

# ESTUDO DO DESEMPENHO DE TBM NA ESCAVAÇÃO DE MACIÇOS GRANÍTICOS DO NORTE DE PORTUGAL UTILIZANDO O SISTEMA $Q_{TBM}$

## STUDY OF THE PERFORMANCE OF TBM IN THE EXCAVATION OF GRANITE ROCK MASSES OF THE NORTH OF PORTUGAL USING THE $Q_{TBM}$ SYSTEM

Miranda, Tiago Filipe da Silva, *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, [tmiranda@civil.uminho.pt](mailto:tmiranda@civil.uminho.pt)*

Martins, Francisco Ferreira, *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, [ffm@civil.uminho.pt](mailto:ffm@civil.uminho.pt)*

Rodrigues, Daniel, *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, [a44340@alunos.uminho.pt](mailto:a44340@alunos.uminho.pt)*

### RESUMO

O sistema  $Q_{TBM}$  é uma metodologia empírica para a previsão dos rendimentos esperados na escavação de túneis com tuneladoras TBM, nomeadamente, as velocidades de penetração (PR) e de avanço (AR). Neste trabalho, esta metodologia é aplicada a uma base de dados geotécnica coligida durante as obras de construção de uma obra subterrânea hidroeléctrica na zona Norte de Portugal, com o objectivo de avaliar a adequabilidade de utilização de TBM na escavação de túneis em maciços graníticos típicos dessa região. Esta base de dados continha 1230 determinações de vários dos parâmetros necessários. Para os parâmetros em falta foram estabelecidos intervalos de confiança e realizadas análises de sensibilidade à sua variação. Deste estudo verificou-se que o maciço em questão apresenta boas características para ser escavado com recurso a tuneladora já que são expectáveis rendimentos bastante aceitáveis.

### ABSTRACT

The  $Q_{TBM}$  system is an empirical methodology for the performance prediction in tunnels excavated with TBM, namely the penetration and advance rates. In this work this methodology is applied to a database collected during the construction of a hydroelectric underground work built in the North of Portugal to evaluate the adequacy of using TBM in the excavation of tunnels in granite rock masses typical from that region. This database contained 1230 determinations of several parameters. For the ones missing, confidence intervals were set and sensitivity analysis was carried to evaluate the impact to their variation. From this study it was concluded that the analysed rock mass presents good characteristics to be excavated using TBM since the expected performance is rather acceptable.

## 1. INTRODUÇÃO

Está prevista, para os próximos anos, a construção de um conjunto de obras subterrâneas na zona Norte de Portugal onde predominam os maciços de natureza granítica. A construção de obras subterrâneas nesta zona tem sido realizada com recurso às técnicas tradicionais de desmonte. No entanto, a utilização de tuneladoras TBM já foi equacionada, nomeadamente no âmbito da construção do reforço de potência Venda Nova III, cujo programa de concurso aceitava que para os túneis hidráulicos a solução TBM seria aceite como solução variante a apresentar pelos concorrentes ao concurso da empreitada geral de construção.

Para além das questões de viabilidade económica da utilização desta técnica existem ainda incertezas associadas ao desempenho de TBM nos maciços graníticos típicos da zona Norte. A experiência do Metro do Porto permitiu concluir da viabilidade da utilização desta técnica em maciços graníticos heterogêneos mas neste caso os túneis construídos foram relativamente superficiais o que não acontece, normalmente, em túneis de aproveitamentos hidroeléctricos em que os recobrimentos podem chegar às centenas de metros.

O objectivo deste trabalho foi o de aproveitar o grande acervo de dados resultantes dos trabalhos de prospecção e observação realizados no contexto de construção do empreendimento de Venda Nova II para, utilizando uma metodologia adequada e devidamente validada, prever o rendimento de uma TBM na realização de uma obra subterrânea em granitos típicos da região Norte de Portugal.

Os modelos de previsão de desempenho de TBM têm evoluído nos últimos 30 anos de modelos que utilizam apenas um parâmetro (Graham, 1976; Nelson, 1983; Hughes, 1986; O'Rourke et al., 1994) para outros mais complexos que utilizam diversos parâmetros (Rostami, 1997; Bruland, 1998; Nelson et al., 1999; Cheema, 1999; Barton, 2000; Grima et al., 2000). A maioria dos métodos considera como principais factores relacionados com o maciço rochoso na previsão de PR são as resistências à compressão uniaxial e à tracção, e a frequência e a orientação das diaclases. Relativamente às características da máquina os parâmetros normalmente utilizados são os relacionados com as características das peças de corte, a força média de corte e o número de rotações por minuto. Na actualidade os métodos mais utilizados são os modelos CSM (Cheema, 1999), NTNU (Bruland, 1998), probabilístico (Nelson et al., 1999) e o  $Q_{TBM}$  (Barton, 2000). Alguns autores desenvolveram também modelos de correlação entre sistemas empíricos de classificação do maciço rochoso e o desempenho de tuneladoras TBM, nomeadamente o RSR (Rock Structure Rating), o RMR, o Q e o IMS (Integrated Mass System) (Innaurato et al., 1999; Sundaram et al., 1998; McFeat-Smith, 1999; Sapiigni et al., 2002).

Recentemente, Gong e Zhao (2009) apresentaram um modelo conceptual para o maciço rochoso para a previsão de PR. O modelo conceptual do maciço rochoso considera quatro parâmetros, nomeadamente: resistência à compressão uniaxial, a fragilidade da rocha, o espaçamento e a orientação das diaclases.

Obviamente, todos estes modelos apresentam vantagens e limitações. Relativamente ao sistema  $Q_{TBM}$  têm sido referidas as dificuldades na sua aplicação mormente pelo elevado número de parâmetros que considera (Gong e Zhao, 2009). No entanto, no caso de estudo presente foi possível determinar valores para a maior parte dos parâmetros necessários. Para os restantes, estes foram estabelecidos com base na experiência ou definidos intervalos de variação para os mesmos estudando o seu impacto nos resultados obtidos. Dado que o sistema  $Q_{TBM}$  foi desenvolvido baseado num elevado número de casos de estudo considera-se um sistema válido para a previsão do comportamento de TBM.

## 2. SISTEMA $Q_{TBM}$

Baseado no sistema Q, Barton estabeleceu uma metodologia empírica para previsão do desempenho de escavações com TBM que operam essencialmente em maciços rochosos e de modo aberto, denominado por  $Q_{TBM}$ . O texto e as figuras, que se apresentam de seguida, baseiam-se numa publicação apresentada por Barton (2000). A base desta metodologia consiste na utilização de um índice  $Q_0$ , que é calculado substituindo na expressão de cálculo de Q o valor de RQD por um outro obtido segundo o eixo do túnel ( $RQD_0$ ) e pela utilização da relação  $J_r/J_a$ , que representa a resistência ao corte das discontinuidades, relativa à família com mais influencia no processo de corte.

O valor de  $Q_{TBM}$  é calculado a partir de  $Q_0$  com a inclusão de outros parâmetros que estão relacionados com o desempenho da tuneladora. A expressão de  $Q_{TBM}$  que engloba todos os parâmetros é a seguinte:

$$Q_{TBM} = Q_0 \cdot \frac{SIGMA}{F^{10} / 20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma_\theta}{5} \quad [1]$$

onde F é força de impulso de corte (tnf); SIGMA o valor estimado da resistência do maciço rochoso em MPa; CLI é um índice relativo à duração das peças de corte; q a percentagem de quartzo; e  $\sigma_\theta$  a estimativa da tensão perimetral, em MPa, induzida na face do túnel.

A abrasividade é um dos factores considerados nesta metodologia de previsão. Da análise da Figura 1, conclui-se que a duração das peças de corte cai muito rapidamente para valores de CLI abaixo de 20. Assim, CLI é normalizado com este valor para traduzir a maior ou menor dificuldade de escavação para valores de CLI, respectivamente inferiores ou superiores a 20. Na Figura 2, apresentam-se intervalos de valores correntes de CLI, e a sua distribuição percentual, para vários tipos de rocha. A inclusão da quantidade de quartzo normalizada para 20% mostrou ser também um factor importante na previsão, já que a duração das peças de corte é mais curta em rochas ricas em quartzo. Para evitar problemas com a expressão 1 em rochas onde não exista quartzo, devem utilizar-se valores de q nunca inferiores a 0,5.

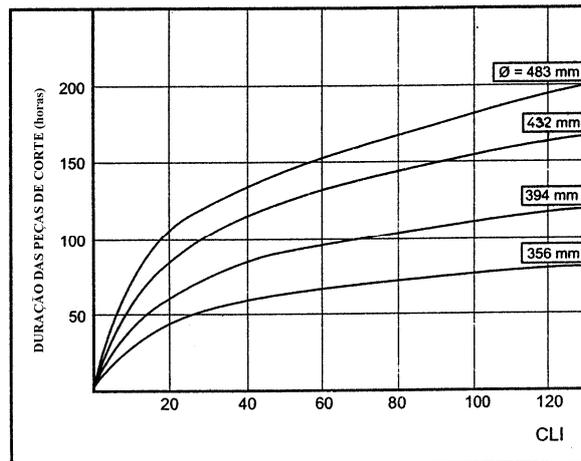


Figura 1 – Duração das peças de corte em função de CLI

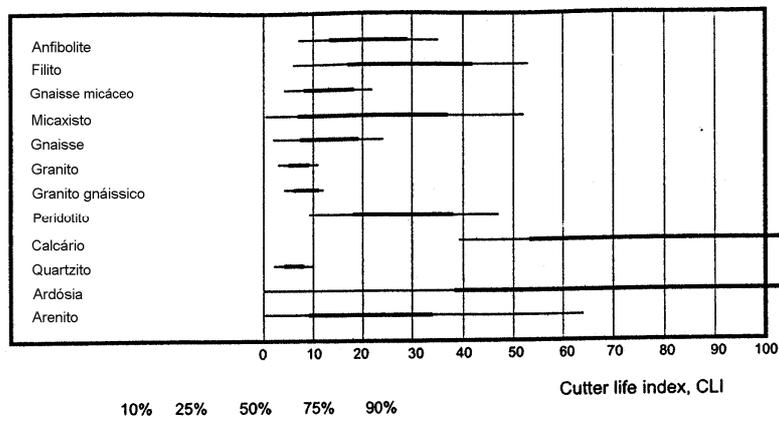


Figura 2 – Valor de CLI para vários tipos de rocha

O estado de tensão também influencia a resistência à penetração, nomeadamente o estado de tensão perimetral ( $\sigma_\theta$ ) na face do túnel. Assume-se que não há dificuldades de penetração acrescidas devido à influência do estado de tensão até aos 100 metros de profundidade, utilizando-se, por isso, uma tensão normalizada igual ao valor médio dividido por 5.

Um aspecto chave deste sistema é a comparação da força de corte transmitida pela tuneladora (F) com uma medida empírica da resistência do maciço rochoso à penetração designada de SIGMA, que é altamente dependente da orientação. O cálculo do valor de SIGMA incorpora o peso volúmico da rocha e um outro parâmetro normalizado  $Q_c$  ou  $Q_t$ , pelo que SIGMA poderá tomar um de dois valores, conforme indicado nas expressões seguintes:

$$SIGMA_{CM} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{1/3} \quad [2]$$

$$SIGMA_{TM} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_t^{1/3} \quad [3]$$

Os valores normalizados  $Q_c$  e  $Q_t$  são dados, respectivamente, por:

$$Q_c = Q_0 \cdot \frac{\sigma_c}{100} \quad [4]$$

$$Q_t = Q_0 \cdot \frac{I_{50}}{4} \quad [5]$$

Deve utilizar-se  $SIGMA_{CM}$  quando o modo de rotura do maciço à penetração da tuneladora é, predominantemente, por compressão e  $SIGMA_{TM}$  quando a rotura é, predominantemente, por tracção. De um modo mais simples, quando a inclinação das descontinuidades é favorável à escavação (inclinações baixas), a abordagem correcta consiste na utilização de  $SIGMA_{TM}$ ; quando é desfavorável (inclinações elevadas), deve utilizar-se  $SIGMA_{CM}$ . Deste modo, consegue-se que  $Q_{TBM}$  seja dependente da orientação.

A Figura 3 mostra que existe uma relação aproximadamente quadrática entre a velocidade de penetração (PR) e a força de corte (F) com uma rápida variação do gradiente quando ultrapassada a força de corte de 20 tnf. Por isso, a força de corte aparece normalizada na expressão 2 para o valor de 20 tnf. O expoente dez em F serve para manter a relação quadrática deste parâmetro com PR já que este está relacionado com  $Q_{TBM}$  por uma raiz quinta.

Os parâmetros fundamentais de desempenho da tuneladora, estimados por esta metodologia, são PR e a velocidade de avanço (AR). Verifica-se que PR aumenta à medida que o valor de Q diminui, como mostra a Figura 4. No entanto, existe um ponto de quebra neste aumento quando a escavação se processa em maciços altamente alterados e fracturados. O operador da TBM normalmente ajusta a força de corte (F) ao tipo de rocha, usando uma força menor em maciços muito fracturados para evitar eventuais problemas de estabilidade e o encravar da cabeça de corte. Podem, também, aparecer problemas nos apoios da máquina quando esta entra numa zona com as características referidas. A Figura 5, que representa a variação de PR e AR com o valor de  $Q_{TBM}$ , mostra linhas a tracejado quando  $Q_{TBM} < 1$ , porque se assume que há intervenção do operador para valores de PR demasiado elevados.

A velocidade de avanço (AR) segue a mesma tendência. Como já se verificou, valores de Q elevados significam uma baixa PR. No entanto, as necessidades de instalação de suportes do maciço rochoso diminuem consideravelmente. Baixos valores de Q aumentam a necessidade de instalação de suportes o que faz diminuir a AR.

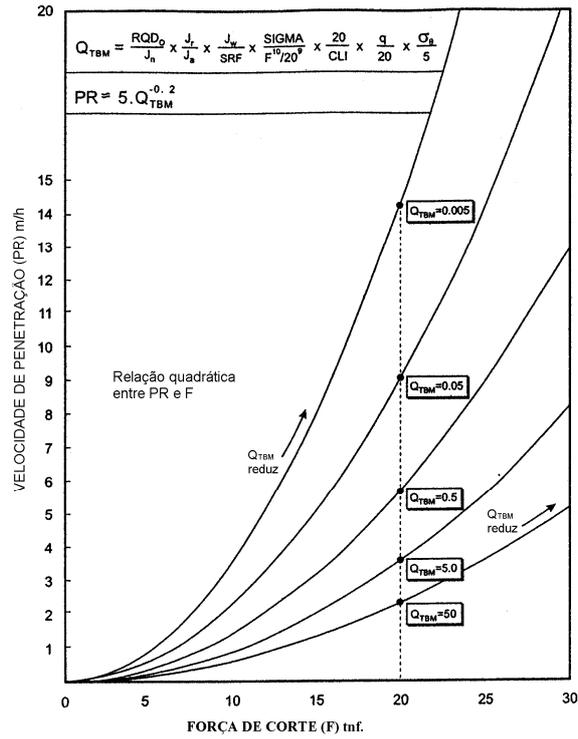


Figura 3 – Relação entre a força de corte e a velocidade de penetração

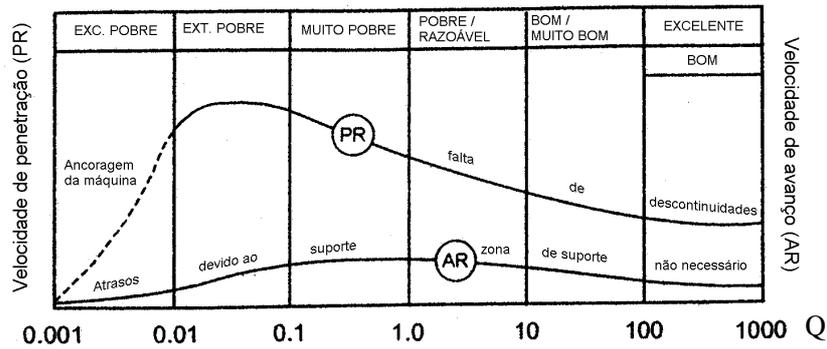


Figura 4 – Esquema da variação de PR e AR com o valor de Q

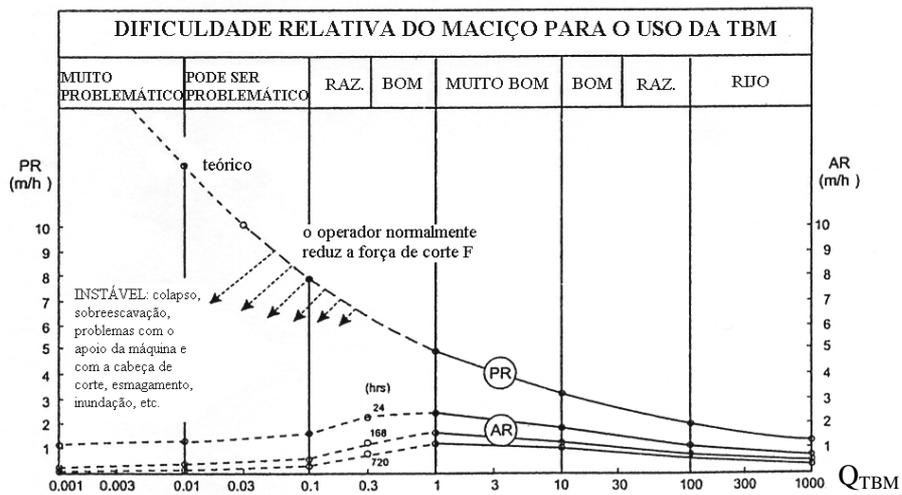


Figura 5 – Variação de PR e AR com o valor de  $Q_{TBM}$

Estas observações apontam para a existência de um intervalo central para os valores de  $Q_{TBM}$ , aproximadamente entre 0,1 e 1, ao qual estão associados valores mais elevados de PR e AR. Deste modo, pode concluir-se que, para um projecto de escavação de um túnel com o recurso a uma TBM, não são desejáveis condições extremas de rocha, nem muito boa, nem muito má.

Calculado o valor de  $Q_{TBM}$ , podem ser determinados os dois parâmetros de desempenho PR e AR através das seguintes expressões, expressos em m/hora:

$$PR \approx 5 \cdot (Q_{TBM})^{-0.2} \quad [6]$$

$$AR = PR \times U \quad [7]$$

onde U é o nível de utilização, que é dependente do tempo (T), podendo ser expresso em função de  $T_m$ , ficando a expressão 7 com a seguinte forma:

$$AR \approx 5 \cdot (Q_{TBM})^{-0.2} \cdot T^m \quad [8]$$

m é um gradiente negativo que depende do desempenho nos trabalhos de escavação e T é a unidade de tempo (dia, semana, mês...) para o qual se quer saber o valor médio de AR, expresso em horas. A Figura 6 mostra que o valor típico de PR, para um maciço razoável e uma hora de escavação contínua, é de 3 m/h. AR terá um valor de 1,6 m/h para 1 dia, de 1,1 m/h para 1 semana, de 0,8 m/h para 1 mês e 0,5 m/h para 1 ano. Este é um comportamento normal em túneis TBM. O valor médio de AR diminui com o aumento da unidade de tempo considerada. A razão é o sucessivo declínio no valor de U, correspondente à utilização da máquina. Esta conclusão foi retirada da análise de 145 túneis perfurados com TBM totalizando mais de 1000 km. Esta diminuição é quantificada através do coeficiente m.

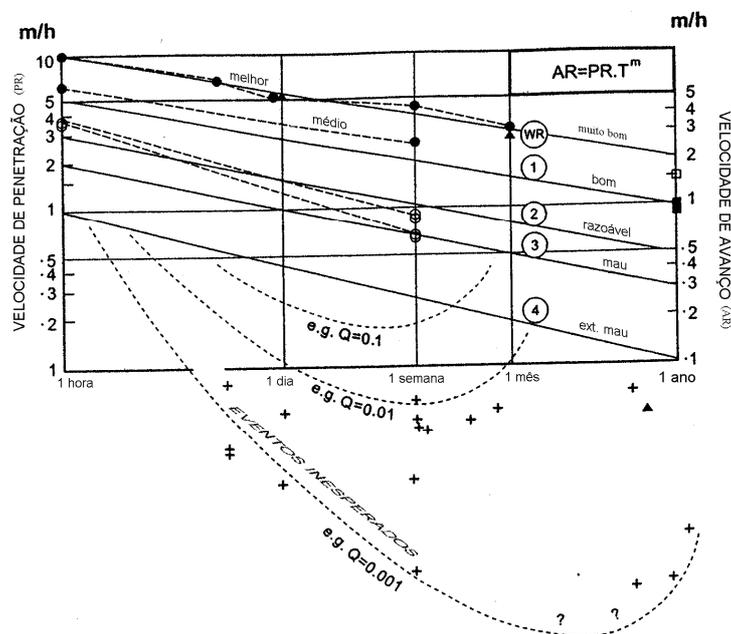


Figura 6 – Variação de AR com a unidade de tempo

O valor inicial do coeficiente de declínio m ( $m_1$ ) pode ser estimado através de uma relação com o valor de Q a partir da Figura 7. Este valor pode ser modificado para ter em consideração a abrasividade da rocha através do coeficiente CLI, a percentagem de quartzo (q), a porosidade (n) e o diâmetro do túnel (D), através da expressão:

$$m \approx m_1 \cdot \left(\frac{D}{5}\right)^{0,20} \cdot \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{q}{20}\right)^{0,10} \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{0,05} \quad [9]$$

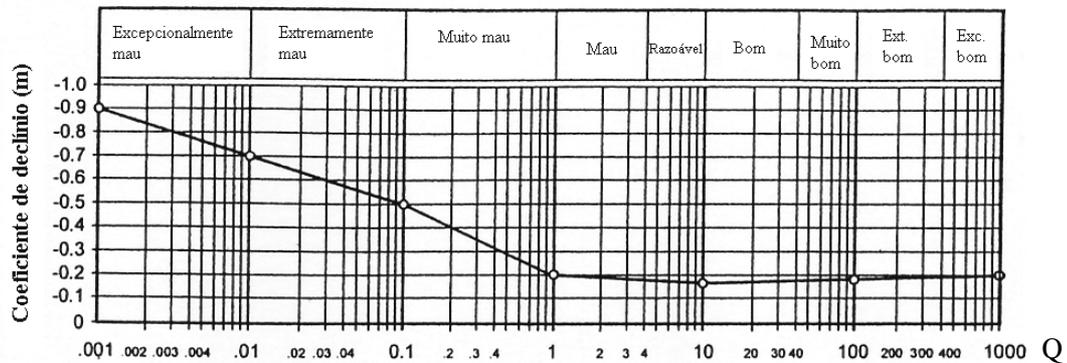


Figura 7 – Variação de m com o valor de Q

A necessidade de mudar as peças de corte mais frequentemente em rochas abrasivas e menos frequentemente em rochas porosas e não cristalinas significa que, também, o valor de m será afectado por CLI e pela quantidade de quartzo.

As porosidades elevadas estão normalmente associadas a baixas resistências à penetração, o que conduz a velocidades de penetração elevadas. Contudo, essa maior velocidade de penetração pode conduzir a um desgaste mais acelerado das peças de corte tendo por isso algum efeito negativo no gradiente m. Devem utilizar-se valores de percentagem de q e n superiores a 0,5%.

Normalmente, os túneis de maior diâmetro originam um comprimento maior de rocha que requer suporte do que em túneis de menor diâmetro. Isto vai fazer aumentar o gradiente (m) ao qual estarão associados, conseqüentemente, menores valores de AR. Embora túneis maiores possam ser escavados mais rapidamente do que túneis menores em diâmetro em condições de rocha similares, maiores atrasos podem ocorrer em túneis maiores se a rocha for de pior qualidade geotécnica. Assim, o diâmetro do túnel normalizado para um valor de 5 m foi seleccionado para modificar o valor do gradiente m. Assume-se que a maior eficiência de máquinas maiores é ultrapassada pelos maiores atrasos devido ao aumento das necessidades de suporte à medida que aumenta o tamanho do túnel.

### 3. RESULTADOS

O valor médio de Q para os 1230 registos disponíveis foi de 13,6 o que permite classificar o maciço de boa qualidade geomecânica. No entanto, o desvio padrão calculado foi de 18,1 o que aponta para a existência de uma grande gama de qualidades de maciço rochoso na base de dados.

A aplicação do sistema  $Q_{TBM}$  implica o cálculo de um valor de Q cujo RQD é determinado na direcção de escavação. Neste caso o valor de Q presente na base de dados é o equivalente a  $Q_0$  já que este foi determinado na frente de escavação de uma obra subterrânea. Para os restantes parâmetros necessários para o cálculo de  $Q_{TBM}$  utilizaram-se ábacos fornecidos pelo autor do sistema, a experiência existente relativamente às características dos maciços graníticos e intervalos de valores possíveis para os parâmetros de interesse.

O parâmetro CLI é um índice relativo à duração das peças de corte e está ligado à abrasividade da rocha. A Figura 2 apresenta estimativas de valores para este parâmetro dependendo do tipo de rocha e para maciços graníticos aponta para valores de CLI entre os 6 e os 9. Assim, neste estudo adoptou-se um valor de 8 para este parâmetro. A experiência indica que a percentagem de quartzo neste tipo de rocha varia aproximadamente entre os 20% e os 40% tendo sido adoptado numa fase mais avançada do estudo um valor médio de 30%. A tensão perimetral ( $\sigma_\theta$ ) varia com o estado de tensão *in situ* na frente da escavação. Assim, optou-se para este parâmetro um intervalo de valores entre os 5 MPa e os 50 MPa para a realização de uma análise paramétrica. O parâmetro F (força de impulso de corte média) depende da tuneladora utilizada. Baseado em experiência anterior fez-se variar esta força entre as 15 tnf e as 25 tnf. Para o cálculo do parâmetro SIGMA considerou-se que o modo de rotura predominante seria por compressão e que o peso volúmico da rocha intacta é de 0,027 MN/m<sup>3</sup>. Estes parâmetros são suficientes para o cálculo de  $Q_{TBM}$  e os intervalos de valores determinados para alguns dos parâmetros permitiram obter um intervalo para  $Q_{TBM}$ .

Numa primeira análise calculou-se  $Q_{TBM}$  e PR considerando um valor de F de 20 tnf. No Quadro 1 resumem-se os resultados obtidos.

Quadro 1 - Valores de  $Q_{TBM}$  e PR considerando F = 20 tnf para valores variáveis de q e de  $\sigma_\theta$ .

q (%)	$\sigma_\theta$ (MPa)	$Q_{TBM}$ (médio)	PR (m/h)
20	5	0,818	7,882
	10	1,637	6,861
	20	3,274	5,973
	30	4,911	5,508
	40	6,547	5,200
	50	8,184	4,973
30	5	1,228	7,268
	10	2,455	6,327
	20	4,911	5,508
	30	7,366	5,079
	40	9,821	4,795
	50	12,276	4,586
40	5	1,637	6,861
	10	3,274	5,973
	20	6,547	5,200
	30	9,821	4,795
	40	13,095	4,527
	50	16,369	4,329

Os valores de  $Q_{TBM}$  obtidos estão na sua maioria dentro do intervalo que optimiza o desempenho das TBM nomeadamente entre 1 e 10. Os resultados apontam para valores de PR aproximadamente entre os 4 m/h e os 8 m/h o que representam velocidades bastante aceitáveis. Verifica-se que o desempenho da tuneladora diminui com o aumento da percentagem de quartzo e da tensão perimetral como seria de esperar. Quando a percentagem de quartzo aumenta de 20% para 30% existe uma diminuição de PR de cerca de 7,8% e quando aquele parâmetro passa de 30% para 40% a redução é mais ligeira, da ordem dos 5,6%.

Relativamente à tensão perimetral, PR diminui consideravelmente numa gama de tensões mais baixas tendendo assintoticamente para valores mais elevados da tensão. Esta redução varia aproximadamente entre os 13% e os 4%, respectivamente para os valores mais baixos e mais elevados das tensões consideradas. Na Figura 8 apresenta-se a variação de PR com a tensão perimetral para diferentes percentagens de quartzo.

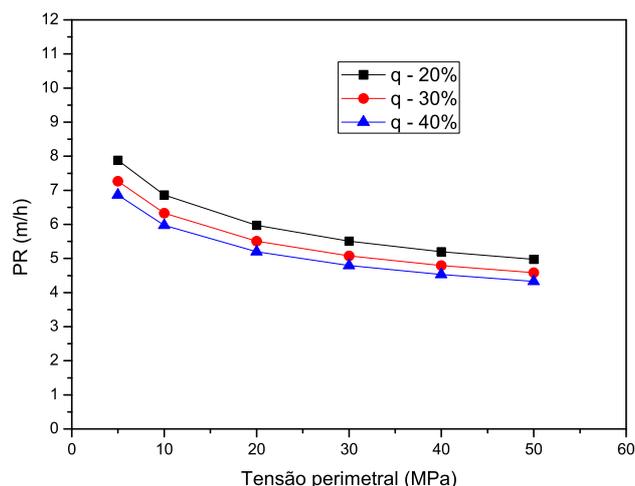


Figura 8 – Variação de PR com a tensão perimetral para diferentes percentagens de q.

De seguida, procedeu-se a uma análise para a avaliação do impacto da força de impulso de corte (F) na velocidade de penetração (Quadro 2). Para esta avaliação considerou-se um valor de q de 30%. Como se pode verificar pela Figura 3 a PR aumenta exponencialmente com F. De facto, o efeito da redução deste parâmetro é extremamente notório na variação de PR. A redução de F de 25 tnf para 20 tnf implica uma redução de PR de cerca de 36% e a redução de 20 tnf para 15 tnf uma redução de 44%. Este facto aponta para que as características da tuneladora nomeadamente a sua força de corte têm um impacto muito significativo na velocidade de penetração principalmente quando comparados com o efeito da percentagem de quartzo e tensão perimetral. Com efeito, PR varia neste caso entre os 2,6 m/h e os 11,4 m/h o que é um intervalo substancialmente mais alargado do que no caso anterior. Os valores de  $Q_{TBM}$  para F de 15 tnf saem fora do intervalo óptimo para os valores deste parâmetro. Na Figura 9 apresenta-se a variação de PR com a tensão perimetral para diferentes valores de F.

Quadro 2 - Valores de  $Q_{TBM}$  e PR considerando q = 30% para valores variáveis de F e de  $\sigma_{\theta}$ .

F (tnf)	$\sigma_{\theta}$ (MPa)	$Q_{TBM}$ (médio)	PR (m/hora)
15	5	21,800	4,088
	10	43,601	3,559
	20	87,201	3,098
	30	130,802	2,857
	40	174,402	2,697
	50	218,003	2,579
20	5	1,228	7,268
	10	2,455	6,327
	20	4,911	5,508
	30	7,366	5,079
	40	9,821	4,795
	50	12,276	4,586
25	5	0,132	11,356
	10	0,264	9,886
	20	0,527	8,606
	30	0,791	7,936
	40	1,055	7,492
	50	1,318	7,165

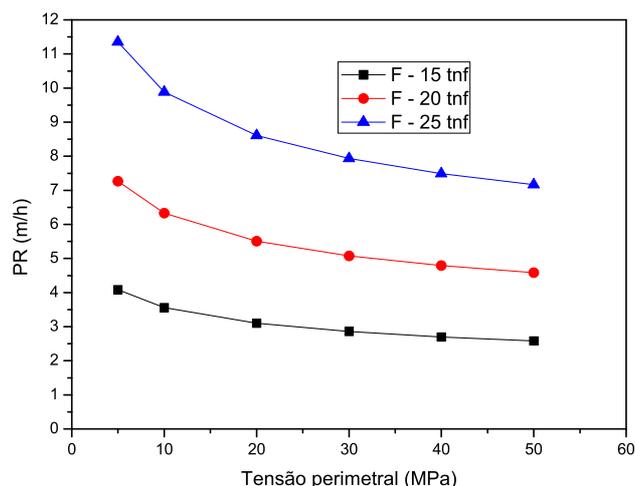


Figura 9 - Variação de PR com a tensão perimetral para diferentes valores de F.

Para o cálculo das velocidades de avanço é necessário determinar alguns parâmetros adicionais, nomeadamente, os que permitem realizar a correcção do parâmetro  $m_1$  parâmetro este que é determinado através do gráfico da Figura 7. Nas análises de AR manteve-se  $q$  constante igual a 30% já que se verificou que dentro da gama de variação deste parâmetro para maciços graníticos a variação de PR e consequentemente de AR não é muito elevada. Para os restantes factores correctivos não conhecidos adoptou-se para a porosidade um valor de 5% (típico de rochas graníticas) e um diâmetro do túnel de 12 m. Assim, foi possível determinar AR para diferentes unidades temporais, nomeadamente, hora, dia, semana, mês e ano, considerando que a máquina trabalha 8 horas diárias. No Quadro 3 resumem-se os resultados obtidos.

Quadro 3 - Valores de  $Q_{TBM}$ , PR e AR considerando  $q = 30\%$ ,  $n = 5\%$  e  $D = 12$  m para valores variáveis de F e de  $\sigma_\theta$ .

F (tnf)	$\sigma_\theta$ (MPa)	$Q_{TBM}$ (médio)	PR (m/hora)	AR				
				Hora	Dia	Semana	Mês	Ano
15	5	21,800	4,088	4,088	2,330	1,508	1,010	0,516
	10	43,601	3,559	3,559	2,028	1,312	0,879	0,449
	20	87,201	3,098	3,098	1,766	1,142	0,765	0,391
	30	130,802	2,857	2,857	1,628	1,053	0,706	0,360
	40	174,402	2,697	2,697	1,537	0,995	0,666	0,340
	50	218,003	2,579	2,579	1,470	0,951	0,637	0,325
20	5	1,228	7,268	7,268	4,142	2,680	1,795	0,917
	10	2,455	6,327	6,327	3,605	2,333	1,563	0,798
	20	4,911	5,508	5,508	3,139	2,031	1,361	0,695
	30	7,366	5,079	5,079	2,894	1,873	1,255	0,641
	40	9,821	4,795	4,795	2,732	1,768	1,184	0,605
	50	12,276	4,586	4,586	2,613	1,691	1,133	0,578
25	5	0,132	11,356	11,356	6,471	4,188	2,805	1,432
	10	0,264	9,886	9,886	5,634	3,645	2,442	1,247
	20	0,527	8,606	8,606	4,904	3,174	2,126	1,086
	30	0,791	7,936	7,936	4,522	2,926	1,960	1,001
	40	1,055	7,492	7,492	4,270	2,763	1,851	0,945
	50	1,318	7,165	7,165	4,083	2,642	1,770	0,904

A redução de AR com F para os vários intervalos de tempo considerados é idêntico ao observado para PR, nomeadamente 36% quando F varia de 25 tnf para 20 tnf e de 44% quando F varia de 20 tnf para 15 tnf. Mais uma vez se demonstra a importância da capacidade da

tuneladora utilizada também na AR. Na Figura 10 apresenta-se a variação de AR com os diferentes intervalos de tempo considerando um F de 20 tnf e para tensões perimetrais entre o 5 MPa e os 50 MPa. Como se pode verificar, nestas condições prevêem-se valores de AR que oscilam entre o Bom e o Razoável sendo que este último caso corresponde a valores de tensão perimetral muito elevadas o que traduzirá condições de escavação mais adversas.

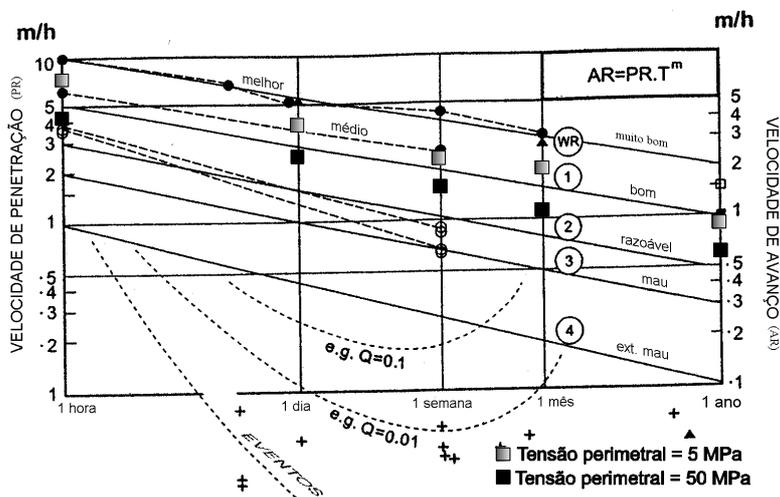


Figura 10 - Variação de AR com a unidade de tempo com F = 20 tnf e considerando tensões perimetrais de 5 MPa e 50 MPa.

#### 4. CONCLUSÕES

A utilização de tuneladoras TBM na construção de túneis na zona Norte de Portugal, para além de já ter sido efectivada nas obras do Metro do Porto, chegou já a ser equacionada para outras obras, nomeadamente no âmbito da construção do reforço de potência de uma central hidroeléctrica designada Venda Nova III. No entanto, subsistem incertezas associadas ao desempenho de TBM nos maciços graníticos típicos da zona Norte.

O objectivo deste trabalho foi o de aplicar uma metodologia recente e validada com um número bastante elevado de casos como é o caso do sistema  $Q_{TBM}$  e, utilizando uma grande base de dados agregada durante a construção de uma importante obra subterrânea na região Norte de Portugal, realizar um estudo para a avaliação dos rendimentos previstos de escavação com TBM para um maciço típico dessa região.

Concluiu-se que os rendimentos expectáveis são bastante razoáveis, quer em termos de velocidades de penetração como em termos de velocidades de avanço. No entanto, este rendimento é muito influenciado pelas características do equipamento utilizado já que a variação da força de corte transmitida pela máquina ao maciço tem um grande impacto nos rendimentos obtidos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à EDP pela autorização de utilização da informação geotécnica recolhida para a obra de Venda Nova II e à Dra. Nadir Plasencia pelos valiosos esclarecimentos prestados durante a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Barton, N. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Rotterdam: Balkema. 173p.
- Bruland, A. (1998). *Hard rock tunnel boring*. Tese de Doutorado. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 183p.
- Cheema, S. (1999). *Development of a rock mass boreability index for the performance of TBM*. Tese de Doutorado. Colorado School of Mines, Golden, CO, 262p.
- Gong, Q. e Zhao, J. (2009). Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46, 8-18.
- Graham, P. (1976). Rock exploration for machine manufacturers. In: Bieniawsky, ZT, editor. *Exploration for rock engineering*. Joanesburgo. Balkema, pp. 173-180.
- Grima, M., Bruines, P. e Verhoef, P. (2000). Modelling TBM performance by neuro-fuzzy methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15: 259-269.
- Hughes, H. (1986). The relative cuttability of coal measures rock. *Min. Sci. Tech.*, 3, 95-109.
- Innaurato, N., Mancini, R., Rondena, E. e Zaninetti, A. (1991). Forecasting and effective TBM performance in a rapid excavation of a tunnel in Italy. In: Wittke, W, editor. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Congress of rock mechanics*, pp. 1009-1014.
- McFeat-Smith, I. (1999). Mechanised tunnelling for Asia. *Workshop organised by IMS Tunnel Consultancy, Ltd.*
- Nelson, P. (1983). *Tunnel boring machine performance in sedimentary rock*. Tese de doutorado. Cornell University, Ithaca, NY, 468p.
- Nelson, P., Yousof, A. e Laughton, C. (1999). Improved strategies for TBM performance prediction and project management. In: *RETC proceeding*, pp. 963-979.
- O'Rourke, J, Spring, J e Coudray, S. (1994). Geotechnical parameters and tunnel boring machine performance at Goodwill Tunnel, California. In: Nelson, P. and Laubach, S. editors. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> NARM symposium*, Austin, Texas.
- Rostami, J. (1997). *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modelling and physical measurement of crushed zone pressure*. Tese de Doutorado. Colorado School of Mines, Golden, CO, 382p.
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Basilio, A. E Cardone, G. (2002). TBM performance estimation using rock mass classifications. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, 771-788.
- Sundaram, N., Rafek, A. e Komoo, I. (1998). The influence of rock mass properties in the assessment of TBM performance. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> international IAEG congress*. Balkema, pp. 3353-3359.