

La abrasividad de los terrenos: un parámetro básico para la estimación de los costes de los túneles construidos con tuneladoras

Abrasiveness of ground: a key parameter to estimate the costs of tunnelling with TBMS

Revista de Obras Públicas
nº 3.538. Año 159
Diciembre 2012
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SPICC, S.L. Madrid (España). fms@spicc.e.telefonica.net

Resumen: La abrasividad de los terrenos de los túneles construidos con tuneladoras es un factor determinante del coste cuando los desgastes reiterados de las estructuras de la máquina, junto con el elevado consumo de herramientas de corte alcanzan cifras significativas. Por ello, el autor se refiere, por una parte, a las insuficientes experiencias desarrolladas hasta ahora en España para el control de la abrasividad así como, a los métodos que actualmente se están aplicando con interés creciente en toda Europa para una medición sistemática de la misma a lo largo de la obra. Propone el análisis por difracción de Rayos X de la muestra global del material excavado por una TBM como sistema que permite una evaluación estadística de este nuevo parámetro a considerar en los costes de un túnel y estudia, por otra parte, la necesidad de abordar también este problema a nivel de proyecto, para poder establecer un control adecuado entre previsiones y resultados. Finalmente expone los controles llevados a cabo en algunas obras españolas recientes, proponiendo un conjunto de medidas necesarias para evaluar debidamente los desgastes reiterados de la TBM a lo largo de la obra.

Palabras Clave: Desgastes estructurales; Consumo de herramientas; Modelos de estudio de costes; Ensayos en rocas duras; Ensayo Cerchar (Índice CAI); Modal análisis e Índice Equ

Abstract: Ground abrasiveness in tunnels excavated with TBM is a decisive factor in the overall project cost, if wear on the machine structure and an elevated consumption of cutting tools reach considerable rates. The present report refers, on the one hand, to the low experience in abrasiveness control in Spain and, on the other hand, to abrasiveness determination methods that are currently and increasingly being used in Europe to evaluate the abrasiveness systematically, during all the project phases. The report suggests the use of X-Ray Diffraction Technology on a global sample of ground excavated by a TBM, as the method that allows evaluating statistically the abrasiveness, a parameter that has to be considered in the tunnel costs calculation. Furthermore, the report examines the need to consider this matter during the design phase of the Project, in order to set a proper control between the predicted values and the real values. Finally, this report gives an approach to the different control systems used in some Spanish tunnels, and propose a group of measures to fulfill the cost evaluation of the repeated wear of the TBM along the tunnel construction.

Keywords: Structural Wear; Tool wear; Cost study models; Hard rock tests; Cerchar Test (CAI Index); Modal analysis and Equ Index

1. Introducción

La baja calidad de las estimaciones del coste de la construcción mecanizada de túneles, que se venían presentando a las licitaciones internacionales, hizo que el Presidente de ROBBINS Co. USA, uno de los fabricantes de tuneladoras de máximo nivel internacional, se expresase en los duros términos siguientes: "la

1. Introduction

The President of ROBBINS Co. USA, one of the top worldwide TBM manufacturers, complained about the low quality of cost estimates that have been usually submitted for international TBM tunnelling project bidding, and made the following statement: "tolerance to inaccurate estimates seriously

tolerancia en las estimaciones inexactas está dañando gravemente nuestro prestigio profesional y el de nuestra industria”.

Pues bien, en los 15 años del periodo 1996-2011, en los que tuvo lugar en España el mayor desarrollo de la construcción mecanizada de túneles, logrado jamás en país alguno, hemos intentado, con resultados de interés creciente, colaborar al perfeccionamiento de los estudios de costes de construcción de los túneles de los proyectos de las grandes Infraestructuras modernas del transporte.

Con esos antecedentes, el objeto de este artículo es exponer los resultados de nuestras experiencias que, con empleo de medios de análisis de capacidad creciente (que hemos ensayado de acuerdo con los nuevos criterios y orientaciones de diversos expertos europeos, con cuya colaboración hemos tenido la suerte de contar) entendemos pueden tener un interés general para valorar adecuadamente los diversos grupos de recursos en que suelen descomponerse los estudios del coste de un túnel para su estimación.

2. Las bases de partida

Con carácter general, puede decirse que, además del coste de la **Mano de Obra** (o Recursos humanos), los dos grupos más importantes de los Recursos materiales del coste restante de un túnel construido con TBM son: por una parte, la **Amortización técnica** aplicada a la obra (la parte del “Valor de mercado de la TBM”, que equivale a la reducción de la “vida técnica” por su utilización en la obra) y, por otra, los **Costes de los Desgastes reiterados, incluidos los de las Reparaciones** tanto las realizadas a lo largo del proceso constructivo, como la general llevada a cabo a su terminación.

Salvo las fases parciales necesarias para atravesar accidentes geológicos del trazado, la construcción de túneles con TBMs **no es un proceso continuo, si no, más bien, cíclico: las operaciones principales de colocación del revestimiento** (o del sostenimiento, según el tipo de máquina de que se trate) siguen a las de **excavación para el avance**, debiendo añadir, a los tiempos necesarios para ellas los de las **paradas esperables** y las debidas a **causas imprevistas aleatorias**, cuya frecuencia ha de ser estimada según el “know how” del experto.

damages our professional prestige and our industry reputation”.

Between 1996 and 2011 in Spain took place the greatest development of tunnelling with mechanized methods ever achieved in any other country. During these 15 years, we have tried to collaborate on improving cost estimate studies concerning tunnelling projects of the greatest nationwide transport lines, and obtained increasingly interesting results.

With this background, the main object of this article is to present the results obtained from our experiences that we consider useful for determining the different groups of sources into which the cost estimate study of the tunnel project is divided. Such experiences are based on using new methods of increasing capacity, according to several international experts indications.

2. Baseline

Generally, it can be said that the most important terms to consider in the cost estimation of TBM tunnelling projects apart from the personnel cost are: the technical amortization applied to the construction works (i.e. market value of the TBM, equivalent to the working life depreciation after being used) and the **costs due to repeated wear on tools and structure, including the costs due to all the intermediate refurbishment during tunnelling operations** and the final **general** repairing once the excavation is completed.

*With the exception of the advance driven through singular geological features along the alignment, tunnelling with TBMs is not a continuous but a cyclical process: Besides the main operations of advance excavation and lining installation (or supporting material, depending on the type of TBM used), the necessary time losses due to **scheduled and non-scheduled stops** must be added, the frequency of which has to be estimated according to the expert's know how.*

*This is the baseline for programming the latest **Cost study models**, that usually include at least, the following Input Data Tables: Ground data / Main parameters of the TBM (Torque and Thrust); Modules for calculating the penetration / Modules for timing / performance (Learning curve; Number of working*

Así puede decirse que es el esquema básico que utilizan los modernos **Modelos de estudio de costes**, a partir de las configuraciones estándar de sus "softwares", que suelen incluir, al menos, las Tablas de entrada siguientes: Datos del terreno / Parámetros básicos de la TBM (Par de giro y Empuje); Módulos de cálculo de la penetración / Módulos de tiempos s/ ritmo del trabajo (Curva de aprendizaje; Número de turnos, etc) / Módulos de las paradas programadas (o del sistema) y Módulos estadísticos de paradas por causas aleatorias.

Pues bien, con todo ello, hay que reconocer que cualquiera de los Modelos en uso permite una buena valoración de la **Mano de Obra**, (recurso cuya importancia prioritaria no vamos a discutir), a la vez que facilita, por supuesto, la de los recursos que me permito llamar complementarios (**Materiales incorporados / Materiales fungibles / Energía y Varios**) con el único fin de destacar la inconveniencia de pretender incluir en estos Modelos los Módulos teóricos correspondientes a la **Amortización técnica**, por una parte, y a los que hemos llamado **Desgastes reiterados**, por otra, los dos grupos de componentes del coste, de importancia tan relevante como la de la **Mano de Obra** que, en nuestra opinión, deben estudiarse en cada caso, por lo que el objetivo del presente artículo es presentar como debe hacerse la evaluación de uno de ellos, el **Coste de los desgastes reiterados de una TBMs**.

3. Desgastes de las TBMs por abrasividad de los terrenos durante la ejecución de un túnel

Como resultado de los contactos mantenidos sobre experiencias modernas relativas a la abrasividad de los diferentes tipos de terreno, a continuación resumimos la actual situación al respecto.

3.1. Proceso histórico y orientaciones actuales

Está universalmente aceptado que los **desgastes en las tuneladoras son la consecuencia de la "abrasividad de la roca"**, hasta el punto de que este concepto está extendiéndose actualmente a las excavadoras puntuales (normales o de tipo "retro"), a las rozadoras empleadas también en túneles e, incluso, a las pantalladoras y pilotadoras utilizadas, en algunos casos, en los proyectos de obras subterráneas. (1)(2)

shifts, etc) / Modules for scheduled stops (or system stops) and Statistical Modules for stops due to random causes.

*All Models currently used allow appropriate estimate of **Human Resources** (the importance priority of which we will not discuss), and obviously, an easy estimate of other "complementary" resources (**Spare parts / Consumables / Power and Others**). Is not convenient to expect include in these Models the Theoretical Modules corresponding to Depreciation and Wear calculations, both as important as Human Resources estimation, which in our opinion have to be studied separately. This article aims to present the method with which the **Cost of repeated wear on the TBMs** can be evaluated.*

3. TBM wear due to ground abrasiveness during the tunnel excavation

Since we have monitored the latest experiences concerning ground abrasiveness, we can summarize the state of the art in this matter as follows.

3.1. Background and current developments

*It is universally accepted that the **wear of the TBM is caused by rock abrasiveness**, since such assumption is also extended to digger works (conventional or backloader), other types of cutting machines also used in tunnelling and drilling machines for construction of diaphragm walls and piles, sometimes used in underground construction Projects. (1) (2)*

As for the TBMs, research works in the field of wear of cutting tools and cutting wheel structure were made intensively during the 80s - 90s, for use in hard rock open TBMs, when these machines reached higher diameters and the number of cutting tools, protections and wear devices increased. (3) (5)

*When using the first machines of this type, we tried to do testing campaigns as systematically as possible, taking medium size blocks of rock and cutting them to have a sample of the appropriate size to perform the Cerchar Test. **Cerchar test was considered the most suitable for hard rock from massifs of medium to high competence.***

Por lo que se refiere a las tuneladoras, el estudio de los desgastes de las herramientas, y de la propia estructura de la rueda de corte, se inició con intensidad a partir de los años 1980-90 para su aplicación a los “topos” o tuneladoras de roca dura, al incrementarse el tamaño de las ruedas de dichas máquinas, así como el número de sus herramientas, protecciones y piezas de desgaste. (3) (5)

Con las primeras máquinas de este tipo, procurábamos hacer, de manera lo más sistemática posible, campañas de ensayos sobre bloques de tamaño medio tomados del frente, que se tallaban para conseguir muestras para aplicación del Método Cerchar, que se comprobó como el más adecuado para las rocas duras de los macizos de competencia medio alta y alta.

El índice CAI, o Índice de abrasividad Cerchar, mide el desgaste sufrido por un punzón de acero que se desplaza con movimientos de vaivén, y sometido a una cierta presión, sobre la superficie plana de la muestra. Ver Figura 1.

Pero, en el periodo 2002-2011 se ha venido verificando que los efectos de la abrasividad de los frentes mixtos (rocas duras y suelos, o bien rocas duras en matriz rocosa de dureza media o medio/baja) pueden ser mucho más desfavorables sobre los costes de la excavación del túnel que los frentes de roca dura, por diversas razones.

De acuerdo con nuestra experiencia, salvo los casos citados de frentes en roca de macizos muy competentes, en los que la aplicación en la forma más simple de los ensayos Cerchar, dió resultados razonablemente representativos, la verdad es que las experiencias en frentes mixtos o en suelos dejaba mucho que desear.

Por esa razón, a partir de enero de 2008 establecimos contacto con la Dra. Ing. Karin Bäßler, responsable del Departamento de Geotecnia de HERRENKNECHT AG y, por medio de ella, con expertos de la Universidad de Munich. Como consecuencia de los contactos mantenidos, podemos asegurar que hoy día disponemos de los métodos adecuados para la valoración de la abrasividad real de los diversos tipos de terrenos y, particularmente, de la de los materiales de los frentes mixtos que presentaba dificultades para su evaluación con la imprescindible representatividad estadística que el problema requiere.

Por otra parte, debe decirse que, obviamente, el problema ha de resolverse no sólo con la medición

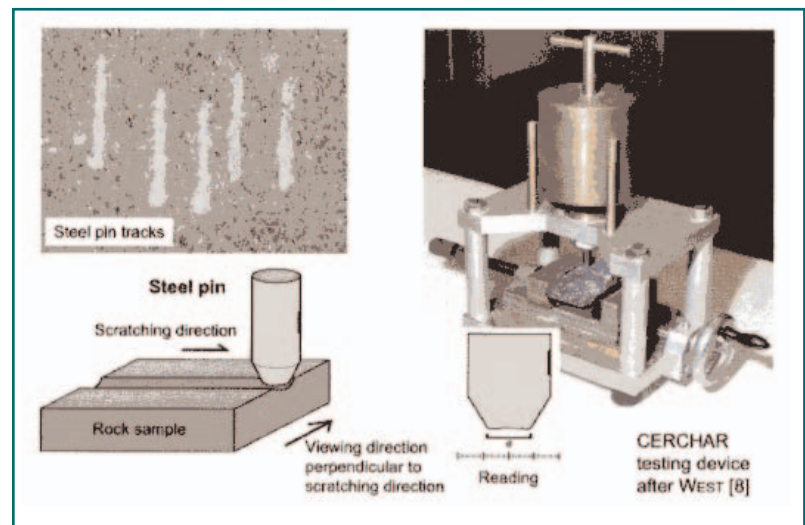


Fig. 1. Disposición de un ensayo Cerchar según West con huellas de desgaste en las muestras/ Cerchar testing device according to West, showing steel pin tracks on a rock sample.

The CAI Index, or Cerchar Abrasiveness Index, measures the wear on a steel burin as it moves swinging under certain pressure over a plain surface of the rock sample. See Figure 1.

However, between 2002 and 2011 it has been verified that the effect of abrasiveness when mixed front faces are encountered (hard rock and soil, or hard rock within a rock massif of medium to soft hardness) may be significantly more unfavourable to the costs of tunnelling than in hard rock front faces, due to several reasons.

According to our experience, Cerchar test results are considerably representative in the case of hard rock face belonging to a highly competent massif, however, in soil or mixed face conditions our experiences leave a lot to be wished.

For this reason, in January 2008 we went to meet Dr. Eng. Karin Bäßler, responsible for the Geotechnical Department of HERRENKNECHT AG and thanks her, we met several experts from the Munich University. After these meetings, we could verify that the existing methods for determining abrasiveness are the most suitable, since they make it possible to evaluate not only different ground types but also mixed face ground conditions that used to be particularly difficult to study because of the extensive statistical representation that requires.

It is obvious that the problem of abrasiveness has to be solved not only during the tunnel excavation by measuring the wear occurred, but also is necessary to be able to predict the potential wear in the early design stage of the Project, which is even more challenging.

del desgaste real a lo largo de la ejecución del túnel, sino que hay que afrontar también la **evaluación previa del desgaste a nivel de proyecto**, lo cual presenta dificultades aún más importantes.

Por todo ello, seguidamente nos referiremos a las siguientes cuestiones relativas a los **desgaste de las tuneladoras que han de trabajar en frentes mixtos con materiales abrasivos**:

- a) Los ensayos para la determinación de la **abrasividad en túneles con tuneladora**.
- b) Los **desgastes en tuneladoras en frentes mixtos y sus consecuencia y finalmente**.
- c) El problema de la **evaluación de la abrasividad a nivel del proyecto del Túnel**.

3.2. Definición de la abrasividad

Actualmente, se define la **abrasividad** como el potencial de un terreno (sea roca o suelo) para causar el desgaste de las herramienta de una tuneladora más los de sus estructuras, sea la de su rueda de corte o bien la de los mamparos o paredes de la cámara.

En los estudios más recientes se acepta que esto significa que tanto dichas estructuras como las herramientas de corte, usualmente metálicos, pierden más o menos cantidad del material con el que están contruidos, por efecto de la **abrasividad del material excavado**, lo que tienen su coste según el tipo de TBM y las características de los terrenos del macizo.

3.3. Métodos actuales de medición de la abrasividad

Los métodos principales que se vienen utilizando tanto en Europa como en Norteamérica para medir la **abrasividad de un terreno** son tres¹.

1. El ensayo Cerchar (Figura 1) ya comentado, que da el **Índice CAI de Abrasividad**
2. El análisis en lámina delgada (o "Modal Analysis") de la **composición de minerales de la muestra** (Figura 2) con determinación del **Índice Equ (Contenido en cuarzo equivalente expresado en %)**. (9). El conteo se hace por observación al microscopio en el caso de rocas.

(1) Otros ensayos como el SIEVERS VALOR C, el BÖHME o el que da el Índice SCHIMAZEK se usan mucho menos.

*Below, we will refer to the following issues regarding the **wear of TBMs in mixed face ground containing abrasive material**:*

- a) **Laboratory tests to determine the abrasiveness.***
- b) **TBM wear in mixed front face conditions and its consequences.***
- c) **The matter of preliminary estimation of the abrasiveness during Project designing stage.***

3.2. Definition of abrasiveness

Nowadays, **abrasiveness** is defined as the ground (soil and rock) potential to cause wear on cutting tools and the structures of the TBM like its cutting wheel, or the bulkhead of the excavation chamber.

More recent studies assume that both those structures and cutting tools, usually metallic, lose part of the material in which they are built, due to the **abrasiveness of the excavated ground**, which leads to a certain cost increase according to the TBM type and the ground properties.

3.3. Current methods to evaluate the abrasiveness

The three¹ main methods that are currently used in Europe and North America to determine the **abrasiveness of ground** are the following:

1. **Cerchar Test** (Figure 1) mentioned above, which determines the **Cerchar Abrasiveness Index (CAI)**
2. **Thin plate technique on microscope** (or Modal Analysis) to know the **mineral composition of the sample** (Figure 2) and determine **Equ Index (Equivalent Quartz Content at %)**. (9). Count is made by observation through a microscope in case of rock.

Multiplying the Equ value by the Unconfined Compression Strength gives the **Rock Abrasivity Index (RAI)**, which is another way to express the result of this test.

Analysing a global sample of previously crushed ground by means of an X-Ray Diffractometer,

(1) Other tests like SIEVERS C VALUE, BÖHME or SCHIMAZEK are much less used.

Multiplicando el EQu por la Resistencia a Compresión uniaxial simple, se obtiene el **Índice RAI de abrasividad de la roca**, que es otra expresión del resultado de este ensayo.

El ensayo tiene la variante del análisis de una muestra global del material previamente machacado por medio de un difractor de Rayos X, lo que lo hace muy adecuado al caso presente.

3. El ensayo LCPC que mide la pérdida de peso de una pieza de acero que se agita dentro de un recipiente metálico relleno de los tamaños desde 4 mm a 6,3 mm de la roca a ensayar, una vez machacada (Figura 3). (10) (11)

De todos ellos, el que ofrece la máxima representatividad estadística es el segundo, que hemos podido aplicar con facilidad razonable a los casos de frentes mixtos o suelos, excavados con máquinas presurizadas, por medio del análisis global del producto excavado por difractor de rayos X², y del que se trata más adelante.

Podemos avanzar ya que la dificultad está en la estimación de la abrasividad al nivel de proyecto si la densidad de sondeos no es elevada, mientras que no sucede así en la determinación real en obra, sobre todo si la extracción de escombros se hace por cinta continua, en la que es fácil tomar muestras sistemáticamente y con la frecuencia por turno que se desee.

En resumen, por lo que respecta a los Métodos actualmente empleados para medir la abrasividad en Túneles construidos con TBMs puede decirse lo siguiente:

Frentes mixtos en roca

- El Ensayo Cerchar tiene la dificultad de estimar la proporción de componentes que habría que ensayar separadamente y, obviamente, tampoco es aplicable a los suelos.
- El ensayo mineralógico para determinar el Índice EQu (Contenido en cuarzo equivalente) es, en nuestra opinión, el más recomendable para estos casos.

(2) Por eso hemos recomendado su aplicación al túnel Trinidad-Montcada de la LÍNEA del AVE Barcelona-Frontera Francesa.

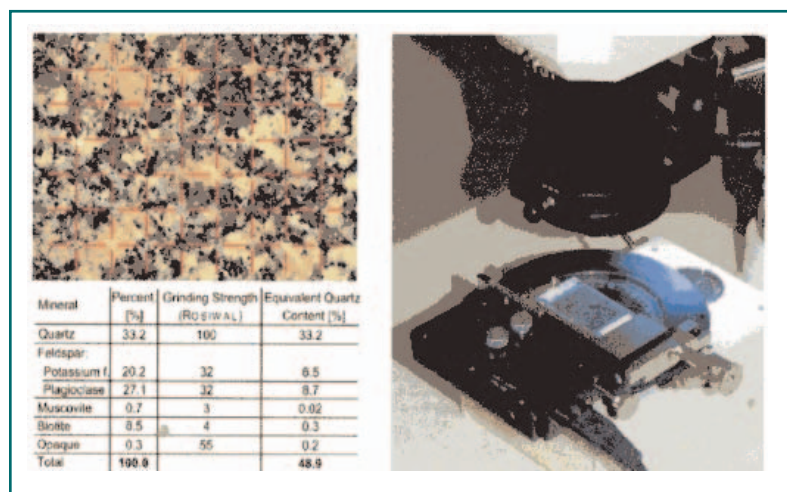


Fig. 2. Empleo de análisis en lámina delgada. Muestra de granito con determinación del EQu al microscopio (9)/Thin section analysis. Granite sample for determination of EQu Index through microscope (9).

makes a different version of this test that is certainly very suitable to the present case.

3. LCPC test indicates the weight loss of a piece of steel (impeller) when it is shaken within a metallic container fulfilled with crushed rock fragments of the sample between 4 mm and 6,3 mm size (Figure 3). (10) (11)

The second one of the tests described gives the highest statistical representativeness. It has been easily applied in cases of mixed rock-soil face or soil face conditions by analysing the spoil that the excavation

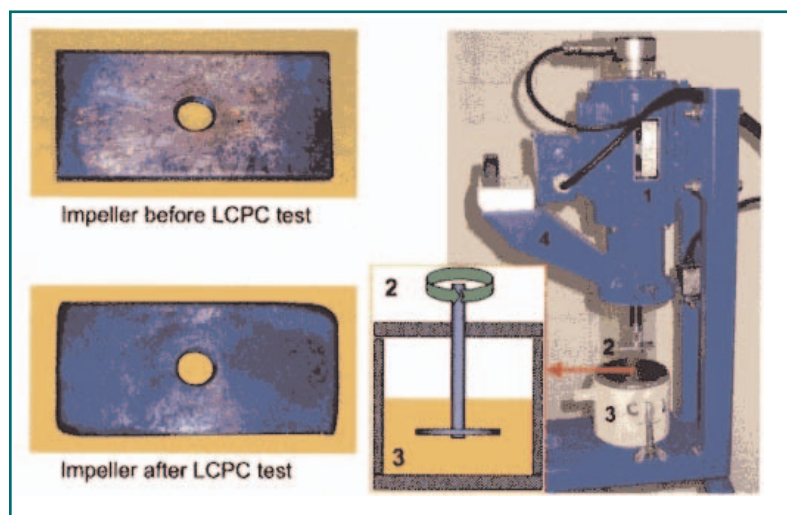


Fig. 3. Disposición de un equipo de ensayo LCPC con la pieza de acero antes y después del ensayo (10) (11). (1: motor / 2: pieza de acero / 3: Container de muestras / 4: embudo)/ Layout of the LCPC test equipment showing the steel piece (impeller) before and after tested. (10) (11). (1: engine / 2: Impeller / 3: sample container / 4: funnel).

Frentes en suelos:

- El método de determinación del Índice EQu en un trazado en suelos cuya tipología va variando presenta las mismas características que en frentes mixtos para su empleo al nivel de obra.
- Solo su aplicación al caso de frentes en arenas finas ($D_{\max} \leq 1 \text{ mm}$) no ha resultado satisfactoria, por lo que para tales casos se ha desarrollado el ensayo NTNU. (8)
- Por último, la medición de la abrasividad de una mezcla cualquiera de suelos con el ensayo LCPC está en desarrollo por el Laboratorio central de Ponts et Chaussées de París que ha publicado ya algo al respecto. (10) (11)
- En todo caso, los túneles en suelos suelen ser bastante superficiales, lo que permite aumentar la densidad de los sondeos y, con ello, la calidad de la valoración de la abrasividad a nivel de proyecto, lo que se trata a continuación.

4. Los desgastes por abrasividad (frentes mixtos y suelos) en los túneles con tuneladora

Para evaluar los Desgastes de una TBM, causados por la abrasividad de los materiales de los frentes mixtos o en suelos, han de tenerse en cuenta los dos aspectos siguientes:

- El efecto directo de la abrasividad sobre el desgaste de las herramientas, para cuya comparación con las previsiones del estudio, deben recogerse los resultados reales de los ensayos (a elegir, siguiendo las recomendaciones del apartado anterior) sobre los materiales del trazado. Además:
- Las consecuencias indirectas de dicha abrasividad real en los frentes mixtos, a las que nos referimos seguidamente.

Frentes mixtos en rocas (o rocas y suelos)

- En los avances en frentes mixtos (sean de rocas abrasivas y suelos, o de intercalaciones de rocas duras y abrasivas en la roca matriz de dureza media o medio baja) además de los desgastes normales por abrasión, el efecto dinámico al pasar de un tipo de roca a otro produce pequeñas roturas del filo de los cortadores, las cuales, agravadas por la

produce through the X-Ray Diffractometer technology², about which is discussed later.

The real difficulty lies in determining the abrasiveness potential of ground during the design phase of the Project, since it is necessary to have a high number of boreholes. Instead, during the construction phase, it is possible to systematically take samples from the excavation spoil being transported by conveyor belt, as many times per working shift as desired.

With respect to Methods currently being used for abrasiveness determination in TBM-tunnelling the following can be concluded:

Mixed face with hard rock

- *Cerchar Test gets into difficulties to determine the proportion of mineral components separately, and this is also not suitable for soil face conditions.*
- *The Modal Test to determine the EQu Index (Equivalent Quartz Content) is, in our opinion, the most recommendable for this case.*

Soil face conditions

- *EQu Index method used for with different type of soils encountered along the tunnel alignment follows the same rules than when is used in mixed face conditions.*
- *With the exception of ground containing fine sands ($D_{\max} \leq 1 \text{ mm}$) where the results of this test are not satisfactory. For this case, the NTNU test has been developed. (8)*
- *Measurement of the abrasiveness of a random soil mixture by means of the LCPC test is currently being developed at the Central Laboratory of Ponts et Chaussées in Paris, which have recently published some approaches about this matter. (10) (11)*
- *In any case, tunnels in soils are often shallow then the density of exploration boreholes can be increased and consequently improved the quality of abrasiveness prediction at early project stages. This matter is discussed below.*

(2) We have recommended using this method for the tunnel sections of Trinidad-Montcada of the High Speed Railway (AVE) Line Barcelona-French Border.

abrasividad, se incrementan rápidamente, llegando al gripado total o a la rotura del cortador.

- b) La rotura de una herramienta justifica la parada inmediata del trabajo, para evitar daños mayores en la rueda de corte, en las piezas de desgaste de la misma o en las restantes herramientas.
- c) Pero, además, en los últimos años se ha venido verificando que los efectos de la abrasividad en frentes mixtos pueden ser mucho más desfavorables sobre los costes de la excavación del túnel que en los frentes de roca dura por las siguientes razones:

- c.1) El número de revisiones de herramientas se incrementó notablemente hasta cifras de más del doble de lo esperable. Es frecuente que haya que establecer sistemáticamente 1 revisión cada 60 a 80 m de túnel e, incluso, con frecuencia mayor.
- c.2) A su vez, la duración de las intervenciones aumentó significativamente debido a dos causas principales:

- Al recambio de herramientas por desgaste convencional hubo que añadir un número similar o mayor por las roturas incipientes en los filos de los cortadores, para evitar su gripado total con posible rotura y consiguiente efecto desfavorable sobre el resto.
- En la mayoría de los casos los frentes son inestables, por lo que con frecuencia es preciso hacer el trabajo en condiciones hiperbáricas, lo que obliga a plazos del orden de 3 días o más por intervención, dado que:
- El número de puntos del trazado en que puede entrarse sin presión en la cámara suele ser muy limitado.
- Las reposiciones, generalmente, han de hacerse en ambiente de aire comprimido y por personal especializado.

- d) Por último, puede evaluarse también el estado de la estructura de cabeza, mamparos y piezas de desgaste en las revisiones hiperbáricas pero no hacer su reparación, para lo que es necesario el empleo de la soldadura. Para ello, y como la frecuencia de estas reparaciones es menor que la que requieren las reposiciones de herramientas:

4. Wear due to abrasiveness (mixed faces and soils) in TBM tunnelling

In order to determine the wear on a TBM, caused by abrasive material from mixed or soil faces, the two following matters need to be considered:

- *The direct effect of abrasiveness on cutting tool wear, for which comparison with the study forecasts, the results of actual abrasiveness tests (any test chosen) must be collected from the ground of the alignment. Furthermore:*
- *Indirect consequences of actual abrasiveness in mixed fronts, to which we refer below.*

Mixed face in rock (or rock and soil)

- a) *When excavating mixed ground (abrasive rock with soil, or alternating soft and hard rock), not only the common wear due to abrasiveness occurs but also, the dynamic effect during the transition between materials of different hardness leads to small breaks in the edge of the disc cutters. The impacts of normal abrasion make those breaks become worse and rapidly increasing, resulting in total blockage or break of the cutter disc.*
- b) *Break of a cutter tool means to stop works immediately, in order to avoid greater damage into the cutter head, protective parts or other cutting tools.*
- c) *On previous experience it has been proved that abrasiveness in mixed faces may lead to significantly higher costs than in hard rock face conditions, due to:*

- c.1) *The number of cutting tool inspections increased substantially to more than double the expected. Frequently, a minimum of one inspection each 60 - 80 m. of tunnel excavation must be established.*
- c.2) *Duration of interventions increased as well, induced mainly by:*

- *Plus changing tools normally worn, it was necessary to change the same number or more tools due to incipient breaks on the cutting edge in order to prevent blockage of the cutters affected and the subsequent adverse effect on the others.*

- Se procura utilizar los puntos del trazado en que, de acuerdo con el Perfil geológico, se espera poder entrar en la cámara sin presión, pero siguiendo Procedimientos para confirmar el poder hacerlo con seguridad, lo que necesita tiempo (2 a 3 horas).
- Si lo anterior no resulta posible, ha de realizarse:
 - Un tratamiento previo del terreno para lograr un bloque resistente, que permita excavar en él una sección desde la que se haga la reparación, una vez introducida en el bloque la rueda de corte, o bien
 - Un recinto estanco con pantallas en el que penetre igualmente la citada rueda.

Frentes en suelos

Todo lo expuesto en los puntos a) al d) anteriores, relativo a los frentes mixtos en roca, es aplicable al caso de los suelos abrasivos, sobre todo aquellos en los que hay presencia de gravas ($D > 75$ mm) o bloques de roca.

Los efectos de las gravas y más aún si hay "bolos" (gravas de $D \geq 300$ mm), así como de bloques de roca, son similares a los de las intercalaciones duras y abrasivas de los frentes mixtos en rocas.

Nuestras conclusiones relativas a los Desgastes en las tuneladoras pueden expresarse así:

- La abrasividad significativa de los frentes mixtos (sean de rocas de distinta abrasividad y dureza, o sean de roca con suelos) o de los suelos abrasivos es el factor determinante de los desgastes sufridos por la TBM, tanto por lo que se refiere a las estructuras metálicas de la cabeza (incluidos sus elementos de protección y las piezas de desgaste que monte) como a las herramientas de corte.
- Tanto dichos desgastes como, sobre todo, las consecuencias indirectas, que se han descrito en el punto anterior tienen la máxima incidencia en los costes del proceso constructivo como se recoge en las publicaciones especializadas más recientes, de las que proponemos como ejemplo la de Universidad de Munich de los expertos Kuroschi Thuro y Heiko Kästling, publicada en *GEO-MECHANICS AND TUNNELLING* 2 N° 2 Año 2009 por Ernst & Sohn.

- *In most cases face is unstable, making it necessary to work in hyperbaric conditions and so that requires interventions of over 3 days long as:*

- *The number of sections in the alignment where is possible to do an intervention in atmospheric conditions is limited.*
- *Generally, replacements need to be done in pressurised air conditions by highly specialized workers.*

d) Finally, the condition of the cutter head structure, bulkhead and protective parts can be checked during hyperbaric interventions but they cannot be refurbished by the application of the required additional welding. This kind of repairs are less frequent than tool replacement, therefore:

- *Make sure to use tunnel sections where intervention in atmospheric conditions is expected to be feasible, according to the Geological profile. Follow the established Security Procedures, i.e. timeout before intervention (2 to 3 hours).*

- *If that is not possible, then:*

- *Previous ground consolidation treatment to ensure a block of ground that is resistant, to excavate a stable-hole, from where the refurbishment works can be done once the cutter head has penetrated into the block. A second option is,*
- *Using a confined area between diaphragm walls where to place the cutting head.*

Soil front face

All stated in the above points a) and d) concerning rock mixed face applies to abrasive soils, particularly soil containing gravel ($D > 75$ mm) or boulders.

The influence of gravel and particularly rock blocks and boulders ($D \geq 300$ mm) is similar to the influence of hard and abrasive rock intermediate bands in rock mixed faces.

As conclusion to the matter of TBM wear we can say:

- *The significant abrasiveness of mixed faces (alternating rock of different hardness and abrasiveness, or rock and soil) or soil faces, is*

- Dicha publicación señala que, en estos últimos años se desarrollaron diversos estudios sobre ensayos para medir la abrasividad del terreno con el fin de que el desgaste en frentes mixtos y suelos pueda ser evaluado debidamente como un parámetro más a tener en cuenta, tanto en el Proyecto como en la ejecución de las obras, dada su importancia relevante comparada con los otros parámetros usualmente considerados en los contratos, sean los de la máquina (Presión de trabajo, Empuje y Par, Avance esperable) o del relleno del trasdós del revestimiento.
- Dicho de otro modo, la alta abrasividad tiene una influencia básica en el coste porque aumenta notablemente el tiempo del proceso de construcción de túneles en frentes mixtos o en suelos abrasivos.

5. Evaluación de la abrasividad a nivel del proyecto del túnel

La representatividad de una evaluación de la abrasividad al nivel de proyecto depende del número de sondeos con extracción mecánica de muestras obtenidas desde la cota superior hasta rebasar de 1 a 2 m la inferior de la sección del túnel, ya que es sobre éstas muestras donde se puede actuar en el laboratorio.

Por eso, tanto para las máquinas abiertas, como para las presurizadas, es referencia básica la **densidad de sondeos de reconocimiento**, que ha de entenderse como el número de sondeos de que se dispone para caracterizar las secciones tipo por km de trazado³. Al respecto, pueden apuntarse los “pros” y “contras” siguientes:

Frentes convencionales en rocas duras y abrasivas

- e) En general, en los trazados con secciones completas en rocas duras y abrasivas es admisible la interpolación de los datos entre sondeos contiguos, salvo fuertes discrepancias, que deben aclararse intercalando nuevos sondeos.

(3) En general los sondeos de proyecto deben hacerse “fuera de la sección” si bien en sus proximidades (del orden de 2 a 3 diámetros de separación máxima entre el eje del trazado y la vertical del sondeo) para evitar futuros problemas en la obra por causa de posibles filtraciones.

Si, por la razón que sea, el sondeo atraviesa la futura sección del túnel debe procederse a sellarlo perfectamente.

decisive in TBM wear, cutter head metallic structures (including protective parts) as well as cutting tools.

- *Not only the wear caused by abrasion but particularly the indirect consequences described in the previous section have critical influence in the construction costs, as described in some specialized papers recently published like Kuroschi Thuro & Heiko Kästling from Munich University published in the magazine GEOMECHANICS AND TUNNELLING n°2, 2009, by Ernst & Sohn.*
- *The Kuroschi Thuro & Heiko Kästling report points out that in the last few years several research in abrasiveness determination has been made with the aim of having a method that allows to evaluate the wear suffered during excavation in mixed ground or soil, as an additional parameter to consider in both project design and construction. Since wear is considerably critical as much as other parameters that project contracts indeed consider, like TBM parameters (i.e. working pressure, thrust force, torque and speed of advance expected) or ring backfilling injection parameters.*
- *In other words, high abrasiveness of ground has a major influence in the final costs, leading significantly longer construction periods for tunnels in mixed front face or abrasive soils.*

5. Determination of abrasiveness during the project design phase

The level of representativeness of an evaluation test of abrasiveness carried out in the early stage of designing the Project is according to the number of exploration boreholes taking samples from the surface down to 1-2 m below the tunnel section level.

Therefore, for both open and pressurized machines, the density of drilled exploration boreholes is a reference guideline based on the number of boreholes per km of alignment³. As for

(3) *Generally, the exploration drilling must be done “out of the tunnel section” but in the vicinity (separation distance of about 2 to 3 diameters between the tunnel axis and the vertical axis of the borehole) to avoid further difficulties caused by possible filtration. If, for any reason, the borehole places across the future tunnel alignment, then it must be perfectly sealed.*

f) Lamentablemente, es muy frecuente que la **densidad de los reconocimientos** no sea la deseable, que, en nuestra opinión, **no debería ser menor de la que corresponde a 1 sondeo cada 100 m**, si bien es frecuente que los plazos y costes aprobados para el Proyecto obliguen a cifras de 1 sondeo cada 250 m ó más de trazado y, en casos de recubrimiento importante, a distancias todavía mayores.

Frentes mixtos en materiales abrasivos.

- g) En el caso de frentes mixtos (sean de roca y suelo, o bien con intercalaciones de rocas más duras y abrasivas en la roca matriz de las secciones), **el problema a nivel de proyecto pudiera parecer, en principio, similar al expuesto para frentes convencionales, e, incluso más favorable, porque los túneles suelen ser más superficiales**, lo que permite aumentar el número de sondeos sin incrementar los plazos de proyecto, aunque si los costes.
- h) Es evidente que tales medidas facilitan una mejor evaluación, pero, por lo que se ha expuesto, las variaciones de la abrasividad y sus consecuencias adicionales pueden ser importantes, por lo que puede decirse que **la interpolación debería realmente admitirse sólo si las distancias entre sondeos son, como máximo, de 50 m.**

Suelos abrasivos

- i) Todo lo expuesto en los párrafos anteriores, relativo a los **FRENTES MIXTOS**, es aplicable al caso de los **SUELOS ABRASIVOS**.
Los reconocimientos por sondeos pueden completarse con frecuencia por calicatas, que dan volúmenes de muestra mayores, con lo que **se aumenta notablemente la representatividad del material examinado, correspondiente a cada zona del trazado.**
- j) Por otra parte, el menor coste de los muestreos a través de calicatas profundas, en vez de sondeos, permite aumentar la densidad de los reconocimientos, pero debe mantenerse todo lo dicho respecto de la aceptación de las interpolaciones sólo para distancias entre muestras inferiores a los 50 m.

En resumen, respecto de la evaluación de la abrasividad a nivel de proyecto de un túnel nuestra propuesta es la siguiente:

this reference data, some advantages and disadvantages can be pointed out:

Conventional fronts in hard and abrasive rock

- e) *Generally in tunnel alignments with full section in hard and abrasive rock the interpolation between boreholes is admissible, unless there is a strong discrepancy between them, then it must be cleared up by adding new boreholes.*
- f) *Unfortunately, the density of boreholes is often insufficient. From our point of view, it **shouldn't be less than 1 borehole each 100 m** however, within the common framework of limited costs and deadlines for the Project design, is frequent to have a density of only 1 pre-exploration borehole each 250 m of alignment, or even more distance for deeper tunnels.*

Mixed front faces within abrasive grounds

- g) *The same situation could be encountered for tunnel Projects in mixed front faces (rock and soil, or very hard rock layers in soft rock matrix). However, **mixed front faces usually correspond to shallow tunnels**, allowing higher number of boreholes, also with higher costs but at least with no increase of time.*
- h) *Greater density of exploration boreholes may make the result of the abrasiveness test more reliable, yet, for the reasons stated above, the abrasiveness variability and corresponding consequences may be considerable. Thus, **interpolation should be admissible only when the distance between boreholes is up to 50 m.***

Abrasive soils

- i) *Everything stated above as for **MIXED FRONT FACES** is applicable to **ABRASIVE SOILS**.
The borehole drilling campaign can be combined often with soil pits, giving larger sample volumes, thereby significantly increasing the representativeness of the ground tested, for each area of the alignment.*
- j) *On the other hand, sampling made by means of deep pits instead of borehole drilling costs less and allows greater density of sample*

- La repercusión directa e indirecta de la abrasividad en los plazos y costes del proceso constructivo del túnel, ha llevado en los últimos años en toda Europa a considerar la abrasividad como un parámetro del terreno, de repercusión similar (y en muchos casos mayor) a la de los parámetros usuales, sean los relativos a su caracterización geomecánica, o a las prestaciones requeridas de la máquina.
- De ahí que la evaluación de la abrasividad a nivel de proyecto deba ser tomada muy en cuenta, exigiendo el máximo esfuerzo posible en los ensayos sobre muestras obtenidas en los reconocimientos previos.
- Estamos de acuerdo con las líneas básicas del documento ya citado del que son autores los expertos de la Universidad de Munich, Kuroschi Thuro y Heiko Kästling.
Dicho documento propone que sean las **Previsiones del Proyecto**, a las que debe referirse el **Constructor** de modo que la medición real que posteriormente haga en la obra, se pueda **comparar** con lo que dice u omite el Proyecto.

6. Casos históricos anteriores a 2008

Túneles de Guadarrama

(4 TBMs “doble escudo” $\varnothing_{exc} = 9,50 \text{ m} / L = 4 \times 29 \text{ km}$)

Fué el Proyecto que marcó un hito importante a nivel internacional en las TBMs de gran diámetro del tipo “doble escudo”: téngase en cuenta que la decisión tomada por el GIF, a propuesta de SPICC, se hizo cuando el Proyecto de PINGLING (2 túneles gemelos de unos 20 km de longitud, para una autopista en Formosa) había sufrido graves contratiempos que obligaron a terminar la mayor parte de la obra por métodos convencionales, con un plazo total de 11 años.

La geología de Guadarrama se conocía en sus líneas generales, pero no había datos concretos del macizo a atravesar. Por otra parte, los reconocimientos efectuados pudieron hacerse sólo en un 35% del trazado⁴ por ser zona protegida, lo que fue la base de la propuesta de SPICC, relativa al tipo

(4) Se perforaron, en total, 6.000 m. de sondeo, pero incluyendo algunos hechos por los licitadores en la misma zona.

extraction, however it must respect the **maximum admissible distance of 50 m**.

Concerning the **abrasiveness determination during the design phase of a tunnel project**, we can summarize our recommendations as follows:

- During the last years in Europe, the direct and indirect impacts of the abrasiveness in the time and cost of tunnelling process have led to consider abrasiveness as a ground parameter of similar influence (many times even more) than the usual parameters considered like geotechnical characteristics or TBM operational parameters.
- Hence the abrasiveness determination at project design stage should be taken into account, requiring maximum effort in testing the samples obtained in previous exploration surveys.
- We agree with the baselines pointed out at the mentioned Kuroschi Thuro & Heiko Kästling report from the Munich University.

This document suggests that the **Project Predictions** have to be addressed by the Contractor so that the real measurements made during building stage can be compared with what the Project says or leaves out.

6. Reference cases before 2008

Guadarrama Tunnels

(4 Double Shield TBMs $\varnothing_{exc} = 9,50 \text{ m} / L = 4 \times 29 \text{ km}$)

This Project marked a milestone in international large diameter “double shield” TBMs: the election of this tunnelling method made by GIF, according to SPICC proposal, took place when the PINGLING Project (20 km-long twin tunnels for a Highway in Formosa) was having serious difficulties that forced to finish most of the work by conventional methods, with a total term of 11 years.

The geology of Guadarrama Tunnels was broadly known but without having specific data. Geological surveys could only be made at 35% of the alignment⁴

(4) A total of 6.000 m of borehole were drilled, including the boreholes previously made by the bidder in the same area.

de máquinas, que se incluyó en el Pliego del Concurso.

Durante la ejecución de la obra, **recomendamos hacer una campaña sistemática de ensayos sobre muestras tomadas del frente, utilizando el método Cerchar, dado el tipo de macizo en roca dura de competencia medio alta y alta (granitos y gneises).** Ver la Figura 1 anterior.

En un artículo de J.M. Rodríguez Manjón, que se incluyó en el libro publicado en 2005 por el ADIF para la **Jornada internacional sobre este Proyecto**, con el título **TÚNEL DE GUADARRAMA**, se recogieron los índices Cerchar resultantes de los ensayos. (6)

La previsión del Proyecto resultó algo inferior a lo obtenido en la ejecución, y, además, no tenía en cuenta los costes de las reparaciones de la estructura de la Rueda de corte. Los avances desde ambas bocas se hicieron a unos ritmos medios mantenidos de 475 m (Boca Sur) y 515 m (Boca N) por mes.

La Obra se había adjudicado **con precio fijo** y en un **Concurso de Proyecto y Obra**. No obstante, los constructores solicitaron una compensación económica por las sensibles diferencias de abrasividad que se habían encontrado.

Como, por otra parte, el ADIF había hecho suyo el Proyecto, envió la petición de los constructores a su Asesor, SPICC, para Informe, que éste lo emitió favorable a la petición. En consecuencia, la Dirección de Obra del ADIF accedió a lo solicitado, de acuerdo con el Informe del Asesor.

Túneles de Perthus

(2 TBMs -"doble escudo" $\varnothing_{exc} = 9,60 \text{ m} / L = 2*8 \text{ km}$)

Este túnel es el paso fronterizo de la nueva L.A.V. Barcelona - Perpignan que atraviesa las formaciones del Pirineo oriental por las proximidades de La Jonquera, Perthus y Boulou.

El trazado presentaba varias fallas importantes, que se esperaba poder pasar con las máquinas tipo "doble escudo", como así sucedió, incluso en las dos mas importantes: en la de Les Cluses, que afectó a unos 400 m del trazado, hubo de avanzarse a ritmo mucho menor, a causa de los desprendimientos sufridos, y la de Boulou, que presentó una amplia brecha de unos 100 m de anchura, fue tratada previamente por inyecciones de lechada.

because the mountain range of Guadarrama was within a protected area. Due to the lack of enough geological data, SPICC suggested the type of TBM that was included in the Bidding Specifications.

During tunnelling operations, we recommended to carry out a campaign of systematic tests of samples taken from the tunnel front, using the Cerchar method, according to the type of rock, of medium-high to high hardness (granite and gneiss). See Figure 1 above.

An article by J.M. Rodríguez Manjón included in the book TÚNEL DE GUADARRAMA published in 2005 by ADIF, for the International Conference on this topic, collected all data of the Cerchar tests carried out. (6)

The Project prediction of abrasiveness was slightly lower than the data obtained during the tunnel construction and, also, it didn't take into account the costs of refurbishments of the Cutting Wheel structure. The rates of advance achieved from the two portal shafts were maintained at 475 m (South Portal) and 515 m (North Portal) per month.

The Project was awarded to a fixed price in a tender that comprised both Project Design and Construction phases. However, the main Contractor claimed compensation for the perceptible different conditions of abrasiveness encountered.

As ADIF became the Owner of this Project, submitted the Contractor's claim to SPICC review as consultant. SPICC in its report suggested approving the request made by the Contractor and, consequently, ADIF Project Managers proceeded to accept the request according to the Consultant Report.

Perthus tunnels

(2 Double Shield TBMs $\varnothing_{exc} = 9,60 \text{ m} / L = 2*8 \text{ km}$)

This is a border-crossing tunnel of the new High Speed Railway Line Barcelona - Perpignan, running through the East Pirineos Mountain Range, near the cities of La Jonquera, Perthus and Boulou.

The tunnel alignment had several major faults which was expected to pass with "double shield" machines, as it happened, even for the two most important faults: Les Cluses fault, affecting 400 m of the alignment, had to be passed at very low advance rates due to the subsidence occurred; and the Boulou Fault, of about 100 m thickness, was previously consolidated with grout injection.

Los avances comenzaron a mediados de 2005 y, salvo el paso de las fallas citadas, en el resto del trazado los avances fueron comparables a los de Guadarrama y, en cuanto a los desgastes por abrasión, bastante inferiores a aquellos, hubo diferencias sensibles entre la realidad y la previsión del Proyecto.

Intervinimos en el estudio de los extracortes habidos durante la obra, en los que se incluyó este tema.

**Túnel de la Línea 9 (Tr.4-2) del Metro de Barcelona
(Escudo de diseño dual -Abierto/EPB- para roca.**

$\varnothing_{exc} = 12 \text{ m} / L = 4 \text{ km}$

Fue el primer caso relevante de frentes mixtos de suelos y rocas muy duras (aluvial en la parte superior de la sección y rocas ígneas del Paleozoico del litoral de Barcelona) del ramal de Sta. Coloma de Gramanet a Sagrera. La obra se realizó en el periodo 2003 a 2006.

Los avances con la cámara en presión presentaron dificultades a veces extraordinarios, consecuencia del insuficiente Par de giro de la máquina, sensiblemente inferior al del escudo EPB del mismo tamaño que excavó el tramo Badalona a Sagrera, en frentes de tipo similar, aunque con rocas ígneas de menor dureza.

Los desgastes de herramientas y de la estructura de la Rueda fueron importantes. La forma contractual adoptada para el Proyecto recogió los costes globales. En consecuencia, los ensayos practicados no fueron sistemáticos y se limitaron a obtener los **Índices Cerchar de las rocas ígneas** (que fueron similares a los de Guadarrama), sin darnos ocasión de aplicar ensayos al conjunto del producto de excavación (roca dura y suelo).

En todo caso, la suma de plazos de las paradas para inspección, reposición de herramientas y reparación de la rueda, supuso un 4% a 5% del plazo global de construcción del tramo.

**Túnel bajo el Guadalquivir = Línea 1. Metro Sevilla =
(Escudo EPB de suelos y roca blanda.**

$\varnothing_{exc} = 6,4 \text{ m} / L = 2 \times 2,5 \text{ km}$

Los avances en el primero de los 2 túneles gemelos excavados con el escudo (Septiembre 2005 a Mayo 2007) fueron muy bajos, motivados por un mal comportamiento de la Rueda de corte (aberturas variables, cortadores de disco y scrapers para suelos) y diversas averías de la máquina, que obligaron a una

Tunnelling works began in mid-2005 and, except for the faults passing performance rates were comparable to Guadarrama tunnels. Concerning wear due to abrasive rock, the wear occurred here was less than in Guadarrama tunnels however, there were slight discrepancies between the Project predictions and the reality.

We collaborated in the study concerning the over costs incurred, into which abrasiveness took part.

**Tunnel for Barcelona Metro Line 9 (Tr.4-2)
(Dual Design Shield - Open/EPB - for rock.
 $\varnothing_{exc} = 12 \text{ m} / L = 4 \text{ km}$**

It was the first major case of mixed faces of soil and very hard rock (alluvial on top of the section and Paleozoic igneous rocks of the coast of Barcelona), in the branch of Santa Coloma de Gramanet to Sagrera. The work was completed in the period 2003-2006.

Advances with pressurized excavation chamber were sometimes too difficult, because of the insufficient torque of the machine, significantly lower than the EPB shield of the same size that excavated the section Sagrera-Badalona, in similar front faces but with less hard igneous rocks.

There was considerable wear on tools and Cutting Wheel structure. The Contract for this project only included overall cost. Consequently, evaluation tests were not done systematically and were limited to Cerchar Index only for the igneous rock (similar results to Guadarrama). It was not possible to test the resulting mixture from the excavation (soil and hard rock).

The total time spent in stops for tools inspection, replacement and wheel repairing involved 4% - 5% of the total tunnelling period.

Tunnel under Guadalquivir River = Line 1. Sevilla Metro = (EPB Shield for soils and soft rock.

$\varnothing_{exc} = 6,4 \text{ m} / L = 2 \times 2,5 \text{ km}$

The advance rate during the first of the 2 twin tunnels excavated (from September 2005 to May 2007) was very low due to a malfunctioning of the Cutting Wheel (variable openings, disc cutters and soils scrapers) that led to a 4,5 months stop to repair it. We have published some information about this

larga parada de 4,5 meses para efectuar las reparaciones. Publicamos sobre esta obra un artículo en los PROCEEDINGS del Congreso internacional de MÓNACO de Octubre 2008.

A propuesta de SPICC, se construyó una nueva Rueda (aberturas fijas y herramientas grandes de tipo "ripper", mas los "scrapers" de suelos) y se modificaron los sellos del cojinete principal. La construcción del Túnel 2 se realizó en 6 meses.

En la mayor parte del trazado, el % significativo de limos arcillosos o margas blandas (más del 20%) redujo notablemente los desgastes de herramientas. No así en el tramo del paso bajo el río Guadalquivir (unos 250 m) que discurrió al 100% en aluvial con un bajo contenido de finos (<6%) y materiales restante muy abrasivos, con mayoría de gravas (tamaños de 40-120 mm), lo que produjo un consumo de herramientas elevadísimo, al excavar este tramo en cada túnel. (7)

Los ensayos Cerchar realizados sobre algunas muestras de gravas dieron valores superiores a 5, pero no fue posible disponer de datos representativos de la abrasividad media del aluvial.

project in an article published on the PROCEEDINGS, of the International Conference in Monaco, October 2008.

According to the SPICC proposal, a new Cutting Wheel was manufactured (fixed openings, big tools like ripper, and scrapers for soils) and the sealing of the main bearing was modified. The construction of the Tunnel 2 was completed within 6 months.

In most of the tunnel alignment the significant proportion of clayey silt or soft marl (more than 20 %) considerably reduced tool wear. Not as for the tunnel section under the Guadalquivir River where the alignment ran fully into coarse granular soils of alluvial deposits, with low fines content (< 6%) and highly abrasive material mostly gravel (size ranging 40 to 120 mm), that led to extremely high tools consumption. (7)

Cerchar test made on some gravel samples resulted in Cerchar Index values over 5. However, it was not possible to have representative data of the abrasiveness average value corresponding to the entire alluvial deposit.

7. Casos históricos del periodo 2008-2012

Corresponden a este periodo los estudios que hemos realizado durante el asesoramiento a la construcción de los túneles siguientes, todos ellos pertenecientes a la nueva Red de Alta Velocidad Española (AVE):

Túnel Trinidad-Montcada	P. Doble vía/Escudo EPB/Barcelona
Túnel Sants-Sagrera	P. Doble vía/Escudo EPB/Barcelona
Túnel de Gerona	P. Doble vía/Escudo EPB/Gerona
Túnel de Sorbas	P. bitubo/Doble escudo/Almería

Aunque hicimos diversos trabajos sobre los desgastes de las TBMs ha sido en el TÚNEL TRINIDAD-MONTCADA donde llevamos a cabo la campaña más importante de tales aplicaciones, por ser un túnel excavado en frentes mixtos en rocas de muy diversa abrasividad, incluso con tramos de frentes mixtos en roca y suelos, razón por la cual este último apartado se refiere con detalle a dicho Túnel.

7. Historic cases during 2008-2012

During this period we have evaluate the following projects, in which we worked as consultants, all of them belonging to the Spanish High Speed Railway Network (AVE):

Trinidad-Montcada Tunnel	Double track section/ EPB Shield/Barcelona
Sants-Sagrera Tunnel	Double track section/ EPB Shield/Barcelona
Gerona Tunnel	Double track section/ EPB Shield/Gerona
Sorbas Tunnel	Twin tunnel-single track/Double Shield/Almería

Despite having carried out several studies concerning the wear of TBMs, the most important one took place within the framework of TRINIDAD-MONTCADA TUNNEL Project, since the alignment of this tunnel runs through mixed front faces of a wide range of abrasiveness, including soil-rock mixed faces. For this reason, the last section of the report focuses on this tunnel Project.

7.1. El túnel Trinidad-Montcada

Los proyectos

El primer Proyecto fue redactado por la UTE IDOM- INTEMAC en Mayo de 2002. Consistía en un **túnel bajo pantallas**. La sección tipo estaba formada por dos recintos cuadrangulares con las soleras a la misma cota, que compartían una misma pantalla central más otras dos pantallas laterales: de un lado se disponía la vía del AVE, de ancho internacional, y del otro la de Cercanías, de ancho ibérico. La planta de la nueva plataforma ocupaba en parte la de la **doble vía de ancho ibérico existente**, por lo que ésta había de ser previamente desplazada lateralmente.

Para la redacción de este proyecto se tuvieron en cuenta varios trabajos previos facilitados por el GIF, que habían servido de base a diversos Estudios de viabilidad de la Línea de Barcelona a la Frontera o de las autopistas del área de Barcelona, pero **el diseño del túnel se basó muy concretamente en el Estudio hecho por JOLSA, de Diciembre de 2001**, apoyado en una campaña de sondeos de reconocimiento del terreno a lo largo del trazado.

El ADIF decidió después hacer **un diseño con secciones excavadas en túnel** y, en consecuencia, en el año 2005 se redactó por la UTE IDOM -INTEMAC un nuevo proyecto con una sección tipo de **dos tubos del mismo diámetro y dispuestos uno encima del otro**, ambos para doble vía y destinados a las dos líneas férreas citadas. **Se utilizó para su redacción el mismo Estudio de JOLSA**. La sección inferior, prácticamente toda ella en roca, se destinó al túnel del AVE, y la superior, con una parte sensible en acarresos del Besós, **a la línea de ancho ibérico**.

Por razones diversas, el ADIF encomendó finalmente a IDOM-INTEMAC la redacción del **Proyecto de un solo túnel para la Línea de Alta Velocidad exclusivamente**, proyecto redactado en 2006, con el que se adjudicó la construcción de la obra en 2007. Para la redacción de este último Proyecto la documentación básica relativa a los terrenos del trazado siguió siendo la del estudio de JOLSA citado anteriormente. Sólo se añadieron un par de sondeos para aclarar aspectos concretos puntuales, pero **los criterios de proyecto sobre la geología, geotecnia y características de los terrenos no tuvieron modificaciones**.

7.1. Trinidad-montcada tunnel

Projects

*The first Project draft was made by the Joint Venture IDOM – INTEMAC in May 2002 and included **tunnelling with cut-and-cover** method. The cross-section consisted of two square areas at the same ground floor level sharing a central diaphragm wall and two more side walls: one side for the High Speed Railway line, of international wide, and the other side for the Regional Railway line, of Spanish wide. Part of the new platform plan overlapped with the existing double-track platform of Spanish width, so the old one had to be previously displaced.*

*For the preparation of this project the designer took into account several previous works provided by the GIF, which had also served as the basis for various feasibility studies for the Line Barcelona - French border or the Barcelona area freeways. Finally, **the design of the tunnel was based very specifically on the study by JOLSA, December 2001**, supported by a campaign of geological surveys along the alignment.*

*Later, ADIF decided to change to a excavation in **tunnel section** and then, the Joint Venture IDOM – INTEMAC drafted a new project consisting of **two twin tunnels one above the other**, both double track, for the two railway lines mentioned. **This project also used the same surveys by JOLSA**. The deeper tunnel alignment, almost entirely in rock, was for the High Speed Railway line (AVE) and the upper one, within the Besos River deposits, for the regional line.*

*For several reasons, ADIF entrusted IDOM-INTEMAC for the draft of **only one Tunnel Project for the AVE line**, which was completed in 2006, and submitted for bid tendering in 2007. The same **geological surveys by JOLSA were used for this draft**. Pair of boreholes more was made for some specific clearance, but the overall **geological and geotechnical baseline kept the same**.*

Type of tunnel boring machine (Trinidad - Montcada)

During the first months of 2007, SPICC studied the different TBM manufacturers bids as advisor of the Contractor Joint Venture in the election of the TBM most suitable for the particular conditions of this Project.

Tipología de la tuneladora (Trinidad-Montcada)

Durante los primeros meses de 2007, SPICC estudió las ofertas técnicas de los fabricantes, para asesorar a la UTE en la elección de la tuneladora más adecuada a las condiciones particulares de los terrenos del trazado, definidas en el Proyecto de Construcción.

El trazado discurría en acarreo en los primeros metros, para entrar inmediatamente en las formaciones rocosas del Paleozoico, descritas en el Informe geológico-geotécnico del Proyecto de Construcción. Las rocas matrices de dichas formaciones son pizarras de características resistentes diferentes (dureza media a medio-alta, entre 80 y 150 MPa) con intercalaciones de rocas duras (ampelitas, pórfidos, etc) y sometidas a la carga de agua del freático, alimentado por los ríos Ripoll y Besós, de un máximo de 30 m sobre la soleira del túnel.

Seleccionada, en principio, la oferta de HERRENKNECHT AG, en Junio de 2007 se perfeccionó, siguiendo las indicaciones de SPICC, para definir en detalle sus características definitivas, que fueron las siguientes:

Escudo tipo E.P.B. para roca dura:

- Diámetro de excavación: $D=11,66$ m.
- Aberturas de la rueda: 33%.
- Peso del escudo: 1.225 t.

Carga máxima de agua: 30 m sobre el nivel de soleira del túnel.

- Presión máxima de operación: 3,5 Bar.

Parámetros nominales máximos:

- Empuje $F = 100 \times K \times S^2 = 100 \times 12,07 \times 107 = 120.760$ kN
- Par de giro $P = \alpha \times D^3 = 23,66 \times 1.585 = 37.515$ kNm⁵

Parámetros de Arranque / Desbloqueo:

- Empuje $F_d = 139.000$ kN
- Par de giro $P_d = 40.700$ kNm

(5) El valor de $\alpha = 23,66$ era el máximo de los adoptados en la época (Junio 2007) por lo cual también lo fue el Par de giro del accionamiento eléctrico.

The tunnel alignment runs through alluvial deposits in the first few meters and goes through the Paleozoic rock formations described in the Geological-Geotechnical Report attached to the Project. The matrix rock of the Paleozoic formations consists of shale of varying hardness (medium to medium-high, from 80 to 150 MPa) with intermediate hard rock layers (Ampelite, porphyry, etc), ground water level feed by the rivers Besos and Ripoll of up to 30 m above the invert tunnel level.

The TBM by HERRENKNECHT AG was selected and it was refined in June 2007 according to SPICC recommendations, to define in detail the final characteristics, which were:

EPB Shield for hard rock:

- Excavation diameter: $D=11,66$ m.
- Wheel opening ratio: 33 %.
- Shield weight: 1.225 t.

Maximum water load: 30 m above the tunnel invert level

- Maximum working pressure: 3,5 bar

Limit values for TBM parameters:

- Thrust $F = 100 \times K \times S^2 = 100 \times 12,07 \times 107 = 120.760$ kN
- Torque $P = \alpha \times D^3 = 23,66 \times 1.585 = 37.515$ kNm⁵

Starting / Unblocking Values:

- Thrust $F_d = 139.000$ kN
- Torque $P_d = 40.700$ kNm

Cutting Wheel Configuration:

- 23 double-disc cutters $\varnothing 17$ edge width 3/4", all around the wheel outer face.
- 14 single-disc cutters $\varnothing 17$ ", along the perimeter.
- 4 double-disc cutters $\varnothing 17$ ", in the centre.
- 16 loading tools for peripheral protection
- 240 scrappers

(5) $\alpha = 23,66$ was the maximum α -value considered in that time (June 2007) and so was the Torque value of the electric drive.

Configuración de la Rueda de corte:

- 23 cortadores de doble disco Ø 17" ancho de filo 3/4" en todo el frente de la rueda.
- 14 cortadores de simple disco Ø 17" en el perímetro.
- 4 cortadores de doble disco Ø 17" en el centro
- 16 "rástres" de protección periférica
- 240 "scrappers"

Tornillo sinfín

- Diámetro: 1.250 mm.
- Capacidad: 900 m³/h

Otras características

- Motorización eléctrica (frecuencia variable): 4.000 kW.
- Velocidad de giro: 0-29 r.p.m.
- Desplazamiento axial: 350/400 mm.
- Corrector de rodadura: si
- Inyección de espumas: 350 m³/h.
- Inyección de bentonita a la cámara: 30 m³/h
- Inyección de bentonita al "gap": si
- Inyección de mortero: 40 m³
- Protecciones antidesgaste en la Rueda y mamparo.

Instalaciones auxiliares

- Cinta de transporte de escombros: Anchura 1.200 mm / Capacidad 1.000 m³/h.

Reconocimientos complementarios del trazado

Nuestra experiencia en la excavación de túneles con TBMs recomendaba **aumentar el número de sondeos de reconocimiento**, pues los del Proyecto de construcción distaban entre sí más de 200 m en varios tramos del trazado. En consecuencia, se llevaron cabo las siguientes campañas complementarias de reconocimiento del macizo.

- Por una parte, en el verano de 2007 la Contrata encargó a GEOCISA una **campaña complementaria de sondeos** (que redujo a unos 100 m la distancia entre perforaciones contiguas) más los ensayos de laboratorio correspondientes.
A lo anterior se añadieron 3 sondeos, como contraste a la campaña de 2007, que fueron realizados

Screw conveyor

- Diameter: 1.250 mm.
- Capacity: 900 m³/h

Other features

- Electric drive (variable frequency): 4.000 kW
- Rotation speed: 0-29 r.p.m.
- Axial displacement: 350/400 mm.
- Rolling control system: yes
- Foam injection: 350 m³/h
- Bentonite injection to the excavation chamber: 30 m³/h
- Bentonite injection to the gap ground-shield: yes
- Mortar injection: 40 m³
- Wear protective parts on cutting wheel and bulkhead.

Auxiliary facilities

- Spoil conveyor belt: Width 1.200 mm/1000 m³/h capacity.

Further geological surveys

According to our experience in TBM-tunnelling, it was advisable to **increase the number of exploration boreholes, since the existing ones were more than 200 m distance from each other in several alignment sections**. Then, the following geological surveys were carried out:

- Firstly, in summer 2007 the Contractor committed **GEOCISA a complementary boreholes campaign** (which reduced to about 100 m distance between adjacent holes) and the corresponding laboratory tests.
Then, 3 more boreholes were made by GEOCONSULT in 2008 to verify the first campaign in 2007, and to improve the definition of the Ripoll riverbed above the tunnel alignment.
- Several times in 2008, 2009 and 2010, the Contractor committed **GEOPAYMA additional borehole campaigns at the critical points of the alignment**, as well as extraction Shaft and location of the vertical Shafts for ventilation and emergency exit.

por GEOCONSULT en 2008, con fines diversos, entre ellos el reconocimiento del cauce rocoso del río Ripoll, bajo el que había que pasar.

- En diversas fechas de 2008, 2009 y 2010, la Contrata encomendó a GEOPAYMA otra campaña de reconocimientos por sondeos en puntos singulares del trazado, así como en el Pozo de extracción, y en las posiciones de los Pozos verticales de Ventilación y Salidas de emergencia.
- Por último, a finales de 2010 se hizo una última campaña complementaria de sondeos de reconocimiento para el tramo comprendido entre el PK 102+823 y el Pozo de extracción, realizada por SG3 y que se completó a principios de 2011.⁶

La presencia de venas de roca dura, junto con los resultados de los ensayos de abrasividad hechos sobre muestras de los sondeos, alertaron sobre la necesidad de controlar adecuadamente durante el avance la abrasividad del material excavado, con el fin de programar las intervenciones necesarias para la reposición de herramientas y piezas de protección, más las que precisaran para los trabajos de reparación de los desgastes de la Rueda, que necesitan trabajos de soldadura.

La abrasividad de los terrenos de trinidad-montcada según estudio de la Universidad de Oviedo

El documento, encargado por IDOM a la citada Universidad para la redacción del Proyecto del ADIF del futuro "SOTERRAMIENTO FERROVIARIO EN MONTCADA DE LA LINEA BARCELONA-PORTBOU", incluye el estudio petrográfico en lámina delgada (Ver Figura 4), así como la caracterización geoquímica y mineralógica de muestras de los testigos de los sondeos realizados en su día por JOLSA para el Proyecto del tunel Trinidad- Montcada que añadimos en el Gráfico 1.

El Estudio reconoce los 5 tipos litológicos siguientes bien diferenciados, de los cuales estudia el número de muestras que se indican:

- A) AMPELITAS (10 muestras)
 B) CUARZOFILITAS (9 muestras)

(6) Con independencia de los reconocimientos por sondeos del macizo rocoso atravesado por el túnel, en Agosto 2010 GEOCONSULT realizó una comprobación por sondeos del tratamiento de "jet grouting" del aluvial del tramo final próximo al Pozo de extracción.

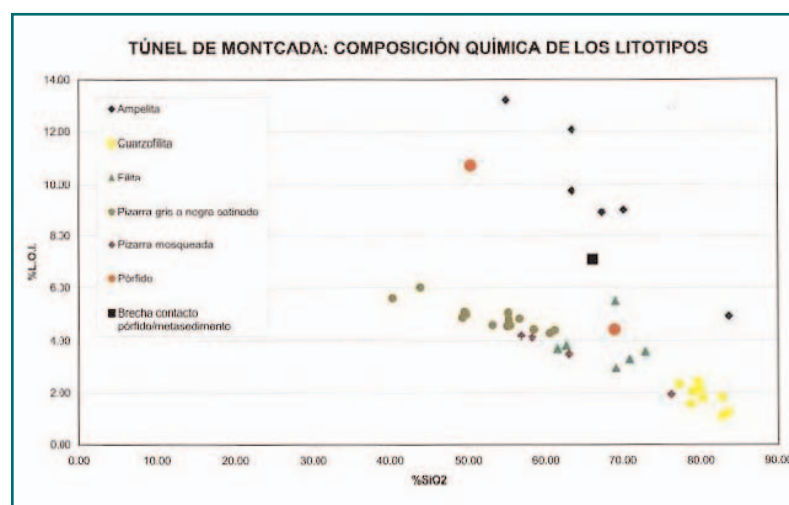


Gráfico 1/Diagram 1.

- Finally, in late 2010 a last complementary campaign of boreholes was made by SG3 in the section between 102+823 KP and the extraction Shaft.⁶

The presence of extremely hard rock layers and the results of the abrasiveness tests carried out on the borehole samples, warned us about the need to monitor properly the abrasiveness of excavated material during the TBM advance, in order to schedule the necessary interventions for replacing tools and protection parts and for the repair work of the wear of the wheel, which require welding.

Ground abrasiveness at Trinidad-Montcada tunnel, according to the survey by Oviedo University

IDOM committed the Oviedo University the geological study for the ADIF Project draft Barcelona-Portbou line railway tunnelling in Montcada. This survey includes the petrology study by thin section (see Figure 4), as well as geochemical and mineralogy identification of the borehole samples taken by JOLSA for the Trinidad-Montcada tunnel Project, shown in Diagram 1.

The survey recognizes the 5 following lithological types, which examines the number of samples indicated:

(6) Apart from the boreholes in the ground of the tunnel alignment, another campaign of boreholes was made by GEOCONSULT in August 2010 to verify the consolidation treatment of jet grouting made within the alluvial formation at the end of the tunnel section, close o the extraction shaft.

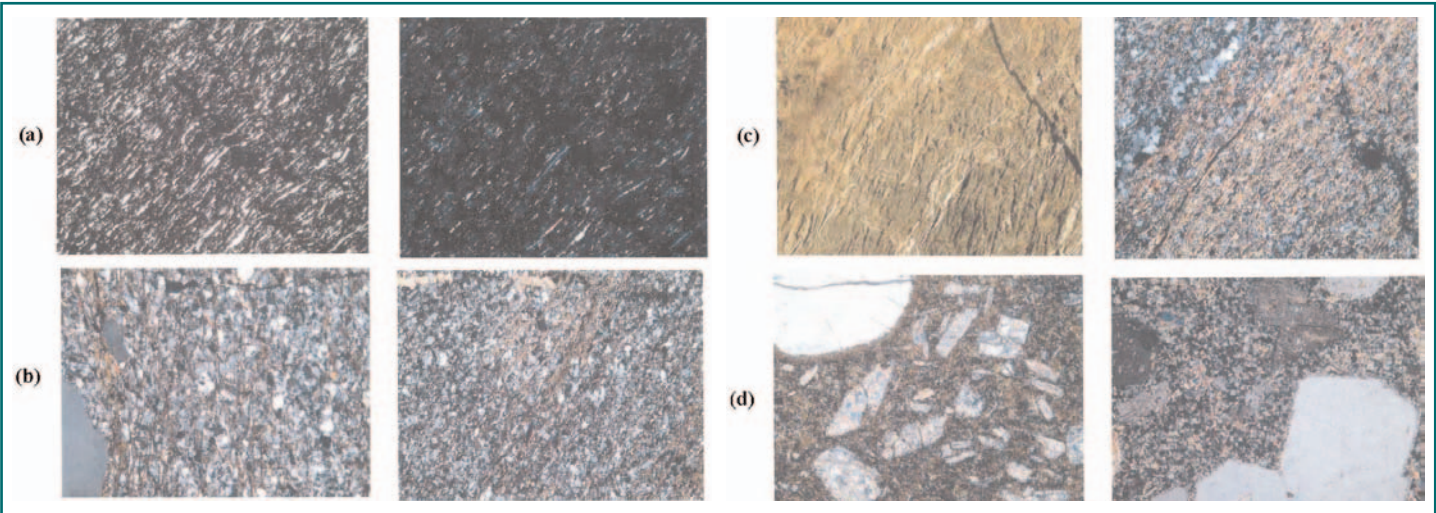


Fig. 4 (Universidad de Oviedo). Texturas típicas y roca matriz correspondiente: a) Ampelitas a la luz natural y muestra con nicoles cruzados / b) Cuarzofilitas y Pizarras mosqueadas con fracturas ocasionales / c) Pizarras pardogrisas a negras fracturadas con venas de cuarzo / d) Pórfidos. / (Oviedo University). Common textures and rock matrix: a) Ampelite at natural light with crossed nicols b) Quartz-phyllite and mottled Shale with occasional breaks c) Brown - grey to black Shale, with quartz veins d) Porphyry.

- C) FILITAS (3 muestras)
D) PIZARRAS (14 muestras) y
E) PÓRFIDOS (2 muestras)

En cuanto a la composición química y mineralógica de estos litotipos, presenta el gráfico 1, en el que se señala el % de sílice de cada uno de ellos, indicando además la proporción de los mismos. Por otra parte, aporta las fotografías de las preparaciones para el estudio petrográfico.

Finalmente expone la Tramificación geotécnica que considera más representativa, como consecuencia de su interpretación de los sondeos tramificación que resume en 6 hojas. Estima también los parámetros correspondientes a las Clasificaciones de Bieniawski (Índice RMR) y de Barton (Índice Q), haciendo la correspondiente propuesta y señala, por último, los problemas geotécnicos que considera pueden presentarse, en los que incluye la "Presencia de niveles rocosos muy abrasivos".

En resumen, las CONCLUSIONES del documento de la Universidad de Oviedo, que coinciden en líneas generales con nuestra opinión, resumen los aspectos mas importantes a tener en cuenta en las formaciones citadas (la complejidad del entorno geológico del trazado; el diferente comportamiento geológico que cabe esperar de las litologías presentes; los accidentes geológicos mas destacables, etc.) y, por lo que problema de la abrasividad de los terrenos se refiere, dice textualmente en el punto V de la Conclusión 8ª:

- A) AMPELITE (10 Samples)
B) QUARTZPHYLLITE (9 Samples)
C) PHYLLITE (3 Samples)
D) SHALE (14 Samples)
E) PORPHYRY (2 samples).

As for the chemical and mineralogical composition of these lithological types, the diagram 1 shows the silica percentage in each one of them, as well as the proportion of each type within the sample. Figure 4 shows some pictures of the petrology study preparation.

Finally, the survey by Oviedo University divides the tunnel alignment into different representative sections of similar geotechnical properties, according to the interpretation of the borehole campaign. This clasification is summarized in 6 pages. It also gives an approach of some geotechnical paramaters according to Rock Classifications by Bieniawski (RMR-Index) and Barton (Q-Index), and points out some of the geotechnical difficulties that the tunnel drive may encounter, as the "presence of extremely abrasive rock layers".

The CONCLUSIONS section in the Oviedo University Report, that are broadly in line with our view, summarizes the most important aspects to consider about the different rock formations (the complexity of the tunnel geology; the different behaviour expected of each lithology; the most remarkable geological accidents, etc.) and, as for

«V) Presencia de niveles rocosos muy abrasivos.

Las cuarzofilitas llegan a presentar contenidos medios de 56% de cuarzo, con valores máximos del 70,3% (dureza 7), mas contenidos medios de albita del 11% y máximos del 21,1% (dureza 6,5 a 7). Los pórfidos “frescos” también presentan altos contenidos en cuarzo (42,6%) y albita (21,2%). Por último, dentro de las pizarras grises a negras es frecuente la presencia de venas de cuarzo de potencia centimétrica (de 10 a 30 cm), si bien en algunos sondeos aparecen venas de cuarzo de hasta 1 m de espesor»

7.2. El control de los desgastes durante la construcción del túnel Trinidad-Montcada

Vistos los importantes desgastes ocurridos en los primeros metros de la excavación del TÚNEL DE TRINIDAD-MONTCADA, iniciada en Mayo/Junio de 2009 recomendamos a la Contrata el establecimiento en la obra de las medidas concretas siguientes:

1. Un control sistemático de la agresividad de los frentes mixtos descritos en los anteriores apartados de este artículo.
2. Recomendamos hacer dicho control de forma sistemática y prioritariamente sobre muestras tomadas de la cinta transportadora del escombro en las que se determinó el % Eq del Equivalente en cuarzo.
3. Dicha determinación se hizo por ensayos en Difractómetro de Rayos X con resultados excelentes si bien la campaña se aplicó solo a unos 400 m. del trazado.

Además del control de la abrasividad a realizar en la forma descrita, es necesario tomar las siguientes medidas para hacer la evaluación total y objetiva de los desgastes de la tBM a lo largo de la obra:

- Duración de las paradas en abierto o hiperbáricas realizadas para la revisión periódica de los desgastes de la cabeza y cámara de la máquina, y relación del personal empleado.
- Duración de las paradas, y relación de los repuestos y materiales para la reposición de herramientas y piezas de desgaste montadas en la Rueda, con indicación del tipo y número de herramientas (nuevas o a medio uso) y de las pie-

the ground abrasiveness refers, the point V of the 8th Conclusion of the report states the following words:

« V) Presence of extremely abrasive rock.

Quartz-phyllite has an average quartz content of 56%, up to 70,3% (hardness level of 7), average albite content of 11% up to 21,1% (hardness 6,4 to 7). “Fresh” porphyry also has high contents of quartz (42,6%) and albite (21,2%). Finally, within the gray to black shale there’s often presence of centimeter quartz veins (10 to 30 cm), although in some boreholes are quartz veins up to 1 m thick.»

7.2. Control and monitoring of wear during tunnel drive in Trinidad-Montcada

After the significant wear occurred in the first few meters of the TRINIDAD MONTCADA TUNNEL excavation started in May / June 2009, we suggested the Contractor to take the following specific measures:

1. *A systematic control of the aggressiveness of mixed faces described in the previous sections of this article.*
2. *Ive recommended to make the control in samples taken from the spoil in the conveyor belt, by determining the Eq %, Quartz Equivalent Index.*
3. *The Eq % was obtained by tests made on RX Difractometer and the results were outstanding although, the campaign were limited only to a tunnel section of about 400 m.*

In addition to the results of the abrasiveness control, the following measures must to be taken to achieve an objective and full evaluation of the repeated wears on the TBM along the tunnel construction time:

- *Duration of interventions (hyperbaric or atmospheric conditions) made for regular reviews of wear in cutting head and excavation chamber; and personnel required.*
- *Standstill duration, list of spare parts and materials used for replacement of tools and protective parts on the Wheel, indicating type*

zas de desgaste, así como del personal empleado en estas labores:

- Duración de las paradas y relación de repuestos y materiales empleados, así como del personal empleado en las reparaciones o reposiciones de elementos estructurales, como:

Las "cajas" de las herramientas y las protecciones fijadas a la estructura de la Rueda.

Los desgaste en la estructura de la Rueda.

Las chapas antidesgaste del frontal, borde e interior de la Rueda.

La renovación con metal duro de las protecciones tipo "grill bar" de la Rueda.

Si fuera el caso, la protección de la cara del mamparo que forma parte de la cámara de tierras.

Por todo ello, nuestra opinión al respecto es que la valoración de la repercusión económica de la abrasividad presentada en esta forma, es objetiva y ajustada a la realidad. ♦

and number of tools (new or slightly used) and protective parts, as well as list of the personnel required for such operations:

- Standstill duration and list of spare parts and materials used, as well as personnel required, for repairs and replacement of:

Tools "boxes" and protections brazed at the Wheel structure.

Wear of the Wheel structure.

The wear plates on the front face, edge and inside face of the Wheel.

The renewal of "grill bar" protections with carbide.

When necessary, the protection of the face of the bulkhead corresponding to the excavation chamber.

Therefore, our view on this is that the assessment of the economic impact of the abrasiveness made in this form, is objective and in line with reality. ♦

Referencias/References:

Por su interés a continuación se incluyen, con alguna otra, las principales referencias bibliográficas de las incluidas en el artículo de 2009 Ernts & Sohn GEOMECHANICS AND TUNNELLING N°.2, que consideramos las más completas, todavía hoy, sobre estos temas.

For your general interest, we list below reference documentation, some mentioned in the article 2009 Ernts & Sohn GEOMECHANICS AND TUNNELLING N°.2 as citations, that we consider most comprehensive in this matter.

- (1) AFNOR NORMALISATION FRANÇAISE P18-579: Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité. AFNOR Association française de normalization. Paris, 1990.
- (2) AFNOR NORMALISATION FRANÇAISE P84-430-

1: Roches: Détermination du pouvoir abrasif d'une roche. Partie 1: Essai de rayure avec une pointe. AFNOR Association française de normalization. Paris, 2000.

–(3) BRULAND, A.: Hard rock tunnel boring: Drillability test methods. Project report 13A-98, NTNU Trondheim, 1998.

–(4) CERCHAR - CENTRE D'ÉTUDES ET DES RECHERCHES DES CHARBONAGES DE FRANCE: The Cerchar abrasiveness index. Verneul, 1986.

–(5) FRENZEL, CH., KÄSLING, H. & THURO, K.: Factors Influencing Disc Cutter Wear. Geomechanics and Tunnelling 1 (2008), No. 1, pp. 55-60.

–(6) GUTIERREZ MANJON, J.M.: Consumo de cortadores de los túneles de Guadarrama. TUNEL DE GUADARRAMA (Adif 2005). Edit. Entorno Gráfico.

–(7) MENDAÑA F. & ALT: EPB shield in non-cohesive terrains with a water load. Recent achieve-

ments on Tunnel section of Line 1 of Sevilla Metro. Proceedings of the MÓNACO International Congress. October 2008.

–(8) NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. & RALEIGH, P.: SAT: NTNU's new soil abrasion test. In: Tunnels & Tunnelling Int. 5/2006, pp. 43-45.

–(9) THURO, K., SINGER, J., KÄSLING, H. & BAUER, M.: Abrasivität-suntersuchungen an Lockergesteinen in Hinblick auf die Gebirgslösung. Vorträge der 29. Baugrundtagung in Bremen, pp. 283-290. Essen: VGE, 2006.

–(10) THURO, K., SINGER, J., KÄSLING, H. & BAUER, M.: Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device. Felsbau 24 (2006), No. pp. 37-45.

–(11) THURO, K., SINGER, J., KÄSLING, H. & BAUER, M.: Determining abrasiveness with the LCPC Test. Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver B.C., 2007.