



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado "Ingeniería de Producción, Minero-Ambiental y de
Proyectos"

TESIS DOCTORAL

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES
CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS
PROYECTOS DE TÚNELES

Autor:

Valentín Fernández García

Noviembre de 2021



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado "Ingeniería de Producción, Minero-Ambiental y de
Proyectos"

TESIS DOCTORAL

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES
CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS
PROYECTOS DE TÚNELES**

Autor: Valentín Fernández García

Director: Rafael Rodríguez Díez

Noviembre de 2021

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

ÍNDICE

1	INTRODUCCION Y ESTADO DEL ARTE.....	2
1.1	Introducción.....	2
1.2	La investigación geológica-geotécnica mediante sondeos.....	6
1.3	Evolución de la técnica de sondeos direccionales con recuperación de testigo.....	15
2	OBJETIVOS Y METODOLOGIA	28
2.1	Objetivos de la tesis	28
2.2	Metodología para el análisis comparativo	29
2.2.1	Metodología seguida en la evaluación de la técnica DCD.....	29
2.2.2	Elección de los túneles representativos e investigación de los tramos tipo.	32
3	MODELO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE.....	38
3.1	Coste de la perforación de los sondeos.	38
3.2	Sobrecostes asociados a las incertidumbres en túneles avanzados con perforación y voladuras.	39
3.2.1	Cuantificación de la incertidumbre asociada al sostenimiento convencional.	39
3.2.2	Cuantificación de la incertidumbre asociada a los tratamientos especiales de sostenimiento.	43
3.2.3	Cuantificación de la incertidumbre asociada al caudal drenado en el túnel.....	45
3.3	Sobrecostes asociados a las incertidumbres en túneles avanzados con tuneladora.....	49
3.3.1	Cuantificación de la incertidumbre asociada a la composición geoquímica del escombros.	49

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

3.3.2	Cuantificación de la incertidumbre asociada a la disminución del rendimiento de la tuneladora.....	50
3.3.3	Cuantificación de la incertidumbre asociada al riesgo de squeezing y atrapamiento de la tuneladora.....	50
3.3.4	Cuantificación asociada a la incertidumbre en la cantidad de resina a utilizar.....	51
3.3.5	Cuantificación de la incertidumbre asociada al sobredimensionamiento de las dovelas.....	52
3.3.6	Cuantificación de la incertidumbre asociada al desprendimiento de grisú	53
3.3.7	Cuantificación de la incertidumbre asociada al consumo de cortadores.....	54
4	ANÁLISIS DE CASOS REALES.....	56
4.1	Túnel de La Burata.....	56
4.1.1	Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso. Análisis comparativos de costes de investigación.....	65
4.1.2	Análisis económico de los sobrecostes asociados a la incertidumbre:.....	69
4.1.3	Resumen túnel La Burata.....	75
4.2	Túnel Lote 3 de la Variante de Pajares.....	76
4.2.1	Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso. Análisis comparativos de costes de investigación.....	83
4.2.2	Análisis económicos de los sobrecostes asociados a las incertidumbres.....	89
4.2.3	Resumen túnel lote 3 de Pajares.....	98
4.3	Túneles de Bolaños.....	99
4.3.1	Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso. Análisis comparativos de costes de investigación.....	103

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

4.3.2	Análisis económico de los sobrecostos asociados a las incertidumbres.....	110
4.3.3	Resumen túnel Bolaños:.....	121
5	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO	124

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Comparación entre métodos tradicionales (DHH) y los DCD	3
Fig. 2	Coste en función del índice GSI (Paraskevopoulou y Benardos, 2013). .	7
Fig. 3	Aproximación de costes planteado por Benardos et al. (2013).	8
Fig. 4	Coste porcentual de investigación respecto el coste de la obra Pelizza et al. (2002).	12
Fig. 5	Diferentes aplicaciones de sondeos direccionales.	16
Fig. 6	Sondeo direccional horizontal.	17
Fig. 7	Control, ramificar y dirigir un sondeo.....	18
Fig. 8	Cortar la curva.....	20
Fig. 9	Comprobación de la desviación.	21
Fig. 10	Caja portatestigos con testigos	23
Fig. 11	Modelo de diseño de sostenimientos según Romana (2014).....	41
Fig. 12	Recomendaciones de sostenimiento según Celada et al (2011).....	44
Fig. 13	Esquema de nivel piezométrico.....	45
Fig. 14	Sección transversal del tunel de Burata y situación de los sondeos ...	58
Fig. 15	Zonas de Jabre según proyecto.	58
Fig. 16	Sondeos en la zona 6.....	58
Fig. 17	Zonas jabre encontradas en el trazado.	59
Fig. 18	Lodos ocasionados por la entrada de agua.....	60
Fig. 19	Sondeos horizontales realizados desde la galería piloto.	60
Fig. 20	Trazado del sondeo DCD1 desde el portal inferior.....	67

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Fig. 21 Trazado del sondeo DCD2 desde el portal superior.....	67
Fig. 22 Trazado del sondeo DCD3 desde superficie.....	68
Fig. 23: Sección del sostenimiento con paraguas en el túnel principal	72
Fig. 24 Sección del sostenimiento con paraguas en la galería auxiliar	72
Fig. 25 Esquema de la sección transversal de los túneles.....	76
Fig. 26: Esquematización de los lotes de los Túneles de Pajares.....	77
Fig. 27: Cabeza de corte con cortadores	78
Fig. 28 Detalle del acopio de dovelas del emboquille norte	79
Fig. 29 Corte geológico del túnel Este (Alonso y Rubio 2009)	80
Fig. 30 Perfil geológico Lote 3. Toyos et al.(2014)	81
Fig. 31 Posicion en la traza del tunel de la formacion San Emiliano	81
Fig. 32 Comparativa entre el corte geologico inicial y el corte geologico real una vez finalizada la excavación	82
Fig. 33 Corte de inyecciones de lechada desde talud de emboquille y lanza de inyección de espuma a través de un hueco de un cortador.	83
Fig. 34 Corte transversal del trazado del lote IV.....	85
Fig. 35: Detalle de la formación San Emiliano.....	86
Fig. 36 Detalle de sondeo DCD.....	87
Fig. 37: Avances acumulados a origen	93
Fig. 38 Tasa promedio de metano q vs excavación en el macizo rocoso	95
Fig. 39 Precio emisiones de CO ₂	96
Fig. 40: Relación de cortadores metro según las formaciones litológicas	97
Fig. 41 Localización de los túneles de Bolaños.....	99
Fig. 42 Sección transversal de ambos túneles	100
Fig. 43 Detalle de la TBM fuera del túnel	101
Fig. 44 Detalle de dovelas en el parque (calleja 2017).....	102

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Fig. 45 Corte geológico insertar calleja 2017	103
Fig. 46 Zona de pizarras ampelíticas	104
Fig. 47 Sondeos convencionales ejecutados.	105
Fig. 48 Sondeo DCD propuesto.	107
Fig. 49 Planta de bicomponente Mendaña 2017	109
Fig. 50 Avance en metros de los túneles de Bolaños.....	114
Fig. 51 Comparativa de los túneles	114
Fig. 52 Galindo y Carbayo (2016).	116
Fig. 53 Galindo y Carbayo 2019.....	117
Fig. 54 Comparativa inyección de resinas vía dcha. vs vía izda.	118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sobrecostes de varios túneles realizados (Flyvbjerg, 2014).	13
Tabla 2 Comparación entre MUD MOTORS y DCD.....	19
Tabla 3 Coste total de la campaña de perforación por sondeos	38
Tabla 4 Costos de sostenimiento	43
Tabla 5 con factores de proporcionalidad y costes unitarios	48
Tabla 6 Coste total de la campaña de perforación por sondeo convencional .	69
Tabla 7 Coste total de de la campaña de perforación DCD	69
Tabla 8 Coste total del sostenimiento (estimado a partir del proyecto original).	70
Tabla 9 coste total del sostenimiento (estimado a partir de datos reales).	71
Tabla 10 Coste sostenimiento con paraguas (estimado del proyecto original).	73
Tabla 11 Coste sostenimiento con paraguas (estimado datos reales).	73
Tabla 12 Costes fijos totales (estimados a partir del proyecto original).....	73
Tabla 13 Costes fijos totales (estimados a partir de datos reales)	74

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 14 Costes asociados al agua (estimados a partir de datos del proyecto)	75
Tabla 15 Costes asociados al agua (estimados a partir de datos reales)	75
Tabla 16 Coste sondeos tradicionales.	87
Tabla 17 Coste sondeos DCD.....	88
Tabla 18 Descripción de los diferentes tipos de dovelas.....	90
Tabla 19 Coste sondeos convencionales.....	106
Tabla 20 Coste sondeos DCD.....	108
Tabla 21 Tablas de rendimientos de excavación en cuarcitas y areniscas con filitas y pizarras laminadas.	113
Tabla 22 Costes unitarios considerados en el cálculo de los túneles de Bolaños	120
Tabla 23 Sobrecoste debido al vertedero para pizarras y ampelitas (Túnel de Bolaños)	120
Tabla 24 Sobrecoste debido a los bajos avances de la tuneladora.....	120
Tabla 25 Sobrecoste total debido a los sobrecoste de atrapamiento.....	121
Tabla 26 Sobre coste total debido al incremento de consumos de acelerante y retardante en los túneles de Bolaños	121

Capítulo 1

Introducción y Estado del Arte

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

1 INTRODUCCION Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción.

Los Sondeos Direccionales con Recuperación de Testigo (DCD) es una técnica que combina dos técnicas preexistentes bien conocidas: la perforación con recuperación de testigo y la perforación direccional, la primera es la más antigua y consiste en perforar un sondeo con una broca de diamante que permite cortar un cilindro de roca (el testigo) que posteriormente se extrae.

Este testigo de roca se puede ensayar en el laboratorio, lo que lo hace altamente aplicable en el campo de la geotecnia y la prospección de yacimientos. Estos sondeos pueden ser horizontales, lo que llamamos técnica HDC.

El sondeo direccional es una técnica de perforación de pozos desarrollada en el campo del petróleo que se ha utilizado con éxito en el tendido de tuberías en las últimas décadas. Básicamente consiste en realizar una perforación convencional con un tricono o con un martillo en fondo, pero con una herramienta especial en la sarta de perforación, que es capaz de guiar la dirección de perforación, permitiendo que gire, cambie y llegue al destino planeado. En principio, esta técnica es destructiva, es decir, tanto el tricono como el martillo de fondo (DTH) trituran la roca que se extrae como una masa de roca (detritus) de la que se puede obtener buena información geotécnica tras los ensayos realizados.

La técnica HDC se ha utilizado con éxito en estudios de túneles. Sin embargo, esta técnica requiere que la maquinaria esté en el mismo nivel que el nivel del túnel, bien perforando desde la galería de avance del túnel o bien desde una galería paralela, como se describe en Castells (2008). Y también puede ser de los emboquilles como se describe por ejemplo en Tsang et al (2015) o más recientemente en Boden et al (2018).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

La novedad es que la técnica DCD también permite la extracción de testigos en el caso de perforación direccional. Esta técnica se ha utilizado con éxito en el campo de la prospección de yacimientos mineros. En la Península Ibérica, en la Mina de SOMINOR (Portugal), desde 2006 hasta 2013, se realizaron sondeos profundos de hasta 1.500 metros, en los que consiguió llegar al punto planificado, con la tolerancia solicitada; este sistema funciona tanto en plano vertical como en plano horizontal.

En el presente trabajo se analiza la aplicación de la técnica a la caracterización geomecánica del macizo rocoso en el caso de túneles donde parece especialmente indicado; de hecho, en algunos países, cuando se pretende excavar un túnel, o microtúnel, es obligatorio realizar una investigación exhaustiva del macizo rocoso que se va a atravesar, en la misma traza del túnel, y previo a la autorización administrativa del inicio de los trabajos.

Esta investigación debe identificar claramente las áreas problemáticas para garantizar que el trabajo se lleve a cabo de manera eficiente y con un riesgo mínimo (Figura 1). Cuando la perforación tradicional de recuperación de testigos (perforaciones DHH-1 y DHH-2) proporciona muy poca información porque solo obtiene muestras de dos zonas específicas, una perforación direccional de recuperación de testigos (DCD-1) atraviesa la formación geológica en el mismo diseño del túnel.

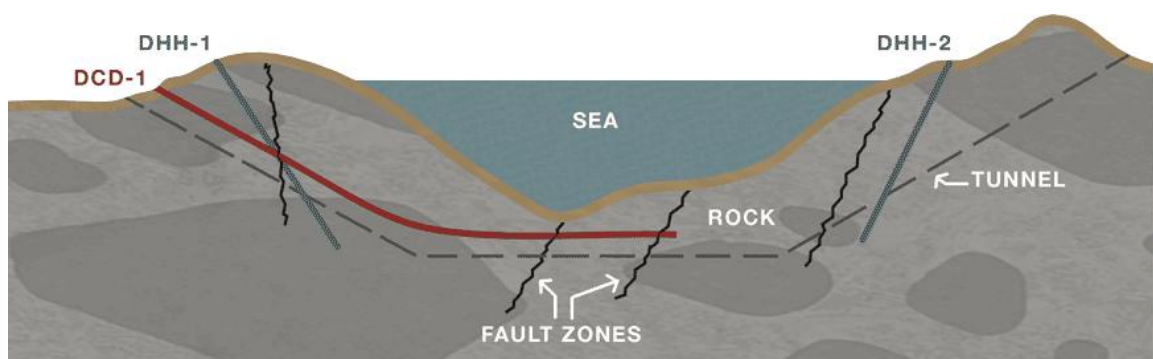


Fig. 1 Comparación entre métodos tradicionales (DHH) y los DCD

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Como se muestra en publicaciones de hace años, en concreto la de Kaplin (1998), el sistema DCD es un método de investigación muy efectivo ya que permite testificar a lo largo de la trayectoria planificada, garantizando que la información geológica obtenida estará en la misma traza que la obra subterránea planificada, de esta forma se dispone de información sobre las propiedades geológicas y geomecánicas del terreno a recorrer, útil para conocer la afluencia de agua, definir el sostenimiento a utilizar o estimar los costes de construcción y tiempo de ejecución de las obras ... etc.

Obras más recientes de la técnica DCD son Lam et al (2008), o Lindhjem y Tai (2008), Cunningham et al (2012a) o Cunningham et al (2012b).

El levantamiento comenzará desde una ubicación accesible más cercana al túnel planificado (o microtúnel) y se dirigirá hasta llegar al área de interés. Cuando el sondeo está en posición, de acuerdo con el plan de perforación, la turbina de perforación se retira y la perforación continúa con el sistema tradicional de recuperación de testigos con cable (wireline). Esto permite volver a extraer el testigo con el diámetro convencional de la broca estándar de perforación.

Una vez que tengamos que volver a dirigir el sondeo y/o recuperar la dirección del plan de perforación, volveremos a usar la turbina DEVICO. La dirección puede ir desde perfectamente vertical hasta la horizontal con un radio de giro de 200 metros, en este punto, hay que recordar que el varillaje permite un giro de 3-4º cada 10 metros sin sufrir ningún daño.

Por sus características, el sistema DCD es especialmente adecuado para el reconocimiento de la traza de todo el túnel, en el caso de túneles de poca profundidad, como los realizados en el tren de alta velocidad de reciente construcción en el NO de España.

Este artículo toma como referencia uno de estos túneles, el túnel de Burata de 4 km de longitud, ya excavado y del que se ha realizado un análisis económico comparativo entre la técnica tradicional utilizada para la caracterización geotécnica y la técnica DCD que muestra la utilidad y posibles ventajas frente a los sondeos tradicionales.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Primero, se hace una comparación económica entre los sondeos tradicionales realmente perforados y los sondeos direccionales con recuperación de testigos, DCD, determinando el coste con ambos sistemas y la longitud del túnel reconocida con cada uno. Posteriormente, se realiza una valoración económica de la incertidumbre que existe con ambos sistemas, estimando los sobrecostes incurridos en dos aspectos que se ven influidos por el mejor conocimiento de las condiciones del terreno:

- a) la duración de la obra y
- b) el sostenimiento utilizado.

Hay que tener en cuenta que por el tipo de obra que es, un túnel, la incertidumbre es siempre un factor crítico que directa o indirectamente afecta negativamente a la sociedad. Una mala caracterización geotécnica puede llevar a una empresa a ofertar un precio inferior al coste real del túnel, que incluso puede llevar a una situación económica muy difícil en detrimento de la generación de riqueza y oportunidades de empleo, y si la responsabilidad recae en la administración pública que ofrece la obra, puede llevarla a asumir importantes sobrecostes imprevistos con el perjuicio que ello supone para el presupuesto público.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

1.2 La investigación geológica-geotécnica mediante sondeos.

La demanda de infraestructuras subterráneas ha ido incrementando en las últimas décadas, gracias a sus claros beneficios para la sociedad, suponiendo un tipo de construcción con fuertes implicaciones entre empresas privadas y entes públicos. Esto hace que minimizar el coste y mantener el presupuesto inicial sea fundamental para el éxito de la obra.

A diferencia de otras infraestructuras, la construcción de cualquier túnel u obra subterránea, ya sea en suelo o en roca, viene asociado con un grado de incertidumbre elevado respecto al conocimiento de las condiciones geomecánicas y de estabilidad, tanto en el frente, como en el emboquille o a lo largo de su recorrido (Estefanía et al., 2010; Benardos et al., 2013) debido a ser una construcción subterránea, que va desde pocos metros hasta centenares de metros, .su valoración cualitativa y cuantitativa ha suscitado un gran interés en las últimas décadas (Flyvbjerg et al. 2008). Disponiendo de investigación, basada en varios de estudio particulares, donde se definen los costes y características de la fase de construcción de los túneles (Zhao et al., 1999; Sinfield y Einstein, 1997; Hoek, 2001; Flyvbjerg et al., 2004; Flyvbjerg et al., 2008; Isaksson y Stille, 2005; Petroutsatou y Lambropoulos, 2005; HM Treasury, 2010; Efron y Read, 2012; and lately Rostami et al. (2013). A pesar de la cantidad de investigación realizada hasta el momento, cada caso tiene sus particularidades, siendo a menudo muy relevantes.

A pesar de que siempre vamos a tener un cierto grado de incertidumbre en este tipo de proyectos, el reconocimiento geológico, y las técnicas de exploración previa como la geofísica, sondeos (verticales o con una inclinación) y ensayos de laboratorio a partir de muestras obtenidas en el campo permiten tener un nivel de conocimiento considerable (Van der Pouw Kraan, 2014), siendo éstos estudios el procedimiento habitual, con un grado de intensidad mayor o menor en función de la complejidad geológica esperada, en el trazado diseñado (Petroutsatou y Lambropoulos, 2005). Entre las técnicas mencionadas, la que puede dar una información más relevante son los sondeos que cortan el trazado del túnel, o se quedan muy cerca del mismo,

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

pudiendo determinar el grado de fracturación, las características de dichas fracturas, la presencia de agua y las características de la roca intacta (Yau et al., 2020).

La extensión de la investigación del terreno suele abarcar una zona más amplia en las proximidades de la alineación preferida para permitir la flexibilidad de modificar la alineación en una fase posterior. Adicionalmente, la investigación en detalle proporcionará la información necesaria para la estimación inicial de los costes de la obra. Esta información suele utilizarse por parte de los licitadores para asumir los riesgos del proyecto (Lam et al., 2008; Estefanía et al., 2010). En esta línea, Paraskevopoulou y Benardos (2013) presentaron una aproximación para determinar el coste de un túnel en función del GSI, Figura 2. La información que relaciona las características del macizo rocoso, ya sea con el GSI, RMR, Q o RMI, entre otros, es de gran interés, especialmente si se dispone de información fiable en toda la trazada del túnel.

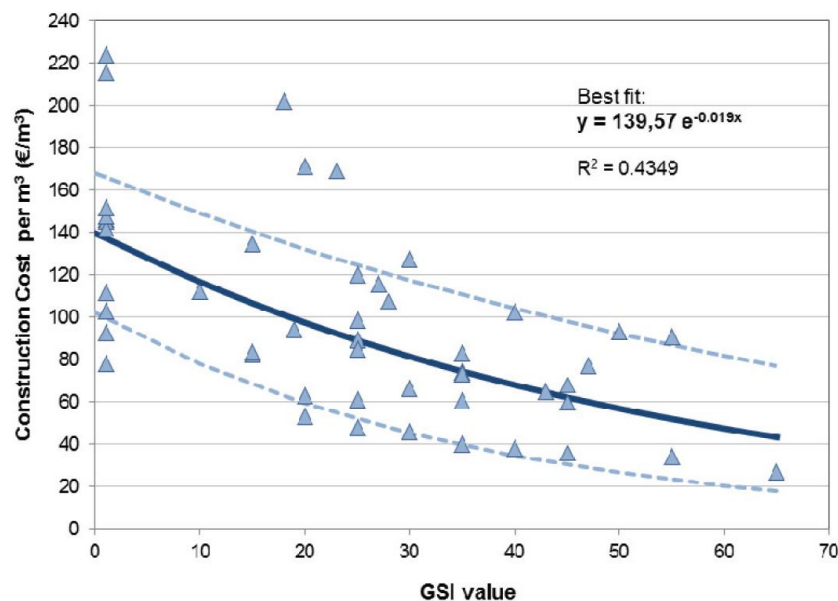


Fig. 2 Coste en función del índice GSI (Paraskevopoulou y Benardos, 2013).

Benardos et al. (2013) también realizó una adaptación interesante de Hoek (2001) respecto a la estimación de costes generados por la excavación y sostenimiento en función de las condiciones del terreno y el diámetro de excavación (Figura 3).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

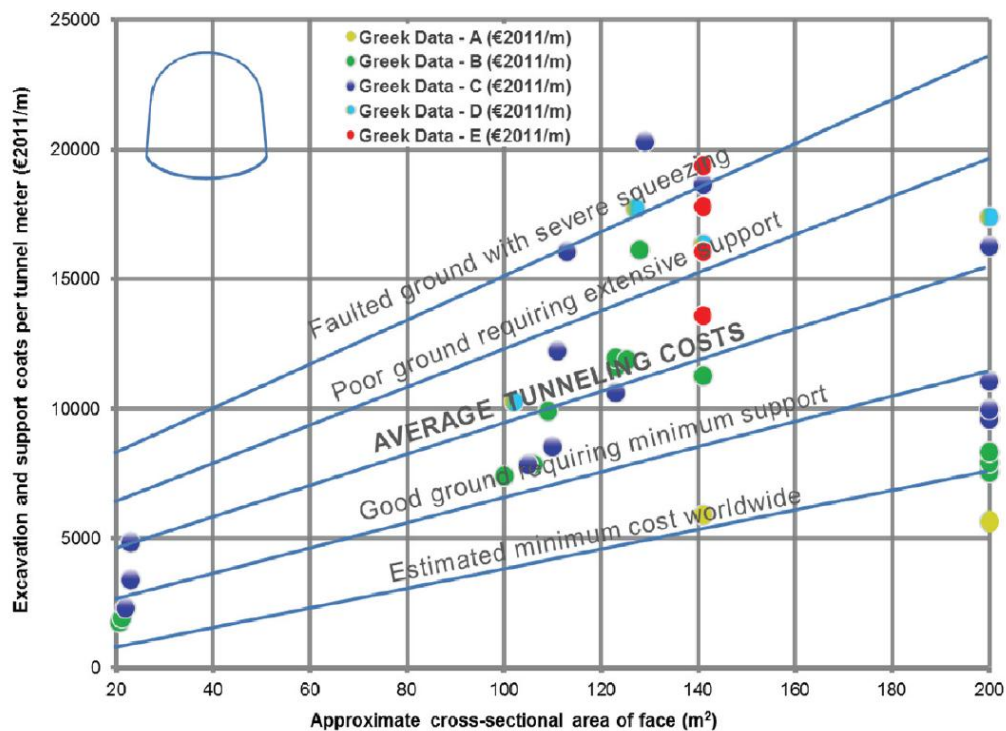


Fig. 3 Aproximación de costes planteado por Benardos et al. (2013).

Por otro lado, Rostami et al., (2013) presentó una aproximación empírica interesante, pero con una dispersión muy grande a causa, en gran parte, de la incertidumbre geológica presenten en los túneles.

Un estudio en detalle indica que los parámetros independientes, a nivel geotécnico, que definen los requisitos de soporte del túnel, y por lo tanto los costes asociados son: el GSI, la deformación del macizo, la altura de la cobertera y el área de excavación (Petroutsatou et al., 2012; Petroutsatou et al., 2021).

Sin embargo, el enfoque tradicional, sondeos verticales o inclinados, para determinar los parámetros relevantes solamente permiten conocer partes puntuales, no disponiendo del conocimiento de toda la trazada sin incurrir en un gasto inasumible para la obra. Este hecho crea una incertidumbre que puede ser problemática desde varios puntos de vista relacionados con el coste total y los plazos de construcción esperados, encontrando entre ellos algunos tan relevantes como:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Estabilidad física de la obra y seguridad de los trabajadores (Yu et al., 2017).
- Sobrecostes por atrasos en su finalización y/o por la necesidad de aplicar un sostenimiento más pesado, redundando en pérdidas para las empresas relacionadas con la obra y/o la administración competente (Flyvbjerg et al. 2004).
- Generación de impactos ambientales no contemplados, como puede ser: la generación de subsidencia o colapsos en superficie por encima del nivel esperado, contaminación de los acuíferos debido a la presencia de agua no detectada o con un caudal no esperado (Rodríguez y Díaz-Aguado, 2011).

Por otro lado, y a pesar de los puntos mencionados en los párrafos anteriores, en general, la construcción de una infraestructura subterránea suele tener unas implicaciones medioambientales menores que su homólogo en superficie (Pelizza et al., 2002).

El enfoque habitual para conocer el tiempo y costes requeridos se basa en determinar los costes a partir del trazado definido, el método de excavación, la sección y el sostenimiento requerido. Una vez determinados los plazos existen sistemas de simulación estadística para definir la incertidumbre del proyecto (Arlandi y Cornejo, 2010).

En este sentido, el grado de incertidumbre se ha reducido en varios proyectos mediante el uso de sondeos dirigidos con recuperación de testigo, DCD, y de tipo horizontal con recuperación de testigo, HDC. Pudiendo incrementar en gran medida el conocimiento del macizo rocoso donde se quiere excavar el túnel, minimizando o eliminando, los impactos potenciales descritos anteriormente.

Hasta el momento, el uso de la técnica HDC ha tenido una aplicación exitosa, pero limitada, disponiendo de varias ventajas y algún inconveniente respecto los sondeos verticales. Debido al efecto de la gravedad y la rotación del equipo, tienden a tener una mayor desviación, siendo necesario un control más exhaustivo, modificando la velocidad de rotación y presión de perforación para

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

la rectificación de su dirección. Además, el HDC se puede considerar un pequeño túnel piloto, pudiendo definir mejor las litologías, la calidad de la roca, la permeabilidad, posibles zonas de falla, entre otras características relevantes. Siendo especialmente relevante en el caso de tener zonas de falla y fracturación, ya que la calidad de la información será mayor al sacar un testigo con mayor perpendicularidad a la discontinuidad (Carter, 1992), además de sacar un testigo de mayor tamaño generalmente.

A partir del estudio de casos reales, Howard et al. (2005) muestran como el coste del conjunto de sondeos verticales es prácticamente igual al uso de HDC, pero con un conocimiento del trazado del túnel mucho mayor usando esta última técnica. En este sentido, Castells (2008) detalla el primer túnel, a nivel nacional, donde se aplicó la técnica HDC, mientras que otros casos de estudio (Tai et al., 2009; Lee et al., 2010) también aplicaron HDC junto con geofísica y perforaciones verticales e inclinadas para definir las características del macizo rocoso.

Como hemos dicho anteriormente, la perforación DCD combina dos técnicas extensamente conocidas, la perforación con recuperación de testigo y la perforación direccional, utilizándose desde hace décadas en la exploración de recursos minerales y petrolífera, alcanzando longitudes de pocos kilómetros, así como cambios de dirección considerables (Wang et al., 2012). El sondeo puede ser vertical desde superficie e ir modificando su dirección hasta seguir el futuro trazado del túnel. El testigo recuperado puede ser usado para la caracterización mineralógica y geotécnica de la zona perforada, así como para determinar las condiciones hidrogeológicas.

Además, la técnica DCD se ha validado en la investigación geotécnica de varios túneles, como la obra en Hong Kong de 2009 con presencia de varias fallas aparentemente problemáticas a nivel geotécnico (Cunningham et al., 2012). Otras técnicas con uso similar pueden ser las perforaciones horizontales con recuperación de testigo, con su uso demostrado en varios túneles, ya sea con el equipo en la propia galería (Castells, 2008), como desde la zona de emboquille (Tsang et al., 2015; Boden et al., 2018). Sin embargo, esta técnica

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

se comenta como una especie de túnel piloto que permite ajustar el tipo de sostenimiento a aplicar y el método de excavación en algunos casos estudiados (Lam et al., 2008). Requiriendo una fase de excavación previa, y por lo tanto, la iniciación del proyecto. Adicionalmente, Lindhjem (2009) expone sus ventajas cuando se debe realizar un túnel debajo de zonas urbanas.

El uso de DCD y/o HCD permite reducir la incertidumbre a cambio de un incremento presupuestario en los trabajos de reconocimiento, ya que se trata de una técnica con un mayor coste respecto los sondeos verticales o inclinados (Kaplin et al., 1998). Por lo tanto, el factor clave será conocer si este incremento del coste inicial redundará en un decremento del coste de construcción al reducir la incertidumbre, lo cual queda constatado en proyectos como el túnel de Burata (Rodríguez et al., 2021), un túnel de suministro de agua donde se definieron las zonas más críticas mediante DCD (Kaplin et al., 1998) o en varios túneles en Hong Kong (Lindhjem y Tai, 2009). Pudiendo usar la técnica DCD incluso desde una plataforma flotante (Tsang et al., 2016).

Lindhjem (2009) también expone las limitaciones del uso de DCD, ya que no se puede controlar bien la dirección en suelos, mientras que en macizos rocosos muy fracturados presenta dificultades de avance y control de dirección. Además de requerir un personal mucho más formado para su correcto funcionamiento. Los sistemas DCD y HCD, no pueden tener longitudes muy por encima del kilómetro, siendo un problema para túneles de más de 3 kilómetros de longitud, ya que se requeriría puntos intermedios de inicio del sondeo, si ello fuera posible.

Referente al coste de este tipo de perforaciones, el caso de estudio presentado por Boden et al. (2018) muestra como para un macizo rocoso de tipo ígneo, la técnica DCD da una información de mucha mayor calidad, especialmente para zonas de falla y los emboquilles, recuperando el dinero adicional respecto a los sondeos verticales. Por el contrario, los mismos autores comentan la importancia de los sondeos verticales, respecto los horizontales o dirigidos, cuando se trata de materiales sedimentarios estratificados.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

A pesar del aparente incremento de coste de las perforaciones tipos DCD y HCD respecto a las verticales, pero al reducir la incertidumbre del proyecto, estudios previamente realizados muestran como el presupuesto se mantendría dentro de un rango aceptable según la recomendación del U.S. NationalCommitteeonTunnellingTechnology, USNCTT (1984).

La cantidad de exploración que se realiza en un proyecto determinado suele estar determinada por la experiencia y las limitaciones presupuestarias. Pudiendo basarse en publicaciones del sector para conocer el orden de magnitud, Figura 4. Sin embargo, la falta de requisitos legales hace que a menudo se infravaloren los problemas relacionados con la mecánica de rocas, variable que tiene una gran incidencia en la maquinaria a usar y el sistema de excavación más adecuado.

		GEOLOGICAL CONDITIONS			
		NOT COMPLEX		COMPLEX	
HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS	NOT COMPLEX	1.2	1.5 - 1.8	1.5	<500M
					>500M
	COMPLEX	1.5 - 1.8	1.8 - 2.5	1.8 - 2.1	<500M
		<2000m	>2000m	<2000m	OVERBURDEN
		LENGHT			

Fig. 4 Coste porcentual de investigación respecto el coste de la obra Pelizza et al. (2002).

Pelizza et al. (2002) constata que los túneles investigados en detalle tienen menos sobrecostes y disputas. Siendo los problemas imprevistos los que pueden crear retrasos y disputas durante la construcción del túnel. Además, la correcta exploración permitirá determinar la viabilidad, seguridad, diseño y costes de un túnel.

El beneficio de este incremento de conocimiento del terreno se ha verificado en estudios previos como un túnel para la conducción de agua mediante TBM

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

(Castello et al., 1999) o varios proyectos con diferentes tipos de tuneladora (Barla y Pelizza, 2000). Por lo tanto, se constata que los riesgos de tipo geológico serán los principales causantes de retrasos e incrementos de coste en la obra. Isaksson (2002) define dos tipos de riesgos relacionados con la geología, normales y excepcionales. Siendo los primeros la variación de calidad del macizo respecto a lo previsto, mientras que los segundos están relacionados con elementos puntuales que no se habían detectado, como fallas, cavidades o infiltraciones anormalmente altas de agua. Además, Arlandi y Cornejo (2010) definen una tabla donde se definen los principales riesgos geotécnicos durante la ejecución de un túnel y los relaciona con la frecuencia y gravedad del riesgo asociados. Si realizamos un análisis interno y externo de los túneles como proyecto se puede concluir que los factores que influyen en el coste y tiempo de ejecución son los siguientes.

- Factores internos: cambios en el calendario del proyecto, aumento del alcance, mayor complejidad ingenieril, contingencias inadecuadas, conflictos entre las partes contractuales (Flyvbjerg, 2014).
- Factores externos: condiciones imprevistas (principalmente condiciones geológicas e hidrogeológicas, requisitos de diseño no previstos, etc.), y cambios cambios externos (factores financieros externos, cambios en la inflación, modificaciones de los mercados, etc) (Membah y Asa, 2015). Entre todos los factores, el más importante será el geológico (Paraskevopoulou, 2011 Langford y Diederichs, 2014).

Paraskevopoulou (2011) también determina que la geología es el factor principal, mientras que el uso final del proyecto el tipo de contrato y la profundidad del proyecto de construcción de túneles se consideran factores de coste secundarios.

Tabla 1 Sobrecostes de varios túneles realizados (Flyvbjerg, 2014).

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Project	Cost Overrun (%)
Troy and Greenfield Railroad, USA	900
Furka Base Tunnel, Switzerland	300
Boston's Big Dig Artery/Tunnel project, USA	220
Minneapolis Hiawatha light rail line, USA	190
Dublin Port Tunnel, Ireland	160
Montreal Metro Laval extension, Canada	160
Copenhagen Metro, Denmark	150
Boston-New York-Washington Railway, USA	130
Great Belt Rail Tunnel, Denmark	120
London Limehouse Road Tunnel, UK	110
Shinkansen Joetsu high-speed rail line, Japan	100
Channel Tunnel, UK, France	80
Karlsruhe-Bretten light rail, Germany	80
London Jubilee Line extension, UK	80
HSR Madrid-Seville, Spain	70
Bangkok Metro, Thailand	70
Mexico City Metroline, Mexico	60
High-speed Rail Line South, The Netherlands	60
Attiko Metro, Greece	50

Por lo tanto, existe una necesidad de evaluar de forma precisa el coste de la construcción del túnel en las fases preliminares del diseño. En esta etapa, la investigación del terreno desempeña el papel más importante para determinar el coste global de la obra y reducir los potenciales sobrecostes (Moret y Einstein, 2016), lo cual se traduce en una menor incertidumbre general de proyecto (Paraskevopoulou y Boutsis, 2020).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

1.3 Evolución de la técnica de sondeos direccionales con recuperación de testigo.

Antiguamente se creía que todos los sondeos eran rectos o que mantendrían la misma dirección e inclinación con las que se habían iniciado en superficie.

Los sondeos direccionales profundos empezaron con el auge de la industria del petróleo a principios del siglo XX, aunque dicha industria tardó bastante tiempo en preocuparse por dichas desviaciones.

Anecdóticamente, podemos mencionar que no fue hasta que a finales de los 1920's en un campo de petróleo de Oklahoma, el campo Seminole, tenía los pozos muy cercanos los unos a los otros, y con desviación de unos 46° (en ese caso concreto), dio como resultado que un pozo estaba sacando petróleo en la misma bolsa que alguno de los ya perforados, con el lógico descenso de producción, al cabo de un tiempo, en ambos pozos. En el campo Seminole, la media en desviaciones de los pozos alcanzó los 13°.

Es entonces cuando se empiezan a desarrollar los equipos de medición de sondeos, para tener un mejor conocimiento de hacia dónde se estaba realizando el sondeo realmente, tanto en azimut como en inclinación.

Con el avance de la técnica en los equipos de medición de sondeos, se introdujeron algunos procedimientos muy básicos para dirigir el sondeo al punto planificado, simplemente, cementando y jugando con el pandeo de la sarta de perforación, dando una mayor o menor presión sobre la cabeza de perforación se podía desviar o volver a dirigir dicho sondeo.

Los primeros sondeos direccionales, de los que se tiene referencia son al principio de los 1930's, con aplicaciones tan dispares como:

- Aprovechar campo petrolífero que la competencia estaba ya explotando.
- Aprovechar un campo petrolífero que estaba bajo un cementero o en terrenos particulares que no permitían perforar desde la superficie.
- Aprovechar campos petrolíferos de un golfo, empezando el sondeo

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

desde tierra y llegando al depósito submarino.

Es decir, en aquellos tiempos hablar de sondeos direccionales no estaba muy bien visto, dado que significaba algo problemático y arrastraba una inmerecida mala fama.

No fue hasta que en un pozo de petróleo, cerca de Conroe (Texas), se produjo un incendio, que estuvo totalmente incontrolado, hasta que por medio de un sondeo direccional se alcanzo el pozo incendiado, por este nuevo pozo se bombearon fluidos que finalmente apagaron dicho incendio.

Es a partir de entonces, cuando este sistema empezó a ser aceptado. Desde entonces, el avance de la técnica de direccionamiento y ramificación, no solo lo hace el método adecuado por su eficacia, sino que además es lo más rentable desde el punto de vista económico.

En la siguiente figura 5, se pueden ver varias aplicaciones de los sondeos direccionales, en el campo del petróleo.



Fig. 5 Diferentes aplicaciones de sondeos direccionales.

Como decíamos, con el avance de la técnica, se podían hacer

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

pozos totalmente verticales, y a cierta profundidad lo podíamos convertir en un pozo horizontal.

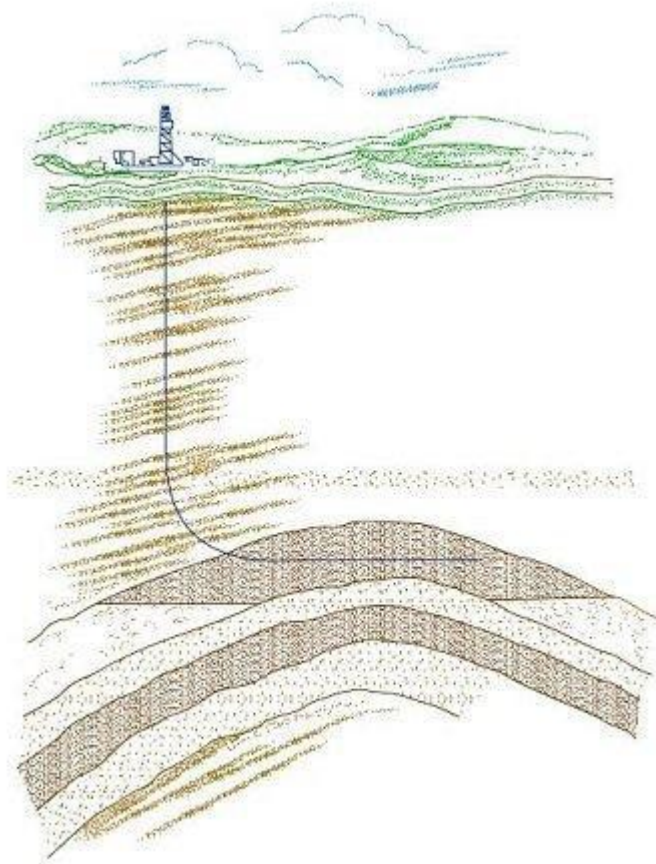


Fig. 6 Sondeo direccional horizontal.

Esta figura 6, nos muestra el típico sondeo para un pozo de fracking, o sondeos de petróleo de recuperación secundaria.

Además desde un mismo pozo que no alcanzó la trampa geológica con petróleo, se puede ramificar en el fondo del pozo y redirigir hasta encontrar la bosada de petróleo.

En la industria del petróleo, se pueden hacer curvas de radio muy bajo, el varillaje, quedará enterrado en dicho pozo y no se volverá a utilizar en otro pozo.

Evolución del estudio geotécnico mediante sondeos direccionales.

Siguiendo los pasos de la industria del petróleo, en la que tenían todos los

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

medios a su disposición, y si no había nada en el mercado, se “inventaba” sobre la marcha, en la investigación geológica, como un hermano pobre, se fue evolucionando a menor velocidad pero no por ello, significa que los resultados sean malos, y se consiguen resultados muy brillantes.

Hay una gran evolución de los equipos de medición y control de sondeos, entonces, es posible dirigir los sondeos y ramificarlos, cuando sea necesario.



Fig. 7 Control, ramificar y dirigir un sondeo.

Tras ésta breve introducción histórica, vamos a centrarnos en los sondeos geotécnicos y su evolución.

Partimos de los siguientes procedimientos de dirigir los sondeos:

1. Tapón de cemento.
2. Utilización de cuñas.
3. Utilizar una turbina de perforación con excéntrica

El método 1 y 2, suelen ir juntos, pero tienen resultados muy irregulares, a veces consiguen su misión pero con bajo porcentaje de acierto.

En el punto 3, tenemos dos sistemas bien diferenciados:

3.1 Mud motors, con tricono destructivo, sin recuperación de testigo en la curva (NAVYDRILL^R).

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

3.2 DEVIDRILL^R, que tiene corona de perforación con recuperación de testigo incluso durante la curva.

Las comparaciones entre ambos, se resumen en la siguiente tabla 2:

Tabla 2 Comparación entre MUD MOTORS y DCD

M.M vs DCD	MUD MOTORS	DCD
Velocidad de perforación.	De 2 a 4 cm/min.	De 10 a 14 cm/min.
Consumo de agua.	De 200 a 400 l/min	Sobre 40 l/min
Peso en cabeza de perforación.	25 KN	45 KN
Ajuste "dogleg"	Fijo	Variable
Diámetro de perforación	BWL	NWL
Cabeza de corte	Tricono NAVY No recupera testigo	Corona DEVICO Recupera testigo en curva
Control de orientación	En superficie	En el fondo del sondeos

Por las ventajas anteriormente mostradas, simplicidad, rapidez y economía, nos decantamos por el sistema de "cortar la curva" de DEVICO

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

RAMIFICACIÓN DE POZOS

- Se realiza primer pozo direccionado
 - Desviación típica: 3° / 10m
 - Longitud en DCD: 15-50 m
- Segundo pozo “corta la curva” en la sección curva
 - Avance: 1-2 cm/min
 - Tiempo operación: 2-4 hrs
- Luego se direcciona el nuevo pozo al nuevo objetivo
- Eficiencia: 5 a 10 ramificaciones por pozo



Fig. 8 Cortar la curva.

En la tabla 2, Mud Motors vs DCD, comprobamos las ventajas del sistema DCD frente al Mud Motors, mayor rendimiento en perforación, consume menos agua, tiene un mayor diámetro de perforación y además tiene más fuerza en la cabeza de corte, tiene un ángulo de excentricidad “dogleg” (pata de perro) variable y además recupera testigo incluso en el direccionamiento.

En la siguiente figura 9, se observa, como tras una ramificación “cortando la curva”, en el primer testigo recogido, tras 3 metros de perforación sabemos que vamos en otra dirección, porque va apareciendo una sección mayor de testigo, en el mud motors, deberemos esperar a cambiar la turbina para medir la dirección y comprobar que todo está de acuerdo al plan de perforación.

RAMIFICACION DE POZOS



- **Ejemplo de testigo al “cortar la curva”**

Fig. 9 Comprobación de la desviación.

Desde principios del siglo XXI, la perforación direccional con recuperación de testigos se ha venido utilizando, en las campañas de investigación y caracterización geomecánica de varios túneles importantes en Hong Kong.

La obtención de testigos, a lo largo de lo que será la trayectoria del túnel ha demostrado ser una muy buena herramienta para evaluar la viabilidad o no, de la construcción del túnel. Los testigos de los sondeos recuperados, permiten detectar cualquier tipo de fallo geológico, entradas de agua, caracterización geomecánica del terreno y, por lo tanto, simplifican la predicción del tipo y la cantidad del sostenimiento que será necesario utilizar.

Debido a la naturaleza topológica de Hong Kong y su distribución de población, los túneles generalmente se construyen a través de las montañas o debajo del puerto, en cuyo caso la perforación de investigación mediante sondeos

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

tradicionales, solo proporcionan una información muy limitada. Mediante el uso de la tecnología de perforación direccional con recuperación de testigo (DCD), donde un solo sondeo puede explorar una gran longitud de terreno, imposible de alcanzar con las otras técnicas de perforación convencionales, y los métodos geofísicos, acústicos, ...etc, no siempre dan una información verídica, dado que sus resultados, se deben cotejar por medio de sondeos tradicionales.

Como resultado, el Gobierno de la Región Administrativa Especial de Hong Kong (RAEHK) ha emitido una nota de orientación técnica que indica los beneficios potenciales de la perforación direccional con recuperación de testigo para las investigaciones "In situ".

Desde entonces, los sondeos direccionales con recuperación de testigo, (DCD), se han utilizado en múltiples ocasiones en Hong Kong, en todo tipo de túneles: carreteros, ferroviarios, de saneamiento, de alcantarillado,... tanto en tierra como bajo el mar.

Ventajas del sistema DEVIDRILL (DCD).

Por lo general, en áreas abiertas, la mayoría de la información geotécnica para la construcción de túneles se suele obtener mediante el trabajo de campo y realización de sondeos en un número limitado, complementados con varios métodos de levantamiento geofísico o gravimétrico. Pero cuando se planifica un túnel debajo de áreas densamente pobladas, ríos, puertos u otras áreas con acceso restringido, el estudio geológico se vuelve complicado bastante, además que aumentan las consecuencias de cualquier error en la interpretación del estudio realizado, por ejemplo, el barrio del Carmelo en Barcelona. Por lo tanto, la extracción de testigos a lo largo de la trayectoria del túnel proporcionaría la mayor parte de la información necesaria para comprender el comportamiento del terreno antes de comenzar la excavación.

El beneficio más claro de la extracción de muestras en toda la trayectoria, se ve en la siguiente figura 10, donde están los testigos en sus cajas, a simple vista se observan las fracturas, zonas de fallas, si hay testigo sólido o simplemente falta testigo debido a la poca consistencia del terreno, con la gran ventaja que

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

se pueden ensayar y obtener las propiedades mecánicas. Dado que la dirección del sondeo y el túnel es casi idéntica, la magnitud y las propiedades de las diversas estructuras del suelo que se ven en el núcleo también serán las mismas durante la excavación.



Fig. 10 Caja portatestigos con testigos

Como ya se ha comentado anteriormente hay una cantidad de dispositivos de medida y sondas de investigación, totalmente adaptadas al sistema wireline, que hace de los sondeos un sitio perfecto para investigar el terreno a atravesar, aparte de la información que se obtiene del propio testigo.

Limitaciones del sistema DEVIDRILL (DCD).

En algunas ocasiones los sondeos direccionales con recuperación de testigos, pueden funcionar mal o incluso fracasar en su trabajo, estas limitaciones se pueden clasificar en fallos de dos tipos:

- a) En asuntos relacionados con el sistema de turbina direccional, su sistema sacatestigos y la tecnología detrás de él, mientras que el resto.
- b) En asuntos relacionados con equipos de los perforación propiamente dichos.

Limitaciones del DeviDrill

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

El barril sacatestigos no funciona correctamente en suelo y grava, ya que la desviación lograda es baja y la dirección es casi imposible de controlar. Dado que muchas perforaciones direccionales se inician en una capa de suelo y se sobrecargan, es necesario perforar en línea recta hasta que se haya alcanzado la roca sólida. Si la alineación del túnel está cerca de la superficie de la roca, la implicación podría ser que el pozo no se puede doblar lo suficientemente rápido para entrar en la envolvente de seguridad especificada. En muchos casos, este problema puede resolverse reduciendo el ángulo de inicio del pozo.

La perforación en zonas de roca de baja calidad suele ser problemática. Normalmente se logrará una desviación correcta, pero la velocidad normal de perforación puede reducirse considerablemente. La causa de esto está principalmente relacionada con la gran superficie de corte de la broca y el pequeño diámetro de la muestra del testigo. Como resultado, el testigo se rompe en pedazos muy pequeños que giran y se retuercen al entrar en el tubo interior sacatestigos. Las piedras eventualmente se atascan y el sondeo debe interrumpirse, a veces después de solo 10 cm de perforación. La mejor solución en estos casos es cambiar las turbinas de perforación y utilizar la estándar directamente hasta alcanzar roca sana. El sacatestigos estándar saca un testigo de mayor diámetro que es más resistente a la rotura y bloquea aún más el tubo interior y recoge menos cantidad de testigo. El problema con tal solución es la pérdida de control en la dirección del sondeo y se puede salir del margen de tolerancia estipulado.

Cada vez más, la investigación geotécnica se realiza con sondeos de mayor diámetro, especialmente de tamaño HQ (96 mm). En tales situaciones, la extracción de testigos direccional no se puede realizar ya con DCD, que solo llega a tamaño NQ. Sin embargo, se suele perforar a tamaño NQ durante el direccionamiento y escariar hasta tamaño HQ después de direccionar.. Las mismas limitaciones ocurren si se perforan sondeos de menor diámetro BQ. Y se puede presentar una solución similar, donde se escaria hasta el tamaño NQ y se continúa con el tamaño más pequeño después de la deflexión. Estas soluciones no son óptimas ya que consumen mucho tiempo y requieren equipo

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

de perforación adicional. Por lo tanto, está previsto que en un futuro próximo se desarrolle un sistema sacatestigos para tamaño HQ.

La limitación más obvia podría ser la complejidad del barril sacatestigos. Se requiere un ingeniero especialmente capacitado para supervisar la operación de perforación siempre que se realice una extracción de testigos direccional. Como resultado, el costo de la perforación direccional es mucho más alto que el de la perforación estándar y la tecnología se utiliza principalmente en proyectos grandes con alto riesgo o tiempo de finalización corto.

Limitaciones de la perforación direccional

La perforación de testigos en roca dura se realiza aplicando rotación y presión a una sarta de perforación fabricada en acero con una broca de diamante en el frente. De todos es sabido, que el acero se dobla, se retuerce y ocasionalmente se rompe, aunque depende de cuánto se curve. Esto impone una limitación a la perforación direccional, ya que el radio de curvatura en el sondeo no puede ser mayor de lo que puede soportar la sarta de perforación.

La mayoría de los fabricantes de barras de perforación especifican un cambio de 3° cada 10 metros, sin que el varillaje sufra ningún daño.

A medida que se desvía el sondeo, la sarta de perforación naturalmente intenta seguir el camino más recto y se fuerza hacia el lado del sondeo con el radio más grande. El contacto entre la pared y la sarta de perforación crea fricción y aumenta la torsión a medida que gira la sarta de perforación. Este incremento en el par, absorbe la energía del equipo de perforación y, por lo tanto, reduce la longitud máxima que puede alcanzar el sondeo, además de reducir la velocidad de perforación de las coronas de corte..

Por lo tanto, la planificación inicial de un sondeo DCD es crucial para asegurar un funcionamiento óptimo en toda la longitud del mismo. Es importante que el equipo de perforación se instale en la dirección correcta con un ángulo de inicio adecuado para evitar una excesiva curvatura. Existen aditivos que se pueden agregar al lodo de perforación para reducir la fricción y el par en el sondeo, pero siempre es mejor una buena planificación.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

La sarta de perforación estándar NQ, tiene un rango de aplicación de unos 2.000 metros para sondeos verticales y un poco menos en pozos horizontales, a medida que aumenta el par debido a la fricción, entre la sarta de perforación y la pared del terreno.

En consecuencia, los sondeos DCD más largo están sobre los 1.250 metros, puntualmente 1.500 m. con un varillaje convencional. Esta es una limitación importante cuando se trata de exploración de túneles submarinos largos especialmente, y no es posible perforar a lo largo de toda la longitud trazado si el túnel supera los 3.000 metros y solo se puede acceder a él en el punto inicial y final.

Aunque hay sartas de perforación especiales, p. ej. CUD 76, que están clasificados para profundidades de 4.000 a 5.000 metros y pueden usarse junto con el DeviDrill, pero las perforadoras son tan costosas que su uso rara vez es factible en exploración geotécnica.

Capítulo 2

Objetivos y Metodología

2 OBJETIVOS Y METODOLOGIA

2.1 Objetivos de la tesis

El objetivo general de la tesis es demostrar las ventajas de la utilización de la técnica DCD, sondeos direccionales con recuperación de testigo, en la investigación geológica, geotécnica e hidrogeológica previa a la redacción del proyecto de un túnel.

Partimos de unos diferentes objetivos parciales antes de conseguir ese objetivo final son:

- Definir una metodología para la evaluación de la técnica DCD aplicada a los túneles
- Definir las incertidumbres y proponer una cuantificación económica de ellas
- Investigar diferentes proyectos de grandes túneles que se han ejecutado en España
- Analizar en detalle varios túneles representativos en los que la aplicación de la técnica DCD en la fase de investigación geológica-geotécnica habría sido muy beneficiosa
- Determinar las ventajas de emplear la técnica en los túneles elegidos como representativos.

Finalmente, se realiza una valoración económica de los resultados.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

2.2 Metodología para el análisis comparativo

2.2.1 Metodología seguida en la evaluación de la técnica DCD

La metodología seguida en la tesis es empírica. A partir del análisis de varios casos reales de túneles ejecutados en España se obtienen unos resultados que pueden ser aplicados a otros casos similares.

Para que el análisis se pueda extrapolar, se han buscado unos túneles representativos de los que se conoce la fase de proyecto y la fase de ejecución de la obra. Es importante destacar que en todos los casos el proyecto inicial presentaba grandes incertidumbres (como es normal en los túneles de gran longitud y/o a gran profundidad).

Se ha estudiado en cada caso la investigación geológico-geotécnica llevada en cada caso para la caracterización del macizo rocoso en el tramo de túnel analizado. Como es normal, la investigación siempre se basaba en campañas de ejecución de sondeos con recuperación de testigo. Estos sondeos se ejecutaban siempre desde la superficie. En un caso muy particular se ejecutó algún sondeo horizontal, pero resulta realmente la excepción.

En cada caso, se ha propuesto una campaña de sondeos con técnica DCD para la caracterización del 100% de la traza del túnel donde aparecerían problemas (en uno de los casos ese 100% representa toda la longitud del túnel.)

Es evidente que la técnica DCD es más cara que los sondeos verticales. Por lo tanto, la evaluación de la técnica ha de ser en términos relativos.

Durante el desarrollo de la tesis, no se han encontrado datos de túneles que sean similares a los que aquí se analizan y en los que se haya utilizado la técnica DCD por lo que no se tiene una valoración previa de la técnica y se ha tenido que proponer una, lo que constituye un objetivo de la tesis.

La evaluación de la técnica DCD que aquí se propone puede ser:

- a) Una evaluación comparativa; se compara la longitud de túnel que efectivamente queda caracterizada utilizando las dos técnicas posibles:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

sondeos convencionales y DCD; también se compara la relación entre el coste en la campaña de sondeos y la longitud de túnel realmente caracterizada con ambas técnicas; una menor proporción €/m implica una técnica más efectiva porque implica un menor coste por m de túnel investigado; finalmente se compara el coste que se necesitaría con cada técnica para caracterizar el 100% de la longitud de túnel estudiada.

b) Una evaluación absoluta mediante la cuantificación económica de las incertidumbres que no se eliminan con los sondeos convencionales y que sí se pueden eliminar, o al menos se disminuyen con sondeos direccionales con recuperación de testigo

Tanto en cuanto la técnica DCD es una técnica de perforación de sondeos con recuperación de testigo, la información que puede dar es muy completa, ya que permite obtener testigos de roca que después se podrán ensayar en laboratorio para determinar diferentes parámetros geotécnicos.

Ahora bien, en esta tesis se evalúa la técnica de acuerdo con la información más básica que podría dar que es delimitar claramente la extensión de la zona de un túnel en la que pueda haber muchas incertidumbres. Obviamente, tanto en cuanto se puede extraer testigo del sondeo, además de delimitar muy exactamente el tramo más complejo del túnel, se tendrían parámetros geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos todo a lo largo de la traza del túnel en el tramo en estudio, lo que permitiría predecir su comportamiento con mucha más exactitud. No obstante, como se dijo esto no se va a tener en cuenta de manera que la evaluación es más bien conservadora.

De esta manera, también se compensan las limitaciones que pueda tener la técnica en cuanto a mantener la dirección del sondeo en macizos rocosos sedimentarios. Por eso se considera que la técnica DCD sólo va a dar la información mínima de interés que no se obtuvo en su día mediante la campaña de sondeos convencionales realizada desde superficie.

Se ha considerado además que esa información mínima es la definición de la extensión de los tramos de túneles analizados.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Por otra parte, se han buscado tramos de túneles en los que esa información mínima se habría obtenido casi con toda seguridad si se hubiera empleado la técnica DCD. Y además, habría aportado unos datos muy relevantes en la fase de proyecto que, sin duda habría llevado a conocer mejor el coste real del túnel en la fase de proyecto.

Como se dijo, la evaluación absoluta de la técnica DCD se basa en cuantificar económicamente las incertidumbres que quedan despejadas al aplicar dicha técnica en la fase de proyecto. Para ello se comparan los costes estimados en la fase de proyecto usando las técnicas convencionales con los costes estimados en la fase de proyecto con la técnica DCD.

Se va a suponer que la técnica DCD nos permite determinar con exactitud la longitud de un tramo de túnel en el que puede haber problemas y que coincide con la longitud que tendrá durante la ejecución del túnel. La cuantificación de las incertidumbres consiste en comparar los resultados suponiendo la longitud que se suponía en proyecto con los resultados que se obtienen suponiendo la longitud real determinada por la técnica DCD. Cabe entonces proceder de tres maneras:

- a) Sin utilizar datos reales del túnel; en este caso se utilizan métodos de cálculo convencionales para determinar costes según la longitud del tramo sea la especificada en proyecto con técnicas convencionales o la que se puede determinar con la técnica DCD. Así, los avances, los caudales de agua, los tipos de sostenimiento...etc. se calcularían en los dos casos como se haría en la fase de proyecto
- b) Si se tienen datos reales del túnel (porque ya se ha ejecutado y se conocen), se pueden utilizar los datos reales obtenidos durante la fase de ejecución de la obra para establecer la comparación de costes
- c) Se puede utilizar una técnica mixta en la que algunas incertidumbres son evaluadas con datos reales de la excavación y otras son evaluadas a partir del cálculo convencional.

En los casos analizados se utilizan las tres posibilidades señaladas anteriormente.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

2.2.2 Elección de los túneles representativos e investigación de los tramos tipo.

La búsqueda de los datos necesarios en el análisis es sumamente compleja. Es una documentación que es relativamente fácil de conseguir cuando se está ejecutando la obra o justo tras su finalización. No obstante, durante ese periodo las empresas no suelen estar de acuerdo con que se investiguen estos temas. Por una parte, pueden poner de manifiesto deficiencias en la investigación geológica-geotécnica o en la redacción de los proyectos. O peor aún, pueden poner de manifiesto deficiencias en la ejecución de las obras con una gran responsabilidad desde diferentes puntos de vista:

- a) El de la seguridad de los trabajadores, como en lo relacionado con el sostenimiento o la presencia de metano,
- b) El del impacto medioambiental del túnel, como es el drenaje de acuíferos o la subsidencia inducida,
- c) El de los resultados económicos del proyecto, como puede ser rendimientos anormalmente bajos o la utilización de maquinaria no idónea
- d) ...etc.

Estos temas son muy sensibles y las empresas son, obviamente, reacias a dar información.

Por el contrario, una vez se ha finalizado la ejecución del túnel y ha pasado un tiempo suficiente, para que esa información no sea sensible, es muy difícil reunir la información porque se halla diseminada en los archivos de diferentes empresas o instituciones (ADIF, empresas privadas, organismos de control, Universidades...etc.).

Para cada túnel se ha buscado información de las siguientes fuentes:

- a) bibliografía científica publicada
- b) bibliografía técnica publicada
- c) proyectos base de los túneles
- d) proyectos modificados de los túneles

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Además, se ha consultado con ingenieros que trabajaron en esas obras en cargos de responsabilidad y que conocieron de primera mano tanto los problemas que se plantearon como las soluciones encontradas para su resolución en obra. De hecho, algunos de esos técnicos son firmantes de algunas de las publicaciones científicas o técnicas).

Se han buscado tres tramos en tres túneles muy representativos de las grandes obras ejecutadas en España en los últimos años.

Túnel de La Burata

El primero de ellos es el túnel de La Burata, que forma parte de la línea ferroviaria de alta velocidad Madrid-Galicia.

Destacamos aquí las características particulares de este túnel con respecto a los otros.

- Fue excavado con explosivo, mediante el método de perforación y voladura.
- Consistía en el túnel principal y una galería auxiliar de pequeña sección en paralelo.
- Su longitud, aproximadamente 4 km, es media/baja.
- Profundidad máxima media/baja, del orden de 200 m.

Dicho túnel atravesaba un macizo rocoso granítico con presencia de granitos, con comportamiento claramente de roca, y granitos muy alterados o jabres con un comportamiento prácticamente como el de un suelo. El problema que se planteó en su día era la extensión de las zonas de jabre, material con unas características geomecánicas muy inferiores a las del granito, cuya excavación originó graves problemas.

Un hecho muy importante es que el túnel discurría a una profundidad media de 200 m muy constante y entonces cabe la posibilidad de plantearse la aplicación de la técnica DCD a todo el trazado del túnel

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

En el caso del túnel de A Burata, el análisis de las ventajas de la técnica DCD se hace considerando las incertidumbres en cuanto a:

- Dimensionamiento del sostenimiento sistemático a utilizar (gunita+bulones+cerchas).
- Rendimientos de avance y e influencia en el plazo o duración de la obra.
- Utilización de sistemas de refuerzo del sostenimiento especiales (paraguas de micropilotes).
- Afluencia de agua al túnel.

En este caso se analiza la técnica DCD en la fase de proyecto. Es decir, se estima la incertidumbre con los datos que tendríamos en la fase de proyecto, sin acudir a los datos reales.

Así tanto los avances como los caudales de agua, tipos de sostenimiento...etc. se calculan como se haría en la fase de proyecto, sin conocer los datos reales después de la ejecución del túnel.

Túnel del Lote 3 de la Variante de Pajares

Los túneles de la Variante de Pajares forman parte de la línea ferroviaria de alta velocidad Madrid-Asturias. El túnel principal es un túnel de base bitubo de 23 km de longitud total. En esta tesis sólo se analiza uno de los tubos en el tramo correspondiente al Lote 3.

Destacamos aquí las características particulares de este túnel con respecto a los otros:

- Fue excavado con tuneladora de escudo simple.
- El túnel es bitubo con dos tubos paralelos de 10 m de diámetro.
- Su longitud, aproximadamente 10 km, es grande.
- Profundidad máxima grande, de más de 1000 m en la zona más profunda.

Dicho túnel atravesaba un macizo rocoso con predominio de formaciones de roca sedimentaria. El estudio de las incertidumbres se centra en una parte del

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

túnel en la que existía un tramo de unos 600 m a través de una formación del Carbonífero formado por rocas de baja resistencia geomecánica (lutitas, pizarras) en las que se concentraban diferentes problemas. Por una parte, son rocas débiles que a esa profundidad tienen una gran tendencia al fenómeno de squeezing. Por otra, existía una probabilidad muy alta de que se produjera desprendimiento de metano durante la excavación.

En el caso del Lote 3 de la Variante de Pajares, el análisis de las ventajas de la técnica DCD se hace considerando las incertidumbres en cuanto a:

- Sobredimensionamiento del sostenimiento de anillos de dovelas prefabricadas
- Disminución del rendimiento de avance y e influencia en el plazo o duración de la obra
- Riesgo “squeezing” y atrapamiento de la tuneladora
- Consumo de cortadores
- Desprendimiento de metano en el túnel

En este caso se analiza la técnica DCD en la fase de proyecto utilizando una técnica mixta, es decir, se estima la incertidumbre con los datos que tendríamos en la fase de proyecto y también con datos reales de avances, consumos...etc. que se tuvieron a posteriori después de ejecutar la obra.

Túnel de Bolaños

El túnel de Bolaños también forma parte de la línea ferroviaria de alta velocidad Madrid-Galicia. Es un túnel bitubo, aunque en esta tesis sólo se analiza uno de los tubos.

Destacamos aquí las características particulares de este túnel con respecto a los otros:

- Fue excavado con tuneladora de escudo simple
- El túnel es bitubo con dos tubos paralelos de 10 m de diámetro

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Su longitud, aproximadamente 7 km es media
- Profundidad máxima media/baja, del orden de 200 m.

Dicho túnel atravesaba un macizo rocoso con predominio de las pizarras, cuarcitas y areniscas. El estudio de las incertidumbres se centra en una parte del túnel en la que existía un tramo de unos 1000 m con pizarras ampolíticas en las que se concentraban diferentes problemas. Por una parte, había fallas y zonas de gran inestabilidad del terreno y por otra parte existía la posibilidad de elementos pesados que no permitían el depósito del escombros en el vertedero normal para residuos inertes del túnel.

En el caso del túnel de Bolaños, el análisis de las ventajas de la técnica DCD se hace considerando las incertidumbres en cuanto a:

- Disminución del rendimiento de avance y e influencia en el plazo o duración de la obra.
- Riesgo “squeezing” y atrapamiento de la tuneladora.
- Utilización de productos de consolidación del terreno (resinas bicomponente).
- Vertedero especial por la composición geoquímica del escombros.

En este caso se analiza la técnica DCD en la fase de proyecto utilizando una técnica mixta, es decir, se estima la incertidumbre con los datos que tendríamos en la fase de proyecto y también con datos reales de avances, consumos...etc. que se tuvieron a posteriori después de ejecutar la obra.

Capítulo 3

Modelo de cálculo de la incertidumbre

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

3 MODELO DE CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

3.1 Coste de la perforación de los sondeos.

El coste de un sondeo C_b se puede estimar de manera simplificada de la siguiente manera:

$$C_b = C_{b0} + c_b l_b \quad (1)$$

Donde C_b es el coste total (€), C_{b0} es el coste de transporte e implantación de la perforadora (€), c_b el coste de perforación lineal (€/m) y l_b la longitud del sondeo (m).

En obra civil los precios dependen mucho del momento y del lugar. En el caso de sondeos con recuperación de testigo y diámetro HQ, el coste de instalación de la máquina no varía de una técnica a otra, siendo un precio medio de mercado en España de $C_{b0} = 3.000$ €. El coste por metro perforado sería $C_b = 100$ €/m en sondeos convencionales y $C_b = 200$ €/m en sondeos DCD. La diferencia se debe al precio de alquiler de los equipos que permiten la orientación de perforación y se ha deducido asumiendo un precio de alquiler de 100.000 €/mes con rendimientos de perforación de 1.000 m/mes, aunque esto es una estimación preliminar la supondremos real y totalmente válida para nuestro estudio comparativo.

El precio depende de las circunstancias y del lugar y puede cambiar mucho de un país a otro. Por ello, lo que aquí se propone es una metodología que se puede individualizar al caso concreto en cuestión.

Tabla 3 Coste total de la campaña de perforación por sondeos

Implantación maquina de sondeos (€)	3.000
Sondeos convencional en NQ- (€/m)	100
Sondeo con DCD en NQ (€/m)	200

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

3.2 Sobrecostes asociados a las incertidumbres en túneles avanzados con perforación y voladuras.

Los sobrecostes por malas condiciones del terreno se clasifican en:

- a) sobrecoste en acero / hormigón del sostenimiento.
- b) sobrecostes por tratamientos especiales de sostenimiento.
- c) sobrecostes por retrasos en los trabajos.
- d) sobrecostes por gran afluencia de agua.

3.2.1 Cuantificación de la incertidumbre asociada al sostenimiento convencional.

Coste extra en acero / hormigón por sobrecostes debido a malas condiciones del terreno. Cuando la calidad del macizo rocoso disminuye, es necesario utilizar un sostenimiento más robusto que, al utilizar más elementos de soporte (pernos, cerchas, hormigón proyectado) resulta más caro. Por simplicidad, solo se evalúa el costo adicional en materiales.

El costo de los materiales de sostenimiento C_s podría estimarse de manera simplificada de la siguiente manera:

$$C_s = c_{st} M_{st} + c_c M_c \quad (2)$$

Donde C_s es el coste total (€), C_{st} y C_c son respectivamente los precios del acero y hormigón (€/t) y M_{st} y M_c son el peso total de acero y hormigón utilizados en el sostenimiento (t) respectivamente.

Como precio típico del acero utilizado en pernos y cerchas se toma $C_{st} = 1.750$ €/t mientras que para hormigón $C_c = 85$ €/t se puede tomar según Rodríguez et al (2019) y Rodríguez y Pérez (2021).

Como se describe en Rodríguez et al (2019), el sostenimiento típico del avance por el método de perforación y voladura está formado principalmente por la combinación de tres elementos: bulones, cerchas de acero y hormigón

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

proyectado. La cantidad y calidad de estos elementos definen su capacidad máxima de carga.

Existen muchas combinaciones diferentes de estos elementos, y para simplificar el problema, se tomarán como referencia las pautas propuestas por Romana (2014), basadas en las de Bieniawski (1989) (Figura 11). Estas directrices se basan en la experiencia española en la construcción de túneles y, en consecuencia, los diseños de sostenimiento propuestos para diferentes macizos rocosos son representativos.

Las propiedades de los materiales de los elementos del sostenimiento son necesarias para el cálculo del mismo. En este caso, se toman como referencia los parámetros dados por Cornejo (2007), también basados en la experiencia española.

Por ejemplo, el material del perno o bulón más usado, es una barra de acero roscada de 25-36 mm de diámetro (la adherencia se logra con resina o mortero de cemento) con una capacidad máxima de tracción de 482-844 kN, la resistencia a compresión característica del hormigón varía típicamente entre 25 y 45 MPa y las cerchas de acero utilizados son perfiles TH fabricados con un acero de límite elástico de 240 MPa.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

RMR	Class	Bolting		Shotcrete			Reinforcement		Steel sets		Others
		L (m)	b/m ²	Spacing (m)	e (cm)	Layers	Sealing	Mesh	Fibers	Type	
100	I a										
90	I b	2/3	0.10	Occasional	2	Occa- sional	No				No
80	II a	3	0.10/0.25	Occasional	5	1	Occa- sional				No
70	II b	3	0.25/0.44	2×2/1.5×1.5	6-10	1/2	Yes				No
60	III a	3/4	0.44/0.66	1.5×1.5/1×1.5	8-15	2/3	Yes				Occa- sional
50	III b	4	0.66/1	1×1.5/1×1	12-20	2/3	Yes				1.5
40	IV a	4/4.5	0.80/1	1×1.25/1×1	16-24	3	Yes				1
30	IV b	4/4.5	1	1×1	20-30	3	Yes				0.75/1
20	V a				30-40	3/4	Yes				0.5/0.7 5
10	V b			Special methods							BERNOLD FOREPO- LIN
0											

Fig. 11 Modelo de diseño de sostenimientos según Romana (2014)

La cantidad de acero y hormigón utilizada se puede estimar como se describe en Rodríguez y Pérez (2021), en este caso se propone un procedimiento simplificado.

Supongamos un túnel que ha avanzado desde una longitud inicial L_0 hasta una longitud final L_f . La masa total de acero y hormigón proyectado utilizada para el soporte M_{st} y M_c , respectivamente, están (en t):

$$M_{st} = m_{st} (L_f - L_0) \tag{3}$$

$$M_c = m_c (L_f - L_0) \tag{4}$$

Donde M_{st} y m_c son el consumo específico de acero y hormigón proyectado (en t/m) para el soporte del túnel.

En términos generales, en España el espesor del revestimiento (que varía entre 35 cm y 45 cm) no depende de la calidad de la masa rocosa y, por tanto, no se considera en este análisis.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Coste extra en retrasos por malas condiciones del terreno. Por otro lado, cuando la calidad del macizo rocoso disminuye, el rendimiento de avance disminuye y en consecuencia aumenta la duración del trabajo.

Efectivamente, asumiendo un túnel excavado mediante perforación y voladura a través de un macizo rocoso caracterizado por su RMR, el avance por

$$a_b = \frac{RMR-20}{10} \quad (5)$$

Todo trabajo conlleva unos costes fijos que dependen del tiempo, independientemente de que la obra avance o no. Dentro de este capítulo se encuentran los sueldos del personal contratado, las pólizas de seguro de responsabilidad civil, el alquiler de la maquinaria, los honorarios e impuestos exigidos por la administración (por ejemplo, por vertidos al río), alquiler de oficinas, servicios de control de calidad, periódicos. ... etc.

La parte más importante es la correspondiente a los sueldos del personal. El valor de estos costes fijos se toma como la incertidumbre asociada a una mayor duración del trabajo.

Si el número de ciclos o el número de voladuras por día es n_b (ciclos/día), el tiempo total T (días) para excavar el túnel de longitud inicial a final, L_o a L_f (m) es, en días:

$$T = \frac{L_f - L_o}{n_b a_b} \quad (6)$$

Si el coste fijo diario es c_f (€/día), el coste fijo total durante el período C_f es, en €:

$$C_f = c_f T \quad (7)$$

Un valor típico de los costes fijos diarios en los túneles avanzados mediante el método de perforación y voladura es del orden de $c_f = 12.000$ € / día.

Los precios unitarios considerados en los cálculos se resumen a continuación en la Tabla 4.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Tabla 4 Costos de sostenimiento

Acero (€/t)	1.750
Hormigón (€/t)	85
Micropilote con armadura e inyección (€/m)	90
Costes fijos	
Costes fijos diarios (€/día)	12.000

3.2.2 Cuantificación de la incertidumbre asociada a los tratamientos especiales de sostenimiento.

Cuando la resistencia del macizo rocoso es muy baja, su comportamiento pasa a ser prácticamente el de un suelo con un comportamiento plástico que se traduce en grandes deformaciones y fuertes empujes sobre el sostenimiento.

En estos casos se ha de emplear un sostenimiento más robusto y en los casos más extremos se ha de recurrir a métodos especiales como son los paraguas de micropilotes.

Siguiendo la figura 11 de recomendaciones de Romana (2014), para macizos rocoso con RMR= 10 – 20, es necesario utilizar paraguas de micropilotes.

Así mismo, según Celada et al (2010), cuando el índice de comportamiento elástico es $ICE < 30$, comienza a haber una plastificación intensa del macizo rocoso y comienza a ser necesario el uso de paraguas de micropilotes en el avance.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

ICE	Comportamiento de la excavación	Posible mecanismo de la inestabilidad	Excavación de la Sección	Sostenimiento orientativo	Elementos especiales de sostenimiento	Pase de Avance	Convergencia medible en obra	Tipo de revestimiento
> 130	Totalmente elástico	Caída gravitacional de bloques de roca. En estados tensionales muy asimétricos y con grandes recubrimientos, posibles estallidos de roca.		Bulones $E_T = 2\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 2,5\text{ m}$ Hormigón proyectado: 5 cm	NO SON NECESARIOS.	EN FUNCIÓN	Inapreciable	Bóveda y paramentos de hormigón. Solera en terreno natural.
90-130	En el límite elasto-plástico	Caída gravitacional de bloques de roca		Bulones $E_T = 2\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 2\text{ m}$ Hormigón proyectado: 10 cm	NO SON NECESARIOS.	DEL RME	Milimétrica	Bóveda, paramentos y solera plana de hormigón.
50-90	Plastificación moderada	Colapsos puntuales de pocos m^3		Bulones $E_T = 1,5\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 1,5\text{ m}$ Hormigón proyectado: 15 cm	NO SON NECESARIOS.	EN FUNCIÓN	Centimétrica	Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha 0,1 x Anchura de excavación.
30-50	Plastificación intensa	Colapsos puntuales de algunas decenas de m^3 . Hinchamiento del sostenimiento colocado en el Avance		Cerchas TH-29 a 1 m 20 cm HP	Patatas de elefante para apoyar las cerchas del Avance	DEL RMR		Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha del 0,2 x Anchura de excavación.
15-30	Plastificación muy intensa	Hincamiento del sostenimiento colocado en el Avance. Inestabilidad del frente		Cerchas HEB-180 a 1 m 30 cm HP	Patatas de elefante. Paraguas pesado. Bulonaje del frente. Micropilotes de recalce		Decimétrica	Revestimiento casi circular de hormigón, armado en la contrabóveda.
< 10	Plastificación extrema	Muy difícil de estabilizar una excavación de más de 8 m de anchura		Tramos de extrema dificultad que requieren un proyecto muy cuidadoso.				

Fig. 12 Recomendaciones de sostenimiento según Celada et al (2011)

Supongamos un túnel que ha avanzado desde una longitud inicial L_0 hasta una longitud final L_f .

Supongamos que un túnel ha avanzado desde una longitud inicial L_0 y una final L_f (en m). Si se ha de avanzar usando paraguas de micropilotes de longitud l_m y con un solape entre paraguas de longitud l_s , resultará que el número de paraguas a utilizar será:

$$N_p = \frac{L_f - L_0}{l_m - l_s} \quad (8)$$

Supongamos que en cada paraguas se perforan n_m micropilotes, el número total de micropilotes n_{mT} es:

$$n_{mT} = n_m N_p \quad (9)$$

Si el precio lineal por micropilote instalado es c_m , el gasto total en la ejecución de los paraguas de micropilotes C_m (en €) es:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

$$C_m = c_m n_{mT} \quad (10)$$

El precio del micropilote para la ejecución de paraguas varía con el diámetro. El precio de un micropilote en interior de túnel o en protección del emboquille, de 150 mm de diámetro de perforación, armadura tubular de acero de 101,6 mm de diámetro exterior y 10 mm de espesor incluyendo inyección de lechada es unos 110 €/m. Si la armadura es de 88,9 mm de diámetro exterior y 7 mm de espesor, el precio es de aproximadamente 90 €/m. (Ver tabla 4).

3.2.3 Cuantificación de la incertidumbre asociada al caudal drenado en el túnel.

Una fórmula muy utilizada es la de Goodman et al (1965), que permite estimar caudal lineal (caudal por metro de túnel) en un tramo de túnel supuesto el terreno homogéneo e isótropo y nivel piezométrico constante. Cuando el nivel piezométrico está por debajo de la superficie del terreno la expresión es:

$$q_L = \frac{2 \pi K H}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right)} \quad (11)$$

Donde:

- q_L : caudal lineal o caudal por m de túnel ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
- K : permeabilidad media del terreno (m/s)
- H : nivel piezométrico respecto del eje del túnel (m)
- R : radio del túnel (m)

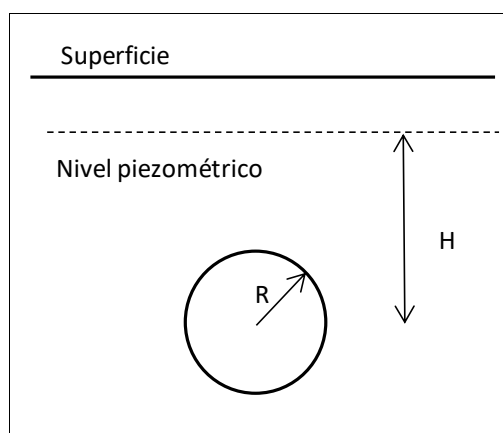


Fig. 13 Esquema de nivel piezométrico.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Ahora bien, en el caso del túnel de La Burata, se avanzan dos túneles en paralelo (túnel y galería). Cuando se avanzan dos túneles iguales en paralelo, el caudal que se extrae de uno de los tubos se puede estimar por la siguiente fórmula de El Tani (1999):

$$q_{L1tubo} = \frac{2 \pi K H}{\ln \left(\frac{2 H \sqrt{d_T^2 + H^2}}{R \quad d_T} \right)} \quad (12)$$

donde d_T es la mitad de la distancia entre los ejes de los túneles (m). El caudal total extraído por los dos tubos será:

$$q_L = 2 \times q_{L1tubo} = 2 \times \frac{2 \pi K H}{\ln \left(\frac{2 H \sqrt{d_T^2 + H^2}}{R \quad d_T} \right)} \quad (13)$$

Según Rodríguez y Pérez (2021), un valor típico de q_L en túneles con abundante caudal de agua varía de $q_L = 2 \times 10^{-5}$ a $q_L = 5 \times 10^{-5}$ m³/s/m.

Supongamos el túnel dividido en varios tramos n_t . Supongamos que un tramo i comienza cuando el túnel tiene una longitud en L_{oi} y termina cuando la longitud es L_{fi} (en m). Si el rendimiento en avance en él es a_i (en m/día), el tiempo en excavar ese tramo T_i será (en días):

$$T_i = \frac{L_{fi} - L_{oi}}{a_i} \quad (14)$$

El tiempo total empleado en excavar el túnel completo será (en días):

$$T_f = \sum_1^{n_t} \frac{L_{fi} - L_{oi}}{a_i} \quad (15)$$

Teniendo en cuenta que en un día se excavan a_i (m), que el tiempo empleado en excavar el tramo es T_i y que cada día tiene 86.400 s, el volumen de agua V_{oi} (en m³) que aporta el tramo i durante su excavación es:

$$V_{oi} = 86400 q_{Li} (1 \times a_i) + 86400 q_{Li} (2 \times a_i) + \dots = 86400 q_{Li} a_i \frac{1 + T_i}{2} T_i \quad (16)$$

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

El resto del tiempo hasta que se termine de excavar el túnel el tramo dará un caudal constante y el volumen total V_{1i} será (en m^3):

$$V_{1i} = 86400 q_{Li}(L_{fi} - L_{oi}) \left(T_f - \sum_1^i T_j \right) \quad (17)$$

Por lo tanto, el volumen total de agua V_i que aportará el tramo i es:

$$V_i = V_{0i} + V_{1i} \quad (18)$$

Y el volumen total que dará el túnel V_T (en m^3) será:

$$V_T = \sum V_i \quad (19)$$

Si el coste en aditivos (coagulantes, floculantes...etc.) para tratar $1 m^3$ de agua es c_A , en €/m³, el coste total del tratamiento con aditivos del agua producida por el túnel durante su excavación será (en €):

$$C_T = c_A V_T \quad (20)$$

El coste en aditivos por m³ de agua tratada es del orden de $c_A = 0,28 \text{ €/m}^3$.

El caudal medio para todo el túnel será (en m^3/s):

$$Q_m = \frac{V_T}{86400 T_f} \quad (21)$$

La potencia eléctrica total de los equipos de la estación depuradora P_T aumenta con el caudal a tratar, y no se comete mucho erro suponiendo que es proporcional. Si c_T es la ratio potencia a caudal (en $kW/m^3/s$), se tiene:

$$P_T = c_T Q_m \quad (22)$$

Un valor típico es $c_T = 1.000 \text{ kW/m}^3/s$.

Si el túnel es descendente, es necesario bombear el agua para evacuarla fuera del túnel. Tal como se describe en Rodríguez y Pérez (2021), la potencia eléctrica necesaria para el bombeo es aproximadamente proporcional a la longitud del túnel. Por lo tanto, la potencia media de bombeo en un tramo desde L_o hasta L_f será:

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

$$P_W = c_L \frac{L_o + L_f}{2} \quad (23)$$

Luego la potencia media de bombeo desde que el túnel se comienza a excavar ($L_o=0$) hasta su longitud final ($L_f= L$) será:

$$P_W = c_L \frac{L}{2} \quad (24)$$

Donde el factor de proporcionalidad vale aproximadamente $c_L= 0,25$ kW/m en los túneles con pendiente entre el 1% y el 5%, y $c_L= 0,50$ kW/m con pendientes entre 5% y 15%.

Suponiendo que tanto el bombeo como la planta de depuración funcionan ininterrumpidamente las 24 horas del día, resulta que la energía gastada en bombeo y depuración E será (en kWh)

$$E = 24 T_f (P_T + P_W) \quad (25)$$

Y, finalmente, si el coste de la energía es c_E (en €/kWh) el gasto en energía eléctrica es:

$$C_E = c_E E \quad (26)$$

El valor del coste de la energía eléctrica c_E depende de la forma de generación. Si la energía eléctrica la suministra una compañía eléctrica, un valor típico del precio de la energía en España, según Rodríguez y Pérez (2021), es $c_E = 0,08$ €/kWh (aunque depende de la zona y la compañía pudiendo llegar a ser el doble $c_E = 0,16$ €/kWh). Si la energía eléctrica es producida por grupos electrógenos, el precio es varias veces superior; se puede tomar como aproximado el valor $c_E=0,35$ €/kWh.

Tabla 5 con factores de proporcionalidad y costes unitarios

Potencia unitaria planta depuradora c_T (kW/m ³ /s)	1.000
Potencia unitaria de bombeo c_L (kW/m)	0,25
Coste en aditivos por m ³ de agua tratada c_A (€/m ³)	0,28
Coste de la energía eléctrica c_E (€/kWh)	0,08

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

3.3 Sobrecostos asociados a las incertidumbres en túneles avanzados con tuneladora.

Vamos estudiar los tipos de incertidumbre según las causas que las producen.

3.3.1 Cuantificación de la incertidumbre asociada a la composición geoquímica del escombros.

Si S es la sección de excavación (m^2) y se excava un tramo de túnel entre L_0 y L_f (m), el volumen de material excavado que va a vertedero V_d (m^3) es:

$$V_d = k_d S (L_f - L_0) \quad (27)$$

Donde k_d es un coeficiente empírico que tiene en cuenta la sobreexcavación con respecto a la sección teórica, el factor de esponjamiento de roca in situ a material suelto a transportar y el factor de compactación de material suelto a material compactado en vertedero.

De la experiencia en túneles de 10 m de diámetro, se tiene que la excavación de 1000 m de túnel produce 100.000 m^3 en vertedero lo que lleva al valor empírico $k_d = 1,27$.

El sobrecoste asociado C_D (€) a la incertidumbre por la posible necesidad de construcción de un vertedero específico para las pizarras y ampelitas de la zona de estudio sería:

$$C_D = c_{d0} + c_d V_d \quad (28)$$

Donde c_{d0} (€) es el coste de preparación del vertedero especial para residuos no peligrosos y c_d (€/m³) es el coste del tratamiento por m³ de material depositado en dicho vertedero.

Un valor típico para la preparación del vertedero de estas características es $c_{d0} = 100.000$ €. Por otra parte, el tratamiento específico para el material variaba entre $c_d = 1$ €/m³, con la utilización de arena caliza para neutralización, hasta $c_d = 5$ €/m³, con un tratamiento más complejo con la utilización de un tecnosol.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Dada la relevancia del problema, en este estudio se va a suponer la peor de las condiciones y se tomará un $c_d = 5 \text{ €/m}^3$.

3.3.2 Cuantificación de la incertidumbre asociada a la disminución del rendimiento de la tuneladora

Esta pérdida de rendimiento, entre otros problemas, produce una mayor duración de la obra. En este caso es fácil cuantificar la incertidumbre ya que se puede estimar fácilmente el sobrecoste debido a los costes fijos.

Si el avance diario o rendimiento de excavación es a_T (m/día), el tiempo T (días) que tarda en excavar el tramo de túnel de L_0 a L_f (m) es:

$$T = \frac{L_f - L_0}{a_T} \quad (29)$$

Si c_{fT} (€/día) son los costes fijos diarios durante la excavación del túnel, los costes fijos totales C_{fT} (€) asociados a la excavación del tramo serán:

$$C_{fT} = c_{fT} T \quad (30)$$

Un valor típico de los costes fijos diarios cuando se excava un túnel con TBM es $c_{fT} = 30.000 \text{ €/día}$.

3.3.3 Cuantificación de la incertidumbre asociada al riesgo de squeezing y atrapamiento de la tuneladora.

Si c_{fT} (€/día) son los costes fijos diarios durante la excavación del túnel, los costes fijos totales C_{fT} (€) asociados a la obra durante la parada por causa de atrapamiento T_P :

$$C_{fTP} = c_{fT} T_P \quad (31)$$

Un valor típico de los costes fijos diarios cuando se excava un túnel con TBM es $c_{fT} = 30.000 \text{ €/día}$.

El tiempo de parada debido al atrapamiento de una tuneladora es muy variable y dependerá del problema concreto. En Abascal y Auvray (2009) se describe

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

cómo quedó atrapada una TBM en la formación Formigoso, una formación del Carbonífero con tendencia al squeezing similar a la Formación San Emiliano.

De esa y otras experiencias en la excavación de grandes túneles con TBM en España, se tiene que los trabajos para liberar una TBM que ha quedado atrapada es del orden de $T_{P=}$ 30 días.

Se supone que no es necesario excavar ninguna galería para proceder al tratamiento del terreno y/o al rescate de la máquina. En ese caso, la parada de la obra puede ser mucho mayor como apuntan Mendaña y Del Rio (1979) que describen el atrapamiento de un topo abierto en el túnel del Padrún, al atravesar una zona de falla en una formación del Carbonífero asturiano.

3.3.4 Cuantificación asociada a la incertidumbre en la cantidad de resina a utilizar.

Como ya se comentó, una pequeña parte de estas resinas se consumía en el relleno del sobrecorte o hueco anular existente entre los anillos de dovelas y el terreno. Por una parte, se perseguía lograr un perfecto contacto entre revestimiento y terreno y, por otra, conseguir la impermeabilización del trasdós del túnel evitando así la entrada de agua.

Este relleno del trasdós ya estaba previsto de antemano y es fácil hacer una estimación teórica de él. Si el diámetro de excavación es D_{exc} (m) y el diámetro exterior de los anillos es D_e (m), el volumen V_r (m^3) a rellenar en el tramo de túnel entre L_0 y L_f es:

$$V_r = \pi \frac{D_{exc}^2 - D_e^2}{4} (L_f - L_0) \quad (32)$$

Si la densidad de la mezcla “bicomponente” del relleno (cemento+bentonita+agua+resina bicomponente) es d_b (t/m^3) y la proporción de resina bicomponente es u (%), la masa de resina bicomponente utilizada en el relleno del trasdós m_b (t) es:

$$m_b = \frac{u}{100} d_b V_r \quad (33)$$

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Si c_b (€/t) es el precio unitario de la resina, el coste total C_b (€) para el relleno del trasdós en la longitud de túnel de L_o a L_f es:

$$C_b = c_b m_b \quad (34)$$

3.3.5 Cuantificación de la incertidumbre asociada al sobredimensionamiento de las dovelas.

Sean D_i y D_e los diámetros interior y el exterior (en m) del anillo de dovelas. El volumen de hormigón V_h (m^3) empleado en el revestimiento del túnel en el tramo que va de la longitud L_o a la L_f será:

$$V_h = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) (L_f - L_o) \quad (35)$$

Si el p_h es el precio del hormigón (€/m³), el coste del hormigón C_h será:

$$C_h = p_h V_h \quad (36)$$

Como valor de referencia para el precio unitario del hormigón se pueden tomar los precios unitarios de los túneles del AVE a Galicia que son los de más reciente ejecución en España. El precio unitario del hormigón en dovela HA-70 (70 MPa de resistencia) es $p_h = 219,93$ €/m³ mientras que el del HA-45 (45 MPa de resistencia) $p_h = 146,49$ €/m³.

Si el peso unitario en kg de acero por m³ de hormigón es m_a (en kg/m³), la masa total de M_a acero empleado en los anillos de dovelas es:

$$M_a = m_a V_h \quad (37)$$

Si el precio del acero corrugado es p_a (€/kg), el coste en acero C_a será:

$$C_a = p_a m_a \quad (38)$$

Un valor de referencia para el precio del acero corrugado es $p_a = 0,87$ €/kg.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

3.3.6 Cuantificación de la incertidumbre asociada al desprendimiento de grisú

Como se describe en Rodríguez et al (2012) y Rodríguez y Pérez (2021), las emisiones de metano pueden llegar a ser importantes cuando se atraviesan formaciones del Carbonífero y esto hay que tenerlo en cuenta desde el punto de vista medioambiental ya que es un gas de efecto invernadero con un potencial 25 veces el del CO₂. Teniendo en cuenta que existen unos derechos de emisiones de gases de efecto invernadero, resulta que la aparición de metano implica unos costes económicos, lo que permite cuantificar la incertidumbre asociada a las emisiones de metano.

Como se demuestra en Rodríguez y Lombardía (2010), las emisiones de metano están relacionadas con la producción o masa de roca excavada.

Si el diámetro de excavación es D_{exc} (m) y el rendimiento medio en avance en la zona es a_{TBM} (m/día), y suponiendo una densidad media de la roca ρ_R (t/m³), la masa de roca excavada M_R al avanzar el túnel entre L_o y L_f (en t) es:

$$M_R = \frac{\pi}{4} D_{exc}^2 \rho_R (L_f - L_o) \quad (39)$$

El volumen de las emisiones de dióxido de Carbono equivalente a las emisiones de metano desprendido en el túnel E_{met} (en m³CO₂) es:

$$E_{met} = s_{met} M_R r_{met} \quad (40)$$

Donde s_{met} es el desprendimiento específico de metano o volumen de metano emitido a la atmósfera por t de roca excavada (m³/t). Un valor medio, según Rodríguez y Lombardía (2010) es $s_{met}=31,4$ m³CH₄/t (equivalente a 20,6 kgCH₄/t), aunque puede variar de unos tramos a otros. El parámetro r_{met} es el factor de conversión de kilogramos de CH₄ a kilogramos de CO₂, que según Rodríguez y Pérez (2021) es $r_{met}= 25$ kgCO₂/kgCH₄.

Si el precio por emisiones de CO₂ es p_{CO_2} (€/t), el coste por las emisiones de metano en el túnel C_{met} (en €) será:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

$$C_{met} = p_{CO2} E_{met} \quad (41)$$

3.3.7 Cuantificación de la incertidumbre asociada al consumo de cortadores

Si el diámetro de excavación es D_{exc} (m) el volumen de roca excavado V_R al avanzar el túnel entre L_o y L_f (en m^3) es:

$$V_R = \frac{\pi}{4} D_{exc}^2 (L_f - L_o) \quad (42)$$

Si el consumo o desgaste de cortadores por m^3 de roca excavada es c_u (uds/ m^3) el número de cortadores consumidos N_c (uds) es:

$$N_c = c_u V_R \quad (43)$$

Si el precio de un cortador es p_c (€/ud), el coste de los cortadores desgastados o destruidos en el tramo es C_c (€):

$$C_c = p_c N_c \quad (44)$$

Capítulo 4

Análisis de casos reales

4 ANÁLISIS DE CASOS REALES

4.1 Túnel de La Burata

El túnel que se toma como referencia para el análisis es el túnel de Burata, descrito en Castells et al (2006), Castells (2018) y López et al (2013).

Este túnel de Burata forma parte de una línea ferroviaria de alta velocidad en España entre Madrid y Santiago.

Consta de galería piloto y túnel principal de 3.996 m de longitud con 13,2 y 85 m² de sección final respectivamente. El túnel se planeó para una profundidad promedio de 93 m, con una montera máxima de 141 m, y fue excavado por el Nuevo Método Austriaco de Túneles (NTAM).

El túnel piloto avanzó por delante del principal una media de 180 m. El sostenimiento consistió en combinación de pernos, hormigón proyectado y cerchas de acero según la resistencia de la masa rocosa.

Fue necesario utilizar paraguas de micropilotes en los emboquilles del túnel y en zonas con problemas geológicos especiales.

El túnel se excavó entre junio de 2006 y mayo de 2010.

Cuando se realizó el estudio geológico y geotécnico, el DCD no era conocido en el campo de la construcción de túneles en España, y se había utilizado en contadas ocasiones en el mundo.

Por este motivo, se llevó a cabo una campaña convencional de perforaciones en superficie. No obstante, y debido a los problemas geológicos del túnel, se perforaron con éxito varios sondeos horizontales desde la galería piloto y desde los emboquilles del túnel, Castells (2008).

Como se describe en López-Fernández et al (2013), el túnel discurre por debajo de una zona donde afloran granitos en la superficie. Entre estos los granitos, abundan los metasedimentos, con vetas y diques de cuarzo.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Sobre el sustrato granítico se desarrolló una importante meteorización con distinto grado de evolución, a profundidades que alcanzan varias decenas de metros, alcanzando un máximo en las cotas topográficas más bajas.

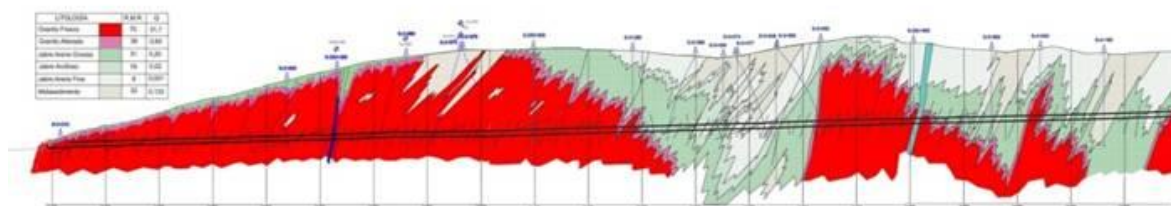
El estudio geotécnico previo para el proyecto del túnel de Burata, consistió en una prospección del terreno que incluyó un mapeo geológico detallado a escala 1: 2.000, la descripción de 31 estaciones geomecánicas y la perforación de 27 pozos (14). Además, también se realizó un estudio geomecánico, petrográfico y mineralógico de 30 muestras extraídas de los sondeos.

Se prepararon y analizaron muestras de sección delgada con sonda gamma. Los resultados llevaron a la definición de las siguientes tres unidades geológicas principales:

- 1) granito fresco (FG), que consiste en granito de peraluminio de dos micas no erosionadas de grano medio a fino;
- (2) metasedimento (MS) que consiste en esquisto de mica, esquisto de cuarzo y paragneiss; y
- (3) suelo residual granítico (GR) generado por la meteorización de ciertos minerales consecuencia de los procesos de oxidación e hidratación derivados de la acción de las aguas subterráneas.

Como puede verse en la e 15, existen hasta seis zonas en las que el túnel atraviesa el suelo residual granítico (GR) degradado con problemas muy importantes para la excavación y el sostenimiento.

Sin embargo, la campaña de perforaciones original solo detectó dos de éstas áreas complejas.



VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

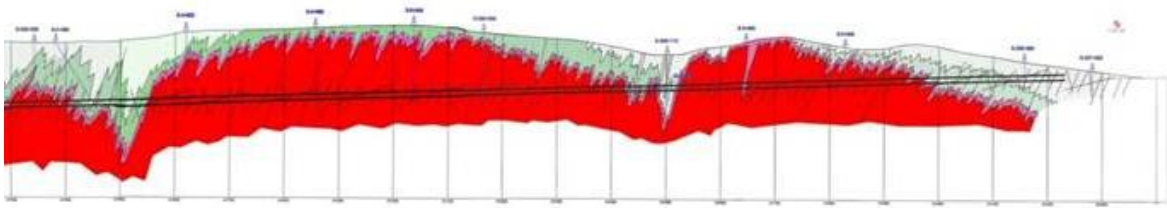


Fig. 14 Sección transversal del túnel de Burata y situación de los sondeos

Veamos las diferencias entre el estudio inicial con lo que realmente se encontró durante la ejecución del túnel:

La investigación realizada en la fase de proyecto llevaba al siguiente corte geológico. El túnel se avanzó desde las dos bocas. En principio, la traza del túnel sólo iba a encontrar jabres cerca del portal (1) y en la zona (6) figura 15. Sin embargo, en la realidad entre (1) y (6) encontraron jabres que no esperaban y tuvieron muchos problemas.

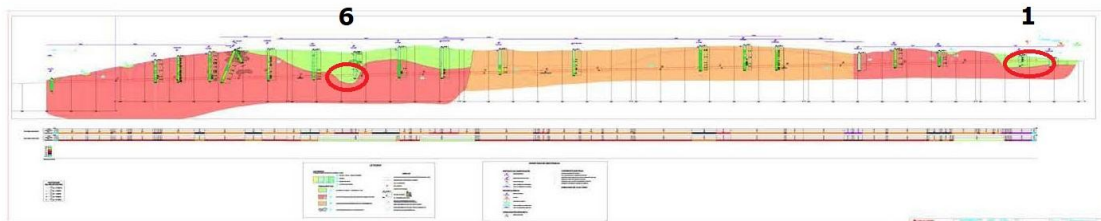


Fig. 15 Zonas de Jabre según proyecto.

Cuando iban a llegar a la zona (6) en la que previsiblemente había jabres, hicieron una campaña de sondeos para delimitar lo mejor posible esa zona. Se dieron cuenta que el corte geológico no reproducía la realidad y se llevó a cabo un estudio geológico en profundidad para definir realmente las zonas de jabres.

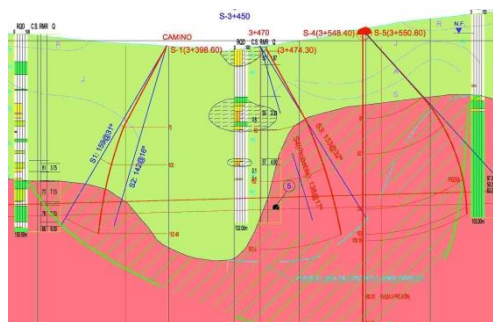


Fig. 16 Sondeos en la zona 6.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

El estudio realizado por la Universidad de Oviedo, primero demostró que la zona de jabre encontrada era mucho más extensa de lo previsto. Y después demostró que había, al menos, otras cuatro zonas más con jabres no reconocidas anteriormente ya que la alteración llegaba a profundidades no frecuentes, Arias et al (2016). Precisamente los problemas se encontraron en esas zonas de jabre en las que según proyecto no debería haberlos.

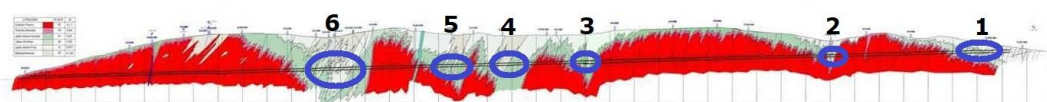


Fig. 17 Zonas jabre encontradas en el trazado.

Del estudio inicial se pudo deducir que alrededor del 90% del túnel (3.600 m) debería excavarse a través de un suelo de granito fuerte (FG) con un RMR promedio = 70 y solo alrededor del 10% de la longitud (400 m) debería excavarse a través del suelo residual de granito muy débil (GR) con un valor promedio de RMR = 20.

Después de acabar el túnel, la realidad fue bastante diferente. La longitud excavada a través de granito fuerte fue de aproximadamente el 70% de la longitud (2.800 m), mientras que la longitud a través del suelo residual de granito débil fue de aproximadamente el 30% de la longitud (1.200 m). Esta fue la longitud a través del macizo rocoso más complejo para la excavación del túnel y el sostenimiento fue hasta 3 veces mayor de lo que se planeó inicialmente.

Cuando se estaba excavando el túnel, ocurrieron problemas muy serios relacionados con el suelo residual de granito débil y la entrada intempestiva de agua y lodos (Figura 18).

Es entonces cuando, se realizan dos perforaciones horizontales, desde la galería piloto (Figura 19) para investigar delante del frente del túnel, Castells (2008), lo que significaba una nueva campaña de sondeos.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**



Fig. 18 Lodos ocasionados por la entrada de agua



Fig. 19 Sondeos horizontales realizados desde la galería piloto.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

PROBLEMAS QUE SURGEN DURANTE LA EXCAVACIÓN Y EL SOSTENIMIENTO.

Como ya se explicó anteriormente, una buena caracterización del macizo rocoso es fundamental a la hora de realizar trabajos subterráneos porque permite diseñar, con precisión, la correcta ejecución del proyecto.

Es decir, al conocer más de cerca la geología, su estructura, sus discontinuidades y la presencia de agua en el terreno sobre el que se realizarán los trabajos subterráneos, se podrá predecir el comportamiento del macizo rocoso durante la excavación y de acuerdo con ello, se diseñan los tipos de sostenimiento adecuados en las diferentes partes del túnel, con anterioridad a la ejecución de la obra.

Esto nos permitirá hacer una previsión de los materiales que se van a consumir y del personal que se necesitarán. Pero este estudio preliminar implica tiempo y un costo elevado, muchas veces incompatible con el presupuesto asignado a la redacción del proyecto.

Por ello, con los datos obtenidos, se utilizan modelos empíricos y matemáticos para definir de forma aproximada, el comportamiento del terreno que se va a excavar y los medios que se utilizarán para llevarlo a cabo, como puede ser, el uso de una tuneladora, o mediante perforación y voladura, así como también para definir el tipo de sostenimiento, normalmente organizándolo en secciones estándar donde se definen cada una de sus particularidades y que generalmente dependerán de la RMR del terreno.

Los diversos tipos de excavación y sostenimiento se definen generalmente por secciones RMR de más livianas a más pesadas.

Una vez iniciada la obra, durante la ejecución del túnel, se realizarán perforaciones horizontales durante el avance, se calculará el RMR en cada emboquille y se tomarán medidas de convergencia para verificar que el trabajo en ejecución se ajuste al proyecto.

Pero, ¿qué ocurre cuando aparecen imprevistos que no han sido detectados en el estudio geotécnico del proyecto?

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Vamos a plantear diferentes escenarios que pueden aparecer durante la excavación.

Materiales de acopio. Puede ocurrir que en el proyecto, el estudio geotécnico defina determinadas zonas del macizo rocoso con baja RMR, que deban ser atravesadas excavando con medios mecánicos y con apoyo de cerchas de acero, paraguas de micropilotes o pernos.

Las cerchas de acero, son un tipo de material de sostenimiento caro que es difícil de obtener. Dado que se ajustan a la sección designada de nuestro túnel, se requiere un diseño personalizado. Es probable que el sostenimiento definido para ese túnel, si no se coloca, no se pueda reutilizar en otro túnel y al final del proyecto tenga que venderse como chatarra. El suministrador de cerchas tiene que cambiar los parámetros de fabricación en función de cada túnel. Por este motivo, es necesario que el Responsable de Proyecto realice una previsión de compra y calendario de suministro de materiales, basándose en el estudio geotécnico existente.

Se podrían pedir tantas cerchas de acero por metro lineal de túnel, según el sostenimiento con las secciones indicadas en el proyecto, pero como el proyecto no es exacto, se hace una previsión de materiales suficiente para poder trabajar sin parar y para que el suministrador tenga la capacidad de responder a las necesidades de la ejecución del túnel, pero se parte de unos supuestos erróneos.

Uso de explosivos. En túneles de gran tamaño es habitual trabajar con polvorines (depósitos de explosivos) que facilitan el almacenamiento de los explosivos y su uso en cualquier momento del ciclo de avance; se utilizan cuando la RMR del terreno es alta, lo que permite avances significativos en la ejecución del túnel y tiempos de ciclo más cortos. Pero, si se avanza en una zona de bajo RMR, podemos dejar de usar explosivos.

Esto requiere rediseñar las voladuras y sobre todo ajustar los pedidos de los explosivos. De no hacerse así, podríamos encontrarnos que tras realizar un cambio de avance del túnel sin voladuras, recibiríamos el pedido de explosivos previsto, provocando un grave problema para la seguridad de las personas al

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

tener que destruirlo, si la cantidad suministrada es mayor que la capacidad de almacenamiento del polvorín, por supuesto eso generaría un coste extra al proyecto.

Lo mismo ocurre si se cambia a un tramo con más RMR, ya que la voladura podría comenzar con el explosivo almacenado en el polvorín, pero no tener suficiente cantidad para continuar el ciclo de avance, provocando días de parada que redundarían en unas pérdidas económicas.

Entrada de agua. El volumen de agua que drena a un túnel desde el macizo rocoso es un factor a tener en cuenta ya que puede suponer un gasto importante. Se pueden señalar cuatro aspectos destacados:

- a) El coste asociado al bombeo del agua, si el túnel es descendente y no puede desaguar por gravedad
- b) El coste asociado al funcionamiento de la planta depuradora que tratará el agua antes de su descarga a un cauce público
- c) El coste asociado a los aditivos utilizados para neutralizar el pH, normalmente básico, del agua.
- d) Elección del tipo de explosivo.

El caudal de agua que llega al túnel, y por tanto el volumen total de agua a tratar durante su construcción, es función de la permeabilidad del macizo rocoso.

A este respecto, hay que señalar que hay una gran diferencia en el comportamiento hidrogeológico del granito sano y el granito degradado o jabre. Mientras que en el primero la permeabilidad puede considerarse baja y el caudal que entrará en el túnel será medio, el jabre tiene una permeabilidad muy alta, en ocasiones casi como unas arenas, lo que produce una gran afluencia de agua al túnel.

Por lo tanto, habría sido muy importante conocer a priori qué tramos de túnel se excavarán en granito sano y qué tramos en jabre. Si no se conoce con suficiente aproximación la geología, entonces aparece una incertidumbre ligada al bombeo y tratamiento del agua.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Una mayor proporción de jabre supondrá un mayor coste en la construcción del túnel. Por una parte, al ser mayor su permeabilidad, resulta que drenará un mayor caudal de agua al túnel. Pero, además, al ser menor el rendimiento de avance en los jabres, el túnel estará más tiempo abierto y se tendrá que bobear y tratar un mayor volumen de agua. Es decir, es un coste que se incrementa tanto con el avance como con el tiempo.

Por otro lado, el dimensionamiento de las bombas de agua de extracción es importante cuando estamos realizando un túnel descendente.

El dimensionado adecuado de las bombas es la diferencia entre que una boca del túnel se inunde, paralizando el trabajo durante varias horas hasta que se resuelva la situación o poder trabajar cómodamente.

Las bombas generalmente se alquilan, por la seguridad de que si una se rompe, nos darán una de recambio durante el tiempo en que se repara la bomba estropeada. El coste final depende del tamaño de la bomba y del tiempo de utilización.

La planta de tratamiento de agua es un punto importante porque si está mal dimensionada, no cumplirá su función, añadiendo un coste extra para poder ajustara un correcto funcionamiento, así como todos los aditivos químicos para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, la presencia de agua, determinará el tipo de explosivo a utilizar en el frente de avance, la extracción de agua mediante cunetas, si el túnel se ejecuta en dirección ascendente, o por bombas, si el túnel se ejecuta en dirección descendente, y también determinará el tamaño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

El tipo de explosivo a utilizar puede ser una parte muy importante del coste durante la fase de excavación.

El tipo ANFO, debe usarse sin agua, por el contrario se deben usar hidrogeles o dinamitas gelatinosas si hay presencia de agua, pero el coste ya es mucho mayor.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

La aparición de agua una vez cerrado el contrato de explosivos puede dificultar la renegociación de un precio competitivo a posteriori.

Si prevemos, con base en el estudio geotécnico, que casi no habrá agua durante la ejecución de la obra y se da la situación contraria, el proyecto se desviará de su presupuesto inicial.

Bloques de roca y cuñas. Una caracterización incompleta del macizo rocoso puede no predecir áreas de bloques o cuñas que deban sostenerse con pernos de mayor longitud que los que se están utilizando. La imposibilidad de predecir la presencia de estos bloques o cuñas puede conllevar retrasos por falta de material acopiados así como costes adicionales por no estar previstos en el proyecto original, en todos estos casos aumentando el ciclo de sostenimiento y disminuyendo el ritmo de excavación, se incrementa el tiempo de ejecución de la obra, aumentando así directamente el coste del túnel.

Asistencia técnica y dirección de obra. Todos estos problemas se convierten en retrasos indeseables, ya que en un túnel el tiempo está directamente ligado al coste de la obra y por ello, los tiempos de reacción para solucionar estos problemas deben ser lo más cortos posible. Algunos de ellos, por ejemplo, los relacionados con la adecuación de personal y medios de producción como bombas o explosivos dependen del jefe de proyecto y su equipo técnico, pero en otros como, por ejemplo, cambios en la sección de sostenimiento debido ante la aparición de problemas geológicos no previstos en el proyecto, también entran en juego la asistencia técnica y la dirección de obra.

La toma de decisiones en estos casos debe ser rápida. Los ingenieros tienen que encontrar la mejor solución que permita que el trabajo se lleve a cabo de forma segura y que pueda realizarse con la suficiente rapidez para que estas no conformidades, no afecte significativamente en el presupuesto del proyecto.

4.1.1 Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso. Análisis comparativos de costes de investigación.

Debido a las especiales características físicas del túnel de Burata, con poca montera, poca pendiente y amplios radios de curvatura, hacen viable la

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

posibilidad de testificar completamente con solo unos pocos sondeos direccionales DCD.

La técnica es perfectamente aceptable, mediante la perforación de 3 sondeos se podría reconocer toda la longitud del túnel, figuras 20 a 22).

Partiremos de cada uno de los emboquilles del túnel, en condiciones normales podríamos perforar hasta 1.500 metros de longitud. Es decir, tendremos DCD1 y DCD2, trabajando simultáneamente desde ambos extremos. El sondeo DCD1 se perforaría desde el emboquille inferior con una longitud $L = 1.500$ m (Figura 20), y el pozo DCD2, desde el emboquille superior con también $L = 1.500$ m (Figura 21) .El pozo DCD3 se perforaría desde la superficie y su La longitud debe ser $L = 1.368$ m (de los cuales 300 m por curva hasta llegar a la línea de nivel del túnel. El resto, aproximadamente 1.068 m, sobre la línea del túnel, (Figura 22).

Este método nos da información sobre la traza del túnel en sí, no hay posibilidad de error en la caracterización geomecánica, es decir, conoceremos de antemano el terreno a perforar y, además, cualquier problema geológico (fallas, acuíferos, nivel freáticos), presencia rocas con abrasividad o no... etc, que podrían dificultarnos el avance normal mediante perforación y voladura, por otro lado, la perforación en sí puede servir para drenar los acuíferos a atravesar, sin olvidar que dispondremos de un testigo en la misma traza del túnel.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

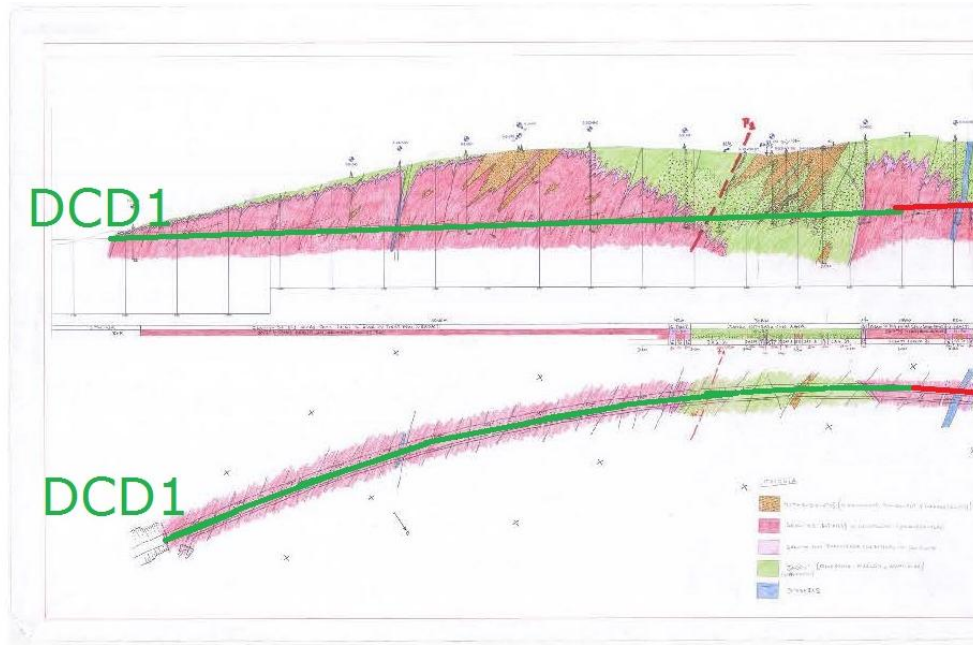


Fig. 20 Trazado del sondeo DCD1 desde el portal inferior.

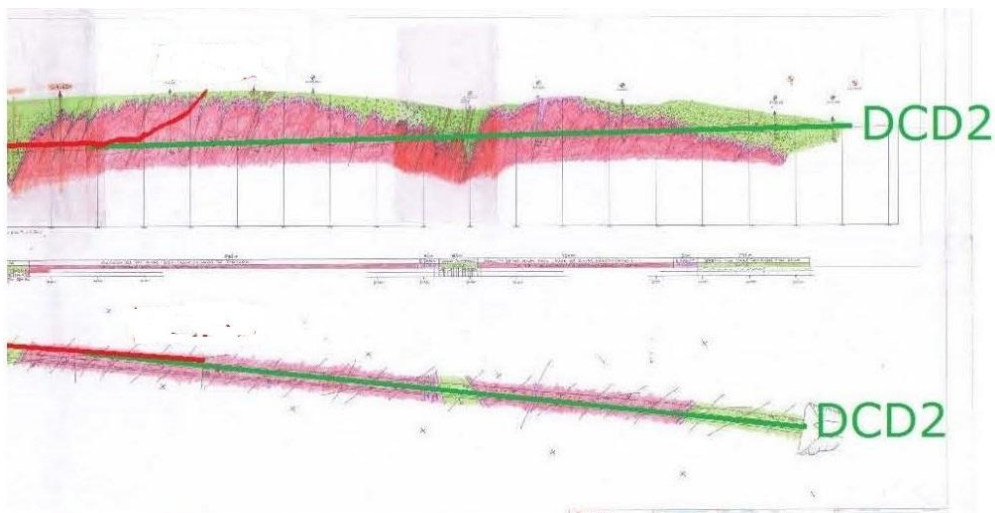


Fig. 21 Trazado del sondeo DCD2 desde el portal superior.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

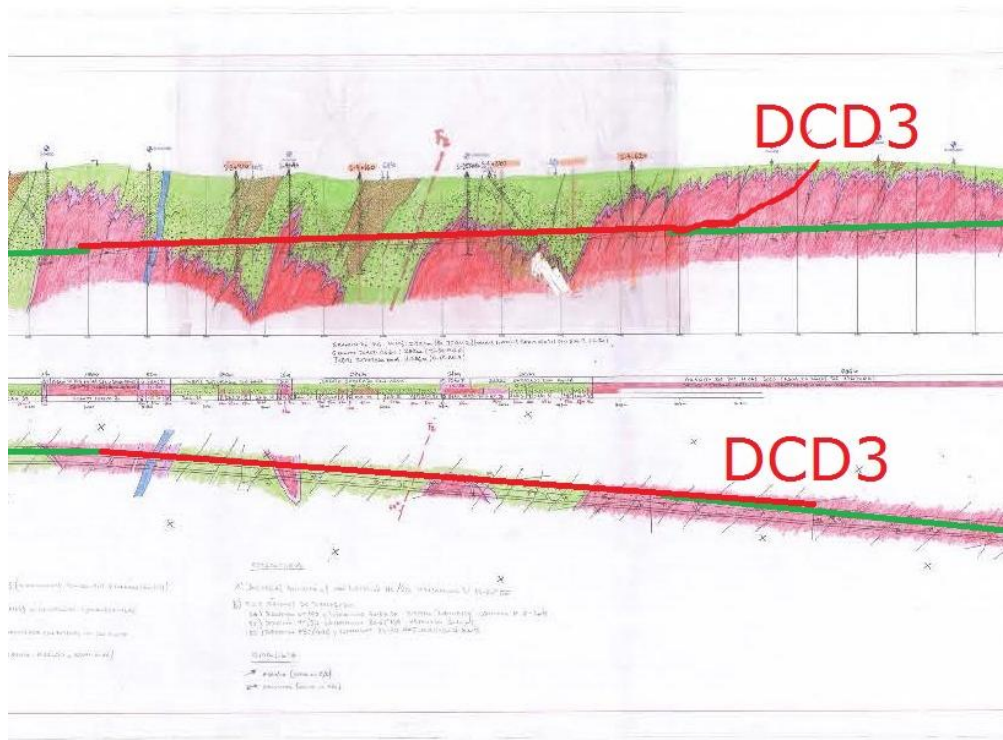


Fig. 22 Trazado del sondeo DCD3 desde superficie.

Como ya se ha dicho anteriormente, la campaña de perforación convencional consistió en 27 perforaciones verticales desde la superficie y 2 perforaciones horizontales desde el interior del túnel. La Tabla 5 resume los datos necesarios para estimar el costo de la campaña. El coste de perforación de los 29 pozos se estima en 442.500 euros.

Suponiendo que cada pozo vertical obtiene información sobre una longitud de túnel de 10 m y que los pozos horizontales reconocen una longitud de túnel igual a la longitud del pozo, la longitud total reconocida es $270 + 250 = 520$ m.

Por tanto, el resultado de la campaña convencional fue un coste de unos 850 €/m de túnel reconocido, o visto de otra forma, se gastaron 442.500 € para reconocer el 13% de todo el túnel. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 6 Coste total de la campaña de perforación por sondeo convencional

TI	Num. sondeos	Longitud total (m)	Longitud media(m)	Implantación (€)	Coste perforación (€)	Coste total (m)
Sondeos verticales						
L ≤ 50 m	3	140	46,7	9.000	14.000	23.000
50 m < L ≤ 100 m	4	310	77,5	12.000	31.000	43.000
100 m < L ≤ 150 m	12	1.525	127,1	36.000	152.500	188.500
L ≥ 150 m	8	1.330	166,3	24.000	133.000	157.000
Sondeos horizontales	2	250	125,0	6.000	25.000	31.000
TOTAL	29	3.555				442.500

Mediante la aplicación de la técnica DCD, se harían 3 sondeos, uno desde la superficie y otros dos desde cada emboquille del túnel. La tabla 7 muestra los datos para estimar el coste de dicha campaña de sondeos.

Dicho coste de perforación, se los 3 sondeos, se estiman en 882.600 euros. Sin embargo, aunque la campaña es más, está claro que, es mucho mejor ya que en este caso, se reconoce el 100% de la longitud del túnel mediante un testigo continuo, el coste unitario es de 220 €/m de túnel sondado.

Tabla 7 Coste total de de la campaña de perforación DCD

TIPO	Num. sondeos	Longitud total (m)	Longitud media (m)	Implantación (€)	Coste perforación (€)	Coste total (m)
Desde Emboquilles	2	3.000	1.500	6.000	600.000	606.000
Desde superficie	1	1.368	1.368	3.000	273.600	276.600
TOTAL	3	4.368				882.600

4.1.2 Análisis económico de los sobrecostes asociados a la incertidumbre:

Costes relacionados con el sostenimiento, se debe estimar el coste de los materiales utilizados en dicho sostenimiento.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

El espesor de diseño del hormigón proyectado se puede estimar con las recomendaciones de Romana (2014) para $RMR = 30$ y $RMR = 60$. Hay que tener en cuenta que hay una cantidad significativa que se debe utilizar para llenar el hueco debido a la sobreexcavación.

Se puede suponer que el espesor de la sobreexcavación, más el porcentaje del hormigón proyectado que se pierde debido al descuelgue cuando se aplica, es aproximadamente el doble del espesor teórico del sostenimiento. Ese dato, es un valor conservador basado en nuestra propia experiencia y en otros autores como Innaurato et al. (1998), Mohammadi et al. (2015) o Mottahedi et al (2018). Se asume una densidad típica de $2,3 \text{ t/m}^3$ para el hormigón proyectado o gunitado.

La siguiente Tabla 8 resume el cálculo del coste de los materiales del sostenimiento a partir de las longitudes de los tramos de granito y de granito meteorizado contemplados en el proyecto original, basándose en estos datos el coste de sostenimiento se estimaría en 12.361.020€.

Tabla 8 Coste total del sostenimiento (estimado a partir del proyecto original).

	Longitud $L_r - L_o$ (m)	RMR	m_{st} (t/m)	m_c (t/m)	Peso acero (t)	Peso hormigón (t)	Coste total (€)
Granito	3.600	60	0,28	21,1	997	75.960	8.201.700
Jabre	400	30	3,15	57,5	1.260	22.992	4.159.320
Total	4.000						12.361.020

En la siguiente Tabla 8 se muestra el cálculo del costo del sostenimiento, según sea el tipo de material que se está atravesando en el túnel, a partir de los datos reales.

Como se puede observar, utilizando los mismos precios unitarios, dicho coste es superior al del proyecto, alcanzando los 18.857.060€.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 9 coste total del sostenimiento (estimado a partir de datos reales).

	Longitud L_r- L_o (m)	RMR	m_{st} (t/m)	m_c (t/m)	Peso acero (t)	Peso hormigón (t)	Coste total (€)
Granito	2.800	60	0,28	21,1	776	59.080	6.379.100
Jabre	1.200	30	3,15	57,5	3.780	68.976	12.477.960
Total	4.000						18.857.060

Por tanto, un mejor conocimiento del terreno gracias a la técnica DCD eliminaría la incertidumbre sobre el sostenimiento a utilizar, que se puede estimar en 6.496.040€.

Veamos ahora, los costes sobre la incertidumbre debido al sobrecoste en paraguas de micropilotes.

Como se comentó con anterioridad, la investigación geológica de las formaciones que atravesaría el túnel se hizo a partir de sondeos convencionales, sondeos verticales ejecutados desde la superficie hasta la cota de la traza del túnel. En esta campaña se estimó que había una longitud de túnel y de galería de 3.600m que se avanzaría en granito fresco y sano con RMR de 60 y otra parte de 400m de longitud en la que se atravesaría una zona de Jabre con un RMR de 30.

En las zonas de Jabre se decidió realizar tratamiento del terreno consistente en un sostenimiento de paraguas de micropilotes que variaba según fuera en el túnel principal o en la galería tal y como se describe en Castells (2018), en el caso del túnel principal, el paraguas está compuesto por 97 micropilotes de 9m de longitud y 88,9 mm, solapados 4m y a una distancia entre ejes de 0,20m e inyectados con lechada de cemento. En los terrenos de peor calidad estos micropilotes llevaban válvulas para inyección selectiva y también se emplazaban en el frente tubos de 9m de longitud de PVC con válvulas para ser inyectados con cemento.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

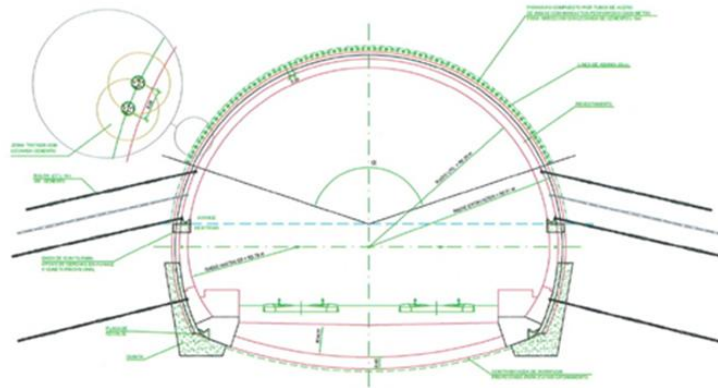


Fig. 23: Sección del sostenimiento con paraguas en el túnel principal
En el caso de la galería auxiliar, al ser menor su sección, es menor el paraguas previsto para atravesar la zona de jabres. Dicho paraguas estaba compuesto por 53 unidades de micropilotes de 9 m de longitud con solapado 4 m y a una distancia entre ejes de 0,20 m e inyectados con lechada de cemento.

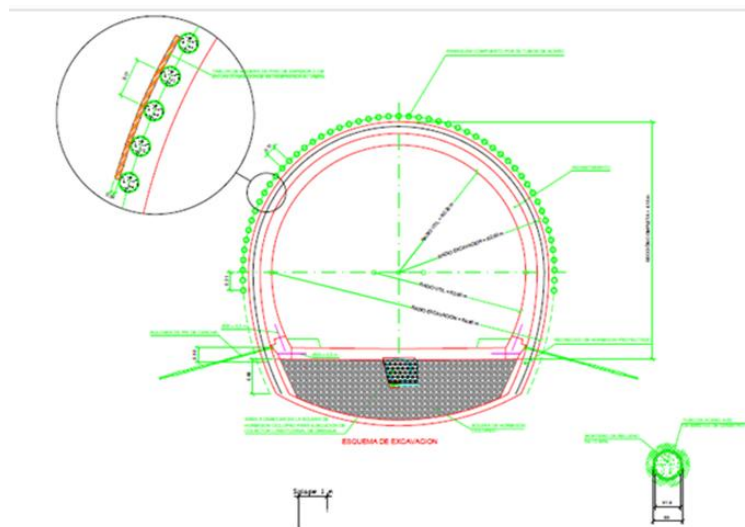


Fig. 24 Sección del sostenimiento con paraguas en la galería auxiliar

No obstante, para que el análisis sea coherente con el análisis de los otros túneles, donde se considera únicamente un tubo, en este caso consideraremos en el cálculo únicamente el túnel principal. En la Tabla 10 se resumen los cálculos para cuantificar el coste de los micropilotes que se consideraron en la

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

etapa de proyecto para una longitud de jabres de 400 m. En la tabla 11 se resumen los mismos cálculos para la longitud real de jabres de 1.200 m.

Tabla 10 Coste sostenimiento con paraguas (estimado del proyecto original).

	Longitud L _r - L _o (m)	Precio microp. (€/m)	Longitud micro- pilote (m)	Número de paraguas	Número micro- pilotes	Longitud perforada (m)	Coste paraguas túnel (€)
Granito	3.600	90	0	0	0	0	0
Jabre	400	90	9	80	7.760	69.840	6.285.600
Total	4.000	90	9	80	7.760	69.840	6.285.600

Tabla 11 Coste sostenimiento con paraguas (estimado datos reales).

	Longitud L _r - L _o (m)	Precio microp. (€/m)	Longitud micro- pilote (m)	Número de paraguas	Número micro- pilotes	Longitud perforada (m)	Coste paraguas túnel (€)
Granito	2.800	90	0	0	0	0	0
Jabre	1.200	90	9	240	23.280	209.520	18.856.800
Total	4.000	90	9	240	23.280	209.520	18.856.800

Por tanto, un mejor conocimiento del terreno gracias a la técnica DCD eliminaría la incertidumbre sobre el sostenimiento a utilizar, que se puede estimar en 12.571.200€.

Costes de la incertidumbre sobre la mayor duración de la obra.

La siguiente Tabla 12 resume el cálculo de la duración del trabajo a partir de los datos del proyecto original. La excavación del túnel tardaría unos 650 días y los costes fijos rondarían los 7.800.000€.

Tabla 12 Costes fijos totales (estimados a partir del proyecto original).

	Longitud L _r - L _o (m)	Seccion (m ²)	RMR	a _b (m/ciclo)	n _b (ciclos/dia)	T (dias)	Coste total (€)
Granito	3.600	90	60	4	2	450	5.400.000
Jabre	400	90	30	1	2	200	2.400.000
Total	4.000					650	7.800.000

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Sin embargo, como se ve en la siguiente Tabla13, utilizando los datos reales de longitud en granito sano y granito meteorizado, la excavación del túnel llevaría alrededor de 950 días y los costes fijos serían del orden de 11.400,00 €/día. Por supuesto, un mejor conocimiento del terreno gracias a la técnica DCD eliminaría la incertidumbre en cuanto a la duración de la obra, esos 300 días de más con los datos reales, que con los datos del proyecto, que podría estimarse en 3.600.000 €.

Tabla 13 Costes fijos totales (estimados a partir de datos reales)

	Longitud $L_r - L_o$ (m)	Seccion (m ²)	RMR	a_b (m/ciclo)	n_b (ciclos/dia)	T (días)	Coste total (€)
Granito	2.800	90	60	4	2	350	4.200.000
Jabre	1.200	90	30	1	2	600	7.200.000
Total	4.000					950	11.400.000

Costes de la incertidumbre sobre la presencia de agua.

La permeabilidad del granito degradado o jabre es mucho mayor que la del granito sano. La mayor proporción de jabre en la traza del túnel en la realidad con respecto al proyecto inicial hace que el caudal de agua en el túnel y el volumen de agua total producido sea mayor con respecto a la previsión inicial, lo que produce a su vez un sobrecoste.

En las Tabla 14 se resume el cálculo del caudal medio en el túnel, el volumen total de agua a tratar y los costes asociados al bombeo y tratamiento de agua según la geología del proyecto original. En la tabla 15 se resumen los mismos cálculos pero ajustados a la geología real.

Se ha supuesto en ambos casos una sección de avance del túnel principal de 90 m² (radio equivalente $R= 5,35$ m), una profundidad media $H=125$ m y una distancia entre ejes (de galería y túnel) $2 \times d_T = 20$ m. Por otra parte, se ha supuesto una permeabilidad media $K= 10^{-6}$ m/s en el jabre y $K= 10^{-7}$ en el granito.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 14 Costes asociados al agua (estimados a partir de datos del proyecto)

	Longitud $L_f - L_o$ (m)	Caudal unitario (m^2/s)/m	Caudal medio (m^3/s)	Volumen total(m^3)	Coste energía(€)	Coste Tratamiento (€)	Coste total (€)
Granito	3.600	$2,4 \cdot 10^{-5}$	(*)	1.419.973	(*)	(*)	(*)
Jabre	400	$2,4 \cdot 10^{-4}$	(*)	3.140.352	(*)	(*)	(*)
Total	4.000	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,066	4.656.325	327.946	1.276.891	1.604.837

(*) El cálculo de los costes y del caudal medio sólo se ha realizado para todo el túnel.

Tabla 15 Costes asociados al agua (estimados a partir de datos reales)

	Longitud $L_f - L_o$ (m)	Caudal unitario (m^2/s)/m	Caudal medio (m^3/s)	Volumen total (m^3)	Coste energía (€)	Coste Tratamiento (€)	Coste total (€)
Granito	2.800	$2,4 \cdot 10^{-5}$	(*)	1.905.201	(*)	(*)	(*)
Jabre	1.200	$2,4 \cdot 10^{-4}$	(*)	6.275.630	(*)	(*)	(*)
Total	4.000	$3,4 \cdot 10^{-5}$		8.180.831	455.298	2.290.633	2.745.931

(*) El cálculo de los costes y del caudal medio sólo se ha realizado para todo el túnel.

4.1.3 Resumen túnel La Burata

La campaña convencional realizada supuso un coste de unos 442.500 €, equivalente a una inversión en exploración de sólo un 1,11%, que resulta un poco bajo respecto los estándares internacionales. Con ella sólo se reconocía un 13% del total de la longitud del túnel.

Una campaña con técnica DCD se habría reconocido el 100% del túnel con un coste de 882.600 €, un poco mayor que la realizada. Además, la inversión en exploración sería del 2.21% más acorde con los estándares internacionales.

Con la campaña DCD se elimina una incertidumbre cuantificada en 23.807.534 €. Esto supone que por cada 1 € de más que conlleva la técnica DCD, se eliminan 54 € de incertidumbre.

Visto de otra manera, tenemos que la aplicación de la técnica DCD elimina una incertidumbre cuantificable en 5.952 € por metro de tramo de túnel analizado. Este es un valor relevante, teniendo en cuenta que el coste total de ejecución está en torno a los 10.000 €/m.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

4.2 Túnel Lote 3 de la Variante de Pajares

Los túneles de la Variante de Pajares pertenecen a la línea de alta velocidad Valladolid-Palencia-Leon-Asturias tramo de la Robla- Pola de Lena. En concreto, estudiaremos el Lote 3.

Se trata de unos túneles singulares, no sólo por su longitud de 24,8 Km que hacen que sean los segundos túneles ferroviarios más largos de España por detrás únicamente de los túneles del Guadarrama, sino por la complejidad del macizo rocoso a travesar como veremos más adelante.

El proyecto consta de dos túneles paralelos entre la Pola de Gordon(León) y Telledo (Asturias) con una sección libre de 52 m² y comunicados entre si mediante galerías de conexión que están separadas aproximadamente 50m en la parte interior del macizo rocoso.

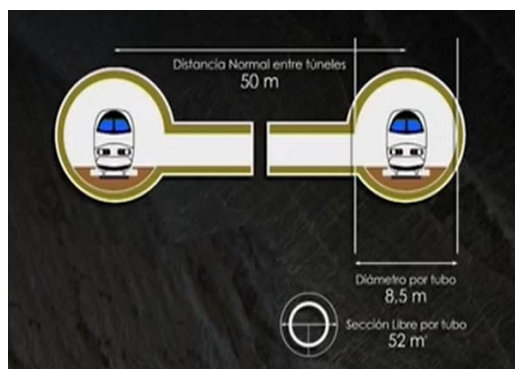


Fig. 25 Esquema de la sección transversal de los túneles

Debido a la dificultad de ejecución de la obra desde sus inicios, esta se dividió en 4 lotes que fueron adjudicados a diferentes empresas.

- Lote 1: Pola de Gordon-Folledo (León). El emboquille de la boca Sur se inicia en la Pola de Gordón. El túnel Este tiene 9,9 km y el Túnel Oeste tiene 11 km. Este tramo comprende galerías de conexión cada 400m.
- Lote 2: Folledo- Viadangos (León). Tramo central de la obra, los dos túneles se han construido utilizando la misma tuneladora y una galería de acceso para poder acceder a la cota de los túneles. El Túnel

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Este y el Túnel Oeste tiene 4,2km, también se han realizado galerías de conexión cada 400m.

- Lote 3: Viadangos (León Telledo (Asturias) Tunel Este. Este tramo se ejecutan 13,3 km de túnel entre el entronque con el túnel ejecutado desde Viadangos del Lote 2 y Telledo (Asturias). En este lote se incluyó la cinta de transporte de material.
- Lote 4: Viadangos(Leon)- Telledo (Asturias) Túnel Oeste. Este tramo se ejecutan 13,3 km de túnel entre el entronque con el túnel ejecutado desde Viandangos del Lote 2 y Telledo (Asturias). En este lote también se incluyeron las galerías de conexión cada 400m entre los dos túneles.

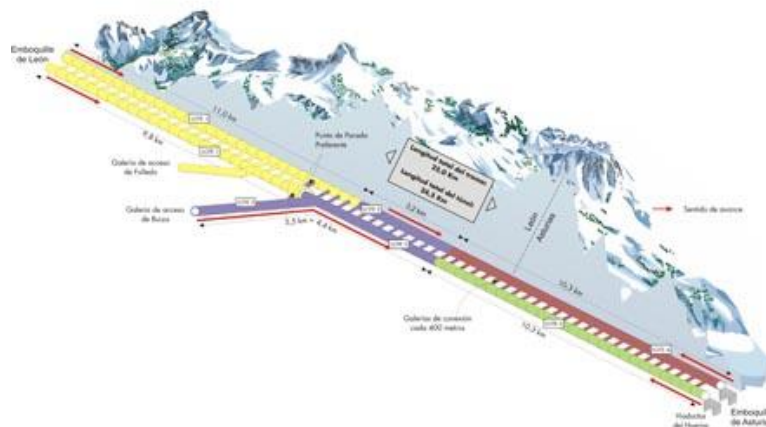


Fig. 26: Esquematización de los lotes de los Túneles de Pajares

En la imagen se puede ver que el Lote 1 aparece esquematizado en color amarillo, el Lote 2 en color azul, el Lote 3 en color rojo y el Lote 4 en color verde

LAS TUNELADORAS

Las obras comenzaron en el 2004 con la realización de los preparativos previos antes de la llegada de las máquinas tuneladoras que se realizaría entre el 2005 y 2006. Los trabajos previos que se realizaron fueron entre otras cosas los emboquilles, se ampliaría la campaña de investigación geotécnica, se

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

construiría la fábrica de dovelas, se realizaría el ensanche de carreras y acondicionamiento de vertederos donde posteriormente se acopiaría el material.

Para la construcción de los túneles se emplearon 5 tuneladoras (información recogida del ADIF)

- Lote 1: Túnel Oeste, se trata de una tuneladora de Escudo simple de Herrenknecht. Esta tuneladora fue la primera en iniciar los trabajos y la que más metros perforó.
- Lote 1: Túnel Este, se empleó una tuneladora de escudo simple de NFM-Wirth.
- Lote 2: Se utilizó una tuneladora de Doble escudo de Herrenknecht fue la única que se utilizó.
- Lote 3: Se empleó una tuneladora de escudo simple de NFM-Wirth.
- Lote 4: Se empleó una tuneladora de escudo simple de MHI-DURO FELGUERA-ROBBINS, fue la única en contar con una empresa española para su fabricación.

Todas las cabezas de las tuneladoras poseían cortadores de disco de 17 pulgadas.



Fig. 27: Cabeza de corte con cortadores

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

SOSTENIMIENTO. ANILLO DE DOVELAS

El sostenimiento de los túneles se realizó mediante anillos de dovelas, estas tenían diferentes configuraciones en cada túnel por lo que no podían ser intercambiados (Diez 2009). En la fabricación de las dovelas de los túneles de Pajares cabe destacar que se emplearon hormigones de resistencias características de 110MPa en previsión del comportamiento fluente de las formaciones pizarrosas.

Se utilizaron dos tipos de espesor de dovela diferente de 50cm y de 60cm.

En el caso del Lote 3 donde se centrará el estudio, las dovelas se calcularon en función del axil que ha de soportar: Tipos 1, 2, 3 y 4 para axiles de 900, 1.700, 2.130 y 3.200 t respectivamente. Este axil viene condicionado por dos parámetros fundamentales: calidad del macizo rocoso (formación geológica atravesada) y profundidad.



Fig. 28 Detalle del acopio de dovelas del emboquille norte

GEOLOGIA DE LOS TÚNELES

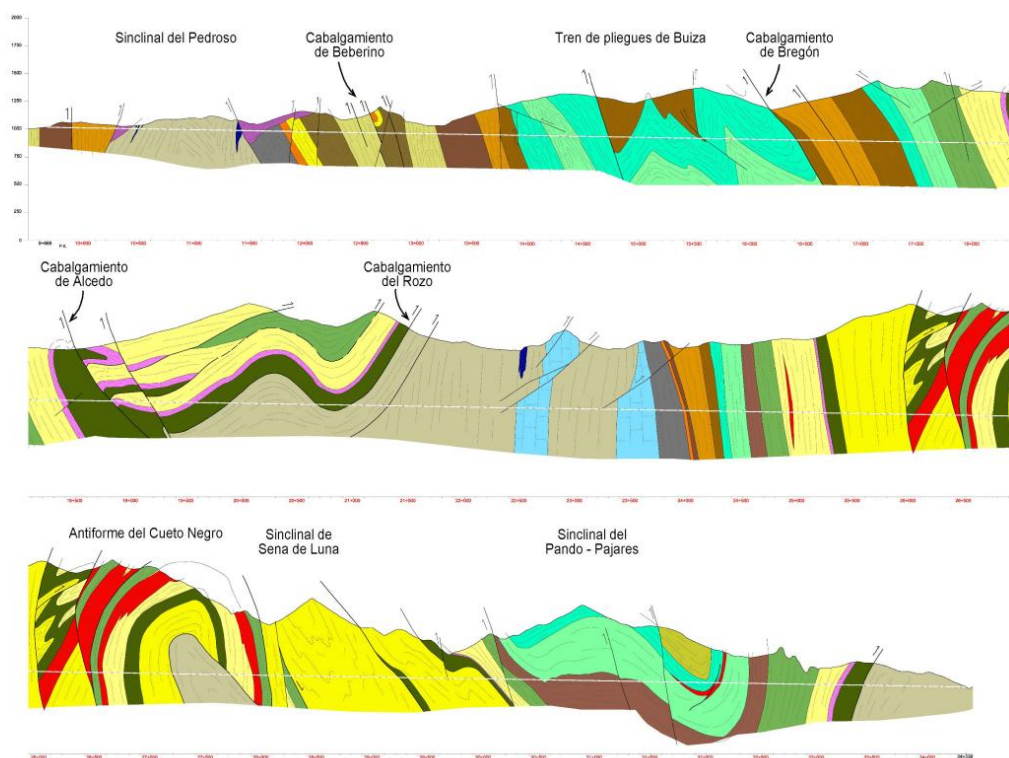
La geología de los túneles de pajares atraviesa la mayor parte de la rama sur de la Zona Cantábrica. Donde se observan: (Alonso y Rubio 2009)

- Cabalgamientos con una trayectoria en escalera compuesta de rampas oblicuas a la estratificación y amplias zonas de despeque paralelas a la misma.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Pliegues producidos durante el transporte de las masas de roca sobre la superficie quebrada de las superficies de cabalgamiento. Algunos de estos pliegues sufrieron un considerable reapretamiento posterior al desarrollo de los cabalgamientos.
- Fallas inversas relacionadas con los últimos estadios de apretamiento de los pliegues.

En el esquema siguiente puede verse el corte geológico del túnel este posicionando en la traza las diferentes zonas atravesadas por el túnel y



Act
Ve a

Fig. 29 Corte geológico del túnel Este (Alonso y Rubio 2009)

Durante la excavación de los túneles una de las formaciones que se atravesaba era la formación San Emiliano.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

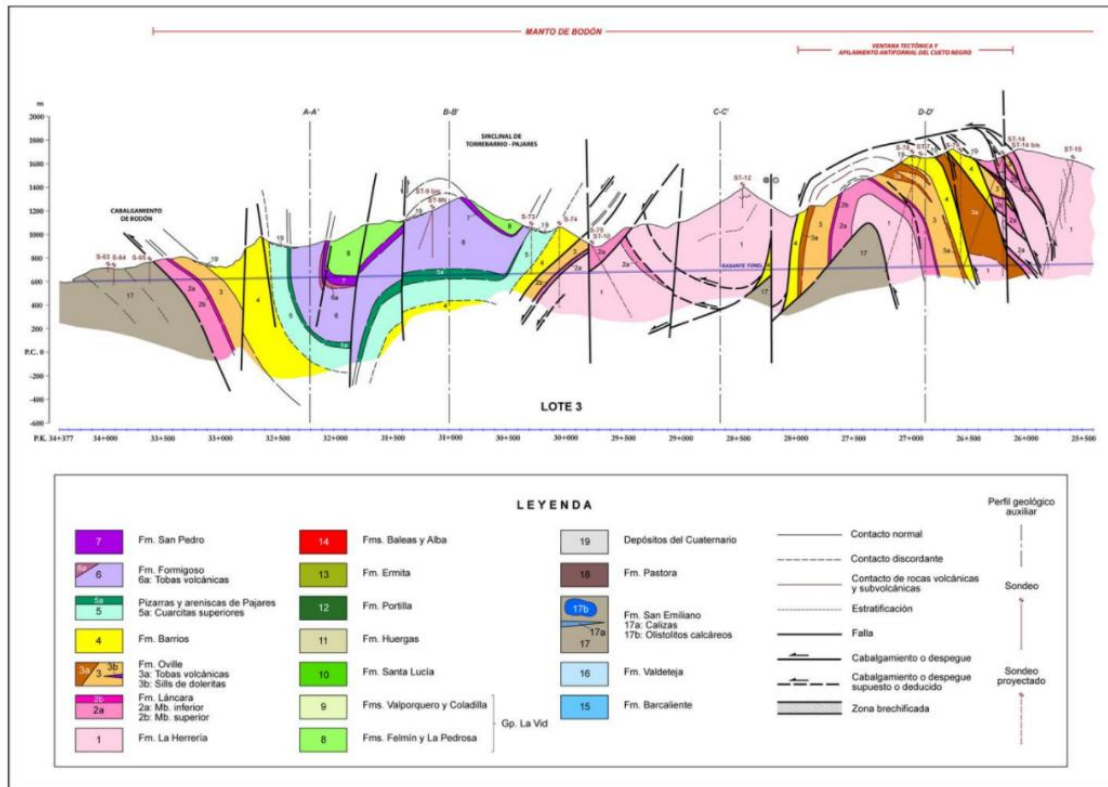


Fig. 30 Perfil geológico Lote 3. Toyos et al.(2014)

LA FORMACIÓN SAN EMILIANO.

Dentro de la variada y compleja Geología atravesada, se excavaron lutitas y pizarras del Carbonífero correspondientes a la formación San Emiliano. Dos fueron los tramos donde se encontró dicha formación tal como se refleja en la Figura. 31

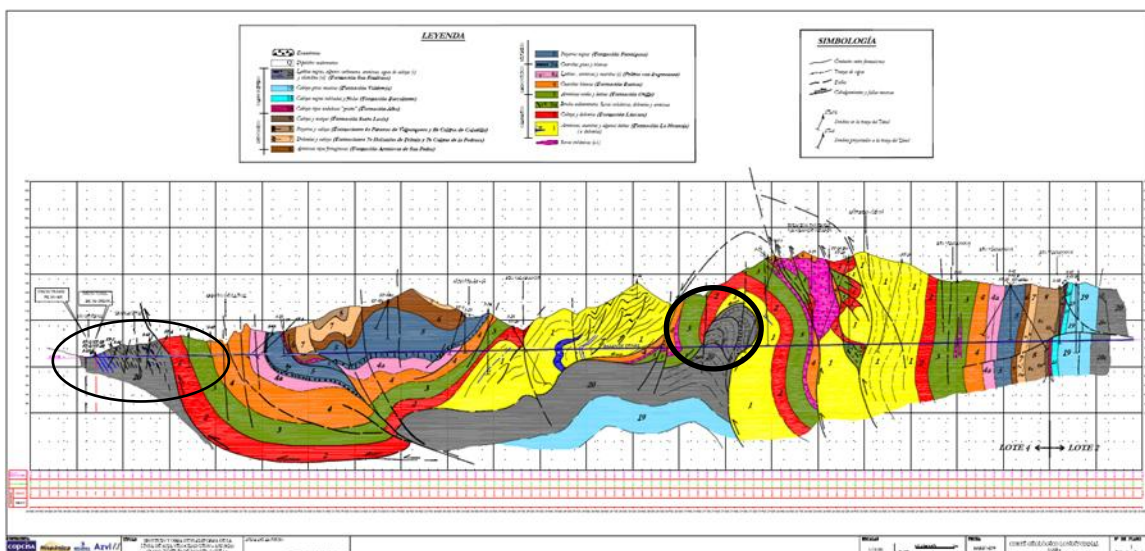


Fig. 31 Posición en la traza del tunnel de la formación San Emiliano

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Dicha Formación aparece inicialmente en los primeros 1.000 m de túnel y posteriormente se corta de nuevo al avanzar el túnel unos 7.000 m del portal Norte a una profundidad de unos 700 m.

En la fase de proyecto, se sabía que la formación San Emiliano aparecería en los primeros 1.000 m de túnel por la boca Norte (Asturias), ya que es un tramo que está a poca profundidad (máximo unos 200 m) y es fácilmente reconocible por sondeos convencionales. Sobre la segunda zona existió, durante la fase de proyecto, duda de si se llegaría a cortar. De hecho, en las primeras fases del proyecto, el corte geológico no contemplaba la aparición de esa formación, aunque se sospechaba que podía aparecer y por eso se dieron sondeos para delimitar la zona. En la Figura 32 se muestra ese corte geológico inicial con el corte geológico real después de finalizada la excavación del túnel.

Sobre la complejidad de tales sondeos se recomienda leer Del Olmo y Fernández (2009).

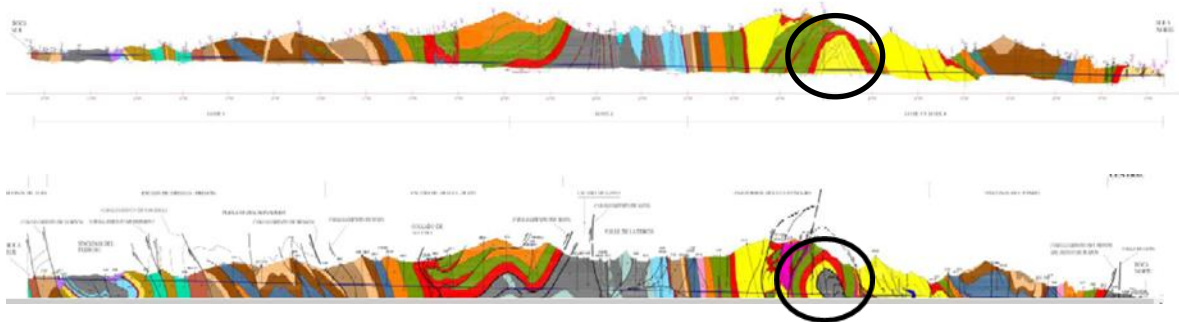


Fig. 32 Comparativa entre el corte geológico inicial y el corte geológico real una vez finalizada la excavación

Los problemas encontrados durante la excavación en la formación San Emiliano fueron múltiples, tal y como se describe en García de Muro (2009) y Díaz-Aguado et al (2014), pudiéndose destacar:

- Presencia de gas con riesgo de explosión y reducción drástica del rendimiento de avance,
- Baja calidad del macizo rocoso, sobre todo las lutitas, con avances muy reducidos y con formación de chimeneas hasta superficie incluso con formación de cráter, cerca del portal norte;

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Grandes deformaciones o “squeezing”, de las lutitas con riesgo de atrapamiento de la tuneladora, produciéndose alguna parada y reducción del rendimiento de avance...
- etc.

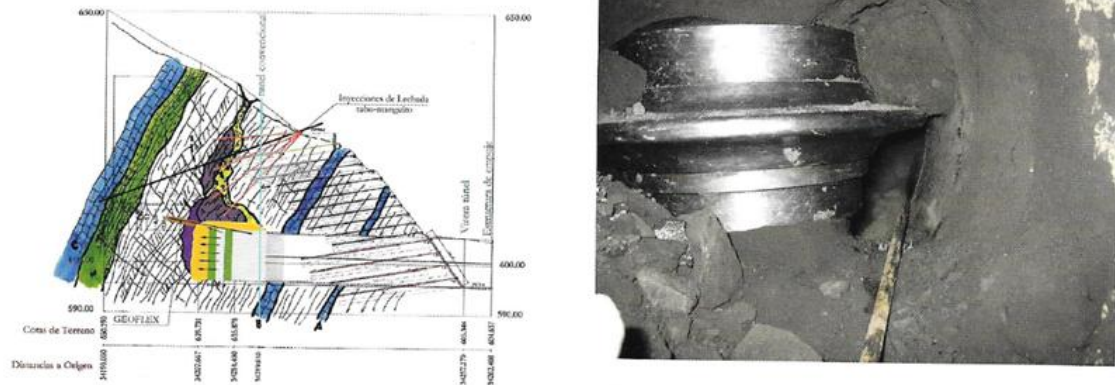


Fig. 33 Corte de inyecciones de lechada desde talud de emboquille y lanza de inyección de espuma a través de un hueco de un cortador.

Con respecto al primer tramo, el más cercano al portal norte, al estar a poca profundidad era más fácil de reconocer mediante sondeos convencionales. Sin embargo, el segundo tramo en la formación San Emiliano era muy difícil de delimitar dado que estaba a 700 m de profundidad y era difícil de delimitar su extensión. Precisamente por estar a mayor profundidad, era esperable que los problemas de gas, squeezing...etc. fueran aún mayores que en el primer tramo.

4.2.1 Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso.

Análisis comparativos de costes de investigación.

Como se ha comentado anteriormente la caracterización del macizo rocoso es muy importante y en un proyecto de la envergadura de los túneles de pajares aún más, debido a la dificultad técnica que presenta.

Durante la excavación de los túneles aparecieron una serie de problemas que dilataron la obra en el tiempo y aumentaron su coste, parte de estas

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

incertidumbres podrían haberse minimizado, como por ejemplo: (Diez de la Rubia 2009)

- Presencia importante de agua al travesar formaciones calcáreas carstificadas y fallas de formaciones cuarcíticas arenizadas.
- Aparición de cavernas y conductos cársticos en formaciones calcáreas.
- Se pasaba bajo el gaseoducto de Leon-Gijon, atravesando una falla con cobertera inferior a un diámetro.
- En las formaciones pizarrosas presencia de gas y deformaciones del terreno con posibilidad de atrapamiento de la cabeza de la tuneladora. Posibilidad de cabeceo y pérdida del trazado de la tuneladora, e imposibilidad de guiado al tener nula resistencia el terreno a excavar.
- Imposibilidad de rellenar el trasdós del anillo de revestimiento debido a la elevada afluencia de agua.
- En las formaciones muy fracturadas posibilidad de bloqueo de la rueda de corte
- En las zonas de falla con material muy facturado giro de la tuneladora y los anillos por falta de reacción con el terreno.
- Sobredimensionamiento de las dovelas
- Desgaste de cortadores

Los Túneles de Pajares constituyen, desde el punto de vista constructivo, la actuación de mayor relevancia de todo el Corredor Norte-Noroeste de Alta Velocidad León-Asturias. Las dificultades orográficas, y morfológicas del macizo cantábrico han supuesto una enorme dificultad para la comunicación ferroviaria entre la meseta castellano-leonesa y el Principado de Asturias, que ha significado un gran reto de ingeniería técnica y constructiva.

La principal dificultad radica en atravesar una zona geológica enormemente alterada, brevemente, atraviesan todo el paquete del carbonífero improductivo,

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

con múltiples fallas, cabalgamientos, pliegues incluso la ventana tectónica del cuitu negro en la unidad de Sobia Bodón como se puede ver en la descripción geológica anterior.

Una gran parte de los túneles largos del AVE, se han construido utilizando tuneladoras (TBM), con un diámetro de sección útil de 8,5 m. En los túneles de Pajares el espesor de las dovelas era de 55 cm. debido a la poca cohesión de gran parte de los materiales que se debían atravesar. Sirva de ejemplo que, en los túneles de Guadarrama, atravesando macizos compactos de granito las dovelas eran de 30 cm.

Desde el inicio de los trabajos en la boca Norte, se comprobó la falta de cohesión del terreno, lo que obligó a realizar múltiples trabajos de consolidación en el emboquille y durante los avances tal como se describe en Díaz-Aguado (214).

Los terrenos que se debían de atravesar correspondían a la formación San Emiliano, en el emboquille y sobre el tramo Pk. +7.000. Ésta formación, además de su baja cohesión, tiene la particularidad de presentar gas metano atrapado en su interior, con el consiguiente riesgo de explosión.

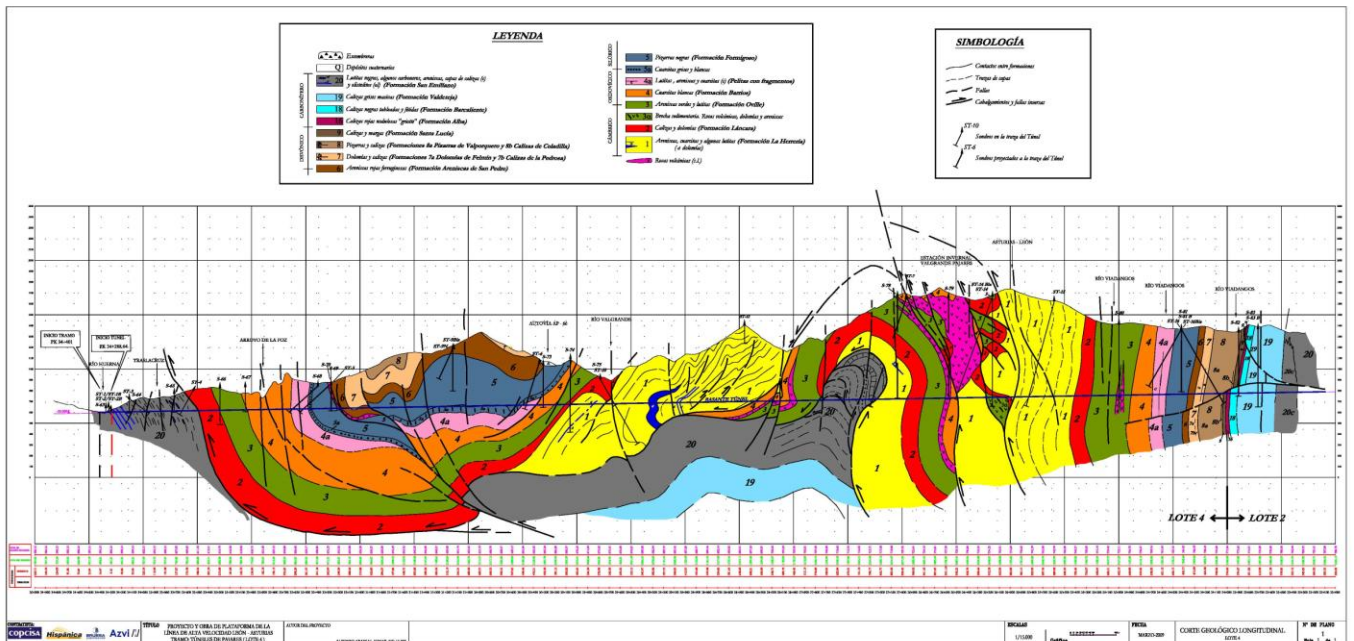


Fig. 34 Corte transversal del trazado del lote IV

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Se realizará a continuación un estudio comparativo de los costes estimados en la campaña de investigación geológica en el tramo de mayor profundidad donde se corta dicha formación San Emiliano, en el PK +7.000, aproximadamente.

En la imagen de la zona de la formación San Emiliano, se observan 2 sondeos tradicionales, ST7, inclinado de 1.100 m. que, aunque llegó a cortar la formación no pudo delimitar su extensión a lo largo de la traza del túnel. El segundo sondeo, el S-78, vertical de 950 m, no llegó a cortar la formación.

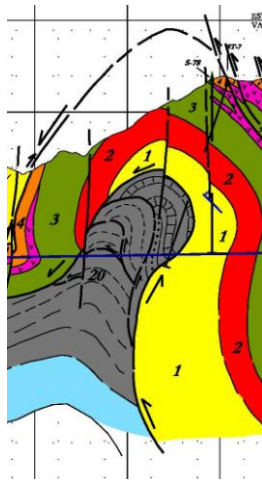


Fig. 35: Detalle de la formación San Emiliano

Siguiendo el procedimiento simplificado ya descrito anteriormente, tomaríamos los siguientes costes unitarios:

- Coste por implantación de máquina: 3.000 €/Ud.
- Coste metro perforado con recuperación de testigo en HQ: 100 €/m.

A partir de ellos, obtendríamos los costes para la realización de los sondeos convencionales serían y que se resumen en la tabla 16:

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 16 Coste sondeos tradicionales.

SONDEO	LONGITUD	TIPO	IMPLANTACION	EUROS	
S-78	950	Vertical	3.000,00	95.000,00	
ST-7	1.100	Inclinado	3.000,00	110.000,00	
	2.050		6.000,00	205.000,00	211.000,00

Es decir, se tendrían 2.025 metros perforados, con un coste de 211.000,00 €, pero el S-78, no nos da ninguna información de la formación San Emiliano, así que descartamos esos 950 m, por lo que el coste unitario de perforación es de 191,82 €/m.

Si suponemos, que los sondeos convencionales representan unos 10 metros de radio alrededor del mismo, el único sondeo válido caracteriza unos 20 metros del tramo de túnel de una longitud total de 550 m. de la formación San Emiliano en la traza del túnel.

Tenemos información del 3,6% del túnel y un coste de sondeos de 211.000,00 €. Si se realiza una extrapolación el coste de los sondeos para el 100% del tramo se obtendría un coste de 5,8 M€.

Estudiamos ahora este caso utilizando un sondeo direccional desde la montera, obtenemos unos 450 m, después direccionando el sondeo, se cortará toda la traza del túnel en la formación San Emiliano, con una longitud de 550 m, la longitud total de este tramo en la traza del túnel es de 725 m, como se puede comprobar en la 36 siguiente, el sondeo DCD aparece marcado en azul.

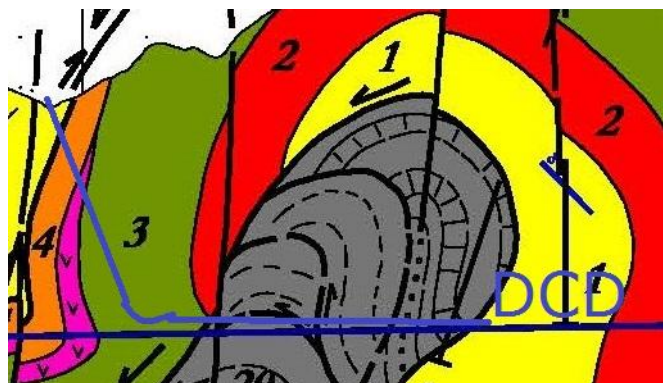


Fig. 36 Detalle de sondeo DCD

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 17 Coste sondeos DCD

Nº SONDEOS	LONGITUD	PROFUNDIDAD	IMPLANTACIÓN.	€/M	SUBTOTALES
DCD1	1.175	de 450 a 600	3.000,00	100,00	120.500,00
DEVICO- DCD					
mes	2			100.000,00	200.000,00
	1.175				320.500,00

El análisis de costes que se realizaría es el siguiente:

- Coste por implantación de máquina: 3.000 €/Ud.
- Coste metro perforado con recuperación de testigo en HQ: 100 €/m.
- Coste mensual del equipo DCD para trabajos a 24 horas: 100.000 €/mes

(Suponemos avances de perforación de 5m/h; 10h/día; 22 días/mes: 1.100 m/mes), en 1 mes se harían esos 1.175 m.

Es decir, tenemos unos 725 metros en la traza del túnel, de los cuales, 530 son de la formación San Emiliano y unos 320.500,00 € gastados, con un coste unitario de perforación 442,07 €/m.

El sondeo direccional sale 442,07 €/m con el 100% del túnel analizado frente a los 191,82 €/m con el 3,77% del túnel analizado.

VENTAJAS DEL SONDEO DIRECCIONAL:

A continuación se describen algunas de las ventajas del sondeo direccional

- Reconocimiento del 100% de ese tramo del túnel.
- Posibilidad de desgasificación del tramo a perforar con la TBM.
- Un testigo continuo e información geológica en la misma traza del túnel.
- Detecta los puntos de corte de niveles freáticos del túnel.
- Evita errores de interpretación geológica.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Da información fiable de las propiedades mecánicas del macizo rocoso a atravesar.
- Facilita el diseño del sostenimiento para cada tramo con diferentes características mecánicas.

4.2.2 Análisis económicos de los sobrecostos asociados a las incertidumbres

En el proyecto inicial, se consideraba que el tramo de túnel de unos 850 m (del PK 27,800 al PK 26,950) se excavaban a través de areniscas y cuarcitas de la formación La Herrería.

Sin embargo, en realidad, en el tramo atravesó también la formación San Emiliano. Más concretamente, se excavaron 550 m en lutitas negras, carboneros, areniscas...etc. de la formación San Emiliano (del PK 27,800 al PK 27,250) y 300 m en areniscas y cuarcitas de la formación La Herrería (del PK 27,250 al PK 26,950).

Teniendo en cuenta que la boca norte se situaba en el PK34,450, el tramo en la formación San Emiliano comenzaba a los 6.650 m de la entrada del túnel y finalizaba a los 7.200 m donde comenzaba la formación La Herrería que se terminaba a los 7.500 m.

Esta variación en la calidad del macizo rocoso hizo que se tuviera que sobredimensionar las dovelas, que bajara el rendimiento y se avanzara a menor velocidad, que apareciera el riesgo de squeezing y atrapamiento de la tuneladora y que se pudiera producir desprendimiento de metano.

Para evaluar el riesgo económicamente se evaluará la diferencia en el coste del sostenimiento y en el mayor tiempo de ejecución de la obra tanto por la bajada del rendimiento (formaciones muy débiles, presencia de gas...) como por una posible parada por atrapamiento de la máquina. También se tendrá en cuenta el riesgo de presencia de metano y el correspondiente coste por las emisiones equivalentes a CO₂.

Además, se tendrá en cuenta la variación en el consumo de cortadores ya que hay diferencia en cuanto a la abrasividad de las litologías.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Tomaremos como referencia el avance de la tuneladora del lote 3 porque fue la más crítica (ya que al ir adelantada, drenaba más agua, y había mayor desprendimiento de grisú).

1) Cuantificación de la incertidumbre asociada al sobredimensionamiento de las dovelas

Como es lo normal cuando se avanza con TBM, el revestimiento en los túneles de la Variante de Pajares estaba formado por anillos de dovelas de hormigón prefabricadas.

Dada la complejidad de la Geología en los túneles de la Variante de Pajares, con tramos atravesando formaciones geológicas muy débiles y a gran profundidad, el diseño y fabricación de las dovelas de hormigón constituyó un reto de primer orden tal como se describe en Segura y Martínez (2009), Méndez et al (2009) y Torbado (2009).

En el caso del Lote 3, las dovelas se calcularon en función del axil que ha de soportar: Tipos 1, 2, 3 y 4 para axiles de 900, 1.700, 2.130 y 3.200 t respectivamente. Este axil viene condicionado por dos parámetros fundamentales: calidad del macizo rocoso (formación geológica atravesada) y profundidad.

Tabla 18 Descripción de los diferentes tipos de dovelas

-Dovela tipo 1

Axil (t)	Hormigón	Armadura Principal		Cercos de junta	
		Circunf.	Long.	Circunf.	Long.
900	HA-40	8Ø16	Ø16 a 25	2 x 3c Ø12/m	2 x 3c Ø10/m

-Dovela tipo 2

Axil (t)	Hormigón	Armadura Principal		Cercos de junta	
		Circunf.	Long.	Circunf.	Long.
1700	HA-60	10Ø20	Ø16 a 25	2 x 3c Ø16/m	2 x 3c Ø10/m

-Dovela tipo 3

Axil (t)	Hormigón	Armadura Principal		Cercos de junta	
		Circunf.	Long.	Circunf.	Long.
2130	HA-80	8Ø25	Ø16 a 25	2 x 4c Ø16/m	2 x 3c Ø10/m

-Dovela tipo 4

Axil (t)	Hormigón	Armadura Principal		Cercos de junta	
		Circunf.	Long.	Circunf.	Long.
3200	HA-110	12Ø25	Ø16 a 25	2 x 5c Ø16/m	2 x 3c Ø10/m

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Estimando el volumen y el peso de la armadura, de forma simplificada, se puede poner como:

Tipo	Hormigón	Espesor	Armadura
Dovela	MPa	M	kg/m ³
1	40	0,5	71
2	60	0,5	107
3	80	0,5	126
4	110	0,5	171

Las dovelas tipo 3 eran para los tramos más profundos en los que no existía el riesgo de fluencia o squeezing, mientras que las dovelas tipo 4 se diseñaron para aquellas formaciones con propensión a la fluencia en los tramos más profundos. Por lo tanto, en el tramo considerado las dovelas empleadas serían las del tipo 3 en la formación La Herrería y las del tipo 4 en la formación San Emiliano.

Las dovelas tienen un diámetro interior de 8,5 m y exterior de 9,5 m.

Para estimar el coste se van a tomar los precios unitarios de los túneles del AVE a Galicia que son los de más reciente ejecución en España. El precio unitario del hormigón en dovela HA-70 (70 MPa de resistencia característica) es 219,93 €/m³ mientras que el del HA-45 (45 MPa) 146,49 €/m³. Para extrapolar a otras resistencias se puede tomar como ratio 3 (€/m³)/MPa.

Por lo tanto, el precio del hormigón de las dovelas tipo 3 y 4, de 80 MPa y 110 MPa de resistencia respectivamente es:

$$\text{Tipo 3: } 3 \text{ (€/m}^3\text{/MPa)} \times 80 \text{ MPa} = 240 \text{ €/m}^3$$

$$\text{Tipo 4: } 3 \text{ (€/m}^3\text{/MPa)} \times 110 \text{ MPa} = 330 \text{ €/m}^3$$

El precio del acero corrugado es en ambos casos 0,87 €/kg.

Por lo tanto, el precio de las dovelas (por 1 m de túnel) se hace como sigue.

- Anillo de dovelas tipo 3 (para 1 m de túnel):
 - Diámetro medio: $8,5+0,5 = 9,0$ m

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Sección de hormigón: $(\pi/4) \times (9.5^2 - 8.5^2) = 14.13 \text{ m}^2$
- Volumen de hormigón por m de túnel: $14,14 \text{ m}^3/\text{m}$
- Masa de acero por m de túnel: $126 \text{ kg/m}^3 \times 14,14 \text{ m}^3/\text{m} = 1.781,64 \text{ kg/m}$

Precio del anillo de dovelas tipo 3:

$$(14,14 \text{ m}^3/\text{m} \times 240 \text{ €/m}) + 1.781,64 \text{ kg/m} \times 0,87 \text{ €/kg} = 3.393,6 + 1.550,03 =$$

4.943,63 €/m

- Anillo de dovelas tipo 4 (para 1 m de túnel):
 - Diámetro medio: $8,5+0,5 = 9,0 \text{ m}$
 - Sección de hormigón: $(\pi/4) \times (9,5^2 - 8,5^2) = 14,13 \text{ m}^2$
 - Volumen de hormigón por m de túnel: $14,14 \text{ m}^3/\text{m}$
 - Masa de acero por m de túnel: $171 \text{ kg/m}^3 \times 14,14 \text{ m}^3/\text{m} = 2.417,94 \text{ kg/m}$

Precio del anillo de dovelas tipo 4:

$$(14,14 \text{ m}^3/\text{m} \times 330 \text{ €/m}) + 2.417,94 \text{ kg/m} \times 0,87 \text{ €/kg} = 4.666,20 + 2.103,08 =$$

6.769,28 €/m

Estimación del sobrecoste en dovelas:

- Según proyecto: $850 \text{ m} \times 4.943,63 \text{ €/m} = 4.202.085 \text{ €}$
- Según longitudes reales: $550 \text{ m} \times 6.769,28 + 300 \text{ m} \times 4.943,63 \text{ €/m} = 5.206.193 \text{ €}$

Sobrecoste en dovelas:

$$5.206.193 \text{ €} - 4.202.085 \text{ €} = 1.004.108 \text{ €}$$

El total del sobrecoste en dovelas supone un millón cuatro mil ciento ocho euros.

2) Cuantificación de la incertidumbre asociada a la disminución de rendimiento:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

A partir de los datos obtenidos de Camus (2011) y Mendaña y Fernández (2009), cuando el lote 3 llevaba 6.500 m llegó a la formación San Emiliano y en ella el avance fue de aproximadamente 6 m/día. A continuación, entró en La Herrería llegando a avances del orden de 15 m/día.

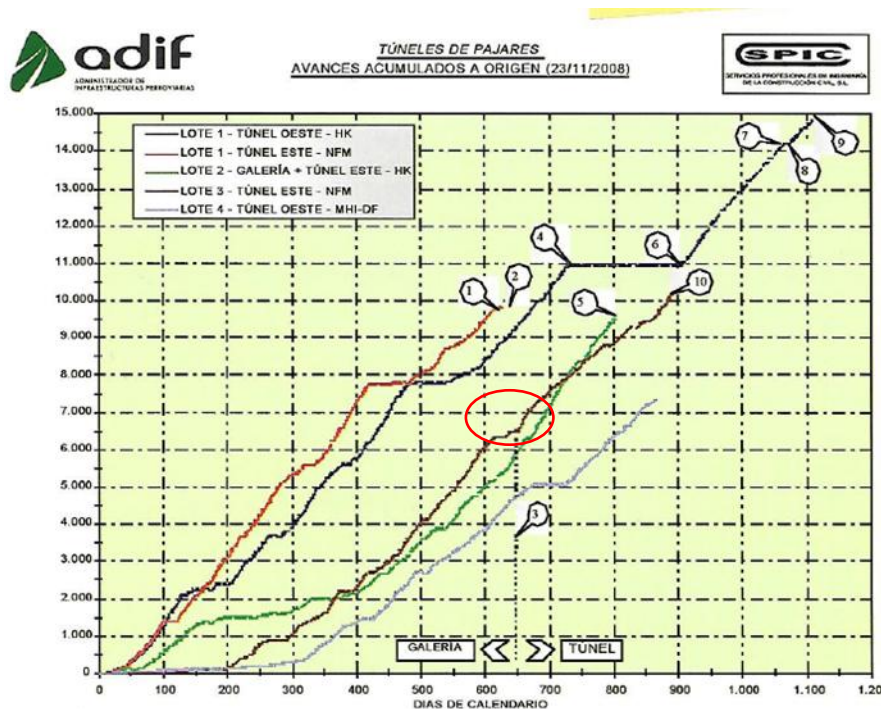


Fig. 37: Avances acumulados a origen

Por lo tanto, la duración según proyecto (donde se consideraba que sólo habría areniscas y cuarcitas de La Herrería) sería:

$$850 \text{ m} / 15 \text{ m/día} = 57 \text{ días}$$

Sin embargo, la duración de acuerdo a la geología real fue:

$$550 \text{ m} / 6 \text{ m/día} + 300 \text{ m} / 15 \text{ m/día} = 111 \text{ días}$$

Si el coste fijo es del orden de 30000 €/día:

$$(111 - 57) \times 30.000 = 1.620.000 \text{ €}$$

El coste asociado a la bajada de rendimiento supone un millón seiscientos veinte mil euros

3) Cuantificación de la incertidumbre asociada al riesgo por atrapamiento de la tuneladora:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Las formaciones areniscosas de La Herrería no tienen propensión a la fluencia y las pizarrosas de San Emiliano sí. Tomando como referencia el atrapamiento de la tuneladora del lote 4 en la formación Formigoso (similar a la San Emiliano, ver artículo en túneles de Pajares), se tiene que el riesgo de atrapamiento implica unos 30 días de parada. Por simplicidad se evaluará simplemente los costes fijos derivados de la parada.

$$30 \text{ días} \times 30.000 \text{ €/día} = \mathbf{900.000 \text{ €}}$$

No obstante, mientras que las otras variaciones en el gasto se producirán porque implican cambios que se materializan, el atrapamiento de la tuneladora puede no ocurrir. De hecho, la tuneladora no quedó atrapada en este tramo. No obstante, es un riesgo que existe en la Formación San Emiliano y no en la Herrería y que es interesante valorar.

El coste del riesgo asociado al atrapamiento de la tuneladora asciende a novecientos mil euros.

4) Cuantificación de la incertidumbre asociada al desprendimiento de grisú

La excavación del tramo de la formación San Emiliano más cercana al emboquille norte produjo el desprendimiento de un volumen de grisú importante. Sin embargo, en la zona más profunda, por debajo del Cueto Negro, sorprendentemente no se produjo metano. No obstante, esto no quiere decir que no se tuviera que valorar como un riesgo en la fase de proyecto ya que su presencia era más que probable.

El rendimiento medio en avance en la zona más profunda de la formación San Emiliano fue de tan solo 6 m/día lo que, suponiendo una densidad media de 2.2 t/m³ (baja por la presencia de materia carbonosa) y teniendo en cuenta que la sección de avance es de 78,5 m² (10 m de diámetro), se tiene una producción diaria:

$$6 \text{ m/día} \times 78,5 \text{ m}^2 \times 2,2 \text{ t/m}^3 = 1.036 \text{ t/día}$$

Tal como se demuestra en Rodríguez y Lombardía (2010), un valor mínimo del desprendimiento de metano es aproximadamente 11 m³/t. Por lo tanto, para

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

esa producción se ve que la emisión media de metano es de unos 11000 m³/día.

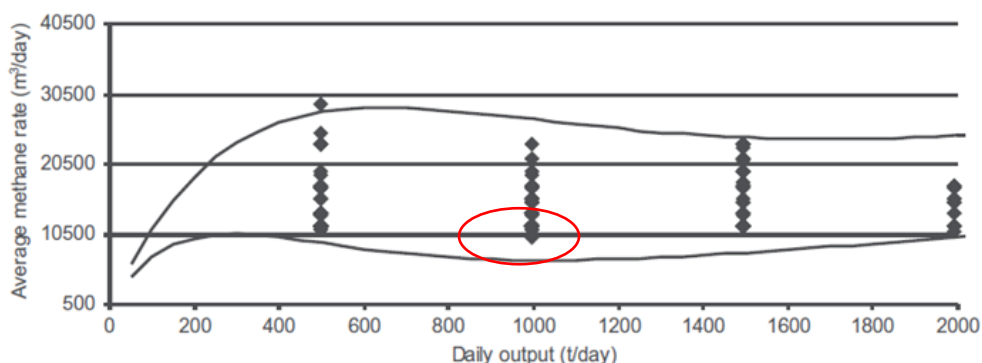


Fig. 38 Tasa promedio de metano q vs excavación en el macizo rocoso

Avanzando 6 m/día, la excavación del tramo de 850 m en la formación San Emiliano producirá un volumen de metano:

$$(850 \text{ m} / 6 \text{ m/día}) \times 11.000 \text{ m}^3/\text{día} = 1.562.000 \text{ m}^3\text{CH}_4$$

Este volumen equivale a una masa de aproximadamente 1.024.672 kg de CH₄ (densidad 0,657 kg/m³). Usando el factor de conversión recomendado en Rodríguez y Pérez (2021) de 25 kgCO₂ por 1 kgCH₄ se tienen que la emisión es

$$1.024.672 \text{ kg CH}_4 \times 25 \approx 25.000.000 \text{ kgCO}_2 = 25.000 \text{ tCO}_2.$$

El coste de emisiones de CO₂ cuando se ejecutó el túnel era de 14 €/t; sin embargo en la actualidad está más cerca de los 50 €/t, lo que pone de manifiesto la incertidumbre no sólo en estimar el volumen de gas emitido sino también en estimar su montante económico. En este caso, parece más razonable utilizar el precio de 14 €/tCO₂ que es el precio medio en 2009 (ver www.sendeco2.com):

$$25.000 \text{ tCO}_2 \times 14 \text{ €/tCO}_2 = 350.000,00 \text{ €}$$

Lo que supone una cuantificación del riesgo asociado a la emisión de grisú de trescientos cincuenta mil euros.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

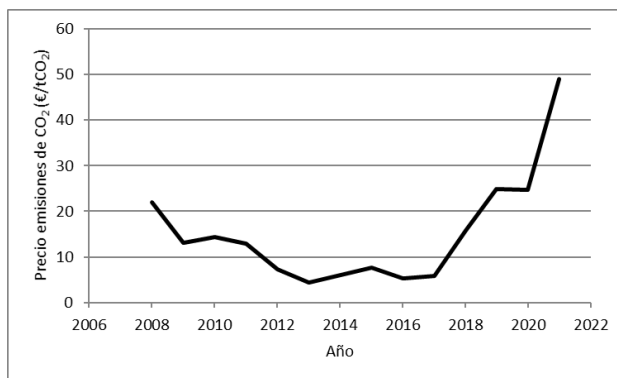


Fig. 39 Precio emisiones de CO₂

5) Cuantificación de la incertidumbre asociada al consumo de cortadores

Según la hipótesis de trabajo en este análisis, en el tramo estudiado se esperaba encontrar la formación Herrería, y sin embargo realmente el tramo pertenece a la Formación San Emiliano.

En este caso, al ser mucho menos abrasivas las rocas de la formación San Emiliano que las de La Herrería, la diferencia en el consumo de cortadores es significativa y se introducirá en el análisis.

Abascal (2009) aporta información sobre el consumo de cortadores del lote 4 en esa zona del túnel. Como el lote 4 es paralelo al lote 3, estos datos nos sirven para la estimación económica.

Los consumos de cortadores fueron de media 0,70 uds/m en La Herrería y muy bajo, del orden de 0,04 uds/m, en la formación San Emiliano.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

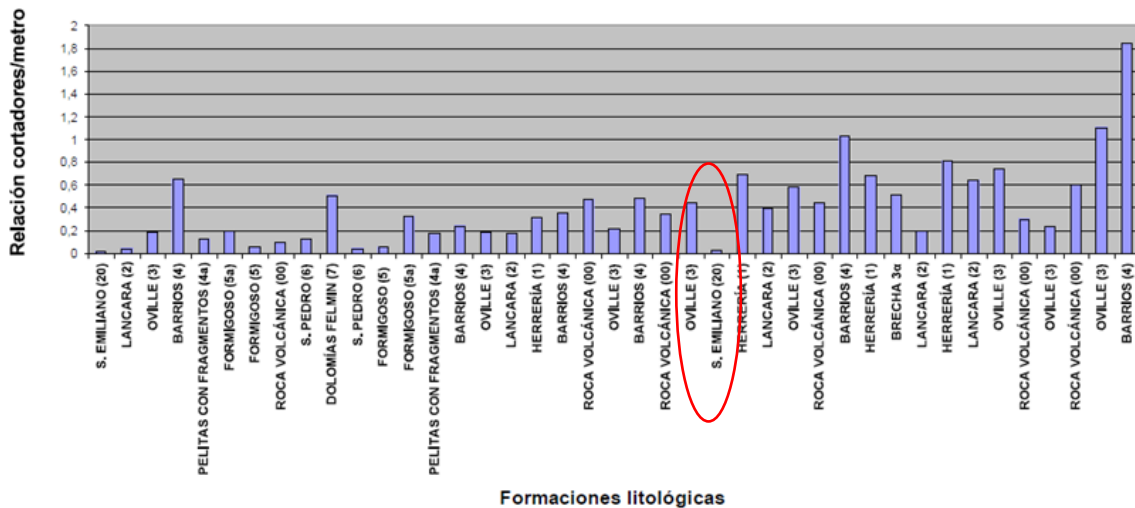


Fig. 40: Relación de cortadores metro según las formaciones litológicas

El coste medio por cortador está entre 2.000 y 3.000 €/ud por lo que aquí utilizaremos el valor medio 2.500 €/ud.

Variación en el consumo en cortadores según proyecto:

Según proyecto: 850 m x 0,7 uds/m = 595 uds

Real: 550 m x 0,04 uds/m + 300 m x 0,7 uds/m = 232 uds

Ahorro en cortadores:

$$(232 - 595) \text{ uds} \times 2.500 \text{ €/ud} = - 907.500,00 \text{ € (ahorro)}$$

La cuantificación del riesgo del ahorro de cortadores supone novecientos siete mil quinientos euros de ahorro

6) Estimación total del riesgo económico:

Sumando todos los componentes (excepto el correspondiente a atrapamiento de la tuneladora) se tiene:

$$\text{RIESGO ESTIMADO: } 1.004.108,00 \text{ €} + 1.620.000,00 + 900.000,00 + 350.000,00 \\ \text{€} - 907.500,00 \text{ €} = 2.960.608,00 \text{ €}$$

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

La estimación total del riesgo económico teniendo en cuenta las partidas anteriores supone un total de dos millones novecientos sesenta mil seiscientos ocho euros.

4.2.3 Resumen túnel lote 3 de Pajares.

La campaña convencional realizada para la caracterización del tramo supuso un coste de unos 211.000 €, equivalente a una inversión en exploración de un 1,83%, acorde con los estándares internacionales. Pero con ella sólo se reconocía un 3,6% del total de la longitud del tramo.

Una campaña con técnica DCD se habría reconocido el 100% del túnel con un coste de 320.500 €, un poco mayor que la realizada. Además, la inversión en exploración sería del 2,77% que, aunque es un poco alta con respecto a los estándares internacionales, es acorde con la extrema complejidad del tramo analizado.

Con la campaña DCD se elimina una incertidumbre cuantificada en 2.966,68 €. Esto supone que por cada 1 € de más que conlleva la técnica DCD, se eliminan 27 € de incertidumbre.

Visto de otra manera, tenemos que la aplicación de la técnica DCD elimina una incertidumbre cuantificable en 5.394 € por metro de tramo de túnel analizado. Este es un valor relevante, teniendo en cuenta que el coste total de ejecución está en torno a los 21.000 €/m.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

4.3 Túneles de Bolaños

Se ha tomado el túnel de Bolaños como referencia para realizar el análisis.

El túnel de Bolaños forma parte del trazado de la línea férrea de alta velocidad entre Madrid y Orense (Galicia). En concreto este tramo pertenece a Vilariño-Campobeceros (Eje Lubián-Orense) y encuentra situado entre los términos municipales de Castrelo do Val y Vilariño de Conso.



Fig. 41 Localización de los túneles de Bolaños

El proyecto del túnel consta de dos tubos paralelos de unos 6.800m de longitud, separados entre ejes una distancia de 30m y con diámetro aproximado de 9,90m. La excavación de los mismos se realiza mediante el uso de una tuneladora de simple escudo, no presurizado para roca y el revestimiento se realiza mediante la construcción de un anillos de dovelas prefabricadas, la sección del túnel será de aproximadamente 52 m². El sistema de extracción del material de la excavación al exterior del túnel se realiza mediante cinta transportadora.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

El proyecto también incluye la construcción de varias galerías de comunicación entre los túneles de la vía derecha y la vía izquierda, separadas entre sí aproximadamente 400m y de 18m² de diámetro.



Fig. 42 Sección transversal de ambos túneles

La excavación de los túneles se realizó entre los años 2012 y 2016. Durante las fases de proyecto y de ejecución de los túneles no se empleó para el reconocimiento del terreno la técnica de DCD.

Inicialmente se comenzó con la excavación del túnel vía derecha y una vez finalizado se comenzó la excavación de la vía izquierda.

Esta forma de ejecución del túnel permitió realizar modificaciones en la maquina tuneladora e introducir mejoras a la hora de abordar las dificultades encontradas durante la excavación del primer túnel como la abrasividad del terreno y el tratamiento de las zonas de falla encontradas, al tener los datos aproximados de las localizaciones y los datos de abrasividad y afluencia de agua obtenidos del tunel de la via derecha. Permitiendo mejorar los tiempos de ejecución del segundo túnel.

La elección del tipo de tuneladora se realizó basándose en los datos geológicos iniciales contenidos en el proyecto.

La tuneladora.

La tuneladora escogida para llevar a cabo los túneles de Bolaños fue una TBM en roca de simple escudo poseía un diámetro de excavación de 9,9m y 64 cortadores (57 sencillos y 4 dobles) en la cabeza.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Contaba con una longitud de 230m, 2.900 tn de peso y una potencia instalada de 6.150 KW. Con un escudo de 10,4 m de longitud, un par máximo de 19.960 KNm a 2,2 rpm con una velocidad máxima de rotación de 6 rpm.

Poseía con 24 cilindros que proporcionan una capacidad de empuje de 115.270 KN.

La extracción del escombros se realizaba por medio de cangilones que lo depositaban en una cámara de escombros donde mediante una cinta transportadora situada en la parte central se depositaba el material en una cinta transportadora longitudinal que lo extraía al exterior del túnel.

La ventilación en el interior de los túneles se realizó mediante ventilación aspirante, dos ventiladores de 90kw y un desempolvador de 1.200m³/min según Calleja 2017.



Fig. 43 Detalle de la TBM fuera del túnel

Sostenimiento. Anillos de dovelas.

El anillo de dovelas se ideó pensando en conseguir un sostenimiento estanco, se diseñó con siete dovelas más un elemento independiente, la solera que

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

servía como base inferior del túnel y sobre la que irá montada la vía de la TBM durante la fase de excavación.

Las medidas adoptadas para asegurar la estanqueidad fueron doble junta de sellado y dovelas trapezoidales donde se eliminaban las juntas radiales paralelas al eje del túnel.



Fig. 44 Detalle de dovelas en el parque (calleja 2017)

Geología en los túneles

Tal y como describe Calleja (2017) y Mendaña (2013), la zona de los túneles se enmarca dentro del Macizo Ibérico ocupado por la zona de Galicia-Tras-os-Montes. A lo largo de la traza de los túneles se atraviesan las siguientes formaciones geológicas:

- Pizarras grises (SPG) sobre las que descansan pizarras negras rocas con una competencia media de RMR 30-65 con afluencia de agua.
- Cuarcitas y areniscas con filitas con una competencia de RMR 25-50 con mayor afluencia de agua.
- Pizarras laminadas fracturadas (tramo de falla del grupo Paraño).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Pizarras ampelíticas con calidad geotécnica media de RMR 30-60 (Grupo Nogeira).
- Pizarras laminadas de competencia media RMR 30-60 (Grupo Nogeira).

Se incluye detalle del corte geológico

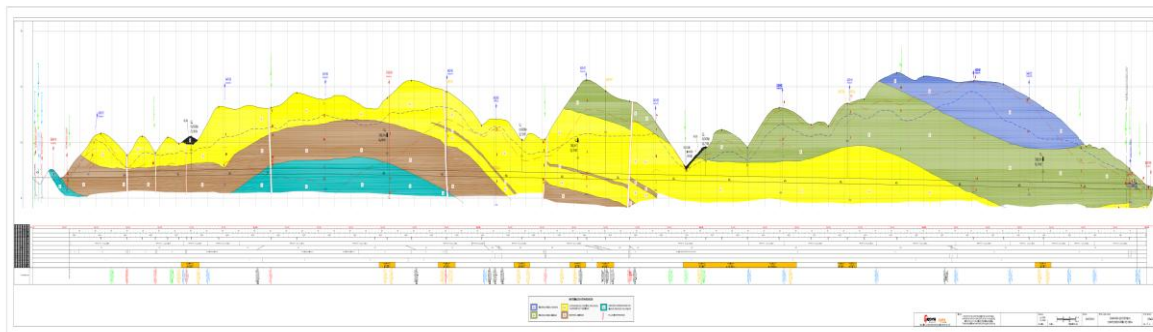


Fig. 45 Corte geológico insertar calleja 2017

Agua en los túneles.

Como se ha indicado antes a lo largo de la traza de los túneles hubo afluencia de agua.

Las formaciones que contenían agua eran principalmente las pizarras grises con caudales entre 10 y 20 l/s llegando a picos de 90l/s y la formación siguiente donde se alternaban filitas con cuarcitas y areniscas fracturadas debido a la proporción de finos se aumentaba el poder de erosión del agua. (Medraño 2017)

Zona de fallas

Las zonas de falla se localizaron en la formación de cuarcitas y areniscas con filitas y en la formación de pizarras laminadas fracturadas, con elevada inestabilidad de los terrenos.

4.3.1 Sondeo vertical y DCD frente a la caracterización del macizo rocoso. Análisis comparativos de costes de investigación.

Una buena caracterización del macizo rocoso es fundamental a la hora de realizar una obra subterránea, permite poder diseñar con mayor precisión el proyecto que posteriormente se va a ejecutar y por lo tanto los sostenimientos

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

a emplear, el personal y las instalaciones como la depuradora o el vertedero. Esto se traduce a la hora de ejecutar la obra en un ahorro de tiempo y de dinero al reducir la incertidumbre sobre aquello que nos vamos a encontrar.

Durante la fase de investigación geológico-geotécnica, se realizó una campaña de sondeos y a partir de la información obtenida se determinó que había una zona de unos 950 m en los que podían aparecer las pizarras ampelíticas (finalmente aparecieron entre el PK 301+400 al PK 302+350).

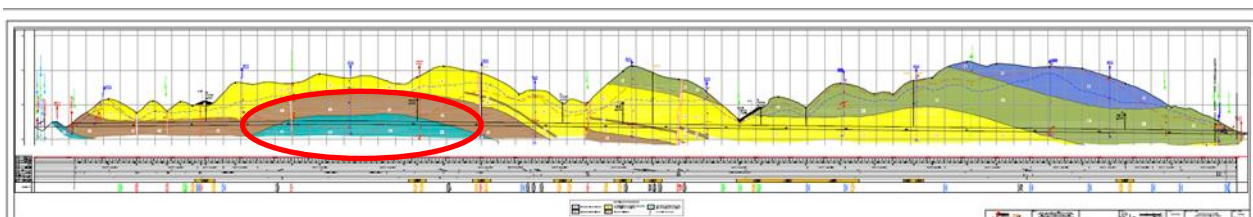


Fig. 46 Zona de pizarras ampelíticas

La acotación de la zona de pizarras con ampelitas era de la máxima importancia porque en esa zona se concentraban tres problemas:

- a) La existencia de sulfuros con la posibilidad de generar lixiviados ácidos en el vertedero lo que llevaba a un tratamiento del material de excavación diferente al resto del túnel Además podía haber algún contenido alto de metales pesados.
- b) La necesidad de una perfecta impermeabilización, lo que implicaba la utilización de un nuevo sistema de relleno del trasdós a base de un bicomponente en vez del tradicional mortero.
- c) El paso de fallas y zonas de inestabilidad con un alto riesgo de atrapamiento de la tuneladora.

Todo ello suponía un sobrecoste con respecto a otras partes del túnel ya que exigía la construcción de un vertedero especial y un tratamiento específico para el material, la utilización de un mortero de relleno especial (al que se le añadía bentonita y una resina bicomponente) y la necesidad de proceder a la consolidación del terreno en la parte del frente mediante resinas bicomponentes de un alto coste.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Para el estudio y caracterización del macizo rocoso en la zona de ampelitas se proyectó la ejecución de 5 sondeos verticales desde superficie, tal como se ve en la Figura 47. La longitud de los sondeos era aproximadamente la siguiente:

PK 301+200, L= 140 m

PK 301+500, L= 120 m

PK 301+850, L= 160 m

PK 302+245, L= 180 m

PK 302+600, L= 190 m

Con estos sondeos se conseguiría acotar la zona de ampelitas además de caracterizar dos fallas existentes (sondeos en los PK 301+500 y 302+600).

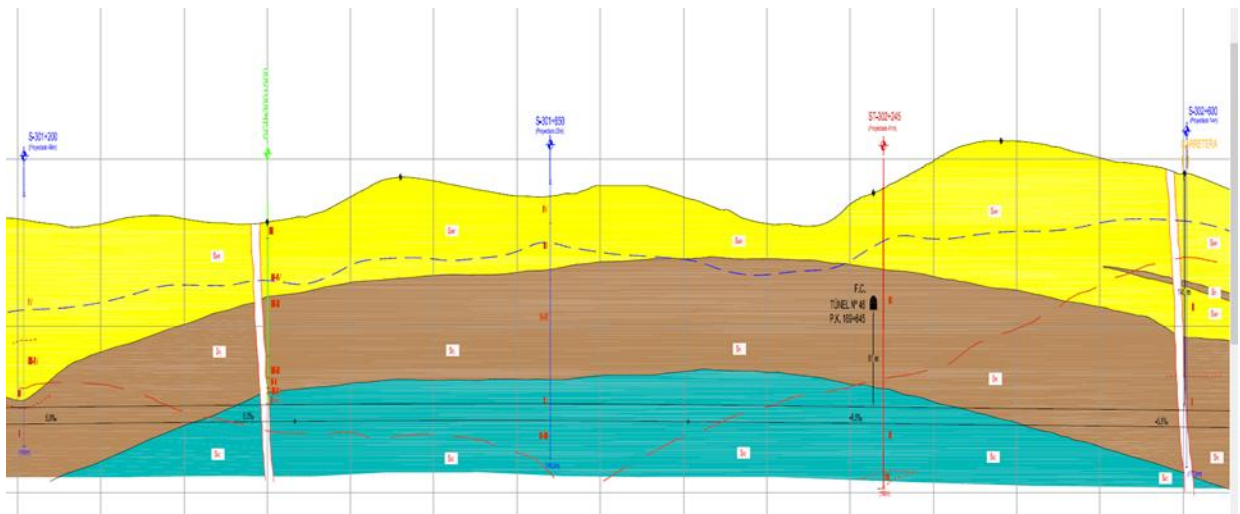


Fig. 47 Sondeos convencionales ejecutados.

Suponiendo un coste inicial por sondeo de 3.000 € correspondiente al traslado y emplazamiento de la máquina y suponiendo un precio de perforación lineal de 100 €/m, el precio total de los sondeos para la investigación geológico-geotécnica ascendería a 94.000 € tal como se ve en la siguiente tabla 19.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 19 Coste sondeos convencionales

Tipo	Número de sondeos	Longitud total (m)	Longitud media (m)	Coste implantación (€)	Coste perforación (€)	Coste total (m)
Vertical boreholes						
L ≤ 50 m	0					
50 m < L ≤ 100 m	0					
100 m < L ≤ 150 m	2	260	130	6.000	26.000	32.000
L ≥ 150 m	3	530	177	9.000	53.000	62.000
TOTAL	5	790				94.000

Es decir, tenemos 790 metros perforados y unos 94.000 € gastados, con lo que el coste unitario de perforación es 120 €/m.

Ahora bien, al disponer de datos de composición química del terreno sólo en 5 puntos (los sondeos), para la caracterización geoquímica del terreno fue necesario hacer un muestreo cada 30 m durante la construcción del túnel. Esto debía hacerse en tiempo real y simultáneamente al avance de la tuneladora y sin interferir con él.

Se tuvo que diseñar un sistema de muestreo en cinta que fuera representativo de toda la masa y llevar las muestras a laboratorios de la Universidad que debían analizarlo en tiempo record para dar el resultado cuanto antes. Hay que tener en cuenta que el material excavado se acopiaba junto la boca del túnel y no era enviado a un vertedero o a otro hasta que no se tenían los resultados de su caracterización geoquímica. Este tipo de tareas introducen un gran estrés en el trabajo día a día.

Si suponemos, que los sondeos convenciones representante unos 10 metros de radio alrededor del mismo, los cinco sondeos caracterizan unos 100 metros del túnel de una longitud total de 1.400 m.

Es decir, tenemos información del 7,14% de la longitud de ese tramo de túnel y un coste de sondeos de 94.000 €. Si hacemos una extrapolación para el 100% del túnel nos daría un coste de 1.316.526 €, o sea, del orden de 1,3 M€.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Como es fácilmente entendible, el sondeo con técnica DCD supone una grandísima ventaja con respecto a los sondeos verticales convencionales ya que, desde un único punto de la superficie se puede hacer un sondeo con recuperación de testigo que permita caracterizar el terreno en toda la longitud del tramo. Con ello se puede tener un análisis geoquímico antes de que comience la construcción del túnel permitiendo una mejor planificación en la definición de la extensión del vertedero especial y del tratamiento a llevar a cabo. Así mismo, se consigue planificar con antelación toda la parte de separación de material inerte y no inerte y su transporte a vertedero así como eliminar toda la parte de muestreo en avance, que conlleva una menor precisión y además interfiere con las tareas en la tuneladora.

Una posible disposición del sondeo DCD es aprovechar la vaguada existente y desde ella comenzar la perforación con una inclinación adecuada hasta ponerse horizontal al alcanzar la traza del túnel tal como se representa en la Figura 48. La longitud total sería de unos 1.600 m de longitud total.

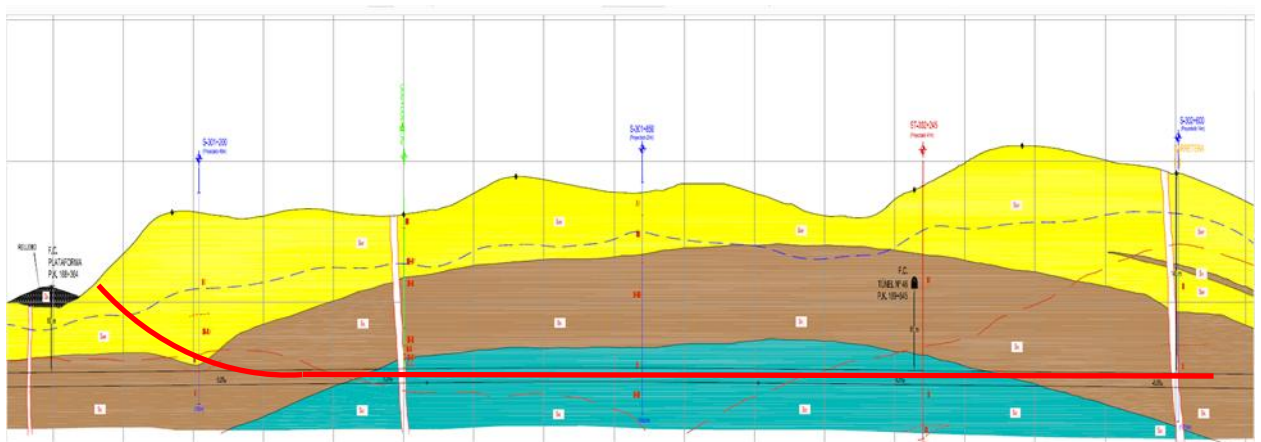


Fig. 48 Sondeo DCD propuesto.

Los precios unitarios para la ejecución de este sondeo serían:

Coste por implantación de máquina: 3.000 €/Ud.

Coste metro perforado con recuperación de testigo en HQ: 100 €/m.

Coste mensual del equipo DCD para trabajos a 24 horas: 100.000 €/mes

Suponiendo avances de perforación de 1.000 m/mes (5m/h, 10h/día, 20 días/mes) se tiene que el coste de alquiler del equipo DCD equivale a 100 €/m.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 20 Coste sondeos DCD

Tipo	Número de sondeos	Longitud total (m)	Longitud media (m)	Coste implantación (€)	Coste perforación (€)	Coste total (m)
Desde emboquilles	0					
Desde superficies	1	1.600	1.600	3.000	320.000	320.000
TOTAL	1	1.600				320.000

Es decir, tenemos 1.600 metros perforados y unos 320.000 € gastados, coste unitario de perforación 202 €/m.

El sondeo direccional sale a 202 €/m con el 100% del túnel analizado frente a los 120 €/m. con el 7,14% del túnel analizado.

Resolución de problemas.

Inyección de resinas de bicomponente

Los problemas de inestabilidades debidas al agua y a los terrenos se solventaron mediante un sistema de inyección de resinas bicomponentes órgano-minerales en el terreno cada cierto número de avances de la tuneladora. Estas inyecciones podían ser variables tanto en cantidad de inyección de la resina, como cada cuantos avances se debía de realizar.

La aplicación de estas resinas no es sencilla, se construyeron unas instalaciones para aplicación de las mismas con capacidad de actuar a ambos lados del eje del túnel sin esperar a que ocurra el vaciado de los dos componentes.

El relleno, por inyección en colas de resinas bicomponentes organominerales en el terreno cada cierto número de avances de la tuneladora, fue el método empleado en los túneles de Bolaños para resolver el problemas de la afluencia de agua del terreno, las sobrexcauciones y la posibilidad de atrapamiento de la maquina al atravesar las distintas formaciones y las zonas de falla pero este método exigió que se adaptara la cabeza de corte de la maquina tuneladora.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES



Fig. 49 Planta de bicomponente Mendaña 2017

El sistema consiste en la inyección de dos componentes A y B, el componente A es una mezcla de bentonita, cemento agua y un aditivo dispersante estabilizador del fraguado y el componente B tiene una base de silicato y se trata de un acelerador de fraguado. Al inyectarse conjuntamente se forma una masa tixotrópica que tiene un tiempo de gelificación menor de un minuto por lo que se proporciona un sostenimiento inmediato y por lo tanto la estabilidad del frente.

Existencia de sulfuros y metales pesados.

El proyecto constructivo se daba tratamiento a los materiales de excavación de los túneles en el vertedero que tenían asociados presencia de sulfuros y metales pesados, mezclando estos materiales con materiales inertes para reducir su concentración, alternado capas de este material con capas de material calizo que contrarrestara el carácter ácido de las aguas de filtración. Y con una capa de arcilla para sellar y así limitar al máximo la entrada de aguas de filtración.

En un estudio de universidad de Oviedo realizado sobre varias muestras de ampelitas determino que el contenido en metales pesados era poco susceptible

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

de generar aguas acidas no obstante, se seguirán las indicaciones de proyecto indicadas anteriormente, cuando se comience la excavación en la zona que se ha definido como susceptible (pk 302+590 y pk 301+300) en el proyecto constructivo, no obstante esa zonificación es aproximada existiendo un alto grado de desconocimiento sobre la longitud del tramo afectado.

4.3.2 Análisis económico de los sobrecostos asociados a las incertidumbres.

El túnel de Bolaños es un túnel formado por dos tubos correspondientes a la Vía Derecha y la Vía Izquierda. Para realizar el análisis de los costes asociados a las incertidumbres comentadas, se analizará a continuación únicamente el túnel correspondiente a la Vía Derecha que fue el primero que se ejecutó y, por tanto, los únicos datos que se tenían en el momento de la excavación eran los del proyecto constructivo.

Como se ha comentado con anterioridad cuando se ejecutó el túnel de la Vía Izquierda ya se tenían datos de la geología y de los problemas durante la excavación del otro túnel lo que permitió realizar mejoras durante la ejecución que permitieron conseguir mejores rendimientos pese a encontrar peores dificultades (2017).

A continuación, se analizará y se cuantificará la incertidumbre asociada a diversos riesgos de tipo geológico-geotécnico, incertidumbres que en buena parte habrían podido ser eliminadas o minimizadas con una mejor campaña de investigación geológica con sondeos DCD al permitir un conocimiento mayor del macizo rocoso a excavar en un primer lugar se cuantificara la incertidumbre sobre la composición geoquímica en las ampelitas y en segundo lugar se cuantificará la incertidumbre de la tuneladora en las zonas inestables.

Cuantificación de la incertidumbre asociada a la composición geoquímica en las pizarras ampelíticas

Como se comentó con anterioridad, la investigación geológica de las formaciones que atravesaría el túnel se hizo a partir de sondeos convencionales. Sondeos verticales ejecutados desde la superficie hasta la

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

cota de la traza del túnel. A partir de 5 de esos sondeos se determinó la existencia de una zona en la que se atravesarían unas pizarras y ampelitas carbonatadas con niveles arenosos volcánicos (Galindo y Carbayo, 2019) susceptibles de contener concentraciones altas de sulfuros y metales pesados (los más altos de Ni y Sb).

Hay que poner de manifiesto que los estudios lito-geoquímicos a partir de las muestras de cinco sondeos tienen una representatividad muy limitada para un tramo de túnel de aproximadamente 1 km de longitud.

Es decir, antes de comenzar la excavación del túnel se tenía evidencia del riesgo geoquímico de presencia de sulfuros y metales pesados en 1000 m de longitud de túnel, sin embargo, se tenía una incertidumbre total sobre la longitud de túnel en el que realmente podría aparecer un material no apto para el vertedero normal de residuos inertes del túnel.

En un estudio hecho por la Universidad de Oviedo, se estimó que los contenidos anormalmente altos en Ni y Sb no eran representativos así que no se contempló nunca la construcción de un vertedero para residuos peligrosos. No obstante, la presencia de sulfuros imponía la necesidad de construir un vertedero para residuos no peligrosos además del vertedero general para residuos inertes.

Esto acarreó diferentes problemas muy importantes durante la construcción del túnel:

- La necesidad de llevar a cabo un muestreo simultáneo a la excavación del túnel y el análisis rápido de las muestras,
- La necesidad de una logística especial en el que el material excavado era acopiado temporalmente en un acopio intermedio hasta que se conocían los resultados de los análisis y se podía determinar si iban al vertedero de residuos inertes o no
- La construcción de un vertedero para residuos no peligrosos (para aquel material que no podía ir al vertedero normal).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Para realizar una cuantificación de la incertidumbre que sea sencilla, no se contemplarán aquí ni los posibles sobrecostes asociados al muestreo ni los posibles sobrecostes por los problemas de logística. Tan sólo se valoran los sobrecostes asociados a la construcción del vertedero de residuos no peligrosos.

Dada la incertidumbre que había antes del comienzo de la obra, la longitud de pizarras ampelíticas no era conocida. Por eso, en el cálculo, se tomará el valor 1.000 m (dato de proyecto).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, una valoración económica de este riesgo para el túnel de vía derecha es la siguiente:

$$100.000 + 100.000 \times 5 = 600.000 \text{ €}$$

El coste del riesgo sobre la composición geoquímica de las pizarras ampelíticas supone seiscientos mil euros (600.000 €).

Cuantificación de la incertidumbre asociada a la disminución del rendimiento de la tuneladora en las zonas inestables

Los avances en terrenos en condiciones de inestabilidad se describen en Mendaña (2017) de donde se extraen el cuadro siguiente.

La excavación del segundo tramo de 950 m, en el que predominaban las pizarras y las ampelitas, llevó un total de 55 días alcanzándose un rendimiento de 17,3 m/día aproximadamente 520 m/mes. Este es un rendimiento bajo, habida cuenta que el rendimiento esperado era de 25 m/día (750 m/mes).

Ahora bien, en los primeros 845 m, los rendimientos fueron muy buenos ya que se alcanzaron los 29 m/día. Sólo en un tramo de 106 m (62,5 m + 43,34 m) los rendimientos fueron extremadamente bajos debido a la debilidad del macizo rocoso y a la tendencia al squeezing. El avance medio fue de 4 m/día y se tardaron 26 días.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 21 Tablas de rendimientos de excavación en cuarcitas y areniscas con filitas y pizarras laminadas.

ZONAS DE FALLA EN CUARCITAS Y ARENISCAS CON FILITAS Y EN PIZARRAS LAMINADAS FRACTIRADAS			
GRUPOS	Nº(Y M. ORIGEN) ULTIMO AVANCE COMPLETO	PRODUCCION Y RENDIMIENTO	
		PERIODO	MEDIA
D	04/06/14....2464(3949M) 11/06/14....2478(3.972M)	23M 44 ANILLOS 8 DIAS	2.8 M/DIA 1,8 ANILLOS/ DIA
B	12/06/14....(3972M) 30/06/14....2695(4320M)	347M 217 ANILLOS 19 DIAS	18.3 M/DIA 11.4 ANILLOS/DIA
C	01/07/14....2696(4320M) 20/07/14...2854(4575M)	25M 160 ANILLOS 20 DIAS	12. M/DIA 8 ANILLOS/DIA
ZONAS DE FALLA EN PIZARRAS LAMINADAS FRACTURADAS			
GRUPOS	Nº(Y M. ORIGEN) ULTIMO AVANCE COMPLETO	PRODUCCION Y RENDIMIENTO	
		PERIODO	MEDIA
A	21/07/14....2855(4575M) 18/08/14...3381(5420M)	845M 529 ANILLOS 29 DIAS	29,1 M/DIA 18,2 ANILLOS/ DIA
D	19/08/14...3382(5420M) 09/09/14....3420(5482M)	62,5M 39 ANILLOS 22 DIAS	2,85 M/DIA 1,8 ANILLOS/DIA
C	10/09/14....3421(5482M) 13/09/14....3447(5525M)	43,34M 27 ANILLOS 4 DIAS	10,8 M/DIA 6,7 ANILLOS/DIA

Donde los avances esperables:

(Grupo A).....ADV > 25 m/dia (>16 anillos/día)

(Grupo B).....Entre 16 y 25 m/dia (de 10 a 16 anillos/día)

(Grupo C).....Entre 8 y 16 m/dia (de 5 a 10 anillos/día)

(Grupo D).....ADV < 8 m/dia (<5 anillos/día)

En las figuras 50 y 51, obtenidas de Mendaña (2017) y Galindo y Carbayo (2019) se señala la zona de pésimo rendimiento.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

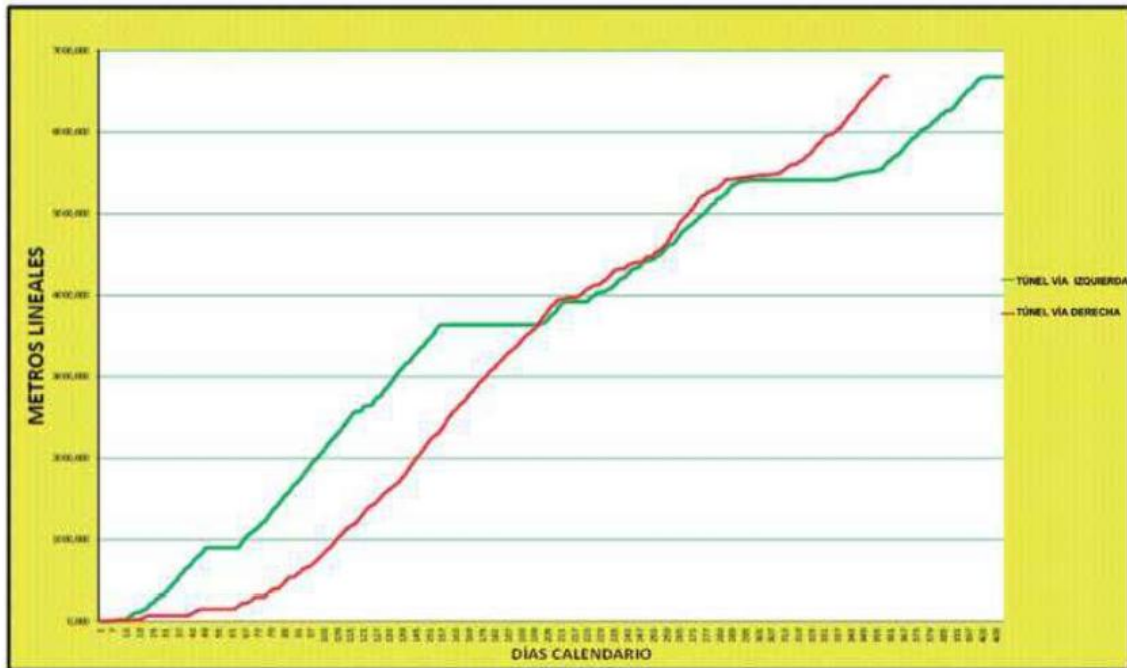


Fig. 50 Avance en metros de los túneles de Bolaños

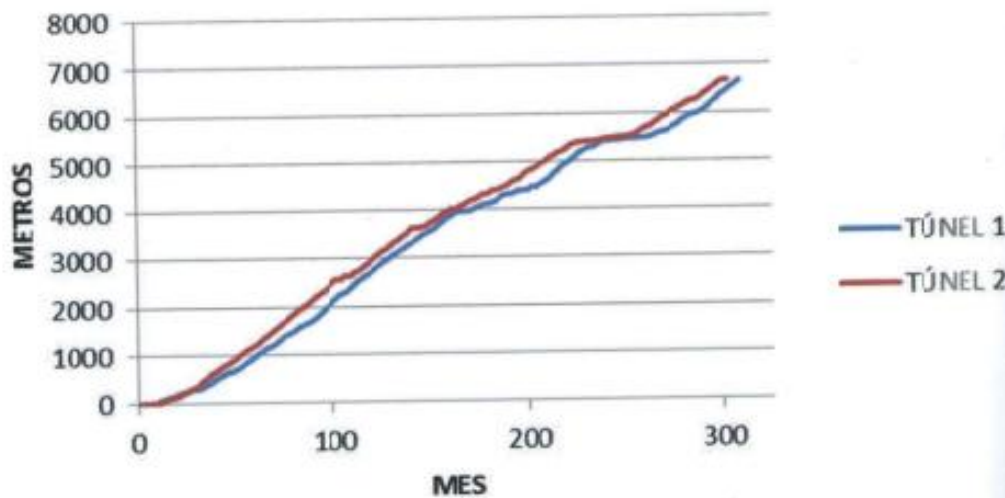


Fig. 51 Comparativa de los túneles

En estas zonas de inestabilidad del frente, era necesario proceder al relleno y consolidación de la zona del frente de excavación mediante resinas bicomponentes, lo que ralentizaba la marcha de la tuneladora.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Esta pérdida de rendimiento, entre otros problemas, produce una mayor duración de la obra. En este caso es fácil cuantificar la incertidumbre ya que se puede estimar fácilmente el sobrecoste debido a los costes fijos.

Tal y como se indica en Mendaña (2017), el avance esperado era de 25 m/día, así que esos 106 m se excavarían en 4 días. Sin embargo, el avance real fue de 4 m/día y se tardaron 26 días en atravesar esa zona. El sobrecoste por un menor rendimiento de la tuneladora fue:

$$(26 \text{ días} \times 30.000) - (4 \times 30.000) = 660.000 \text{ €}$$

El coste la incertidumbre de la tuneladora en las zonas de riesgo se es de seiscientos sesenta mil euros (660.000€).

Cuantificación de la incertidumbre asociada al riesgo de Squeezing y atrapamiento de la tuneladora:

Tal y como se dice en Mendaña (2017), debido a la tendencia al squeezing en diferentes secciones del túnel (alguna de ellas en el tramo de pizarras y ampelitas analizado) hubo riesgo de atrapamiento de la tuneladora ya que incluso el par de la TBM era insuficiente para hacer girar la rueda de corte. La inyección de resinas bicomponente en el frente de excavación fue clave para evitar el atrapamiento de la tuneladora como se ha contado con anterioridad.

En Abascal y Auvray (2009) se describe cómo quedó atrapada una TBM en una formación con tendencia al squeezing. De esa y otras experiencias en la excavación de grandes túneles con TBM en España, se tiene que los trabajos para liberar una TBM que ha quedado atrapada es del orden de T= 30 días.

Por lo tanto, se puede cuantificar el riesgo existente de que se produzca el atrapamiento de la tuneladora de manera sencilla haciéndolo equivalente a los costes fijos generados durante los días de parada de la máquina.

En este caso:

$$30 \text{ días} \times 30.000 \text{ €/día} = 900.000 \text{ €}$$

El riesgo de atrapamiento de la maquina supone novecientos mil euros (900.000€).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Cuantificación de la incertidumbre asociada a un mayor consumo de resinas bicomponente

La inyección de resinas de bicomponente se utilizaban en dos casos. Uno era el relleno del trasdós en la que se introducía una mezcla de cemento, bentonita y agua además de los dos componentes de la resina (retardante y acelerante); en el relleno la proporción de resinas era, según Mendaña y Villanueva (2014), menos del 2% en peso (máximo 23 kg en 1200 kg). Sin embargo, en el caso de inestabilidad en el frente de avance con riesgo de hundimiento y atrapamiento de la tuneladora, se utilizaban sólo las resinas bicomponente. En este caso, las resinas se emplean para consolidar el escombros y material colapsado que pueda haber y rellenar los huecos alrededor de la rueda de corte, lo que hace que se produzca un consumo muy importante de dichas resinas bicomponentes.

En las figuras 52 y 53, extraídas de Galindo y Carbayo (2016) y Galindo y Carbayo (2019), se muestran dos situaciones en las que hubo que inyectar resinas en el frente de excavación.

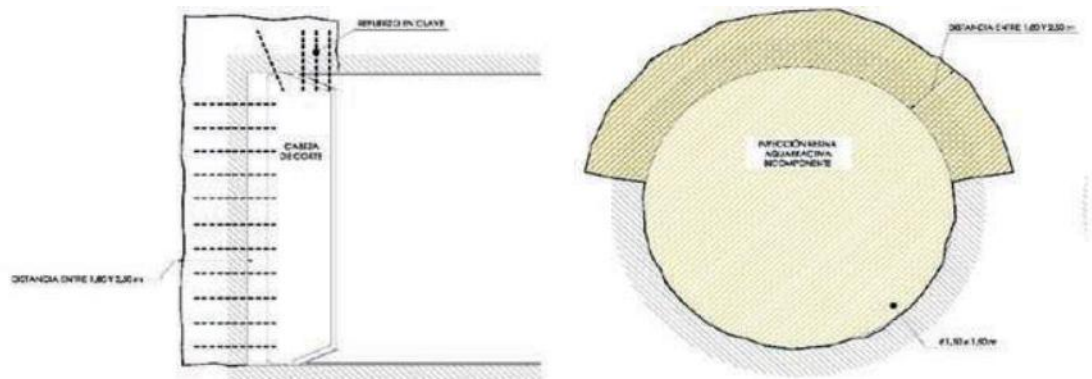


Fig. 52 Galindo y Carbayo (2016).

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

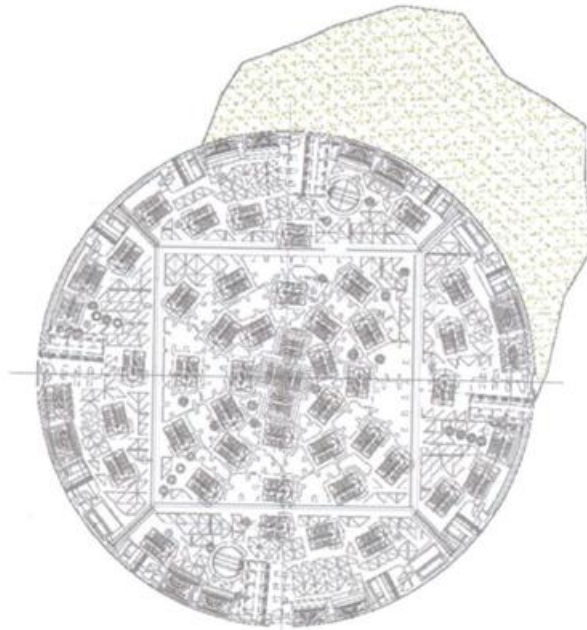


Fig. 53 Galindo y Carbayo 2019.

Según señala en Mendaña (2017), en el último tramo de las pizarras ampelíticas (avances 3.420 a 3.450 según) se consumió del orden del doble de aditivos de inyección de resinas.

Como ya se comentó, una pequeña parte de estas resinas se consumía en el relleno del gap o hueco anular existente entre los anillos de dovelas y el terreno. Por una parte, se perseguía lograr un perfecto contacto entre revestimiento y terreno y, por otra, conseguir la impermeabilización del trasdós del túnel evitando así la entrada de agua.

En el caso estudiado, la longitud del tramo de pizarras con ampelitas estimada en la fase de proyecto era $L_f - L_0 = 1.000$ m. El diámetro de excavación era $D_{exc} = 9,90$ m, mientras que el diámetro exterior del anillo de dovelas era $D_e = 9,49$ m. Por lo tanto, el volumen teórico del trasdós era

$$V_r = 6.244 \text{ m}^3$$

Si la densidad del relleno del trasdós era $d_b = 1,2 \text{ t/m}^3$ y el 2% eran resinas bicomponentes, la masa de resina utilizada para relleno del gap teórico debería ser:

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

$$m_b = 150 \text{ t}$$

que equivale a un consumo unitario de resina de 150 kg/m.

Ahora bien, tanto las sobreexcavaciones producidas como los colapsos del frente que hicieron necesaria la inyección de resina para consolidación, hizo que el consumo de resinas fuera mucho mayor del esperado.

En la figura 54, presentado por Mendaña (2017) se representa el consumo real de resinas en función del avance del túnel lo que permite determinar el consumo real en la zona de las ampelitas cuando se avanzó el primer túnel, el de la vía derecha:

Avance 2.855 (4.575 m) – consumo acumulado 200 t

Avance 3.447 (5.525 m) – consumo acumulado 750 t

El consumo en el tramo fue

$$750 \text{ t} - 200 \text{ t} = 550 \text{ t}$$

Y el consume unitario real:

$$550.000 \text{ kg} / 950 \text{ m} = 580 \text{ kg/m}$$

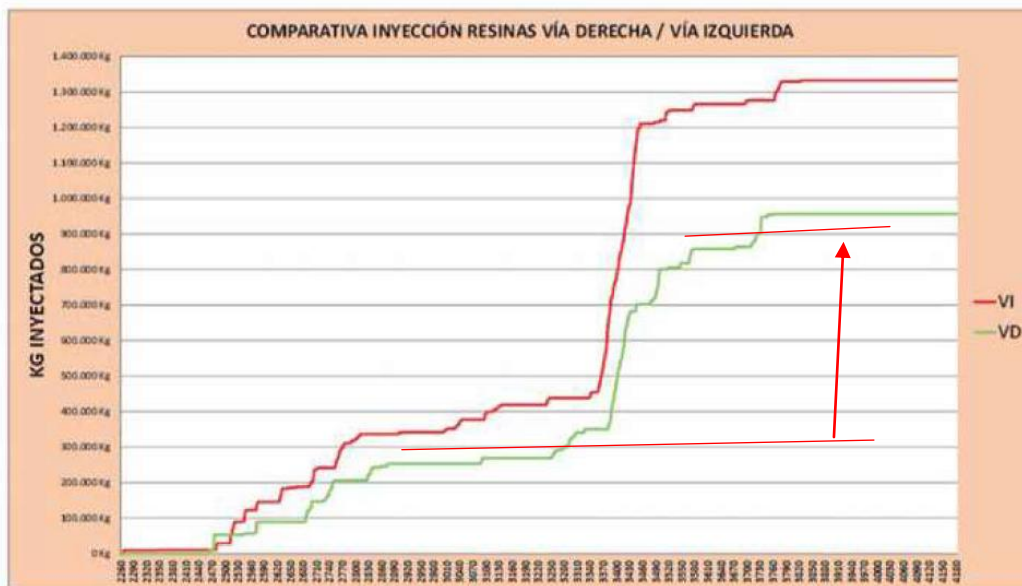


Fig. 54 Comparativa inyección de resinas vía dcha. vs vía izda.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Tal como se publica en la nota de prensa del Gobierno de España y se recoge en Lorenzo (2016) y González (2016), el tratamiento con resinas bicomponente se introdujo como un proyecto modificado cuantificado en unos 19.200.000 €.

Para cuantificar la utilización de resinas y el sobrecoste debido a la incertidumbre, se puede establecer una relación entre el coste total del tratamiento de consolidación del terreno y el consumo total de resinas.

Según Mendaña (2017) se utilizaron un total de 956 t + 1.333 t = 2.289 t. Podemos estimar entonces que el coste total de tratamiento por t de resina empleado es unos 8.400 €/t.

Las resinas como producto son más económicas. De otros túneles se puede afirmar que el coste de las resinas es de aproximadamente 5 €/kg. Realizaremos una estimación de coste. Las resinas bicomponente se venden por pares de garrafas (“pares” o “parejas”) de igual volumen, pero distinto peso al tener distinta densidad. Una de ellas pesa 35 kg y otra pesa 25 kg. El coste del par es 350 €. Por lo tanto, el coste medio por kg es $350 \text{ €} / (35+25)\text{kg} = 5,8 \text{ €/kg}$, lo que es coherente con la cifra anterior si se tiene en cuenta el coste de mano de obra para la aplicación...etc.

En definitiva, se puede cuantificar el sobrecoste en resinas debido al consumo de ellas distinto al del relleno del trasdós y que por lo tanto suponía una incertidumbre y no era cuantificable a priori:

$$(550 - 150) \text{ t} \times 8.400 \text{ €/t} = 3.360.000 \text{ €}$$

En el caso de vía izquierda fue aún mayor, aunque en este caso se está analizando sólo el tubo derecho.

El sobrecoste asociado a la utilización de resinas se valora en tres millones trescientos sesenta mil euros (3.360.000€).

Cuantificación económica total de todas las incertidumbres

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Por lo tanto, la cuantificación de las incertidumbres analizadas en los diferentes apartados que se han expuesto es de cinco millones quinientos veinte mil euros:

$$600.000 + 660.000 + 900.000 + 3.360.000 = 5.520.000 \text{ €}$$

Resumen de las tablas 22 a 26 de costes

Tabla 22 Costes unitarios considerados en el cálculo de los túneles de Bolaños

COSTES UNITARIOS DE LOS SONDEOS	
Implantación del equipo de perforación (€)	3.000
Sondeo convencional (€/m)	100
Sondeo con el sistema DCD (€/m)	200
COSTE UNITARIO DEL VERTEDERO	
Coste de implantación (€)	100.000
Coste unitario del tratamiento (€/m ³)	5
COSTE DE LA MEZCLA PARA RELLENO	
Coste unitario de la mezcla de retardante/acelerante (€/t)	8.400
COSTES FIJOS	
Coste fijo diario de la TBM (€/día)	30.000

Tabla 23 Sobrecoste debido al vertedero para pizarras y ampelitas (Túnel de Bolaños)

	Longitud Lf- Lo (m)	S (m²)	kd (m³/m³)	Volumen Vd (m³)	Coste Total (€)
Ampelitas/pizarras	1.000	78,5	1,27	100.000	600.000
Total					600.000

Tabla 24 Sobrecoste debido a los bajos avances de la tuneladora

	Longitud Lf- Lo (m)	Avance (m/día)	Tiempo empleado (días)	Coste Fijo Total (€)
Pizarras/Ampelitas				
Esperado	106	4	26	780.000
Total	106	25	4	120.000
Sobrecoste total				660.000

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Tabla 25 Sobrecoste total debido a los sobrecoste de atrapamiento

	Dias de parada (dias)	Coste Fijo total(€)
Atrapamiento de la TBM	30	900.000
Total		900.000

Tabla 26 Sobre coste total debido al incremento de consumos de acelerante y retardante en los túneles de Bolaños

Pizarras/ampelitas	Longitud $L_r - L_o$ (m)	Sobrecorte V_r (m³)	Peso mezcla $d_b \times V_d$ (t)	Esperado u (kg/kg)	Peso m_b (t)	Coste Total (€)
Esperado	1.000	6.244	7.500	0,02	150	1.260.000
Actual	1.000				550	4.620.000
Sobrecoste						3.360.000

4.3.3 Resumen túnel Bolaños:

La campaña convencional realizada para la caracterización del tramo fue de 94.000 €, es decir, una inversión en exploración de sólo un 0,71%, valor demasiado bajo respecto los estándares internacionales. Con ella sólo se reconocía un 10,5% del total de la longitud del tramo.

Con una campaña con técnica DCD se habría reconocido el 100% del túnel con un coste de 320.000 €, sensiblemente mayor que la realizada. Además, la inversión en exploración sería del 2,21% más acorde con los estándares internacionales.

Con la campaña DCD se elimina una incertidumbre cuantificada en 5.520.000 €. Esto supone que por cada 1 € de más que conlleva la técnica DCD, se eliminan 24 € de incertidumbre.

Visto de otra manera, tenemos que la aplicación de la técnica DCD elimina una incertidumbre cuantificable en 5.811 € por metro de tramo de túnel analizado.

**VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN
LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES**

Este es un valor relevante, teniendo en cuenta que el coste total de ejecución está en torno a los 14.000 €/m.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas de futuro.

5 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

El objetivo de la tesis era demostrar las ventajas que, frente a los sondeos convencionales, tendría la utilización de la técnica DCD en la investigación geológica, geotécnica e hidrogeológica en los proyectos de túneles.

Para ello, en primer lugar, se ha definido una metodología para la evaluación de la técnica DCD aplicada a los túneles a) comparándola con la técnica convencional de sondeos verticales y b) cuantificando económicamente la incertidumbre que se elimina. Después se han seleccionado tres túneles representativos, con diferentes tipos de incertidumbre y se ha aplicado la metodología de evaluación propuesta.

A partir de la investigación se ha llegado a las siguientes conclusiones:

a) Respecto a la técnica

- Es una técnica especialmente útil en la investigación geológica y geotécnica en los proyectos de túneles porque permite dirigir el sondeo y perforar un tramo horizontal sobre la misma traza del túnel.
- Se puede utilizar para la caracterización geológica, geotécnica e hidrogeológica ya que se obtiene la máxima información al recuperar un testigo continuo sobre la misma traza del túnel.
- A partir de un mejor conocimiento geológico-geotécnico, se reduce la incertidumbre en la fase de proyecto lo que permite estimar el coste del túnel con una mayor precisión
- En los casos estudiados la cuantificación de la incertidumbre es del orden de 6.000 € por m de túnel analizado

b) Respecto al coste de la técnica

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- En términos absolutos la técnica DCD es más cara que la técnica convencional de sondeos verticales desde superficie, siendo su coste entre 1,5 y 3,5 veces según los casos analizados
- No obstante, en términos relativos, su coste es proporcionalmente menor ya que permite reconocer el 100% de la longitud del tramo de túnel frente a la técnica convencional que reconoce del orden de un 10%.

c) Respecto a su utilización en proyectos de túneles

- En el caso de túneles poco profundos, se podría caracterizar el 100% de la longitud del túnel; la técnica estaría especialmente indicada en los túneles de metro por debajo de las grandes ciudades.
- En el caso de túneles profundos, la técnica se podría utilizar en aquellos tramos especialmente complejos en los que se puedan presentar problemas graves como materiales fluyentes (squeezing), presencia de fallas, presencia de gases, rocas muy abrasivas...etc.

Como perspectivas de futuro se pueden señalar, al menos, dos:

- Una en un nivel más teórico, profundizando en la investigación y estudiando qué otras ventajas se obtienen a partir de la recuperación del testigo continuo y la información que se obtiene de la traza real del túnel
- Otra en un nivel más práctico, proponiendo la ejecución de un sondeo con técnica DCD en un proyecto de túnel en España para constatar los buenos resultados que se deducen de la investigación en esta tesis

Bibliografía

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

BIBLIOGRAFIA

Abascal A., Auvray J.M. 2009. Atrapamiento de escudo de cola en la formación Formigoso. Túneles de Pajares. Ed.: ADIF, Madrid 2009, pp. 509-524.

Abascal Aznar, A. (2009). Herramientas de corte en TBM para roca dura. Consumo de cortadores por formación geológica. En: Pando, L., López Fernández, C. y De la Rubia Mir, L. (eds.), Jornadas Técnicas de la Variante de Pajares. ADIF - Universidad de Oviedo, Oviedo, 173-179.

Ayhan M., Aydın D., Şefik M., Imamoglu M.S., Cogalan M., Karakus A. (2018). Investigation of a methane flare during the excavation of the Silvan irrigation tunnel, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78(4), 1-12.

Barla G., Pelizza S. (2000): TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions, GEOENG 2000, Melbourne (Australia), 19-24 November, 20 pages.

Benardos, A., Paraskevopoulou, C., Diederichs, M. (2013). Assessing and benchmarking the construction cost of tunnels. *GEO Montréal*.

Bieniawski, Z.T. (1989), *Engineering Rock Mass Classifications*, Wiley & Sons, New York, USA.

Boden A, Bridges G, Tsang CK and Zu J (2018) Experience of horizontal direction coring in Hong Kong. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering* 171(4): 179–185.

Calleja M. 2017. Ejecución de túneles Bolaños con TBM de roca simple escudo dentro del plan de construcción del AVE Madrid-Galicia. *Revista de Obras Públicas*, nº 3590, pp. 25-37

Camus T., Fontanille G., Champeaux JL, Margareto J., Fajardo F. 2011. Single shield TBM performance in Carboniferous rock. The case study of Pajares-Sotiello.

Carter, T.G. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. In *Proceedings of the 4th International Rock Mechanics and Rock Engineering Conference*, Torino, Italy, 1–4 December 1992.

Castells E., Perea J.L., Bujalance F., Varela F. (2006). Túnel de Formigueiro y Túnel de Burata. *Ingeopres*, 154 (4), 44-49. (En español).

Castells E. (2008). Aplicación de sondeos horizontales para determinar las características del terreno antes o durante la excavación del túnel. *Sistemas de medición de desviación de sondeos*. *Ingeopres*, 170 (5), 22-26. (En español).

Castells E. (2018). “Casos singulares en Mecánica de Rocas: Túnel de Burata”. XVI Jornada Técnica Anual de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas. Madrid, April 2018, pp. 1- 44 (En español).

CASTELLO G., CHANTRON L., FABRE D. and SEM M. (1999): Analysis of the TBM Performances for the Excavation of the Trasvase Guadiaro-Majaceite,

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Province of Cadiz, Spain. ITA World Tunnel Congress '99, Oslo (Norway), 9 pages.

Celada B., Fernández M., Rodríguez A., Tardáguila I. 2010. Definición preliminar de las secciones tipo de sostenimiento en los túneles proyectados por métodos convencionales. *Ingeopresn*º 192, Mayo 2010.

Civil Engineering and Development Department of Hong Kong SAR (2005): Site Investigation for Tunnel. *Works. Technical Guidance Note No 24*.

Cornejo Álvarez, L. (2007). Nuevas Tendencias en los Revestimientos de Túneles, *Ingeniería de túneles vol 13*, Ed. Proyectos - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain.

Cunningham, B., Tam, J.K.W., Tattersall, J.W., Nip, G.C.Y. & Seit, R.K.F., 2012a. "Planning of Horizontal Directional Coring for Deep Subsea Tunnel", Proceeding of the HKIE Civil Division International Conference 2012 – innovation and Creativity of infrastructure Development for Quality Cities. HKIE (Civil Division).

Cunningham, B., Tam, J.K.W., Tattersall, J.W. & Seit R.K F., 2012b. "Horizontal Directional Coring (HDC) and Groundwater Inflow Testing for Deep Subsea Tunnels", Proceeding of the HKIE Geotechnical Division 32 Annual Seminar – Geotechnical Aspects of Tunnelling for Infrastructure. HKIE (Geotechnical Division).

Del Olmo J., Álvarez J.R. 2009. Ensayos geológicos de investigación a grandes profundidades. Variante de Pajares, (Eds.), Pando, López y de la Rubia, ADIF y Universidad de Oviedo, Oviedo, pp. 19-28.

Díaz-Aguado M.B., García de Muro J., Rodríguez R. 2014. Main difficulties and lessons learnt during the TBM excavation in shales in the North portal of Pajares tunnels. In Proc. Eurock 2014, Vigo, Spain. Alejano, Perucho, Olalla and Jiménez Eds. Taylor & Francis, London, 2014.

El Tani, M., 1999. "Water Inflow into Tunnels." Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES 1999, Oslo, pp. 61-70, Balkema.

Efron, N., Read, M. 2012. Analysing international tunnel costs: An interactive qualifying project. Report, Worcester Polytechnic Institute, USA.

Estefanía, C., Fuldain, J. A., Laguna, J. A., & Arlandi, M. (2010). Payment for tunnel construction by means of the Standard Rate method: Experience on the Bilbao South Metropolitan By-pass. *Association Canadian Tunnels ACT*, 12–26.

Flyvbjerg, B. What you should know about megaprojects and why: An overview. *Proj. Manag. J.* 2014, 45, 6–19.

Flyvbjerg, B., Bruzelius, N. and van Wee, B. 2008. Comparison of capital costs per route-kilometre in urban rail, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 8(1): 17-30.

Flyvbjerg, B., Holm, M.S. and Buhl, S.L. 2004. What Causes Cost Overrun in Transport Infrastructure Projects?, *Transport Reviews*, 24(1): 3–18.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Galindo F, Carbayo R. 2016. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia. Construcción del tramo Vilariño-Campobecerros. Ingeopres nº 255, 2016, pp. 10-14.

Galindo F, Carbayo R. 2019. Final de la Excavación de los túneles de Bolaños – Uso de métodos innovadores en su ejecución. In: Ingeotúneles 26, Chapter 9, Ed. Politechnical University of Madrid, pp. 207-231.

García de Muro J. 2009. Lote 3: Excavación en lutitas y pizarras carbonosas de San Emiliano. In: Jornadas Técnicas, Variante de Pajares, (Eds.), Pando, López y de la Rubia, ADIF y Universidad de Oviedo, Oviedo, pp. 181–190.

González P. 2016. El Gobierno libera 19 millones para que la tuneladora del AVE reanude su trabajo. La Voz de Galicia, 23rd April, 2016.

Goodman, R.E., Moye D.G., van Schalkwyk A., and Javandel I. 1965. "Groundwater Inflows during Tunnel Driving". Engineering Geology, 1965, vol 2, pp. 39-56.

Gordón G. 2014. Relleno con lechada bicomponente del gap de los anillos de la tuneladora La Peregrina, en los túneles de Bolaños. Ingeopres nº 238, 2014, pp. 38-40

Henson R. 2016. Tunnelling. Spanish Lessons. New Civil Engineering, October 2016, on-line.

HM Treasury. 2010. Infrastructure cost review: Technical report, Infrastructure UK, London, UK.

Hoek, E. 2001. Big tunnels in bad rock, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9): 726-740.

Howard, A., Salisbury, N., Tunison, S. (2005). Horizontal geotechnical investigations for tunneling. *Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 792–803.

Isaksson T. (2002). Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects. *Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.*

Isaksson, T., Stille, H. 2005. Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation, Rock Mechanics and Rock Engineering, 38(5): 373-398

Kanjlia V.K., Ramamurthy T., Wahi P.P. and Gupta A.C. Eds. Central Board of Irrigation & Power New Delhi, India. pp 1183-1191.

Kaplin J, Dowdell R., Tokle V. (1998). Directional core drilling for the Metro West Water Supply Tunnel. North American Tunneling. ISBN 9054109319.

Kemp, John. (14 July, 2014). The real shale revolution: Kemp. *Reuters*. Retrieved from <http://www.reuters.com/article/us-shale-usa-kemp-idUSKBN0FJ26220140714>

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

- Lam Y.C., Tam K.W., Lo Y.C. (2008). "Ground Investigation for Tunnel Works", Proceeding of 28th Annual Seminar, Hong Kong Institution of Engineers, Geotechnical Division. Hong Kong, 2008.
- Langford, J.C.; Diederichs, M.S. Support design for excavations in brittle rock using a Global Response Surface Method. *Rock Mech. Rock Eng.* 2014.
- Lee, S. C., Ahn, K. C., Lee, S. K., Nam, H. L., Suh, Y. H., Lee, S. Y., Park, Y. J., Kim, S. M. (2010). Drill and Blast Method for South Korea's Longest Twin-Tube Subsea Road Tunnel. *Association Canadienne Des Tunnels (ACT)*, 2–9.
- Lindhjem R., (2007): Economical benefit by use of the Devico method for sidetracking and directional core drilling in deep hole exploration. *Master's Thesis, NTNU*.
- Lindhjem R., Tai C. (2008). "Directional core drilling in geotechnical exploration In Underground Facilities for Better Environment and Safety". Proceedings of the World Tunnel Congress 2008.
- Lindhjem, R., Tai, C. (2009). Directional core drilling for geotechnical exploration. *Hong Kong Tunnelling Conference 2009*, 3, 27–34.
- López-Fernández C., Arias D., Fernández -Viejo G., Pando L., Castells E. (2013). Surface Subsidence Induced by Groundwater Drainage Tunneling in Granite Residual Soils (Burata Railway Tunnel, Spain). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, May 2013, pp 821-824.
- Lorenzo B. 2016. El Consejo de Ministros autoriza obras complementarias en el túnel de Bolaños. *El Faro de Vigo*, 22nd April, 2016.
- Membah, J.; Asa, E. Estimating cost for transportation tunnel projects: A systematic literature review. *Int. J. Constr. Manag.* 2015, 15, 196–218
- Mendaña F., Del Río J.A. 1979. Excavation and support of the Padrún tunnel, Spain. In: *Tunnelling'79, Proc. Of the 2nd International Symposium London*, 12-16 March, 1979, pp. 193, 199.
- Mendaña F., Fernández R. 2009. Tuneladoras en Pajares. In: ADIF (ed.) *Túneles de Pajares*, Madrid, pp. 127 – 152.
- Mendaña F, Pindado C. 2013. Relleno con bicomponente del gap de los anillos de dovelas en los escudos no presurizados, *Revista de Obras Públicas*, nº 3546, pp. 21-35
- Mendaña F, Villanueva JP. 2014. Impermeabilidad y calidad general del revestimiento en los túneles construidos con TBM. *Revista de Obras Públicas* nº 35557, 2014, pp. 7 – 29.
- Mendaña F. 2017. Túneles de Bolaños. Estabilización de zonas de falla con resinas y relleno con bicomponente inyectado a presión del trasdós del revestimiento de anillos de dovelas en un escudo simple para roca dura. *Revista de Obras Públicas* nº 3590, 2017, pp. 46 – 67.
- Méndez L.A., Rabadán P., Sedano F. 2009. fabricación de hormigones de alta resistencia para dovelas. In: *Jornadas Técnicas, Variante de Pajares*, (Eds.),

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Pando, López y de la Rubia, ADIF y Universidad de Oviedo, Oviedo, pp. 237–245.

Moret, Y.; Einstein, H.H. Construction cost and duration uncertainty model: Application to high-speed rail line project. *J. Constr. Eng. Manag.* 2016, 142, 501–601.

Paraskevopoulou, C. Construction (Excavation and Temporary Support) Cost Analysis of Greek Road Tunnels. Diploma Thesis, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2011.

Paraskevopoulou, C., Boutsis, G. (2020). Cost overruns in tunnelling projects: Investigating the impact of geological and geotechnical uncertainty using case studies. *Infrastructures*, 5(9).
<https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES5090073>

Paraskevopoulou, C.; Benardos, A. Assessing the construction cost of tunnel projects. *Tunn. Undergr. Space Technol. J.* 2013, 38, 497–505.

PELIZZA, S., PEILA, D., ORESTE, P. P., OGGERI, C., & Vinai, R. (2002). Environmental aspects of underground construction and exploration for underground structures - state of the art s. ACUUS 2002 International Conference.

Petroutsatou, C. and Lambropoulos, S. 2005. Quick cost pre-estimation of road tunnels, 2nd Hellenic Congress of Roads, Technical Chamber of Greece, Volos, Greece.

Petroutsatou, K., Georgopoulos, E., Lambropoulos, S., Pantouvakis, J.-P., 2012. Early cost estimating of road tunnel construction using neural networks. *J. Constr. Eng. Manag.* 138, 679–687.

Petroutsatou, K., Maravas, A., Saramourtsis, A. (2021). A lifecycle model for estimating road tunnel cost. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111(January), 103858. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103858>

Rodríguez R., Lombardía C. 2010. Analysis of methane emissions in a tunnel excavated through Carboniferous strata based on underground coal mining experience. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (2010), pp. 456–468.

Rodríguez, R., Díaz-Aguado, M.B., Lombardía, C., 2012. Compensation of CH₄ emissions during tunneling works in Asturias: a proposal with benefits both for local councils and for the affected population. *J. Environ. Manage.* 104, 175–185.

Rodríguez R., Pérez F. 2021. Carbon foot print evaluation in tunneling construction using conventional methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108 (2021), 103704.

Rodríguez R., Díaz-Aguado M.B. (2011). Environmental impact due to tunnels excavation: a key aspect for its success. Experiences in Asturias (Northern Spain). AFTES International Congress “Underground spaces for tomorrow”. Lyon, France, 17-19 October 2011.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

Rodríguez, M. A., Rojo, F. C. (2010). ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN LOS TÚNELES Y SU INFLUENCIA EN EL COSTE Y PLAZO DE EJECUCIÓN. *JORNADAS DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DE TÚNELES*, 1–20.

Rodriguez, R., Fernández, V., Fernández, P. (2021). Reduction of the uncertainties in the tunnel support definition from geotechnical characterization by means of directional core drilling. *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21)*.

Rodriguez R., Fernández P., Pérez F., Malagón B. (2019). "Relevance of the concrete used for the support and lining in tunnels excavated through different rockmasses from safety, economic and environmental point of view". The 2019 International Conference on Tunnels and Underground Spaces - ICTUS19, Korea, September 17 - 21, 2019.

Rodríguez R., Pérez F. (2021). Carbon footprint evaluation in tunneling construction using conventional methods. *Tunnelling and Underground Space Technology* 108 (2021) 103704.

Romana M. (2014). "Update of 1989 Bieniawski's RMR guidelines for tunnel excavation and support". *EUROCK 2014 - Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*. Vigo, Spain, 2014.

Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Gharahbagh, E. A., Mojtabai, N. (2013). Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.08.002>

Rostami, J., Sepehrmanesh, M., Gharahbagh, E.A., Mojtabai, N., 2013. Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data, *Tunnelling and Underground Space Technology* 33: 22–33.

Segura P., Martínez J.F. 2009. Hormigones de alta resistencia en el tramo II del túnel de Pajares. In: ADIF (ed.) *Túneles de Pajares*, Madrid, pp. 35-50.

Sinfield, J.V., Einstein H.H. 1997. Tunnel construction costs for tube transportation systems, *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1): 48-57.

Tai R., Chan A., Seit R. (2009). Planning of deep sewerage tunnels in Hong Kong. *ITA WTC 2009 Congress in Budapest, Hungary*

Torbado S. 2009. Planta de dovelas: definición, instalaciones, proceso de fabricación, materiales y producción. In: *Jornadas Técnicas, Variante de Pajares*, (Eds.), Pando, López y de la Rubia, ADIF y Universidad de Oviedo, Oviedo, pp. 229–236

Tsang C.K., Chau S.F., Chan J. (2015). Subsea horizontal directional coring (HDC). *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* 47 (3), 31-36.

Tsang, C. K., Chau, S. F., Chan, J. (2016). Subsea Horizontal Directional Coring (HDC). *Geotechnical Engineering*, 47(3), 31–36.

VENTAJAS DE LOS SONDEOS DIRECCIONALES CON RECUPERACIÓN DE TESTIGO EN LOS PROYECTOS DE EJECUCIÓN DE TÚNELES

U.S. National Committee on Tunnelling Technology (1984) Geotechnical site investigations for underground projects. National Academy of Engineering, Washington D.C.

V. Fernández (2015). Presentación general “Nuevas técnicas de perforaciones profundas”, Metallic Mining Hall-Seville Spain

Van der PouwKraan, M.C. Rock Mass Behavioral Uncertainty: Implications for Hard Rock Tunnel Geotechnical Baseline Reports. Master’s Thesis, Queen’s University, Kingston, ON, Canada, 2014.

Wang, F., Ren, T., Tu, S., Hungerford, F., Aziz, N. (2012). Implementation of underground longhole directional drilling technology for greenhouse gas mitigation in Chinese coal mines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11, 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.09.006>

Yau, K.; Paraskevopoulou, C.; Konstantis, S. Spatial variability of karst and effect on tunnel lining and water inflow. A probabilistic approach. *Tunn. Undergr. Space Technol. J.* 2020, 97, 103248

Yu, J.; Zhong, D.; Ren, B.; Tong, D.; Hong, K. Probabilistic risk analysis of diversion tunnel construction simulation. *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2017, 32, 748–771.

Zhao, J., Liu, Q., Lee, K.W., Choa, V., Teh C.I. 1999. Underground cavern development in the Jurong sedimentary rock formation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 449-459.