, este trabajo ha ocasionado la ejecución de 264 perforaciones o reperforaciones, totalizando unos 8.000 m de longitud, y la inyección por bombeo de 90 m<sup>3</sup> de silicato de sosa y de 300 t de cemento. Muchos de estos taladros estaban inclinados con respecto al eje de las galerías, de tal modo que formaban holgadamente una aureola, no sólo alrededor de cada una de ellas, sino también de la sección definitiva excavada.

A pesar de estas dificultades tan importantes, de las que dan una idea algunas fotografías, el avance pudo recomenzarse tras la desaparición de las venas de agua frontales, y la «escama» del Lías se franqueó hacia el p. k. 1,400. En todo este tramo la bóveda fue totalmente fabricada. El avance prosiguió hasta los alrededores del p. k. 2,000, en las margas cenomanenses, hasta el encuentro con el ataque opuesto. En las formaciones geológicas de mala calidad, como las margas calizas, la bóveda de hormigón fue reforzada con cimbras metálicas (perfiles metálicos IPN-220, separados de 1,20 a 1,80 m) incorporadas al revestimiento.

En las partes excavadas a través de las margas plásticas empujando a grandes presiones se realizó un encadenado general en forma de arco, refiriendo los pies derechos entre sí, por medio de rollizos. El perfil obtenido de esta forma ofrece la ventaja de despejar el perfil teórico, oponiendo el conjunto una resistencia satisfactoria a los fuertes empujes del terreno.

Las secciones reproducidas en esta descripción del túnel ponen en evidencia todos estos detalles y señalan que la bóveda fue realizada parcialmente en mampostería trabada de manera que procurasen la mejor adaptación a los esfuerzos disimétricos susceptibles de manifestarse en el terreno.

Cuando se convocó concurso para la realización de la obra acudieron muchas empresas francesas, basando sus proposiciones económicas en los diversos datos recogidos (estudios geológicos y sondeos de reconocimiento). Por encargo de una de estas empresas hemos presentado un estudio geológico y un estudio de las condiciones de ejecución consiguientes, poniendo en guardia al director de la obra contra los inconvenientes y dificultades que eran más o menos previsibles.

Finalmente, la contrata fue adjudicada a la Sociedad «Travaux Souterrains», que había menospreciado las dificultades y que debió, en consecuencia, confiar parcialmente la ejecución a la empresa C. Montcocol (París), la cual ha podido terminar la obra en buenas condiciones.

Aparte del acceso en galería cubierta —de un tipo ciertamente particular— en el origen de la desviación por el lado de Roquebrune, la apertura del túnel buscando la perforación procedente de Mónaco se ha iniciado en una brecha de caliza jurásica tras una zona de terrenos alterados que se extiende en unos 150 m. Las calizas in situ no se encontraron hasta el p. k. 3,200 y el trabajo fue organizado por medias secciones, superior e inferior, debido a la proximidad de un sinclinal eoceno rellenado, al cual debían suceder bastante rápidamente las formaciones de margas calizas de los pisos Turonense-Senonense.

Las operaciones consistían, en primer lugar, en excavar en la roca la media sección superior, donde la estabilidad estaba asegurada suficientemente por cimbras y entibados metálicos.

El hormigonado de la bóveda, con cimbras metálicas incrustadas en el hormigón, avanzaba unos 20 m detrás, lo cual no daba a los terrenos un plazo de tiempo bastante largo para deformarse.

La puesta en obra del hormigón descendía hasta los arranques de la bóveda; y para permitir ejecutar el hormigonado posterior de los muros con garantías totales, cada arranque estaba armado en toda su longitud de forma que constituyera un durmiente continuo, asegurando la estabilidad de la bóveda.

La excavación en roca de la media sección inferior podía comenzarse entonces por la eliminación de la destroza, iniciándola por el centro de la galería, de modo que se formara un plano inclinado de acceso a la media sección superior y dejando, en consecuencia, un espesor más reducido en los macizos laterales.

La excavación de estos últimos se realizó en la fase última por «bataches» de 4 m, al tresbolillo, hormigonándolos inmediatamente. La estabilidad de la obra superior quedaba así garantizada mientras se terminaba el hormigonado de las otras partes de los muros.

Por detrás, y a una distancia conveniente, se concluía la excavación al nivel de la futura solera y del canalón central.

En diferentes puntos de la obra irrumpieron en la galería importantes avenidas de agua, especialmente hacia el p. k. 2,900, al franquear una chimenea cárstica en el seno de calizas fracturadas, correspondiendo la avenida a una resurgencia localizada entre la orilla del mar y el subterráneo, que la interceptaba. Como la aportación de este manantial natural debía ser respetada y mantenida, su aprovechamiento exigió una serie de trabajos consistentes en una verdadera red de galerías por encima del nivel del trasdós del túnel.

Era preciso, además, dar a estas galerías de drenaje dimensiones suficientes para recoger las aportaciones, muy importantes por cierto, que aparecen en periodos de lluvia y en régimen cárstico (hasta 10 y 13 metros cúbicos por minuto).

Asimismo, debieron tomarse precauciones para garantizar la perfecta estanqueidad del revestimiento de hormigón, ya que había que instalar una doble línea eléctrica de 25 kV en la parte superior de la bóveda y de manera permanente.

Con vistas a los trabajos de captación del p. k. 2,900 y en el trasdós de la bóveda se dispusieron entre las dos bóvedas —una de hormigón de 0,30 y otra de 0,70 m de mampuestos de espesor— unas placas de «compound» bituminoso (Bitulac), previamente coladas en caliente sobre chapas de palastro delgadas, para ser soldadas inmediatamente entre sí por el mismo producto (Acid compound Resist), y sostenidas por el lado del intradós por la segunda bóveda, de 0,70 m de espesor y fábrica de mórtillos.



Paso de la «escama» acuífera del Lías: Avenidas de agua hacia el p. k. 1,295.

Entibación con maderos antes de la colocación del revestimiento.

Entibación de un anillo y en segundo plano revestimiento de fábrica de un anillo terminado.

Finalmente, la estanqueidad completa fue asegurada mediante la aplicación de una capa de cemento CLK —con el producto hidrófugo SIKA 4 incorporado— en el intradós de la segunda bóveda, donde persistían las manchas de humedad a pesar de las precauciones ya descritas.

Además, en muchos puntos se impermeabilizaron los rezumos residuales aplicando un revoco de resina sintética «epoxi» en el intradós del revestimiento.

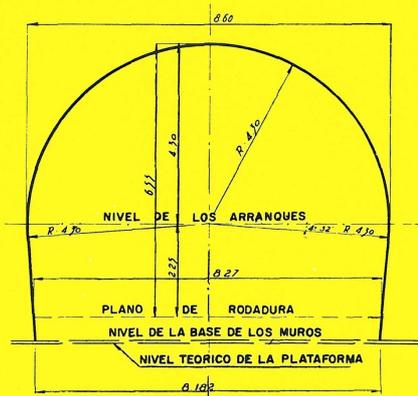
El método de perforación ha tenido cierta influencia en la técnica de la impermeabilización de la bóveda y los riñones de la galería terminada; éste fue, por ejemplo, el caso en las cercanías del p. k. 1,300 (paso de la «escama» de calizas y dolomías liásicas de la Cresta de las Mulas, ya indicada).

En este punto se ha operado de la siguiente forma:

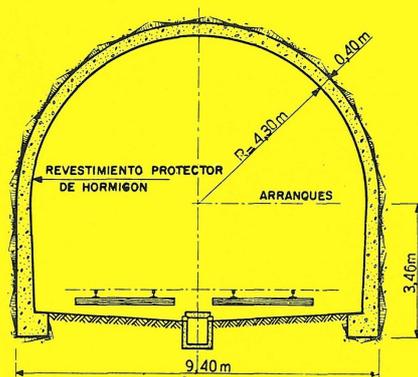
A medida que se colocaban las maderas del entibado y se construían las obras de fábrica, las placas del producto bituminoso eran aplicadas directamente contra la roca desnuda, con el auxilio intermedio de un lecho de mortero. Estas placas se soldaban entre sí para conseguir la estanqueidad del trasdós entre la roca viva perforada y la fábrica de mampuestos formando bóveda, ejecutando la operación sin pérdida de tiempo. La estanqueidad se completó acto seguido por medio de una serie de inyecciones de cemento en la roca y su contorno.

A la derecha del p. k. 3,200 y sus alrededores se construyó la primera bóveda, con hormigón de

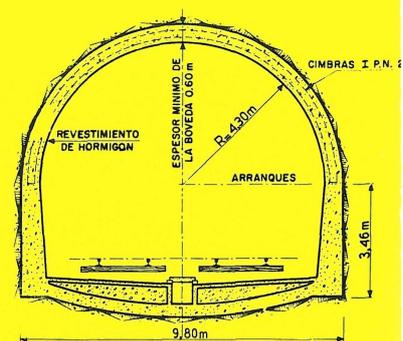




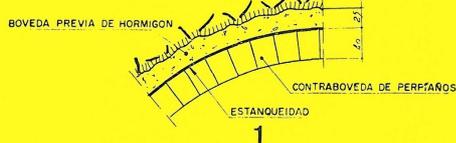
Perfil interior.



Sección transversal en la caliza de buena calidad.



Sección transversal del túnel en las margas calizas.



1



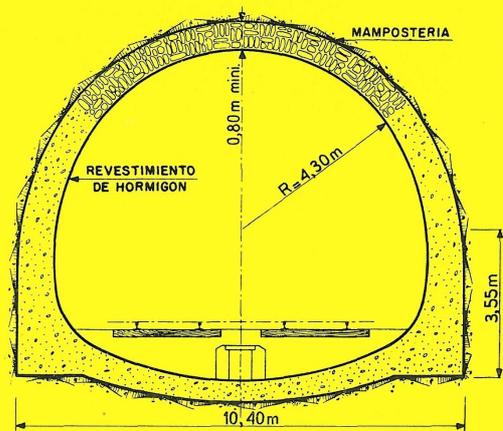
2



3

4

Detalles de ejecución de la estanqueidad: 1. Zonas de venas de agua localizadas.— 2. Zonas húmedas hacia el origen por el lado de Roquebrune.— 3. Paso a través de grandes avenidas, p. k. 2,900.— 4. Paso a través de la zona de Cresta de las Mulas (sobre el p. k. 1,300).



Sección transversal del túnel en las margas plásticas; revestimiento terminado.

Vista general de la zona de la «escama» del Lias: Inyecciones.



Fotos: DETAILLE

0,60 m de espesor; contra ella, se aplicó una película de poliéster armada con fibras de vidrio y aplicada en cinco capas (espesor total, 2,5 mm aproximadamente), la cual era soportada, por el lado del intradós, mediante una segunda bóveda de ladrillo de 0,27 m de espesor.

Al atravesar las formaciones derruidas del p. k. 3,300, la técnica que debía asegurar la estanqueidad fue nuevamente modificada debido a las circunstancias.

La primera bóveda se construyó de fábrica de mampuestos de 0,80 m de espesor, contra la que se aplicaron capas de una sustancia plástica (Posolène), de 2 mm de espesor cada una, unidas entre sí por encolado y con cada una de sus caras protegida por un fieltro bituminoso impregnado.

Por el lado del intradós esta capa estaba sostenida a su vez por una segunda bóveda de ladrillo de 0,27 m de espesor.

La colocación de las vías y del balasto en el túnel de Monte-Carlo no ha presentado ninguna particularidad, excepto que los raíles de 55 kg/m han sido soldados en gran longitud y descansan sobre traviesas de madera.

En el corto subterráneo de Sainte-Dévote se ha introducido una nueva experiencia, que consiste en colocar la vía directamente sobre el hormigón de la solera, sin traviesas ni balasto de piedra machacada. Los raíles están sostenidos por placas de asiento de acero colado recibidos en el hormigón con ayuda de resinas sintéticas «epoxi».

Para completar nuestra descripción nos falta hablar del acceso a la entrada del gran subterráneo por el lado de Roquebrune.

Por otra parte, la preparación de dicho acceso correspondía al principio de la desviación de la vía férrea en el p. k. 3,491. Estábamos en presencia de una zona muy confusa e inestable, formada por bloques, considerables a veces, desgajados de los acantilados calizo-dolomíticos que dominan la vía férrea. En la época del trazado inicial, hace más de cien años, los constructores de la plataforma del ferrocarril habían encontrado la facilidad de rodear esta zona derruida construyendo un muro bordeando el mar. Además, sobre esta zona de grandes bloques que forman un verdadero caos, existía un jardín que se presta extraordinariamente al cultivo de plantas exóticas y la desviación debía pasar por debajo, en una longitud de unos 150 metros.

En el principio de la desviación fue construido un muro de contención, a cielo abierto, en tres tramos sucesivos de 9 m de largo cada uno, con alturas de 3,50 a 6 m. Tras los primeros 27 m fue necesario cavar gradualmente pozos cuadrangulares, sólidamente entibados, que constituían otros tantos bloques después de hormigonados. Los espacios entre estos bloques fueron rápidamente abiertos y hormigonados a su vez. Esta nueva parte del muro de contención, de 52 m de longitud, tiene una altura comprendida entre los 6 y 12 metros.

Para pasar bajo los bloques derruidos, se excavaron los pozos a uno y otro lado de la obra, hormigonándose después para formar columnas de la altura requerida por el gálibo y siendo en seguida unidos entre sí por maderos transversales abovedados.

Una vez realizados todos los pilares de hormigón y todos los codales, las zonas comprendidas entre aquéllos se abrieron a su vez y fueron hormigonadas. Por último, los intervalos comprendidos entre los citados codales fueron cubiertos con losas para formar el techo de la galería.

De la enumeración de los volúmenes removidos se desprende una idea bastante precisa de la importancia del conjunto de la obra.

En el ataque por el lado de Mónaco, los 2 km en subterráneo han dado 160.000 m<sup>3</sup> de roca y tierras, totalmente extraídos por dumpers y depositados en diversos puntos del litoral, a petición de las autoridades monegascas, para ganar nuevas superficies utilizables al mar. Es evidente que el m<sup>2</sup> de terreno tiene un precio muy elevado en el restringido territorio del Principado.

En el ataque por el lado de Roquebrune, el volumen de escombros, que fueron obligatoriamente arrojados al mar, alcanza la cifra de 120.000 m<sup>3</sup>, viniendo dada la posición local de la vía férrea, que está en desplomo, por un muro de contención. No era posible otra solución.

Tras la puesta en servicio de la desviación no se ha registrado ningún incidente, pero las desagradables sorpresas encontradas en el curso de la ejecución subrayan el interés especial, en un momento en que están excavando importantes obras subterráneas, de rodearse de todas las garantías geológicas posibles a fin de prevenir peligros eventuales.

Agradecemos a la Empresa C. Montcocol, de París, la documentación fotográfica que su Dirección Técnica ha puesto a nuestra disposición para ilustrar este informe.

**Déviation en tunnel de la voie ferrée dans la principauté de Monaco**

Georges Vié, ingénieur des mines

Le renouvellement du contrat d'exploitation du tronçon de la voie ferrée Marseille-Vintimille qui traverse la principauté de Monaco a provoqué des modifications du tracé primitif. La superficie réduite de la principauté et les exigences de la vie moderne ont obligé les autorités monégasques à chercher une solution qui permette de récupérer une partie des terrains utilisés par les voies.

Le nouveau tronçon, de 3.491 m de long, construit en sa majeure partie en souterrain, comprend deux tunnels séparés par un ravin. Celui de Monte-Carlo, de plus de 3.000 m, a donné lieu à une cascade de problèmes, la plupart posés par les mauvaises conditions géologiques du terrain.

Plus de 280.000 m<sup>3</sup> de terres de remblai ont été utilisés pour emprunter à la mer une superficie utilisable.

---

**Bypass arrangement of the railway at the Monaco Principality**

Georges Vié, mining engineer

The renewal of the development contract for the Marseilles-Vintimilla railway, which crosses Monaco, has necessitated the introduction of changes in the railway layout. As Monaco has a small area, this has obliged the authorities to seek a new arrangement that would enable them to recuperate some of the ground area taken up by the railway line.

The new arrangement, along a distance of 3,491 m, has been constructed largely underground, and it involves tunnels, separated by a narrow valley. The Montecarlo section has been faced with a number of difficulties, almost all of them due to the poor geological soil condition.

More than 280,000 m<sup>3</sup> of excavated soil has been used to gain some useful area from the sea.

---

**Verlegung der Eisenbahnlinie auf eine Tunnelstrecke im Fürstentum Monaco**

Georges Vié, Bergbauingenieur

Die Erneuerung des Pachtbetriebsvertrages der Monaco-Strecke der Eisenbahnlinie Marseille-Vintimiglia rief Traktveränderungen hervor. Die geringe Fläche des Fürstentums und die wachsenden Raumforderungen des modernen Lebens haben der monegassischen Obrigkeit eine Lösung aufgezwungen, welche einen Teil der früheren Eisenbahnstrecke für andere Zwecke freilässt.

Die neue 3.941 m lange Strecke ist grösstenteils unterirdisch und hat zwei durch eine Schlucht getrennte Tunnel. Der Monte-Carlo-Tunnel (über 3.000 m) war —meistens wegen der ungünstigen geologischen Verhältnisse— Quelle immer neuer Probleme.

Die über 280.000 m<sup>3</sup> bewegte Massen wurden ausgenutzt, um durch Meerverdrängung Neuland zu gewinnen.