

Kvesheti-Kobi Road. República de Georgia

Túnel de Gudauri, un proyecto singular en un macizo calcáreo con recubrimientos superiores a los 1000 m

8

En este artículo se exponen los principales aspectos de diseño del túnel de Gudauri que forma parte del tramo de carretera Kvesheti-Kobi en la República de Georgia. Este túnel forma parte de una actuación que constituirá una mejora estratégica en el sistema de transporte por carretera del país, actuando sobre el denominado corredor Norte-Sur.

Francisco Peral Álvaro
(IDOM)

Manuel Cueto Caso
(IDOM)

Miguel Ángel Frías Villafuella
(IDOM)

Manuel Calleja Alonso
(Subterra Ingeniería)

Daniel Santos Delgado
(Subterra Ingeniería)

El túnel de Gudauri se encuadra dentro del tramo Kvesti-Kobi que forma parte del proyecto de carretera 'North-South Corridor (Kvesheti-Kobi) Road Project' en la República de Georgia. El proyecto realizado por IDOM consiste en el estudio de factibilidad de un corredor de 110 km de carretera con una parte de mejora de carretera existente que consta de 15 a 20 puentes o viaductos nuevos (según variante considerada) y de 13 a 15 túneles nuevos totalizando una longitud de 5.000 m. El tramo central, de nuevo trazado, era objeto de estudio de factibilidad y diseño de detalle, y consta de 6 viaductos nuevos incluyendo uno en arco de 400 m de longitud y un puente de 14 vanos, así como de varios falsos túneles para protección de aludes y de tres túneles en mina, dos en NATM y uno con TBM de 9 km de longitud. Este último túnel, el más singular del proyecto, es el objeto de este artículo.

El tramo de carretera que actualmente une Kvesti-Kobi tiene una intensidad de tráfico diaria de 3.000-4.000 vehículos de los que el 30% son vehículos pesados. Debido a las condiciones climáticas y a la orografía de la zona no es posible mantener la carretera operativa durante los meses invernales. Además los radios de curvatura impiden el tráfico de los camiones de mayores dimensiones. Estas limitaciones y discontinuidades en la explotación de la carretera constituyen una gran problemática frente a la creciente demanda de transporte en el corredor Norte-Sur y a su vez están dañando el potencial desarrollo turístico del área Norte (Gudauri ski resort, Kazbegi National Park...). Esta actuación constituirá una importante mejora cuantitativa y cualitativa en el sistema de transporte por carretera en el país.

El tramo de nuevo trazado constituye un reto tanto desde el punto de vista del diseño como desde el de la ejecución. El trazado finalmente aprobado para el túnel de Gudauri implica una solución en túnel a lo largo de 9 km de longitud, y constituirá un elemento singular en la comunicación a ambos lados (Norte-Sur) del sistema montañoso Caucásico el cual presenta una orografía muy accidentada con cimas superiores a los 5.000 m de altitud. Este túnel será el más largo de Georgia y atraviesa un macizo principalmente calcáreo que supera en algunas zonas los 1.100 m de recubrimiento sobre el eje del trazado. Para la Ingeniería de Detalle del Túnel Gudauri, IDOM contó con la colaboración de Subterra Ingeniería. Dada la magnitud del estudio, se contó también con la colaboración del grupo de Geología Aplicada a la Ingeniería de la Universidad de Oviedo para el estudio geológico del túnel de Gudauri y con el Institute of Earth Sciences and National Seismic Monitoring Centre, Ilia State University (Georgia) para el asesoramiento sísmico al ser una zona con actividad sísmica, aspecto fundamental en el estudio de alternativas del tramo de nuevo trazado. Este equipo pluridisciplinar permitió abarcar todos los aspectos de un estudio de dicha magnitud y conseguir realizarlo en unos plazos muy reducidos que exigía el cliente dada la importancia estratégica de acometer dicha obra y mejorar el tráfico en este corredor. La Figura 1 muestra la situación del túnel de Gudauri dentro del estudio de mejora del corredor.

A continuación se exponen los principales aspectos de diseño del Túnel de Gudauri.

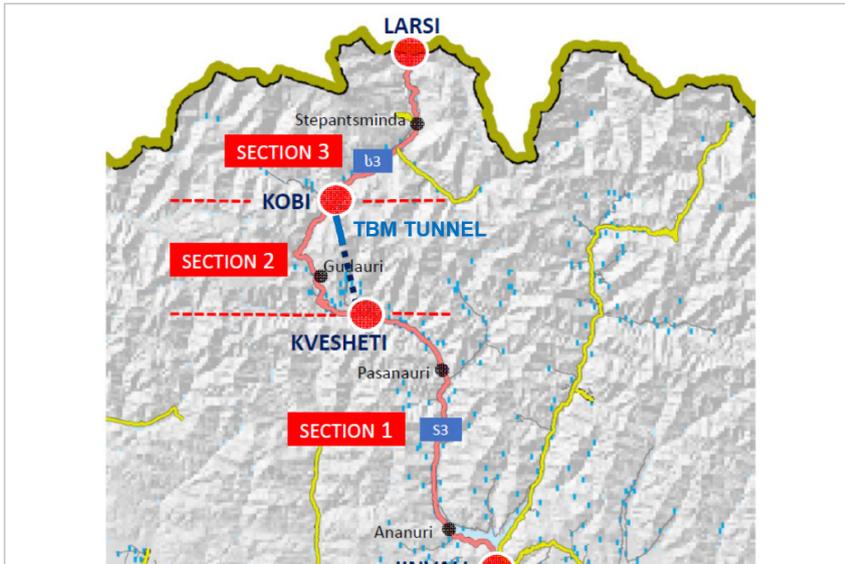


Figura 1.- Situación del Túnel de Gudauri.

Datos geométricos y funcionales del túnel

El Túnel Gudauri presenta una longitud de 8.860 m. La longitud soterrada total alcanza los 8.995 m sumando la longitud de los falsos túneles diseñados en el portal Norte (Kobi) y en el portal Sur (Tskere). El sistema de evacuación del túnel se articula a través de una galería peatonal paralela con conexiones cada 500 m. La Figura 2 muestra la Planta de trazado del túnel.

La sección funcional del túnel se ha concebido para albergar tráfico bidireccional de un carril por sentido (Figura 3). Conforme a las recomendaciones de la PIARC (Cross section design for Bi-directional road tunnels) se diseñó un ancho de plataforma de 11 metros de anchura total distribuidos en dos bermas de 1.5 m, 3.5 m para cada carril y 1.0 m en la mediana. Mediante esta configuración es posible prescindir de la generación de apartaderos. Adicionalmente se dispusieron sendas aceras de 0.75 m de ancho en cada lado. Se ha respetado un gálibo libre de 5.0 m.

El sistema de ventilación fue un condicionante fundamental en la definición de la sección tipo asociado a la casi imposibilidad de disponer de un acceso intermedio para reducir la sección necesaria para la ventilación. Esta es entonces de tipo transversal y la sección provee una superficie para la circulación del aire contaminado sobre un falso techo y también una superficie para la circulación del aire fresco bajo la calzada (Figura 3). Este conjunto de condicionantes geométricos junto al planteamiento de la ejecución mediante máquina tuneladora, por plazos de obra, definen una sección funcional circular de 13.4 m de diámetro interior.



Figura 2.- Trazado del túnel de Gudauri.

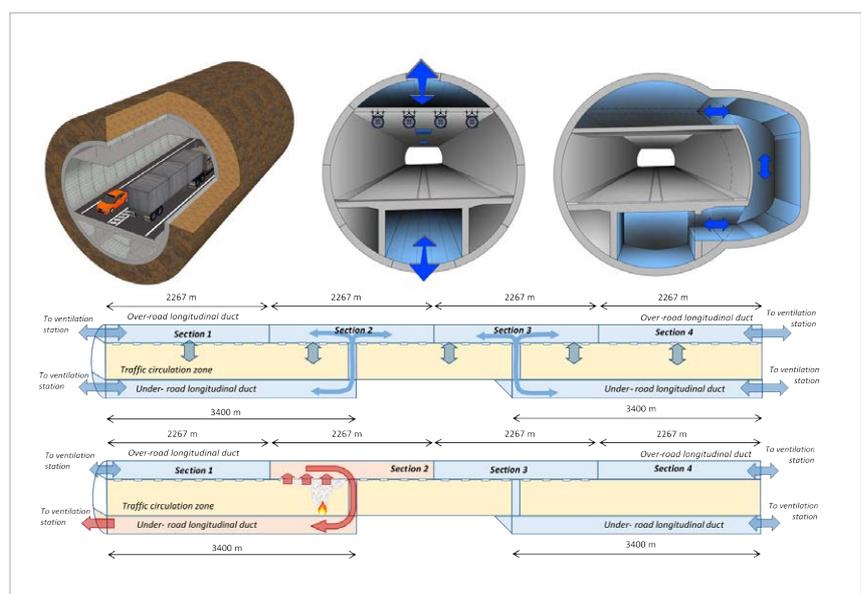


Figura 3.- Sección Túnel Gudauri y esquema del innovador sistema de ventilación.

Respecto a la galería de evacuación, aunque el planteamiento inicial únicamente consideraba un acceso de tipo peatonal, finalmente se adoptó una sección para tráfico debido a la conjunción de aspectos constructivos, consideraciones respecto a la facilidad de mantenimiento y la obtención de un estándar más elevado respecto a la seguridad en explotación. La sección facilita un pasillo peatonal de 0.75 m de ancho junto a un carril de 2.8 m y respeta un gálibo vertical de 3.0 m.

La distancia entre los ejes de la galería y el túnel principal se ha establecido en 37 m para todo el trazado salvo en el caso del Portal de Kobi en donde se ha reducido ligeramente con el objeto de limitar las dimensiones y afección de la excavación. Las conexiones entre la galería y el túnel se han diseñado en base a tres tipologías:

- Conexión peatonal: Cada 500 m
- Conexión peatonal y vehicular: Cada 1.500 m
- Conexión peatonal y espacio para instalaciones: Cada 1.500 m

En la Figura 4 se muestra la planta esquemática de la conexión de tipo peatonal.

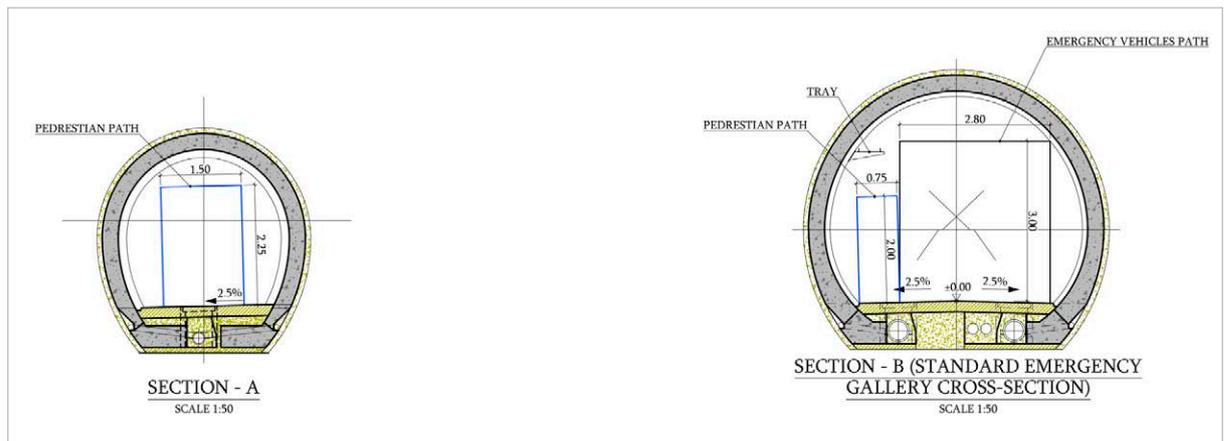
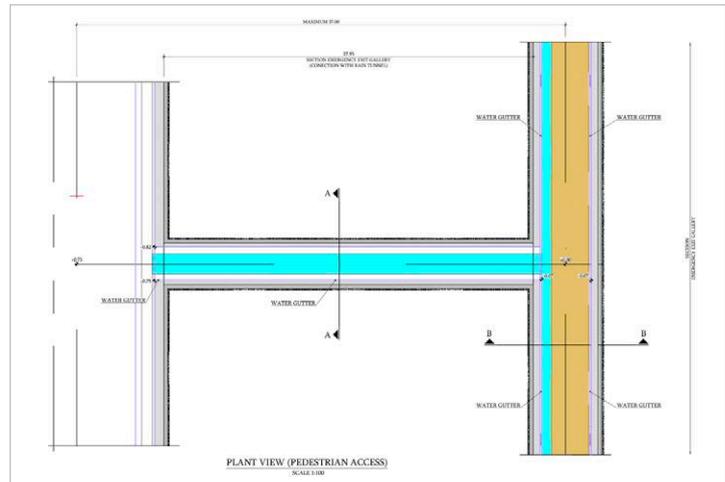


Figura 4.-Planta y secciones. Conexión peatonal con galería.

Datos geológicos

El Túnel de Gudauri se desarrolla en las estribaciones del Cáucaso, situado en la intersección entre Europa y Asia. Este sistema montañoso se extiende desde el Mar Negro hasta el Mar Caspio, y tiene entre sus cimas el Monte Elbrus que es el pico más alto de Europa (5.642 m). La zona se caracteriza geológicamente por la presencia de afloramientos de un basamento Mesozoico cubierto por recientes flujos de lava volcánica y sedimentos Cuaternarios de diferente naturaleza. En el macizo calcáreo por el que discurre el túnel se diferencian dos dominios estructurales, un dominio norte caracterizado por pliegues cerrados asimétricos y basculados de vergencia sur, donde se desarrolla una foliación penetrativa (Jurásico) y un dominio sur con pliegues abiertos y sin deformación interna (Cretácico). Ambos dominios se encuentran separados por un cabalgamiento tal como se presenta en la Figura 5.

El sustrato carbonatado entre el portal de Kobi (norte) y el portal de Tskere (sur) es una formación Jurásica flyshoide que puede ser dividida en dos miembros. Un miembro inferior hacia el norte fundamentalmente margoso, constituido por una alternancia centimétrica a decimétrica de margas, calizas y pizarras arcillosas, con algunos niveles centimétricos intercalados de areniscas (azul claro Fig. 5). Una unidad superior en el lado sur (azul oscuro Fig. 5) cons-

tituida por calizas estratificadas con potencias de más de 2 metros de espesor en alternancia con pizarras y margas en niveles de 1-2 m de espesor. Ambos miembros se diferencian ya que el miembro inferior es eminentemente margoso y el superior más calcáreo.

Tapizando todos estos depósitos se encuentran sedimentos volcánicos cuaternarios, siendo identificados 4 conos volcánicos en la zona. Asociado a estos conos volcánicos se diferenciaron varios episodios efusivos. En el portal sur y a lo largo de los primeros 500 m del túnel, se excavarán materiales volcanoclásticos básicos, probablemente derivados del volcán Sedzede III. Los materiales de este volcán están caracterizados por la emisión de lavas con composición basáltica o andesítica y tobas que dan como resultado rocas con clara textura porfídica.

Por otro lado, los procesos modeladores del relieve asociados a los ambientes de alta montaña han originado una cobertura de sedimentos cuaternarios debidos por un lado a la presencia de glaciares, mediante la formación de morrenas y, en segundo lugar, al tapizado de las superficies por la alteración superficial y el transporte gravitacional de los materiales, conformando rellenos coluviales de ladera.

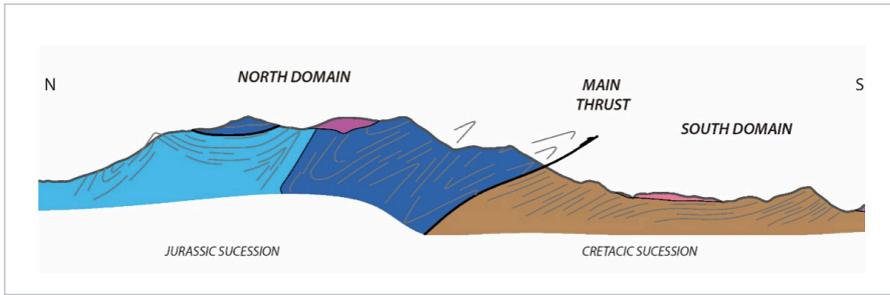
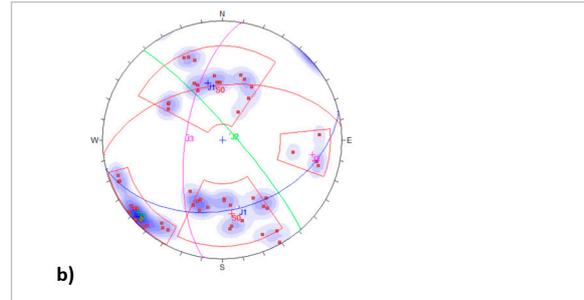
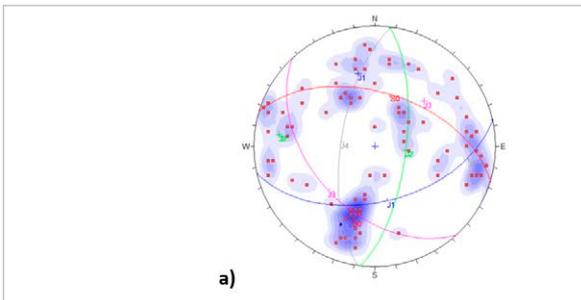


Figura 5.- Perfil longitudinal geológico de la zona de proyecto.



Familia	Buzamiento	Dirección Buzamiento.
S0	53	17
J1	52	167
J2	69	97
J3	46	227
J4	67	278

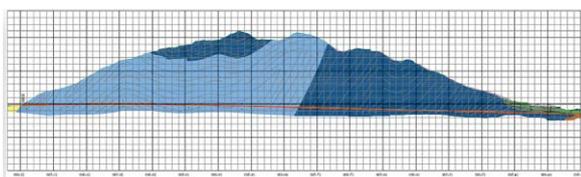
Familia	Buzamiento	Dirección Buzamiento.
S0/S1	52	353
J1	40	176
J2/S0	82	48
J3	282	72

Figura 6.- Análisis de discontinuidades. Dirección y dirección de buzamiento para las discontinuidades medidas en materiales a) cretácicos y b) jurásicos a lo largo del trazado, mediante el software Dips 5.0 (Rockscience).

Se han diferenciado los dominios estructurales de la zona cretácica y jurásica. Para su análisis, las medidas tomadas en campo se han representado mediante proyección estereográfica, a partir de la cual se obtienen, mediante análisis estadístico, isolíneas de densidad de polos. Posteriormente se obtienen, los polos medios que corresponden a las direcciones medias de fracturación. La Figura 6 muestra un diagrama de contornos de polos, la unidad Cretácica (Fig. 6a) y Jurásica (Fig. 6b). Se ha realizado a su vez una división por dominios estructurales a lo largo del todo el trazado.

Una vez determinada la representatividad del patrón de fracturación, se ha procedido a cuantificar mediante análisis estadísticos la dispersión de las discontinuidades en términos de persistencia, rugosidad, apertura y espaciado.

Los materiales presentes a lo largo del desarrollo del túnel corresponden casi en su totalidad a materiales jurásicos del miembro superior e inferior y, únicamente y de forma localizada, aparecen en el emboquille de entrada materiales volcánicos compuestos por tobas, lavas basálticas y morrenas arcillosas cuaternarias (Figura 7).



La verificación sísmica se llevó a cabo de acuerdo al Eurocódigo 8 teniendo en cuenta el método de deformación indicado en Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, 'Tunnel and Underground Space Technology' Vol. 15, Nr. 3, 2000, así como DAUB 'Recommendations for the design, production and installation of segmental rings' - 2013. Pertenecientes a la International Tunneling Association (ITA) y a la Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES).

El método usado para analizar las acciones sísmicas sobre la estabilidad del túnel es el de deformación de corte en campo libre [Wang 1993; Power et al. 1998; Hashsh et al. 2001].

Previamente se realizó específicamente un estudio sísmico en las inmediaciones del Túnel de Gudauri desarrollado por el Institute of Earth Sciences and National Seismic Monitoring Centre, Ilia State University.

La Aceleración Máxima del Suelo obtenida es $A_0 = 0,372$ g. Se ha considerado una Desangulación Sísmica de Diseño para las obras subterráneas de $e_{max} = 2,59 \times 10^{-4}$.

El campo de esfuerzos natural adoptado corresponde a una distribución del coeficiente de esfuerzo K_0 de 1,5 en la dirección Este-Oeste y también de 1,5 en la dirección Norte-Sur.

Figura 7.- Perfil geológico del túnel de Gudauri.

Datos geotécnicos

Debido a la compleja orografía (Paso de Jvari a 2.400 m de altitud) y meteorología (investigación únicamente en periodo estival) existente en la zona del túnel, se ha llevado a cabo una investigación geológico-geotécnica multi-técnica. La investigación incluyó cartografía geológica con toma de datos estructurales (27 estaciones geomecánicas); sondeos horizontales y verticales profundos (6 sondeos con 730 ml y hasta 200 m de profundidad); así como investigación geofísica (920 ml de sísmica de refracción y 1000 m de tomografía eléctrica superficial). De forma novedosa en Georgia, en los sondeos profundos se ejecutaron 46 presio-dilatómetros (tipo OYO) con un equipo movilizado desde España.

12

Es necesario destacar, que únicamente eran accesibles las zonas de ambos emboquilles, por lo que fue necesario llevar a cabo accesos con maquinaria pesada, recurriendo en la parte central del túnel de mayor montera, a geofísica profunda, llevando a cabo tomografía eléctrica profunda a lo largo de 3600 m y alcanzando una profundidad de investigación de 400 m con alta resolución. Para los trabajos de geofísica profunda en la parte central del túnel se emplearon unas 20 personas, así como quads y caballos, permitiendo completar la adquisición en la parte central del túnel únicamente durante las ventanas de buen tiempo en periodo estival.

Además de los ensayos geotécnicos de laboratorio, se realizaron ensayos de Fluorescencia de rayos X y Difracción de rayos X, realizando una caracterización geoquímica y mineralógica de las diferentes litologías atravesadas, con el objetivo de anticipar minerales problemáticos.

Para el análisis hidrogeológico del túnel, se llevaron a cabo 11 ensayos de tipo Lefranc, 12 ensayos Lugeon y ensayos de medida de caudal en los sondeos horizontales realizados (5-9 l/s).

Finalmente, debido al riesgo sísmico existente en la zona de estudio, el Instituto de Ciencias de la Tierra y Centro Nacional de Monitorización Sísmica (Iliá State University) llevó a cabo un estudio particularizado.

Para realizar la toma de datos en un plazo limitado por la presencia de nieve, se llegó a contar con 5 empresas geotécnicas y geofísicas trabajando conjuntamente, dos de ellas españolas y 3 locales (Figura 8).

En base a los ensayos de laboratorio realizados, las unidades Jurásicas por las que discurre la mayor parte del túnel de Gudauri presentan valores de compresión simple (σ_{ci}) de 45-55 MPa, clasificándolas como de resistencia media (ISRM 1978). Las unidades de coladas basálticas y andesíticas intersectadas en la parte inicial del túnel se clasificarían como de resistencia alta (90 MPa), mientras que los niveles de tobáceos y escoriáceos intercalados como de resistencia moderada (40 MPa). El módulo de elasticidad (E_i) de 25-40 GPa, y de acuerdo a la clasificación de Deere and Miller (1966), estos valores resultan generalmente en alto módulo relativo ($E_i/\sigma_{ci} > 500$).

Una vez caracterizado el litotipo a nivel de roca intacta, el macizo rocoso se ha clasificado utilizando los criterios de valoración de Bieniawski, que proporciona el índice RMR (Rock Mass Rating) asimilándolo al GSI (Geological Strength Index). A continuación se procede, para los diferentes rangos de calidad geomecánica establecidos, a la minoración de las propiedades de la roca intacta mediante las formulaciones de Hoek-Brown para parámetros resistentes y de Bieniawski-Galera (2005,2006) para los deformacionales.

Basándose en las recuperaciones de los sondeos, los valores de RMR obtenidos en las estaciones geomecánicas, las observaciones de campo realizadas durante la fase de cartografía geológica y, apoyada en el modelo geológico, se pudo realizar la zonificación o sectorización del longitudinal del túnel en rangos de RMR. La tramificación desarrollada se muestra en la Figura 9.

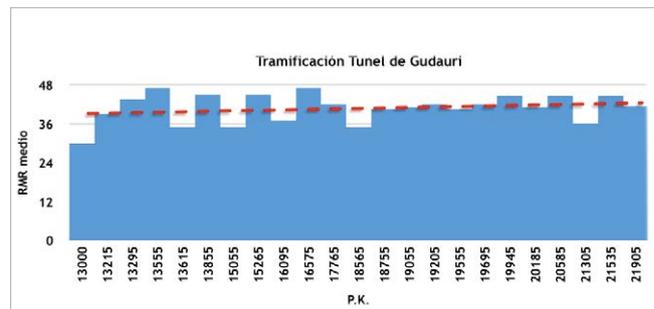


Figura 9.- Tramificación geomecánica del Túnel de Gudauri.



Figura 8.- Perforación de sondeo y trabajos de adquisición de tomografía eléctrica profunda en el emboquille Norte (Kobi).

Análisis de riesgos

El análisis de riesgos es un proceso muy importante en cualquier proyecto. A tal fin en el proyecto del Túnel de Gudauri se siguieron las recomendaciones del ITA para proyectos de túneles.

La metodología empleada incluye la realización de una matriz de identificación de peligros posibles a los que posteriormente se asocia un impacto y una probabilidad de ocurrencia. De esta manera los peligros posibles pasan a convertirse en riesgos potenciales y mediante la ponderación de riesgos basada en la combinación de probabilidad e impacto se genera la denominada matriz de riesgos.

Una vez identificados los riesgos se establecen las medidas para reducirlos 'As Low As Reasonably Practicable' (denominado como principio ALARP). De la asignación de medidas de mitigación de riesgos (mediante reducción, transferencia o eliminación) se obtiene la matriz de riesgos residuales, donde podemos identificar los denominados como riesgos críticos, aquellos riesgos que tras las actuaciones previas tienen, de todas maneras, alta probabilidad de ocurrencia y alto potencial de impacto. Tanto la identificación de riesgos como la revisión del impacto de los mismos deben ser revisados cíclicamente a lo largo de todas las fases del proyecto.

En el proyecto del Túnel de Gudauri, los riesgos identificados como críticos fueron los siguientes:

- Presencia a lo largo del trazado de zonas de falla.
- La presencia regular y frecuente de planos de pizarrosidad subhorizontales, inclinados subverticales o verticales.
- El exceso de entrada de agua al túnel, preferentemente en las zonas de contacto, zonas kársticas y zonas de falla.
- Presencia de acuíferos debidos al cizallamiento y confinamiento por parte de las lavas andesíticas.
- Presencia de manantiales en el túnel.
- Condiciones de 'Squeezing' en las zonas de debilidad del macizo
- Derrumbes asociados con zonas de falla
- Riesgos kársticos asociados a la presencia de calizas masivas.

Para la mitigación de los riesgos asociados al Squeezing se realizó un estudio a lo largo del trazado aplicando las metodologías de evaluación del potencial de squeezing en base a varios autores. El resultado del análisis se muestra en la Figura 10, en donde se puede observar una alta potencialidad de 'squeezing' a lo largo del túnel, siendo crítica en las zonas con mayor cobertera.

Desde el punto de vista hidrogeológico se analizó la infiltración potencial del túnel en base a la pluviometría anual, la evapotranspiración real y los coeficientes de infiltración, estableciéndose una sectorización de los mismos y apoyándose en datos de mediciones de caudales en un sondeo horizontal de 200 metros realizado en una de las bocas del túnel que resultó ser surgente y cuyo caudal fue monitorizado durante varios meses. Como resultado se obtuvieron unos potenciales flujos de infiltración entre 281-523 l/s en el portal sur y de 130-241 l/s en el portal norte, siendo para el Túnel de Gudauri de 411 - 763l/s (considerando las variaciones en el diámetro de perforación del túnel), con una media durante la perforación de 587 l/s \pm 30%. Desde el punto de vista hidrogeológico el substrato se considera impermeable, por lo que la posibilidad de existencia de agua subterránea queda restringida a la presencia de discontinuidades en el macizo como zonas de fractura, planos subverticales de la tectonización, zonas kársticas, etc. que conforman la permeabilidad secundaria.

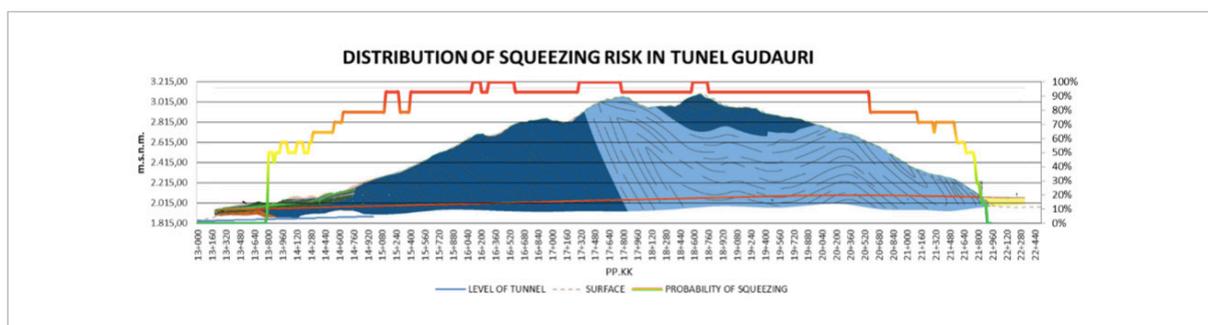
La ejecución de la Galería de Emergencia con carácter previo, servirá para realizar un drenaje puntual del túnel principal antes de su excavación, evaluar el conjunto de riesgos y establecer medidas de actuación respecto a la ejecución del túnel principal.

Método y estrategia constructiva

Para la elección del método constructivo a emplear en un túnel, una de las primeras opciones a considerar, es la de un método totalmente mecanizado. En el caso del túnel Gudauri, su longitud en el entorno de los 9 km, una sección de excavación de grandes dimensiones y una relativa homogeneidad en las características de los materiales a atravesar resultan factores determinantes para que la adopción de métodos mecanizados implique mayores rendimientos y menores costes.

Las condiciones ideales para el diseño de una obra subterránea se encuentran asociadas a la disposición de un modelo 3D geológico-geotécnico e hidrológico. En este caso, las condiciones orográficas y climáticas de la zona supusieron una limitación en cuanto a la cantidad de sondeos y geofísica disponible. Debido a lo anterior se adoptó como estrategia constructiva la ejecución de la galería de evacuación mediante NATM. De este modo, contando con que es posible abordar la excavación de la galería desde ambos portales, que el inicio de los trabajos podría efectuarse con bastante antelación respecto a la TBM y unido a que las dimensiones de la excavación de la galería son las idóneas para maximizar los rendimientos, se prevé que a lo largo de la totalidad de la traza la excavación de la galería se ejecutaría con anterioridad al paso de la TBM. Esta circunstancia supone un aspecto clave respecto a la mitigación de riesgos del proyecto debido a que es posible prever las condiciones geotécnicas del frente de excavación de la TBM.

Figura 10.- Análisis de potencialidad de Squeezing, Túnel de Gudauri.



Asimismo, permite la ejecución de tratamientos tales como inyecciones o drenes de alivio de presión de agua, sobre la sección del túnel principal previamente a su excavación.

Respecto a la elección de la tipología de la máquina se desarrolló un estudio comparativo para determinar la opción idónea entre TBM de doble o simple escudo y una EPB adaptada para excavación en roca. A continuación se resumen los principales factores considerados en la elección de la máquina:

- Resistencia a compresión simple de las litologías en rangos entre 40-90 MPa, principalmente 40-50 MPa.
- RME de las litologías comprendido entre 44 a 61.
- Máximo recubrimiento de 1.100 m y su influencia sobre el estado tensional de la roca y su potencialidad de squeezing.
- Existen varios factores asociados con una cierta incertidumbre geológico, geotécnica e hidrogeológica a lo largo del tramo central del túnel como: RMR y RQD de la roca, presencia de fallas, caudales y presencia de presiones elevadas de agua.

Para la estimación de rendimientos se determinaron los ARAT según la tipología de máquina (Nuevas aplicaciones del 'Índice RME' para la selección del tipo de tuneladoras. Bieniawski, Galera, Celada, Tardáguila, 2006).

Finalmente se consideró la tipología de TBM de escudo simple como la más idónea en base a las siguientes consideraciones:

- El rango de RME esperados a lo largo del trazo supone un escenario en el que una TBM de escudo simple es competitivamente superior en rendimiento- coste frente una TBM de doble escudo.
- Debido al contexto geológico el riesgo de atrapamiento debe considerarse como un factor importante. La menor longitud de un escudo simple supone por tanto una clara ventaja frente a este aspecto.
- Respecto al riesgo de presencia de presiones de agua elevadas, un escudo simple también presenta ventajas notables frente a un doble escudo. Este aspecto podría haber condicionado la elección de una EPB, sin embargo la estrategia constructiva prevista permitió restar peso a este condicionante.

La galería de evacuación, a ejecutar mediante la implementación del Nuevo Método Austriaco, se excavará a sección completa dado que se trata de una sección inferior a los 40 m². La construcción de las conexiones galería- túnel principal se ha proyectado siguiendo los siguientes pasos. La Figura 11 muestra una imagen representativa de este proceso.

- Excavación y sostenimiento de la galería de sostenimiento hasta 5 m de distancia respecto al contorno del túnel principal.
- Refuerzo del anillo de dovelas, ejecución de paraguas de micropilotes y corte de la sección de intersección.
- Ejecución de un marco de acodalamiento que puntea las cargas de las dovelas demolidas.
- Excavación y sostenimiento del tramo restante de galería de conexión.

Sostenimiento y revestimiento

En el presente proyecto se diferencia entre el diseño del anillo de dovelas del túnel principal y el diseño del sostenimiento y revestimiento de las galerías de evacuación.

En cuanto al anillo de dovelas se adoptó una tipología de anillo universal formado por 9+1 piezas. Las grandes coberteras que caracterizan el túnel junto a la potencialidad de squeezing han condicionado el empleo de dovelas de 0,50 m de espesor. Se han diferenciado dos clases resistentes para el hormigón en función de la montera existente, adoptándose C50/60 para coberteras inferiores a los 700 m y C70/80 para las mayores coberteras.

El diseño de los refuerzos se ha efectuado considerando los escenarios de carga habituales para el diseño de estructural como son:

- Acciones de manipulación: desencofrado, almacenamiento y colocación. Se trata de acciones que se producen entre la fabricación de la dovela y su puesta en obra.
- Empuje de los gatos al avanzar la máquina.
- Acciones del terreno sobre el túnel. Implican el estado de cargas que el terreno induce sobre el anillo tras el paso de la tuneladora y durante la vida útil del túnel incluso las cargas sísmicas.
- Acciones asociadas a estados de carga en relación con la explotación como puedan ser cargas interiores o una situación de incendio.

Para la estimación de las acciones del terreno sobre el túnel se desarrollaron modelos tensodeformacionales que reproducen con gran nivel de verosimilitud el proceso constructivo de un túnel mediante tuneladora y la interacción entre los diferentes elementos como son, terreno, escudo, mortero de trasdós y dovelas. En la Figura 12 se muestra una salida gráfica del modelo de cálculo.

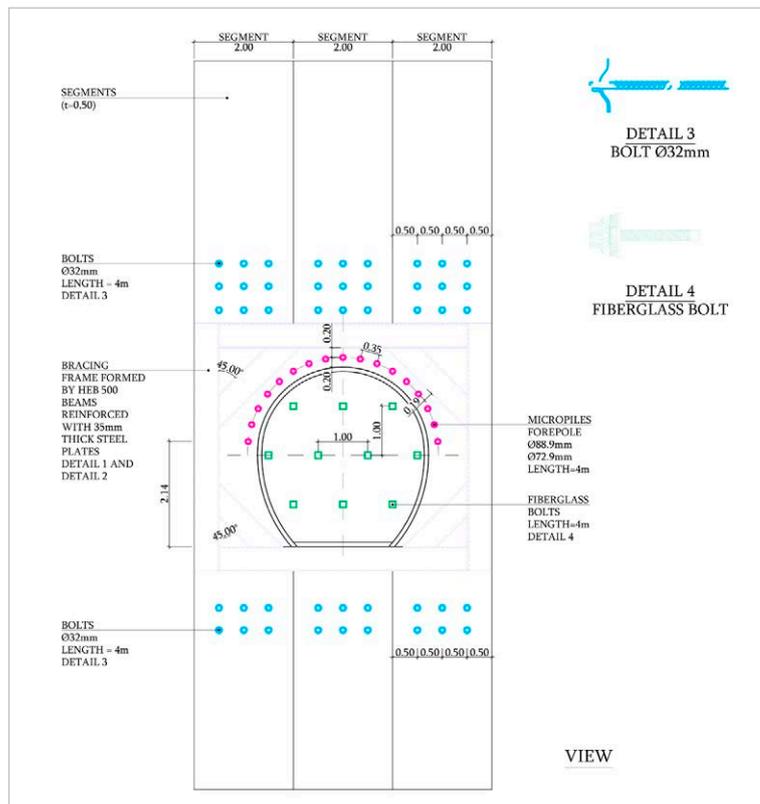


Figura 11.- Conexión Túnel-Galerías.

El diseño frente al fuego se ha efectuado considerando un estándar R120 y se ha aplicado el Método Simplificado de la Isotherma 500°C. Adicionalmente se ha considerado una dosificación de fibras de polipropileno antiincendio que previenen el desarrollo del fenómeno de spalling en el hormigón durante un incendio.

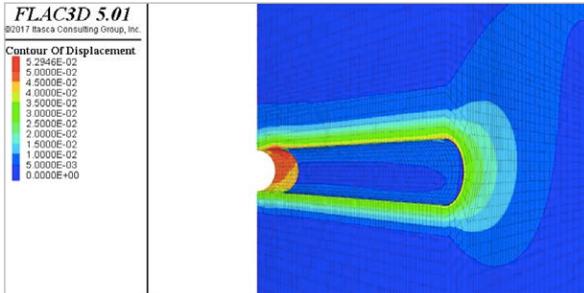


Figura 12.- Excavación en avance de la TBM. Desplazamiento total a largo plazo. Modelo Flac 3D.

Respecto a la galería, el diseño del sostenimiento de una obra subterránea en un macizo rocoso implica como primera operación la división del trazado en tramos homogéneos desde el punto de vista de su comportamiento geotécnico. A continuación se procede a la definición de las secciones tipo de sostenimiento de la galería auxiliar y las galerías de conexión, para lo que se ha seguido una metodología progresiva, en el siguiente orden:

- Clasificaciones geomecánicas: Se trata de métodos empíricos que permiten efectuar un prediseño ajustado del sostenimiento a instalar.
- Análisis mediante Examine 2D de la influencia entre las diferentes excavaciones mediante el método de elementos de contorno.
- Cálculo de bloques: Mediante el software UNWEDGE, estos cálculos son complementarios a los métodos numéricos.
- Cálculos tenso-deformacionales: Una vez predefinidos los sostenimientos mediante los métodos anteriores se procede a realizar simulaciones numéricas para comprobar la idoneidad de los diseños realizados mediante su análisis tensodeformacional. Para ello se han empleado los programas FLAC3D y PHASE2D.

En las Figuras 13, 14 y 15 se muestran algunas de las salidas de cálculo obtenidas en el diseño del sostenimiento mediante el empleo de los programas UNWEDGE, FLAC3D y PHASE 2D.

PROJECT		TUNNEL	
GUDAURI TUNNEL GEORGIA		Emergency Gallery	
SECTION	Detail 4	FINISH	160.0211.32P
DATE		ANALYSIS	ST-B
COMBINATION OF JOINTS			
NO	JOINT	EXP	TYPE
1	1	AT	IS
2	2	AT	IS
3	3	IS	IS
JOINT PROPERTIES			
NO	A/T	E/T/PS	μ/IMP/2
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	0	0
ROCK PROPERTIES			
SECTION NAME	ROCK UNIT_1		
BOLT TYPE	M124		
BOLT CHARGE (KG/m)	...		
BOLT LENGTH (M)	...		
BOLT CIRCUMF. (MM)	...		
BOLT WEIGHT (KG)	...		
BOLT SPACING (M)	...		
ROCK COEFFICIENT	...		
ROCK COEFFICIENT	...		

Figura 13.- Factores de seguridad frente a caída de bloques. Modelo Unwedge.

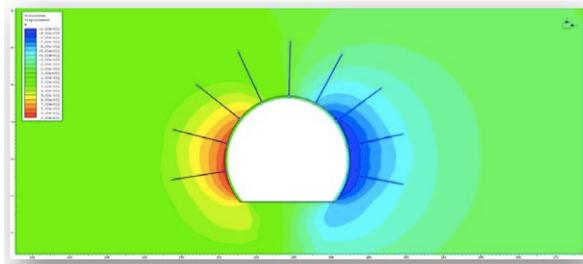


Figura 14.- Desplazamiento horizontal del terreno (en m). Galería Auxiliar. Modelo Phase 2D.

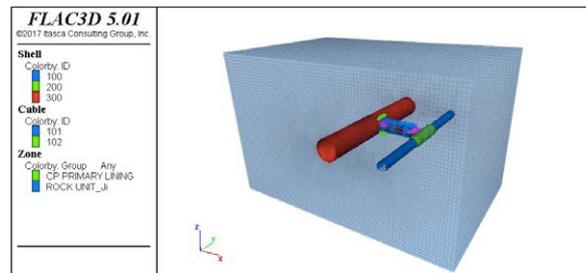


Figura 15.- Modelo de cálculo. Conexión Galería Auxiliar. Modelo Flac 3D.

En la Tabla I se detallan los diseños de sostenimiento desarrollados para la galería de emergencia y galerías de conexión.

Debido al potencial de squeezing presente en el trazado y para aquellas profundidades mayores de 700 m (donde se ha definido una mayor probabilidad de ocurrencia) se prescribe la colocación de la segunda capa de sostenimiento final con un desfase de 12 m, tras la ejecución del sostenimiento primario. Asimismo, en estas zonas se han previsto sobreexcavaciones en el entorno de 15 cm para contrarrestar la pérdida de sección asociada a las convergencias obtenidas en los cálculos.

Sostenimiento tipo	RMR c	Longitud pase (m)	Sellado (1) (cm)	Pernos (2) eT(m) xe _L (m)	SC-40/50(1) (cm)	marcos Espaciado (m)	Otros
I	<65	4,0	3	2,0 x 2,0	3	-	(1)(2)
II	55-65	3,0	3	2,0 x 1,5	7	-	-
III	45-5	3,0	3	1,5 x 1,5	10	-	(3)
III-A	45-55	3,0	3	1,5 x 1,5	10+10		(4)(5)(6)
IV	30-45	1,5	5	-	15	LG-95/26-18 @ 1,5 m	(3)(6)
IV-A	30-45	1,5	5	-	15+15	HEB-140 @ 1,5 m	(4)(5)(6)
V	<30	1,0	5	-	20	HEB-140 @ 1,0 m	(3)(6)
V-A	<30	1,0	5	-	20+20	HEB - 180 @ 1,0 m	(4)(5)(6)

- (1): El hormigón de sellado se diseña como un SC-40/50 con un contenido en fibras de polipropileno de 4kg/m³.
- (2): pernos Sweelex Mn 24 de 3 metros de longitud, con placa de reparto de 200x200x6mm.
- (3): para profundidades mayores de 700m.
- (4): Para profundidades mayores de 700m.
- (5): 12m después de la ejecución del sostenimiento primario debe ser ejecutado el revestimiento.
- (6): La sección de excavación se divide en dos fases (avance y destroza) separadas con un mínimo de 25 m entre sí.

Tabla I.- Sostenimientos propuestos. Galería de emergencia y galerías de conexión. Túnel de Gudauri.

El sostenimiento tanto primario como secundario de todas las obras subterráneas incluirá una dosificación de 4kg/m³ de fibras sintéticas estructurales.

A continuación se procede al diseño del revestimiento para lo que, en el presente proyecto, los condicionantes que suponen el sistema de impermeabilización adoptado, las cargas sísmicas, y la estimación de la degradación de los parámetros geotécnicos a largo plazo son los principales factores a considerar. Asimismo el revestimiento debe proporcionar un coeficiente de seguridad adicional sobre la función estabilizadora del sostenimiento. En la Tabla II se detallan los diseños de revestimiento desarrollados.

Sostenimiento Tipo	RMRc	Revestimiento Espesor ⁽¹⁾ (cm)	Contrabóveda Espesor ⁽¹⁾ (cm)
I	>65	30	-
II	55-65	30	-
III	45-55	30	-
IIIA	45-55	40	50
IV	30-45	30	30
IVA	30-45	40	50
V	>30	30	30
VA	>30	40	50

(1): Hormigón C 40/50 reforzado con armadura B500C

Tabla II.-Revestimientos propuestos.
Galería de emergencia y galerías de conexión. Túnel de Gudauri.

El sistema de impermeabilización contempla dos soluciones completamente diferentes en cuanto a su concepción:

- Sistema impermeabilización y drenaje para la galería de emergencia. Este sistema canaliza los flujos del agua de infiltración hacia el sistema de drenaje de la galería y se aplicará siempre que la infiltración medida en el túnel supere los 10 l/min cada 5 m.
- Túnel estanco para el túnel principal ejecutado con TBM. La estanqueidad se obtiene por medio de gaskets situados en las juntas de las dovelas.

Tratamientos especiales

Se denominan como 'tratamientos especiales' aquellas acciones a determinar durante la ejecución de la obra que no se encuentran recogidas dentro del proceso de excavación y sostenimiento de los túneles a ejecutar.

El comienzo y final de la perforación con una máquina tuneladora conlleva siempre una operación delicada. Debido a la usual alteración del terreno en los taludes frontales de los portales, se proyecta en ambos portales la construcción de los primeros 15 m con una sección que permita el posterior paso del escudo de la tuneladora, a realizar mediante perforación y voladura.

La sección de excavación se diseña en fase de avance y posterior destroza (y construcción de contrabóveda). El sostenimiento, a realizar en pases de 1,0 m, conlleva el sellado de 3 cm de hormigón, la colocación de cerchas HEB-180 cada metro y el gunitado

de 30 cm adicionales para completar el sostenimiento. En ambos emboquilles se proyecta a su vez la realización de un paraguas de micropilotes $\varnothing_{int} / \varnothing_{ext}$ 88.9/72.9 mm.

La galería de emergencia en este proyecto hace las veces de galería de investigación, conforma por lo tanto un aspecto peculiar, ya que de por sí la galería de emergencia servirá como prospección y elemento del drenaje del macizo. Los tratamientos especiales se ejecutarán en la galería o desde la galería hacia el túnel principal. Los tratamientos proyectados son los siguientes:

- Realización de perforaciones horizontales en el frente de la galería que permitan anticipar los materiales atravesados, detectar la presencia de bolsas de agua y medir y aliviar las presiones en el frente. Estos sondeos se realizarán en la galería cuando se atraviesen terrenos tipo IV-V y en el túnel principal, cuando se atraviesen terrenos con valores de RMR<45. Las perforaciones horizontales tendrán una longitud mínima de 30 m.
- En base a los datos obtenidos de las perforaciones o en base a los registros de avance de la galería puede ser necesario la mejora de los terrenos mediante inyecciones de lechada que permitan la reducción de los flujos de agua y la mejora de las características del terreno. Estas inyecciones pueden ser en forma de paraguas en el frente de la galería o bien desde la galería hacia el túnel principal, preparando el posterior paso de la tuneladora.
- En el frente de excavación de la galería de emergencia, cuando las condiciones del terreno lo ameriten, ejecución de bulones de fibra en el frente, el mantenimiento de un machón central, el gunitado del frente de excavación o la ejecución de paraguas. Todos estos tratamientos especiales deben ser en cualquier caso valorados y aprobados por la dirección de obra.
- Para evitar la pérdida de sección debida al elevado rango de deformaciones previstas se diseña una sobreexcavación de la sección, que en el caso de la tuneladora viene dada por la conicidad del escudo y copy cutters, mientras que en el caso de la galería NATM se realizará mediante la definición de contornos de sobreexcavación.

Emboquilles

Los trabajos que se desarrollaron para definir los taludes en roca o suelo en ambos portales del túnel, fueron los siguientes:

- Definición geométrica de los taludes laterales y frontal.
- Análisis frente a estabilidad global mediante el programa SLIDE v6.0
- Análisis cinemático y estereográfico mediante el programa SWEDGE v5.0.
- Definición del tratamiento y refuerzo de los mismos.
- Definición de los procesos constructivos.

En el caso del Portal Norte del Túnel de Gudauri los taludes se desarrollarán en terrenos rocosos de calidad geomecánica media con un pequeño recubrimiento de materiales coluviales. Tras el análisis pertinente se han diseñado refuerzos consistentes en la parte superior de los taludes en una malla de 3x2 metros de anclajes de 3 cables y 10 m de espesor. En la bancada inferior se proyectaron bulones en malla 2x2 m de 8 m de longitud. Adicionalmente se dispusieron diversos espesores de hormigón proyectado reforzado con doble o simple mallazo. Finalmente se dispusieron drenes de 1 m de longitud repartidos en una malla de 3x2 m. En la Figura 16 se representa una planta de excavación del Portal Norte con los tratamientos diseñados.

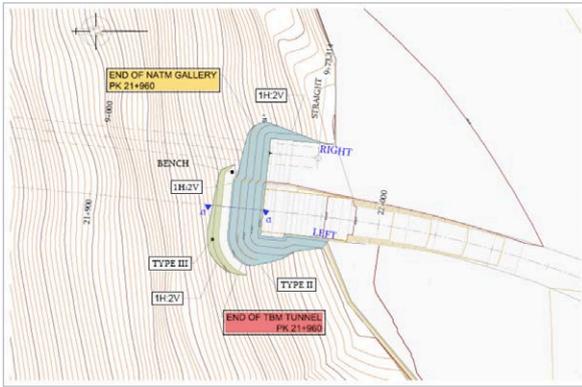


Figura 16.- Planta de excavación del Portal Norte (Kobi).

En el caso del Portal Sur los materiales en los que se emplaza el portal engloban coladas volcánicas de basaltos y tobas sobre los que se sitúa un relleno cuaternario compuesto por unas morrenas glaciales. La plataforma de acceso del portal sur tiene además el condicionante de limitar con un cementerio y una carretera, lo que imposibilita los taludes diseñados originalmente hacia el este, que afectarían el actual trazado de la carretera y parte del cementerio. Esta circunstancia obliga a la verticalización del talud en la zona contigua al muro. Para ello se ha diseñado un muro anclado de 1H:4V, ejecutado mediante bataches. El resto de los taludes se diseñan en la parte inferior con un 1H:2V, hasta alcanzar el contacto con los materiales cuaternarios superiores donde se ejecuta una berma y un talud 1H:3V, que continúa con la solución aportada en el muro.

Los sostenimientos diseñados para este emboquille se componen, en el muro anclado, de una malla de 3x2 metros de anclajes de 3 cables y 15 m de longitud, un espesor de 35 cm de hormigón reforzado con doble mallazo y drenes de 1 m de longitud. En

el resto de zonas los refuerzos son similares a los proyectados para el Portal Norte. En la siguiente figura se muestra la planta de excavación del portal sur con la zonificación de los tratamientos diseñados.



Figura 17.- Planta de excavación del Portal Sur (Tskere).

Monitoreo

El monitoreo de las obras subterráneas resulta de vital importancia para poder asegurar y controlar su correcta ejecución.

Las incertidumbres asumidas en la fase de diseño en cuanto a la fiabilidad del modelo geotécnico, hacen imprescindible un análisis de la información que se va obteniendo durante la propia construcción que permita verificar o en su caso ajustar lo determinado durante las fases anteriores de estudio.

Estableciendo un sistema de medición de los desplazamientos que se producen durante y tras la ejecución de una excavación, se puede comprobar la estabilización de la sección y, sobre todo, es posible comparar las medidas reales con las previsiones de los cálculos efectuados para, en el caso de que exista una divergencia significativa, adoptar las medidas correctivas oportunas.

Superamos los 100 años de Durabilidad

- La Directiva Europea 89/106/CEE para productos de la construcción establece que en estructuras permanentes la durabilidad mínima de la estructura debe ser de 50 años.
- En ambiente C3, situación más habitual, con Galmac 4R® garantizamos una vida útil >50 AÑOS (ISO 9223 EN 10223-3, Anexo 1).

Gaviones de malla electrosoldada Galmac 4R®
GAVIARQ

Gaviones fabricados en aleación Zn90Al10, con marcado CE, conformes UNE EN 10223-8.

Disponibles en varias luces de malla, diámetros y medidas

Cálculos según EC-7 Anejo Español, Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares, asesoramiento en el diseño.

Considerando todo lo anterior se ha desarrollado un Plan de Monitoreo en el que se han definido las principales magnitudes a medir, los equipos necesarios para su control, la frecuencia de medición, los criterios de interpretación y, por último, un plan de contingencia.

El Plan de Monitoreo está basado en un control exhaustivo de la calidad geomecánica del frente y de los desplazamientos inducidos en el entorno de las excavaciones a efectuar. A este respecto, la ejecución de la galería de emergencia con carácter previo permitirá evaluar, en base al monitoreo de la misma, la respuesta del terreno atravesado, para posteriormente ejecutar el túnel principal mediante tuneladora.

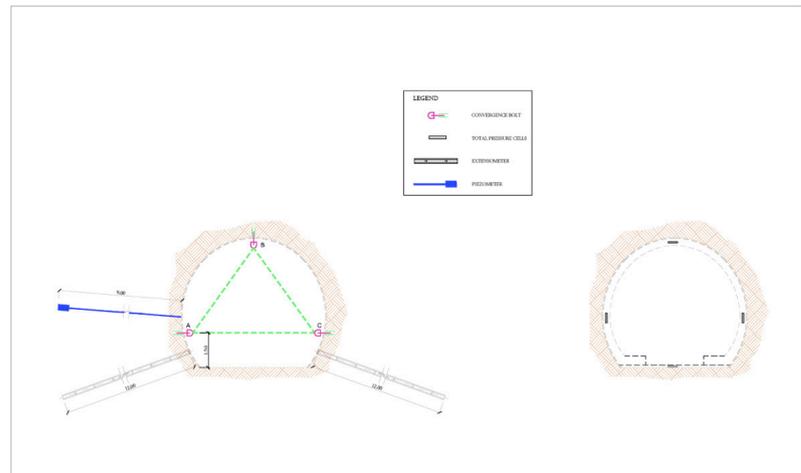


Figura 18.- Sección tipo de instrumentación en la galería de emergencia. Túnel de Gudauri.

El monitoreo de galería de emergencia y galerías de conexión comprende el control de los siguientes aspectos:

- El control geotécnico del frente se lleva a cabo caracterizándolo in situ. Se realizará, en cada pase, el estudio de la litología, estructura y calidad de los terrenos atravesados.
- Medidas de deformación en la galería que serán monitoreadas mediante secciones de convergencia y nivelaciones de clave. La Figura 18 representa una sección tipo del túnel con las cuerdas de convergencia a monitorear.
- Medidas de deformación en el terreno desde el interior de la galería, mediante la instalación de extensómetros, que aportarán información sobre el comportamiento tenso-deformacional del terreno.
- Control de nivel de agua mediante la instalación de piezómetros de cuerda vibrante que aportarán información sobre la presión de poro existente.
- Por último en las secciones de control se diseña la instalación de células de presión total, embebidas en el revestimiento del túnel.

Toda la información obtenida de la auscultación de la galería será considerada para la ejecución del túnel principal, en el que se establecen las siguientes medidas de auscultación:

- Control de los parámetros de perforación de la tuneladora y comparación con valores teóricos estimados.
- Instalación de anillos monitorizados que constarán de 1 célula de presión y 1 extensómetro de cuerda vibrante embebidos en cada segmento.
- Por último se establece el control de la ovalización mediante un perfilómetro.

En la siguiente figura se muestran los elementos de auscultación diseñados para el túnel principal de Gudauri.

Aparte de los túneles en sí mismos es importante controlar los movimientos en los emboquilles del túnel, y el correcto funcionamiento de las estructuras proyectadas. Por ello en ambos emboquilles se han instalado hitos de control topográfico, inclinómetros e hitos de nivelación a lo largo del muro anclado.

El monitoreo de las obras subterráneas resulta de vital importancia para poder asegurar y controlar su correcta ejecución

Conclusiones

El proyecto del túnel de Gudauri supuso un reto desde el punto de vista del estudio de alternativas, la obtención de datos de campo y el posterior diseño de obras subterráneas debido a la conjunción de las singularidades en la configuración geométrica y el contexto geológico geotécnico.

Gracias a la incorporación de un equipo pluridisciplinar para abarcar cada aspecto en las distintas tomas de decisión y a través del análisis pormenorizado de cada una de las opciones y técnicas constructivas existentes se ha podido alcanzar una solución que asegura la factibilidad de la construcción del proyecto. •

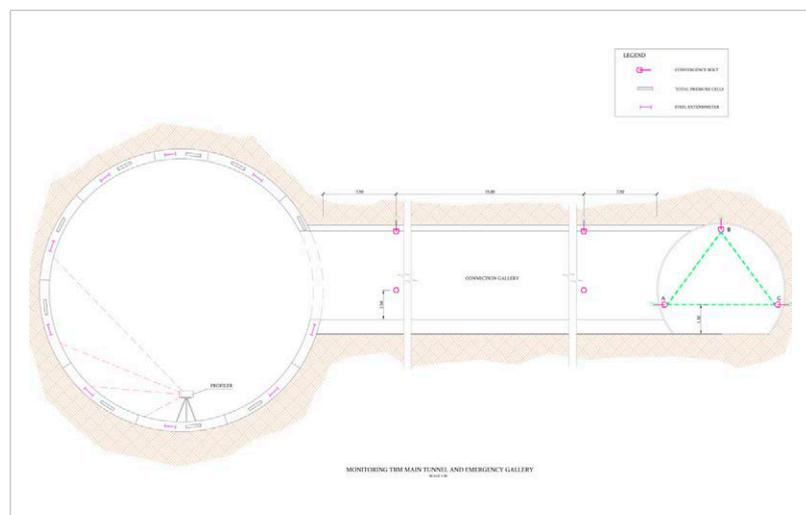


Figura 19.- Sección tipo de instrumentación. Túnel y conexiones.