

3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas
Seminário Internacional “South American Tunnelling – SAT 2012”

**OTIMIZAÇÃO DO AVANÇO DAS TUNELADORAS E CARACTERIZAÇÃO DO
MACIÇO ESCAVADO MEDIANTE A ENERGIA ESPECÍFICA**

Richard Bieniawski¹; Francisco Cabrera²; Benjamín Celada³; Luciano Lucas⁴; Murilo Martins⁵

Isidoro Tardáguila⁶; Juan Tebar⁷

Resumo

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados obtidos de um projeto de I+D realizado pela Geocontrol com a colaboração do Administrador de Infraestructuras Ferroviárias (ADIF) da Espanha. Este projeto, realizado entre Julho de 2009 e Setembro de 2011, foi financiado pela Geocontrol e contou com um apoio por parte do Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) da Espanha.

Os trabalhos realizados demonstram que a Energia Específica de Escavação (EEE) de um túnel pode ser calculada através da fórmula proposta por Teale (1964) e que esta energia pode descompor-se em três componentes de acordo com a equação:

$$EEE=EET+EEG_r+EEG_f, \text{ onde:} \quad (1)$$

EET = Energia específica gasta na deslocação da tuneladora.

EEG_r = Energia específica gasta para girar a cabeça de corte rodando sobre a frente do túnel.

EEG_f = Energia específica gasta para girar a cabeça de corte para superar o atrito que se opõe ao material escavado.

Com base nos dados analisados nesta investigação, correlacionou-se a Energia Específica de Rotação, usada no rolamento, EEG_r, com o RMR do maciço da frente, através da fórmula:

$$RMR = \frac{5 \cdot \ln\left(\frac{EEG_r}{80}\right) - 100}{\ln\left(\frac{EEG_r}{80}\right) - 1} \quad (2)$$

Também se definiu o Índice de Eficiência da Escavação, que permite controlar o funcionamento da tuneladora.

¹ Bieniawski Design Enterprises. P.O. Box 11205, Prescott, AZ 86304-1205 USA profztb@cableone.net

² Administrador de Infraestructuras Ferroviárias (ADIF). Cl. Titán nº 4-6, 8 Pl. 28045 Madrid, T. 34 917744548, F. 34 917744522, fcabrera@adif.es

³ Geocontrol S.A. Cl Cristobal Bordiú nº 19-21, 5ª 28003 Madrid, T. 34 915531763, F.34 915549396, bcelada@geocontrol.es

⁴ Administrador de Infraestructuras Ferroviárias (ADIF). Cl. Titán nº 4-6, 8 Pl. 28045 Madrid, T. 34 917744548, F. 34 917744522, llucas@adif.es

⁵ Núcleo-Geocontrol Engenharia Ltda. Av. das Nações Unidas 12.399. Sala 77b. 04578-000 São Paulo, Brasil, T. 55 1155247880, murilo@nucleoprojetos.com.br

⁶ Geocontrol S.A. Cl Cristobal Bordiú nº 19-21, 5ª 28003 Madrid, T. 34 915531763, F.34 915549396, isidoro@geocontrol.es

⁷ Administrador de Infraestructuras Ferroviárias (ADIF). Estación de St. Justa Av. Kansas City, s/n. 41007 Sevilla T. 34 954485066, F. 34 954485028 jtebar@adif.es

INTRODUÇÃO

As tuneladoras podem alcançar avanços sustentáveis na ordem dos 1.000m/mês, quando estão bem adaptadas aos maciços a escavar e sejam conduzidas por equipes eficientes.

No entanto, se as tuneladoras não se adaptam bem aos maciços, os avanços não serão mais de 300m/mês e, no caso dos problemas levantados serem importantes, o uso das tuneladoras pode resultar bastante caro.

Para prever o tipo de tuneladora que melhor se adapte às características de escavação de um determinado túnel, a Geocontrol desenvolveu o Rock Mass Excavability (RME) Index; Bieniawski *et al.* 2006.

O RMR é muito útil na fase de projeto para escolher o tipo de tuneladora que melhor se adapte às características dos maciços. Contudo, até o momento, não há nenhum procedimento eficaz para caracterizar o maciço da frente de uma tuneladora e para prevenir os possíveis bloqueios desta.

Durante os anos de 2009, 2010 e 2011, a Geocontrol desenvolveu um projeto de I+D com o objetivo de criar uma metodologia que permita conhecer as características dos maciços na frente da tuneladora e otimizar os avanços, baseando-se nos dados sobre o processo de escavação proporcionados pela tuneladora.

Este projeto de investigação baseou-se na Energia Específica de Escavação (EEE), definida como o quociente entre a energia que se usa num processo de escavação, expressada em MJ, e o volume de maciços escavados, expressados em m³.

O conceito da EEE foi utilizado, já há algumas décadas, para ajudar a controlar a eficácia nos processos de escavação e perfuração dos maciços rochosos, uma vez que este é um parâmetro que pode ser calculado em tempo real com dados proporcionados pela própria máquina de escavação ou perfuração. Por outro lado, isto faz com que a EEE resulte especialmente atrativa para relacioná-la com as propriedades mecânicas do maciço. Acaroglu *et al.* (2008).

Destaca-se que para cada processo de escavação (TBM's, Drill and Blast, Hidraulic Hammer,...) existe uma determinada EEE, e que também depende do tamanho médio das partículas gerais na escavação. Não se pode esquecer que, de acordo com as Leis de Rittinger e Bond, a energia necessária para fragmentar um material cresce exponencialmente com o tamanho médio dos fragmentos produzidos e, conseqüentemente, é lógico que a EEE cresça exponencialmente com o tamanho médio dos fragmentos escavados.

DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA EM LABORATÓRIO

A área fechada por baixo da curva tensão-deformação, obtida através de um ensaio de compressão simples servo-controlado, corresponde com a Energia Específica gasta na ruptura a compressão simples (EEC).

Para determinar a EEC foram realizados ensaios de laboratório, com uma prensa servo-controlada, de amostras obtidas nos maciços escavados no túnel de Pontones (Astúrias, Espanha).

A Figura 1 mostra a determinação da EEC na amostra de grês do túnel de Pontones.

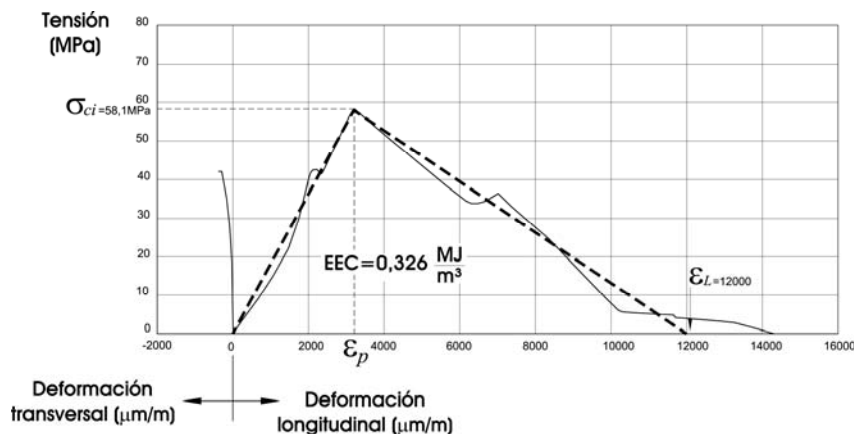


Figura 1- Determinação da EEC através de um ensaio a compressão simples servo-controlado.

Para evitar ensaios com prensas servo-controladas, sensivelmente menos frequentes que os habituais de compressão simples e que não têm em conta a pós-ruptura, Copar et al. (2001) propuseram a correlação da EEC com o produto da resistência a compressão livre (σ_{ci}) e a tração indireta (σ_t). A Figura 2 mostra a correlação das amostras do túnel de Pontones encontradas pela Geocontrol.

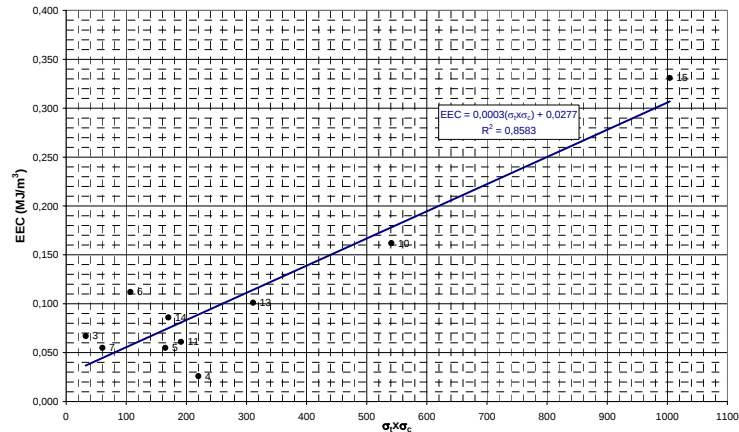


Figura 2- Correlação entre $\sigma_{ci} \times \sigma_t$ e EEC no túnel de Pontones.

CÁLCULO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE ESCAVAÇÃO A PARTIR DOS PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE UMA TUNELADORA.

Teale (1964) publicou um trabalho interessante sobre as medidas de Energia Específica nos processos de perfuração de sondagens de grande diâmetro na antiga National Coal Board, a partir do qual se propôs que a Energia Específica de Perfuração (EEP) fosse calculada com a seguinte fórmula:

$$EEP = \frac{F}{A} + \frac{2\pi \cdot \omega \cdot T}{A \cdot u} \quad (3)$$

onde:

F = Impulso da cabeça de perfuração

A = Área de taladro

ω = Velocidade de rotação

T = Par aplicado

u = Velocidade instantânea de perfuração

O primeiro termo desta equação corresponde à energia proporcionada pelo impulso do fundo do taladro perfurado; enquanto que o segundo corresponde à energia fornecida pelo par de rotações comunicado ao conjunto de barras.

Se o conceito de penetração específica for utilizado para cada revolução, $P = \frac{u}{\omega}$, a fórmula anterior assume a seguinte forma

$$EEP = \frac{F}{A} + \frac{2\pi T}{A \cdot P} \quad (4)$$

Com base nas medidas realizadas, Teale concluiu que o termo $\frac{F}{A}$ apenas representava 1% de EE; razão pela qual o considerou insignificante.

Os trabalhos realizados no túnel de Pontones (Espanha) permitiram verificar que a fórmula proposta por Teale também pode ser usada para calcular a EEE nos processos de escavação com tuneladoras. O mesmo sucedia com a perfuração de taladros, o conceito correspondente ao impulso é de cerca de 1% da EEE, em condições normais, ainda que possa alcançar os 30% em casos de bloqueio da tuneladora, razão pela qual não deve ser ignorado.

Adaptando a equação de Teale ao caso da escavação com tuneladoras pode-se escrever:

$$EEE = EET + EEG \quad (5)$$

Onde a EEE representa a energia específica consumida no deslocamento da tuneladora, que como já foi indicado representa normalmente 1% da EEE, enquanto que a EEG é a energia específica usada para girar a cabeça da tuneladora, que é o que realmente produz a escavação do maciço.

Com os dados obtidos no túnel de Pontones foi possível calcular a EEE do maciço para vários valores da RMR: quando $RMR < 35$, a EEE é inferior a 10 MJ/m^3 e quando $RMR > 45$ a EEE é superior a 32 MJ/m^3 . Nos ensaios de compressão simples servo-controlados realizados com amostras intactas destes maciços, os valores da EEC eram 10 a 20 vezes menores que os da EEE. Este resultado é aparentemente contraditório, pois o fato de que no maciço real estejam incluídas a discontinuidades e na rocha intacta não, sugere que a energia específica para destruir o maciço devia ser menor que a necessária para destruir a rocha intacta. Provavelmente a explicação deste trabalho seja que o processo de ruptura a compressão simples é mais eficiente que o da escavação com uma tuneladora.

COMPONENTES DA ENERGIA ESPECÍFICA DE ROTAÇÃO

A EEG, que em condições normais representa 19% da EEE, pode decompor-se em três termos:

$$EEG = EEG_r + EEG_f + EE\epsilon \quad (6)$$

A EEG_r é a energia específica que se gasta para rodar a cabeça de corte sobre a frente do túnel, o qual possibilita que ao realizar-se dois cortes contíguos com efeito semelhante ao ensaio brasileiro, se produza a ruptura do maciço por tração.

Nas condições habituais dos Túneis de Pontones e Sorbas (Almería, Espanha), a EEG_r representa entre 57 e 77% da EEE, correspondendo os valores mais altos com os valores mais elevados do RMR do maciço escavado.

EEG_f é a energia específica que se gasta para rodar a cabeça de corte entre o maciço previamente fragmentado pelos cortes. Em condições normais a EEG_f está compreendida entre 41 e 31% da EEE. Ao contrário da EEG_r os valores mais altos da EEG_f correspondem aos valores mais baixos da RMR.

O conceito $EE\epsilon$ engloba o resto da energia específica que se gasta em atividades relacionadas com o rolamento da cabeça de corte, como carregar o maciço escavado ou acelerar a cabeça de corte. A componente $EE\epsilon$ é praticamente constante e representa 2% da EEG, razão pela qual pode ser ignorada.

Em condições normais de funcionamento das tuneladoras, quer a EEG_r quer a EEG_f mantêm-se dentro das proporções antes indicadas. Contudo, quando a resistência do maciço aumenta significativamente, tornando-se mais difícil para escavar, a proporção da EEG_r ultrapassa os 77% da EER e, no limite, quando o maciço não pode ser escavado, alcança os 100% da EEG.

Caso contrário, ou seja, quando o maciço perde significativamente resistência e fica, inclusive, instável na frente, é muito difícil avançar com os cortes no maciço fragmentado, sendo a EEG_f a que tem 100% da EEG.

A partir dos valores instantâneos, proporcionados pela tuneladora, da força de contato sobre a frente (KN), par (m.KN) e velocidade (rpm) da rotação da cabeça de corte, assim como da velocidade do avanço (m/s) definiu-se o Índice de Eficiência da Escavação (IEE); que define os seguintes campos de funcionamento da tuneladora:

Se $IEE < 0,25$ a tuneladora corre o risco de bloquear-se na frente.

Se $0,25 < IEE < 1,75$ a tuneladora trabalha normalmente.

Se $IEE > 1,75$ a tuneladora tem grandes dificuldades para escavar.

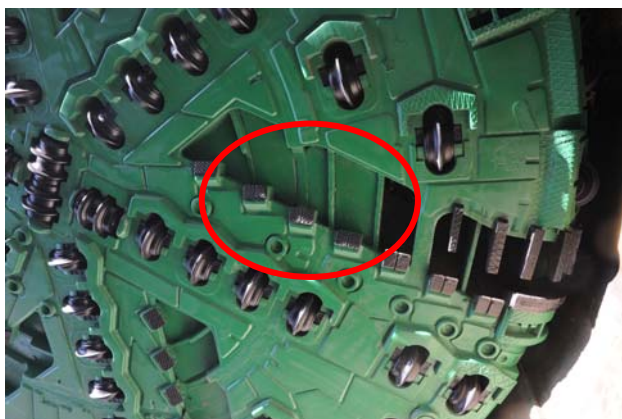
Durante a construção do túnel de Sorbas, constituído por dois túneis gêmeos de 7,5Km e com um diâmetro de escavação de 10,08m, foi possível verificar a utilidade do IEE para controlar o funcionamento da tuneladora.

Neste túnel foi previsto escavar 6,7Km com tuneladora desde as portas N; enquanto que os 800m restantes foram escavados com meios convencionais.

O primeiro túnel foi escavado com um Escudo-Duplo, que alcançou um avanço médio de 828m/mês. Apesar desta excelente média a tuneladora bloqueou a 16 de Outubro de 2010 por uma instabilidade na frente, tendo recuperado o seu funcionamento 10 dias depois.

De forma a evitar um novo bloqueio da tuneladora, no segundo túnel decidiu-se diminuir a superfície de passagem do maciço escavado através da cabeça de corte. Esta operação, tal como mostra a Fotografia 1, fez-se soldando umas placas de aço no interior da cabeça de corte. Esta operação foi realizada quando se desmontou a tuneladora, após a escavação do primeiro túnel.

A redução da secção de passagem deu muito bons resultados, pois o segundo túnel está sendo escavado a uma velocidade média de 1.196m/mês, 44% superior à obtida no primeiro túnel. A 20 de Setembro de 2011, a tuneladora escavou o tramo onde se bloqueou ao construir o primeiro túnel, sem qualquer tipo de problema.



Fotografia 1- Redução da superfície de passagem da tuneladora em Sorbas.

A Figura 3 mostra sobrepostas as evoluções dos valores IEE ao escavar o primeiro e o segundo túnel no trecho que inclui a zona de bloqueio do primeiro túnel.

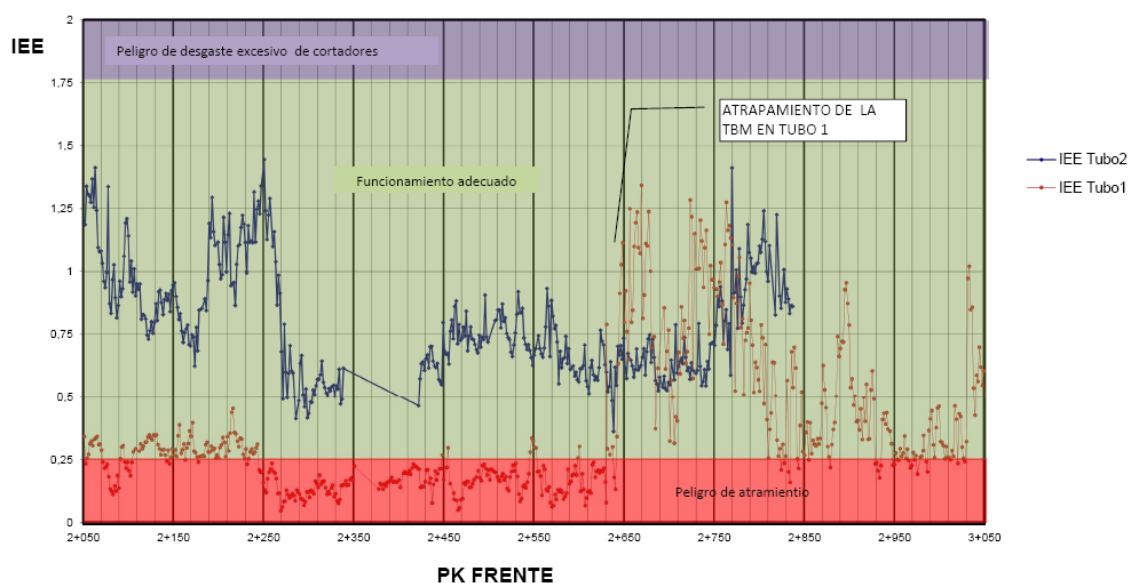


Figura 3- Evolução comparada do IEE durante a escavação dos dois túneis do túnel de Sorbas.

Nesta figura pode-se ver claramente que durante a escavação do segundo túnel os valores do IEE estão muito mais concentrados na zona de funcionamento normal que os valores obtidos durante a escavação do primeiro túnel. Por outro lado, também se verifica que durante o bloqueio do primeiro túnel, os valores do IEE reduziram, ficando por debaixo de 0,25, enquanto que na escavação desse trecho, no túnel 2, os valores do IEE variaram entre 0,5 e 0,9.

Em função de um IEE maior ou menor que 1, a EEG_r e a EEG_f calculam-se através das seguintes fórmulas:

$$\text{Para } IEE \leq 1 \begin{cases} EEG_r = \frac{4}{5} \cdot K_t \cdot \frac{f_c}{1000 \cdot \mu} \\ EEG_f = EEG_{Teale} - EEG_r \end{cases} \quad \text{Para } IEE > 1 \begin{cases} EEG_f = \frac{1}{5} \cdot K_i \cdot \frac{f_c}{1000 \cdot \mu \cdot IEE} \\ EEG_r = EEG_{Teale} - EEG_f \end{cases} \quad (7)$$

onde:

K_t = constante da tuneladora = $\frac{1000}{S \cdot d}$; sendo S = espaçamento de cortes (m) e d = diâmetro dos cortes (mm)

f_c = Impulso de contato pelo corte (KN)

μ = Coeficiente de rolamento; que, segundo SANIO (1985), vale $\sqrt{\frac{P}{d}}$; sendo P = penetração (mm)

K_i = Constante instantânea da tuneladora = $\frac{1000 \cdot EEG}{f_c / \mu}$

ESTIMATIVA DO RMR DA FRENTE ESCAVADA A PARTIR DA EEG_r

A partir dos dados obtidos nos Túneis de Pontones II e Sorbas I, em Espanha, assim como no túnel de Los Bronces, no Chile, realizou-se o gráfico que se mostra na Figura 4, a partir do qual se pode estimar o valor do RMR do maciço escavado na frente com um erro de ± 5 pontos.

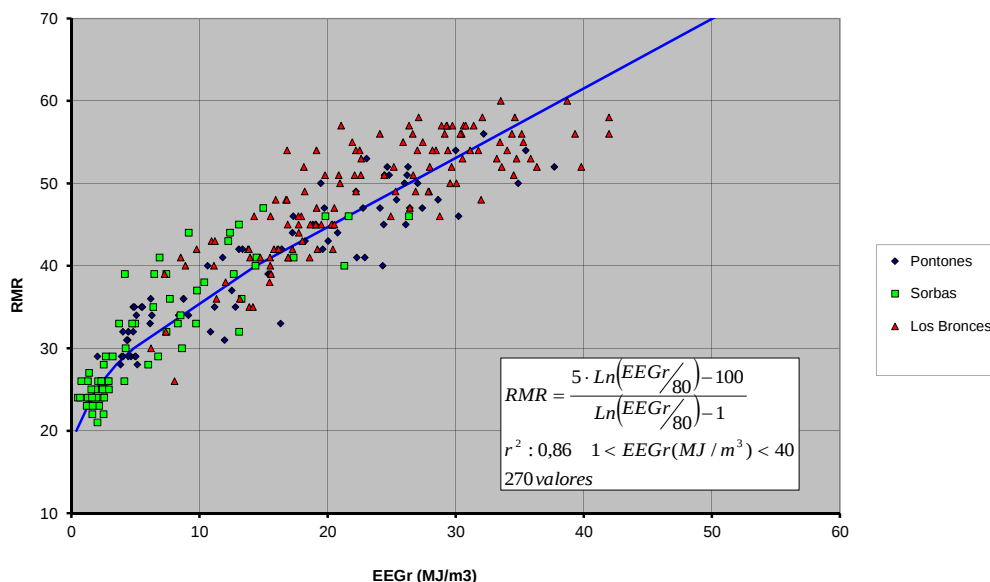


Figura 4- Correlação da EEG_r com o RMR da frente de escavação.

A estimativa do RMR do maciço escavado na frente é muito útil para seleccionar o tipo de revestimento primário que deve ser colocado, detrás da tuneladora, quando se utilizam tuneladoras sem escudo.

AUTOCONTROLE DO FUNCIONAMENTO DAS TUNELADORAS

Durante a construção do túnel de Guadarrama, constituído por dois túneis gêmeos de 28Km de comprimento, a Geocontrol aplicou um sistema de ajuda ao processo de escavação, baseado nas previsões do Projeto de Construção. Tardáguila *et al.* (2005).

O fato de que com os parâmetros proporcionados a tuneladora possa estimar o RMR da frente e, com este dado, calcular o Índice de Comportamento Elástico (ICE) Celada (2010) e Bieniawski *et al.* (2011), assim como calcular o IEE da tuneladora, estabelece-se um novo caminho para poder exercer, a tempo real, um autocontrole eficiente do funcionamento da tuneladora e conseguir a sua otimização.

A Figura 5 mostra um exemplo da aplicação desta metodologia no túnel de Sorbas.

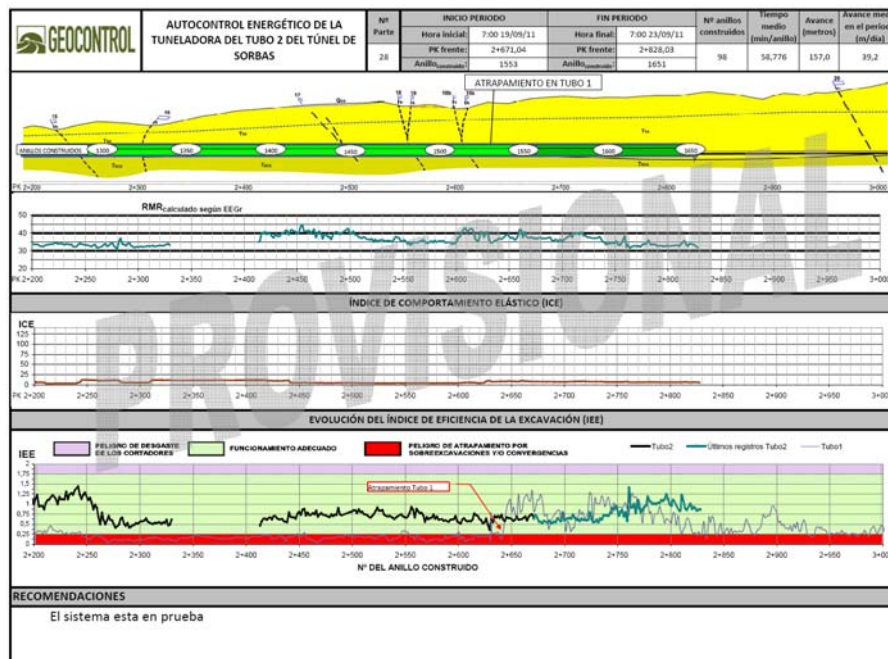


Figura 5- Resultados obtidos do programa para otimização do funcionamento da tuneladora.

Na situação atual a informação que se facilita a quem conduz a tuneladora é:

Perfil Geomecânico previsto no Projeto de Construção.

Evolução do RMR da frente.

Evolução do ICE na frente do túnel.

Evolução do IEE.

Com base nesta informação pretende-se que quando o sistema esteja depurado, que se possa estabelecer recomendações diárias acerca do impulso sobre a frente e a rotação da cabeça de corte, de forma a otimizar o avanço da tuneladora.

CONCLUSÕES

Os trabalhos de investigação realizados nos Túneis de Pontones e Astúrias durante 2009 e 2011 permitiram chegar às seguintes conclusões:

I.- A Energia Específica de Escavação (EEE) numa tuneladora pode calcular-se a través da fórmula de Teale (1964).

II.- A Energia Específica de Compressão (EEC), que se pode obter ensaiando amostras de rochas em laboratório, é 10 a 20 vezes menor que a EEE para o mesmo maciço.

III.- Para efetuar uma análise do trabalho da tuneladora com base à EEE, é necessário utilizar as três componentes da EEE; definidas pela seguinte relação:

$$EEE = EET + EEG_r + EEG_f \quad (8)$$

IV.- O valor do RMR do maciço escavado na frente pode-se estimar, com um erro de ± 5 pontos, a partir da Energia Específica de Rotação usada para rodar a cabeça de corte na frente (EEG_r).

V.- A partir das componentes da EEG_r e outros parâmetros da tuneladora, pode-se definir o Índice de Eficiência da Escavação (IEE); com o qual se pode controlar o funcionamento da tuneladora.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho desejam expressar os seus agradecimentos à ADIF, por ter permitido a utilização de informação necessária para a apresentação deste trabalho, especialmente ao Sr. Raimundo Angosto, Chefe de Estruturas do trecho León-Oviedo e ao Sr. Diego Martínez, Diretor de Obra do Túnel de Sorbas, pela sua excelente colaboração na coleta de dados para esta pesquisa.

Também expressam o seu agradecimento ao Sr. Juan Margareto, Chefe de Obra do Túnel de Pontones, ao Sr. José Luis Canedo, Chefe de Obra do Túnel de Sorbas e ao Sr. José Luis del Valle, Gerente do Consórcio FCC-Sando.

BIBLIOGRAFIA

a) Capítulo de livro

TARDÁGUILA, I.; SUAREZ, J.L. (2005) “*Metodologia para el seguimiento y control del maciço en el interior de los Túneles de Guadarrama*”. Libro “*Túnel de Guadarrama*” ADIF, Madrid, pp. 477-501.

b) Artigo de revista

ACAROGLU, O; OZDEMIR, L.; ASBURY B.; (2008). “*A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction*”. Tunnelling and Underground Space Technology. nº 23.

BIENIAWSKI, Z.T.; AGUADO, D.; CELADA B.; RODRÍGUEZ, A.(2011) “*Forecasting Tunnel Behaviour and the Round of Advance for Construction by Conventional Methods*”. T&T pp.39-42.

CELADA, B; FERNÁNDEZ, M.; RODRÍGUEZ, A.; TARDÁGUILA, I.(2010) “*Definición preliminar de las secciones tipo de sostenimiento en los túnel*”. ICE Ingeopres , pp. 16-22.

COPUR H.; TUNCDEMIR, H.; BILGIN, N.; DINCER, Tt.; (2001). *Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkinsh mines*. Trans. Inst. Min. Metall, Sep. Dec.

TEALE, R.; (1965). *The concept of specific energy in rock drilling*. Int. J. Rock Mechanics. Mining Sci. Vol 2.

SANIO, H.P.; (1985). *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic roc*. Int. Jour. Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol 22, nº3.

c) Artigo de congresso

BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M.; ÁLVAREZ, Mª.; (2006). “*Rock Mass Excavability (RME) index: a Neww Way to Selecting the Optimun Tunnel Construction Method*” Proc. ITA World Tunnelling Congress, Seul.

COOK, N.G.W.; JOUGHIN, N.C.; (1970). *Rock Fragmentation by Mechanical, Chemical and Thermal Method*. Sexto Congreso Mundial de Minería; Madrid

d) Outros

GEOCONTROL S A, (2011). *Informe final sobre el proyecto de I+D para el Desarrollo de un nuevo sistema para predecir los cambios del maciço por delante de las tuneladoras*. CDTI ref. IDI-20100374. Madrid, España.