

■ Hace más de 50 años que se planeó la construcción de este proyecto que atraviesa los Alpes suizos. Con 57 kilómetros longitud y una cobertura máxima de 2.300 metros de roca, este túnel se transformó en el más largo del mundo.

FABIOLA GARCÍA S.
PERIODISTA REVISTA BIT

**TÚNEL DE SAN GOTARDO,
SUIZA**

RÉCORD SUBTERRÁNEO



**HISTORIA
DEL TÚNEL
SAN GOTARDO**

FICHA TÉCNICA

TÚNEL DE BASE SAN GOTARDO

UBICACIÓN: Alpes suizos.

MANDANTE: AlpTransit Gotthard Ltd.

CONSTRUCTORAS: Consorcio ARGE AGN (secciones Erstfeld y Amsteg), Consorcio ARGE Transco-Sedrun (sección Sedrun) y Consorcio ARGE TAT (secciones Bodio y Faido).

LONGITUD CONSTRUIDA: 57 km de túneles.

PRESUPUESTO: 23 mil millones de francos suizos.

AÑO DE CONSTRUCCIÓN: 2002-2016 (obras subterráneas).

UNA NUEVA MARCA se suma al registro histórico de la ingeniería civil. El túnel ferroviario más largo y profundo del mundo construido a la fecha fue inaugurado el pasado primero de junio. El túnel de base San Gotardo lo conforman dos túneles, uno para el viaje hacia Suiza y el otro a Italia, con un diámetro de 9,0 a 9,5 me-

tros y 57 kilómetros de largo a través de los Alpes suizos. Un proyecto de AlpTransit –subsidiaria de Ferrocarriles Federales Suizos (SFR, por sus siglas en inglés)– diseñado para agilizar la ruta entre las ciudades de Zúrich y Milán, en el eje norte-sur de Europa, con el cual no solo se reduciría en una hora el tiempo de viaje (a 2 horas con 50 minutos), sino que también mejoraría la capacidad de carga de los trenes de alta velocidad, la seguridad ante los incendios o choques y la sustentabilidad por el tipo de transporte de bajas emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

La idea de construir este proyecto no es reciente. Y es que se habría gestado hace más de 50 años. La necesidad de su construcción surgió a partir de las rutas de ferrocarril transalpino que datan de hace más de cien años. Antes de San Gotardo, los nuevos trenes rápidos de Europa debían bajar la velocidad al llegar a los Alpes, que no tenían la infraestructura adecuada para su conducción veloz. Razón por la cual, la población suiza confirmó esta decisión, votó y autorizó el financiamiento de este proyecto en 1998.

Las excavaciones duraron alrededor de 14 años, mientras que el tiempo total de construcción (incluyendo las terminaciones, equipos y suministros) fue de 17 años.

Por el norte el proyecto se divide en: Erstfeld, Amsteg y Sedrun, al medio se encuentra el macizo San Gotardo y por el sur está Faido y Bodio. Mientras que los tres accesos intermedios se ubicaron en Amsteg, Sedrun y Faido. Así, las excavaciones tuvieron lugar en distintos puntos simultáneos para acortar el proceso constructivo y para entregar ventilación a los túneles. La distancia promedio entre los túneles es de 40 metros y la máxima, de 70 metros. También existen galerías de conexión cada 300 metros.

Por otra parte a un tercio y a dos tercios a lo largo del túnel se encuentran las estaciones multifuncionales para la desviación de los trenes a través de los cruces. Si ocurre un problema en una vía,



© ALPTRANSIT GOTTHARD LTD.

Los dos tubos conectados, uno de ida y otro de vuelta presentan un diámetro de 9,0 a 9,5 metros.

En cuanto al proceso constructivo, una vez ejecutado el piso, continuaban con el refuerzo y el hormigón in situ.



GENTILEZZA GIORGIO PIAGGIO

El túnel fue construido con cerca de cuatro millones de toneladas métricas de hormigón.

pueden hacer cambio en este lugar e irse por el otro túnel. Si quedan atrapados, los pasajeros pueden quedar en la estación multifuncional.

SECCIONES

Según informó AlpTransit, fueron excavadas cinco secciones independientes de diferente longitud de forma simultánea. Debido a las distintas condiciones geológicas se implementaron dos métodos de excavación: tuneladoras (TBM) y perforación y tronadura (D&B, por sus siglas en inglés).

Como actividad inicial, fue ejecutada una campaña geotécnica en el sector de Piora en 1993 y recién en 1998 se obtuvieron resultados claros en cuanto a la geología. A partir de 1996, se construyeron todos los piques y pozos necesarios.

La sección Erstfeld incluye un túnel de bifurcación para permitir una futura ampliación del túnel principal hacia el norte sin tener que interrumpir los servicios del tren. La primera parte del túnel se construyó con la excavación de una zanja abierta que se tapó de nuevo después de la finalización. En el resto de la sección Erstfeld implementó la TBM.

En la sección Amsteg un túnel de acceso de 1,8 kilómetros se construyó hasta la ubicación del túnel principal. En este último lugar se excavaron cavernas de montaje a partir de las cuales, dos TBM comenzaron a excavar hacia la sección de Sedrun en 2003, dirección sur.

La sección de Sedrun se alcanza desde la superficie a través de un túnel de acceso de 1 km de largo y dos piques verticales paralelos de 800 metros de profundidad. El primer pique se ejecutó con el método de hundimiento ciego (perforación y tronadura vertical o shaft sinking), mientras que el segundo pique se hizo con un equipo Raise Boring.

Esta sección es también el sitio de una de las dos estaciones multifuncionales que albergan instalaciones electromecánicas, estaciones de parada de emergencia y aparatos de cambio para cruces de vía. La excavación de los túneles principales al norte y al sur se inició en 2004 mediante D&B. En este lugar se deci-

dió no utilizar TBM debido a las condiciones geológicas adversas.

A la sección de Faido se llega desde la superficie a través de un túnel de acceso de 2,7 kilómetros de largo con una pendiente de hasta 13 por ciento. La segunda estación multifuncional de este sector se construyó más al sur de lo previsto inicialmente, debido a las condiciones geológicas.

Cuando las dos TBM de Bodio llegaron a Faido en 2006, fueron reparadas y modificadas antes de continuar al norte hacia la sección de Sedrun.

Bodio es la sección más larga del túnel San Gotardo. La primera parte se construyó en suelos y luego a través de rocas meteorizadas, antes de llegar a roca de calidad geotécnica adecuada que permitiera el paso de las TBM.

Para lograr una construcción más rápida de las cavernas de montaje de las TBM, fue excavado un túnel bypass alrededor del sitio. A partir de estas cavernas, dos tuneladoras comenzaron a excavar al norte hacia Faido en 2003.



© ALPTRANSIT GOTTHARD LTD.

El proyecto de AlpTransit reduce el tiempo de viaje a 2 horas con 50 minutos, una hora menos de lo que duraba antes.

Desde el portal al sur en Bodio, una línea de acercamiento en superficie une el túnel de base San Gotardo a la línea principal existente de los Ferrocarriles Federales Suizos en Giustizia/Osogna.

Giorgio Piaggio, director y vicepresidente del Comité de Túneles y Espacios Subterrá-

neos (CTES-Chile) estuvo presente en la obra y compartió con Revista BIT los datos del proyecto.

Se implementaron cuatro tuneladoras para roca dura llamadas Gabi I, Gabi II, Sissi y Heidi. En Bodio su diámetro era de 8,8 metros y en Faido, de 9,5 metros. Su longitud fue de

PUNTALES ROSCADOS ¡SIMPLICIDAD Y EFICACIA!

 **scafom-rux**

FABRICADO CON LOS MÁS ALTOS ESTÁNDARES DE CALIDAD
DIVERSAS POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN PARA EL CLIENTE



ANDAMIOS DE FACHADA
MULTIDIRECCIONALES
PRODUCTORES DE CIMBRAS,
PUNTALES Y ACCESORIOS.





El 80% de los tubos principales se excavaron con tuneladoras y 20% con perforación convencional.



IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE



GENTILEZA ALPTRANSIT

450 metros incluyendo el tren posterior, 2.700 toneladas de peso, 2.500 toneladas de empuje máximo, 7.000 toneladas métricas de fuerza de agarre hacia las paredes del túnel, 6.000 kNm de torque y 6 rpm de velocidad rotacional. Su récord de avance registrado fue mayor a 40 metros promedio por día. Su ciclo de operación fue dos turnos de nueve horas y un turno de seis horas de mantención.

Los avances con las TBM por túnel (este y oeste) se pueden resumir de la siguiente forma:

Erstfeld este:	7,15 km
Erstfeld oeste:	7,12 km
Amsteg este:	10,72 km
Amsteg oeste:	10,70 km
Faido este:	11,13 km
Faido oeste:	11,09 km
Bodio este:	13,45 km
Bodio oeste:	14,11 km

Existen galerías de conexión cada 300 metros y dos estaciones multifuncionales para la desviación de los trenes a través de los cruces.



© ALPTRANSIT GOTTHARD LTD.

HORMIGÓN

El túnel fue construido con cerca de cuatro millones de toneladas de hormigón, casi 40 veces lo utilizado en la construcción del Burj Khalifa, el edificio más alto del mundo.

Para la construcción de ambos túneles, BASF suministró aditivos para el hormigón, inyecciones de cemento para detener el ingreso del agua y morteros para protección contra el fuego. "En construcción subterránea, hay requerimientos contradictorios al concreto: mientras es transportado varios kilómetros al interior de la montaña, tiene que permanecer trabajable por horas y no puede solidificarse. Pero el concreto también tiene que fraguar casi inmediatamente cuando es proyectado en el muro del túnel. En el túnel de base de

San Gotardo, este fue uno de los mayores desafíos," dice René Bolliger, líder de la unidad de Construcción Subterránea de BASF para Alemania, Austria y Suiza.

Esto fue posible gracias a la correcta combinación de aditivos para el hormigón: los superplastificantes, que hacen el concreto especialmente fluido y trabajable, mientras que los acelerantes de hormigón proyectado hacen que solidifique y endurezca en minutos.

También desarrollaron especialmente un aditivo el cual retarda la hidratación del cemento. En combinación con los superplastificantes, se aseguró que el hormigón pudiera ser utilizado de manera óptima incluso después de haber sido transportado por largas distancias y expuesto a altas temperaturas al interior de la montaña.

En tanto, Sika aportó su tecnología para la producción de más de dos millones de metros cúbicos de hormigones con propiedades especiales en el túnel. Comenzó en 1993 en el túnel exploratorio Piora con el desarrollo de la nueva tecnología del acelerador y acabó con hasta cuatro aditivos para



© ALPTRANSIT GOTHARD LTD.

El 15 de octubre de 2010 se unieron ambos frentes del túnel. Aquí la desviación fue de solamente ocho centímetros horizontalmente y un centímetro verticalmente.

el hormigón. Conjuntamente con SikaBau AG realizó la impermeabilización de las dos secciones del sur del Gotardo (Sedrun, Bodio y Faido), con 3 millones de metros cuadrados de membranas impermeabilizantes y sistemas de juntas. En total, Sika aportó también 20.000 toneladas de aditivos para hormigón y 40.000 toneladas en el manejo de materiales.

DIFICULTADES Y LECCIONES APRENDIDAS

Las complicaciones en la construcción debido a las condiciones geológicas de los macizos no fueron menores. Hubo dos zonas particularmente complejas como el submacizo Travetsch que posee rocas blandas y el pliegue sinclinal Piora.

Tal como se mencionó anteriormente, en la



AISLACIÓN | PIEZAS ESPECIALES | MUROS | LOSAS | TECHOS

BLOQUE AISLANTE PARA MURO - ICF

Bloque Aislante para muros **ICF** de **SYNTHEON**® fabricados en Poliestireno Expandido (EPS), es un elemento de alta densidad con tecnología avanzada.

Al ser rellenos con Hormigón armado genera un muro estructural de excelente aislación térmica y acústica, proporcionando y mejorando la eficiencia de la vivienda durante todo el año. Permite además cualquier tipo de acabado interior o exterior.

Esta eficiente solución constructiva de **SYNTHEON**® es ampliamente utilizada en Europa, Norteamérica y otros países.

Eficiencia y Sustentabilidad en Sistemas Constructivos

Ahorre tiempo y costos durante la construcción • Construya más rápido (ahorro del 50%) y más liviano • Construya sin desperdicio en obra • Edificaciones mas eficientes • Ahorro de energía.

syntheon.cl

SYNTHEON™

We Value Engineered Sustainability™



CIFRAS DE SAN GOTARDO

Largo: 57 kilómetros.

• 152 kilómetros de túnel en roca.

Tiempo de tránsito en el túnel: 20 minutos para trenes de pasajeros.

Capacidad del túnel: más de 260 trenes de carga y 65 trenes de pasajeros por día.

Velocidad máxima: 160 km/h en trenes de carga y más de 250 km/h en trenes de pasajeros.

• 60 minutos más rápido desde Zúrich a Milán.

• Sistema de dos tubos (uno para cada sentido de tránsito) conectados cada 325 metros por cruces peatonales.

Elevación: 500 metros sobre el nivel del mar.

Máxima cobertura de roca: 2.300 metros.

Tiempo de construcción (excluyendo la exploración): 17 años.

• 28,2 millones de toneladas de material excavado.

• Túneles excavados con TBM (80%) y con D&B (20%).

• 43.800 horas trabajadas sin detención para el montaje de la vía férrea.

• Estudios geotécnicos y de ingeniería de 1996 a 2002 con pruebas intensas y la inversión previa de más de tres millones de francos suizos.

Participantes del proyecto: 2.600 personas.

Comisionamiento: 11 de diciembre de 2016.

Costo total del nuevo enlace ferroviario por Los Alpes con los túneles Lötschberg, Gotardo y Ceneri: 18.200 millones de francos suizos (precio de 1998 excluyendo inflación, IVA e intereses del préstamo de la construcción; costo efectivo total: unos 23 mil millones de francos suizos).

FUENTE: SIKA



zona Piora fue excavado un túnel de prueba que terminó inundado con un caudal de 600 litros por segundo y 150 bar de presión, equivalentes a una columna de agua de 1.500 metros. Este material cuyo volumen es de 1.400 m³ lo llamaron "azúcar", ya que se deshacía fácilmente conformando pequeños cubos de roca. La TBM quedó inundada y tuvieron que ejecutar un tapón de hormigón de ocho metros de espesor. Afortunadamente, mediante la perforación de sondajes se descubrió que la zona Piora estaba sostenida en profundidad por mármol de buena calidad que protegía el trazado de los túneles ferroviarios.

En cuanto al proceso constructivo, una vez ejecutado el piso, se construyó el refuerzo y el hormigón in situ. Piaggio explica que proyectaron un soporte inicial de shotcrete, después pernos y mallas o bien fibras dependiendo del sector. Con eso se sostenía el túnel en el corto plazo, mientras que para el sostenimiento de largo plazo se encargó un equipo adicional con hormigón in situ.

El criterio utilizado en San Gotardo, comenta Piaggio, fue diseñar el revestimiento final como si no existiera el soporte inicial: se consideró que el revestimiento final tomaría todas las cargas del terreno, tanto del corto, como del largo plazo. "El factor de seguridad es bastante alto", destaca.

En tanto, hubo un par de complicaciones con las TBM. En Boido se presentó una falla horizontal de aproximadamente 500 metros, lo cual produjo un colapso de la frente. Aquí

el avance se redujo a tres metros por día durante casi seis meses.

En algunos tramos se presentó el fenómeno de squeezing, que corresponde a deformaciones extremas en la sección. Esto se evidenció en Faido, donde los perfiles TH se deformaron y hubo falla general del shotcrete. Se registraron 150 mm de desplazamiento y no fue posible sobreexcavar con los discos cortadores de la TBM.

En Amsteg, luego de dos años de perforación, con un avance de doce metros por día, hubo una detención de cinco meses por una falla en el túnel oeste. Esto debido a un caudal de dos litros por segundo que contenía mucho material granular, el cual bloqueó el cabezal de la TBM. Para ello se tuvo que hacer un bypass.

También se presentó rockburst, es decir explosión de la roca debido al estado tensional del macizo.

Debido a la alta cobertura del túnel fueron necesarios medios de soporte especiales, ya que los tradicionales en ocasiones no soportaban las cargas y cedían.

Para ello, los ingenieros desarrollaron un sistema innovador de sostenimiento con anillos de acero flexibles y abrazaderas que se cierran con la presión del terreno e impiden mayores deformaciones en la estructura terminada.

No obstante estas complicaciones, las tuneladoras también presentaron peaks de avance que permitieron compensar el tiempo perdi-

do. Una de las marcas fue de 56 m excavados solo en 24 horas, lo que sería un récord mundial para una tuneladora de roca dura de tales dimensiones (9,58 m de diámetro). En el resto del proyecto los avances máximos registrados fueron de 40, 38 y 36 metros por día.

Otra de las dificultades fueron las altas temperaturas de los macizos. En el interior las temperaturas alcanzan más de 45° C, por lo que la ventilación fue fundamental.

El 15 de octubre de 2010, a unos 30 km de la boca sur y 27 km de la boca norte, se produjo la unión del túnel por ambos lados. Aquí la desviación fue de solamente ocho centímetros horizontalmente y un centímetro verticalmente.

Con todo, el 80% de los tubos principales se excavó con tuneladoras y 20% con perforación convencional. Así, un total de 28,2 millones de toneladas de roca excavada fue transportada fuera del túnel.

Piaggio concluye que el diseño y construcción de túnel de base San Gotardo es una muestra clara de cómo satisfacer necesidades estratégicas mediante el arte de la ingeniería, de manera confiable y racional. "La metodología de diseño, el proceso constructivo y la resolución de problemas de este proyecto deben ser estudiadas a fondo y aplicadas a otras obras subterráneas", señala.

El túnel de San Gotardo marca un nuevo récord mundial en el registro de la ingeniería. El túnel ferroviario más largo y profundo construido a la fecha. ■

SIKA® , SOLUCIÓN INTEGRAL EN IMPERMEABILIZACIÓN



Sika® Watertight Concrete, propone una solución integral de alta calidad y excelencia, combinando un diseño adecuado de hormigón con sellos para juntas de construcción.

Soluciones para:

Hormigón:

- Sika® 100
- Sika® WT 200P
- Sika® ViscoCrete®

Juntas:

- SikaWaterbar®
- SikaSwell®
- Sikadur -Combiflex®

Envoltentes:

- Sikaplan® WP
- SikaProof® A