

Estimativas de Taxa de Avanço, Vida útil de Ferramentas de Corte e Força de Penetração em Túnel Escavado com TBM em Rochas Pouco Fraturadas

Paulo Henrique de Souza Gines

Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos -SP, Brasil, paulohsg1@hotmail.com

Esteban Vindas Arce

Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos -SP, Brasil, eavindas@gmail.com

Júlio Cláudio Di Dio Pierri, Struktura G3 Consultoria, São Paulo-SP, jpierri@gmail.com

Tarcísio Barreto Celestino

Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos-SP, Brasil, tbcelestino@usp.br e Themag Engenharia, São Paulo-SP

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo de caso de um túnel escavado em rocha pouco fraturada utilizando uma Tuneladora tipo mix shield. O objetivo foi quantificar parâmetros como: taxa de avanço (AR), vida útil das ferramentas de corte e força nos cortadores através das bases de classificação de maciço Q_{TBM} . O trabalho aborda um túnel escavado em gnaisse (Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro). Compararam-se os resultados obtidos na escavação, com os resultados empíricos calculados a partir do Q_{TBM} . Percebeu-se que os resultados calculados foram próximos dos dados reais. As previsões teóricas de AR apresentaram diferenças entre 14 e 20% dos dados reais. As previsões de vida útil de ferramentas de corte apresentaram diferenças entre o calculado e o real entre de 14 e 19%. Para as estimativas de força aplicada nas ferramenta de corte, as diferenças foram de 10 a 15%. Constatou-se que as bases empíricas forneceram resultados confiáveis e bem próximos à realidade da escavação.

PALAVRAS-CHAVE: Taxa de Avanço, Taxa de Penetração, Q_{TBM} , Ferramentas de Corte, Rochas fraturadas, TBM em rocha

ABSTRACT: This work presents the case study of a tunnel excavated in sparsely fractured rock using a Mix shield TBM. The objective was to quantify parameters such as: advance rate (AR), life cycle of cutting tools and force on cutters through the Q_{TBM} rock mass classification method. The work analyzes a tunnel excavated in gneissic rock (Line 4 of the Rio de Janeiro Metro). The results obtained in the excavation were compared with the empirical results calculated with Q_{TBM} . It was found that the calculated results were close to the actual data. The empirical predictions of AR showed differences between 14 and 20% to the real data. The life cycle forecasts of cutting tools presented differences between the calculated and the real values in the range of 14 to 19%. For the estimates of force applied to the cutting tool, the differences were 10 to 15%. It was found that the empirical model gave reliable results and very close to the reality of the excavation

KEY WORDS: Advanced Rate (AR), Penetration Rate (PR), Q_{TBM} , Cutting tools life cycle, Fractured rock, TBM in rock

1 INTRODUÇÃO

As escavações com Tunnel Boring Machine (TBM) representam grande investimento, e a expectativa é que se desenvolvam em menor tempo quando comparadas ao método convencional. Quando condições do maciço são desfavoráveis, certamente pode-se esperar mudanças no cronograma. As surpresas nas escavações muitas vezes são muito maiores em um túnel escavado por TBM do que aqueles executados por métodos convencionais (Barton, 1996).

As regiões falhas encontradas durante uma escavação com TBM, podem causar muitos problemas. Exemplo disso, pode-se citar a sobrecarga no escudo da tuneladora. Em alguns casos pode ocorrer até o bloqueio do escudo do TBM. Além dos problemas citados anteriormente, há riscos de colapso na face de escavação, formação de "capelas" (cavidade sobre a geratriz superior do Túnel) e grande afluxo de águas subterrâneas. Estes eventos geológicos devido às zonas de falhas resultam em longos atrasos, e em alguns casos a permanente paralisação do projeto. Diversas obras tiveram seus cronogramas comprometidos devido a complicadores geológicos em rochas fraturadas e escavadas por TBMs. Exemplos disso podemos citar: túnel Evinos-Mornos na Grécia (Grandori et al., 1995), túnel rodoviário Pinglin em Taiwan (Shen et al., 1999), túnel principal da usina hidroelétrica de Pont Ventoux na Itália (Barla e Pelizza, 2000), túnel Tuzla na Turquia (Dalgıç, 2003), túnel Gilgel Gibe II na Etiópia (De Biase et al., 2009), túnel de serviço Alborz no Irã (Wenner e Wannenmacher, 2009) e túnel de Kargi Kizilirmak também na Turquia (Casa, 2016).

Além de eventual colapso em zonas de falhas, podem ocorrer decréscimos nas taxas de avanço (AR), de penetração (PR), e elevado consumo das ferramentas de corte. Comparando as regiões fraturadas com as pouco fraturadas, estas diferenças entre AR e PR podem chegar à ordem de 70%. Já o consumo de ferramentas à ordem de 100%. A depender da qualidade e do

grau de fraturamento dos maciços, essas taxas de consumo de ferramentas de corte podem aumentar significativamente, Barton *et al.* (2003). Em geral, as ferramentas de corte representam boa parte dos custos de escavação com TBMs, portanto, este é um parâmetro que merece atenção. Tanto AR quanto PR são dados de suma importância em obras de túneis, pois estão ligados aos custos das escavações, e com o prazo de entrega da obra.

Segundo Barton *et al.* (2003), um novo sistema de classificação de maciço rochoso dedicado à utilização de TBM pode ser utilizado para estimar AR e PR . Este sistema de classificação de maciço é denominado Q_{TBM} , e é formulado em estágios. Ele é iniciado com a estimativa do valor Q do sistema de classificação proposto por Barton *et al.* (1974), e que é amplamente difundido. Neste sistema as condições do maciço são extremamente importantes. O Q_{TBM} além de considerar as condições do maciço como mencionado anteriormente, também leva em consideração as interações maciço/TBM permitindo que PR e AR possam ser estimados. Neste trabalho serão realizadas retroanálises dos dados PR , AR e consumo de ferramentas de corte obtidos de uma tuneladora tipo mix shield (), que executou as escavações dos túneis da linha 4 do metrô do Rio de Janeiro - RJ.

O trecho sul da linha 4 do Rio de Janeiro inclui um túnel que une as estações de Cantagalo e Gávea. O trecho analisado aqui encontra-se entre os quilômetros 11,8+0,00 e 12,2+0,00, sendo este em rocha e pertencente a uma pequena parte da extensão total dos túneis da obra, que, por sua vez, é quase que na totalidade em areia. O trecho aqui analisado encontra-se imediatamente abaixo do morro Cantagalo, na divisa entre os bairros de Copacabana e Ipanema. Neste trecho temos um maciço com variações de gnaiss dos tipos facoidal e kinzigítico classes I e II, e em alguns trechos III e IV.

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

Os dados para análise de desempenho do TBM foram obtidos a partir do banco de dados armazenados na fase de escavações e consistem em: *AR*, força imprimida às ferramentas de corte durante o ataque ao maciço, e as trocas de ferramentas necessárias no trecho. Neste último dado, é possível estimar a vida útil dos discos de corte. As informações do projeto estão resumidas na Figura 2, onde também é possível visualizar os pontos de investigação do maciço rochoso durante a fase de projeto. As resistências à compressão simples das rochas (*RSC*) foram obtidas na fase de estudos e projetos de implantação da obra.

O maciço rochoso deste trecho consiste em rochas massivas e com poucas fraturas, compostas de granito/gnaíse dos tipos kinzigítico e facoidal. As atitudes das fraturas se apresentam de forma bastante uniforme em todo o trecho, e estão orientadas em sua maioria na direção N 220/15¹ (direção/mergulho), de modo que o eixo longitudinal do túnel orientasse a (N190/2) neste trecho. As maiores coberturas são da ordem de 150m (escarpa da montanha), e as menores cerca de 20m (meio urbano). O conjunto de dados para análise de desempenho consiste em 195 ciclos de escavações (Anel 01 a 195). Não estão registrados neste banco de dados o tempo de montagem de anéis e manutenções mecânicas do equipamento. Para esta análise utilizou somente a classificação de maciço rochoso Q_{TBM} - Barton.

Durante as trocas de ferramentas e manutenções mecânicas permitiu-se realizar as verificações do maciço rochoso em todo o comprimento do túnel, podendo-se assim, aferir as diferenças entre as campanhas de investigação e da fase de execução. As taxas de penetração e avanço de campo foram calculadas dividindo o comprimento trecho pelo tempo líquido de perfuração (tempo real de escavação). A força imprimida pelo equipamento a cada um dos discos de corte (ferramenta de escavação) foi

obtida diretamente pelos instrumentos automatizados de controle do TBM. Já as trocas de ferramentas realizadas no trecho são fornecidas através de diários e controle das atividades da obra.

Na maior parte da escavação o maciço apresentou *RSC* entre 90 a 120 MPa, e um grau relativamente baixo de fraturamento, exceto nos últimos 30m na região de transição entre rocha e solo. Este último trecho (30m finais) não faz parte desta análise, uma vez que nestas condições há seções transversais mistas (rocha e solo), e outros fatores técnicos devem ser levados em consideração. No trecho de onde se exclui a transição, raramente foram encontrados mais de três famílias de descontinuidade, tipicamente caracterizadas por paredes variando entre planares e rugosas e não preenchidas por materiais alterados (Figura 3).

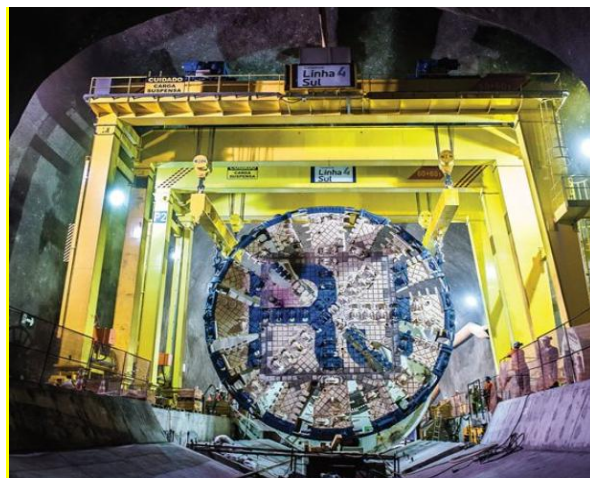


Figura 1 - Montagem da roda de corte do TBM: Fonte Autor

3 BASE EMPÍRICA E RESULTADOS

As penetrações reais de campo podem ser comparadas com as previstas pelas equações empíricas propostas por Innaurato *et al.* (1998) e Barton (2000), que relacionam o desempenho do TBM com os índices de classificação de maciço rochoso Q_{TBM} , definido de acordo com a equação 1:

$$PR \cong 5 \cdot Q_{TBM}^{-1/5} \quad (1)$$

Onde:

¹ Ângulos variando entre 15 e 25°

PR = Taxa de penetração; Rochoso para TBM;
 Q_{TBM} = Classificação específica de maciço

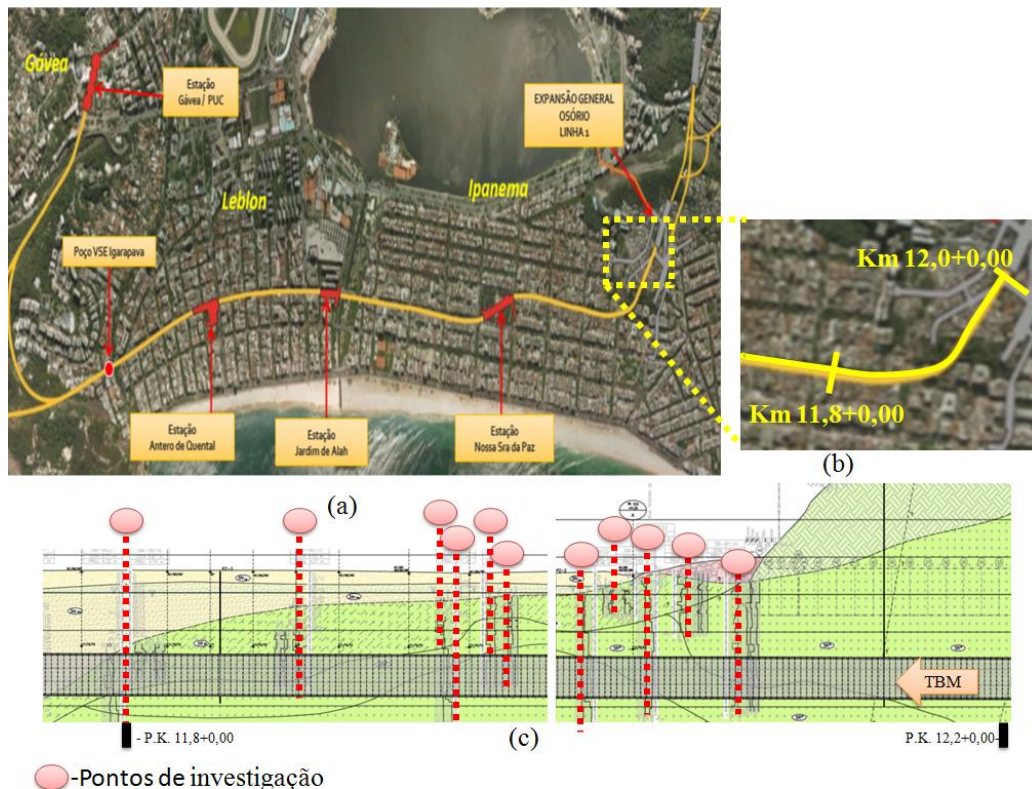


Figura 2 - Visão geral do projeto (a) Traçado geral dos túneis; (b) - Região específica de análise; (c) - Perfil do trecho de escavação em rocha

O novo parâmetro Q_{TBM} é fundamentado no sistema de classificação Q convencional, e muitos dos dados utilizados no Q_{TBM} podem ser aproveitados da classificação do sistema Q .

$$Q_{TBM} \cong \frac{RQD_0}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{(F/SIGMA)} \quad (2)$$

Onde:

RQD_0 = É o índice de qualidade da rocha interpretado na orientação paralela ao eixo de escavação;
 J_n , J_r , J_a e J_w = Permanecem inalterados ao sistema de classificação convencional Q ,

$SIGMA$, pode ser calculado pela equação 3.

$$SIGMA = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{1/3} \quad (3)$$

Onde:

γ = Peso específico da rocha (kN/m^3);
 O parâmetro Q_c , pode ser calculado pela equação 4.



Figura 3 - Imagem das pistas de rolamento dos cortadores, fotos tiradas do interior da câmara de escavação - (a) Escavação do P.K. 12,1+30m (b) escavação do P.K. 11,9+70m (c) escavação do P.K. 11,9+05m

A classificação Q_{TBM} pode ser realizada de acordo com a equação (2).

$$Q_c = Q \cdot (\sigma_c / 100) \quad (4)$$

Onde:

Q = Classificação do maciço pelo sistema Q ;

σ_c = Resistência à compressão média da rocha;

F = É a força média que a ferramenta de corte deve imprimir à rocha para que possa promover a escavação, e pode ser obtido mediante a equação 5.

$$FPI = \frac{\text{Força} / \text{Cortador (kN)}}{PR} \quad (5)$$

Onde:

FPI = Fator de Penetração de campo (kN/mm/rev);

PR = Razão de penetração teórica (mm/rev);

O parâmetro PR é inicialmente estimado por meio de gráficos empíricos que relacionam dados de penetração com a resistência a compressão simples da rocha intacta apresentados em Grandori *et al.* (1995a).

Na Figura 4, é possível visualizar a relação entre FPI e σ_v/UCS_{rm} , onde σ_v representa a tensão vertical e UCS_{rm} representa resistência a compressão simples da rocha levando em consideração o efeito escala do maciço.

A relação entre UCS_{rm} e UCS pode ser obtida através da equação 6.

$$UCS_{rm} = \sqrt{s \cdot UCS^2} \quad (6)$$

Onde:

UCS = resistência a compressão simples da rocha intacta;

s = Fator escala do maciço rochoso; ver Tabela 1.

Tabela 1- Correlação dos valores de s e o espaçamento de juntas - Fonte Klein *et al.* (1995)

Frequência das Fraturas	Espaç. médio de juntas	s
1-Macijo	> 3m	0,1
2-Levemente Fraturado	1 -3m	0,004
3-Moderadamente Fraturado	0,3 - 1m	0,0001
4-Altamente Fraturado	30 - 500mm	0,00001
5-Rocha esmagada	< 50mm	0

Valores registrados para o sistema Q convencional referem-se ao conjunto que influencia a estabilidade do túnel, e que geralmente é o mesmo conjunto de fraturas para o qual o Q_{TBM} chama a atenção. Certamente estas são as descontinuidades mais influentes, mais persistentes e que têm maior chance de causar instabilidades.

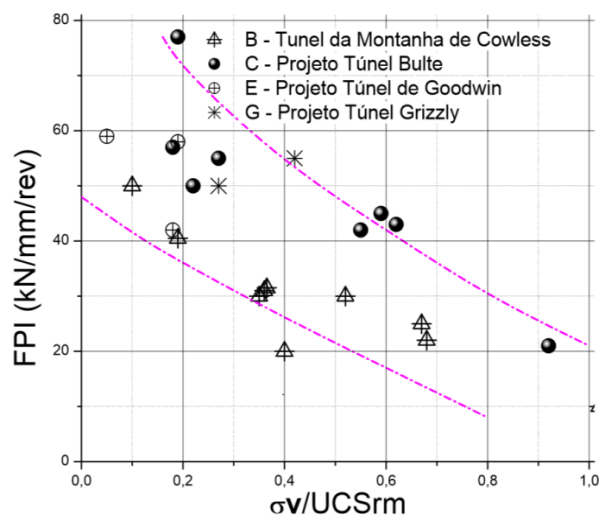


Figura 4 - Fator de penetração de campo σ_v/UCS_{rm} - Fonte Klein *et al.* (1995)

Para estimar AR de um TBM pelo sistema Q_{TBM} , utilizam-se as variáveis PR e a taxa de utilização T . Na taxa de utilização são considerados os turnos de trabalho do equipamento, contabilizando as horas de utilização. Este controle pode ser realizado diariamente, semanalmente, mensalmente e até anualmente dependendo do tipo de análise a ser realizada e do comprimento do trecho. Para maiores detalhes verificar Barton *et al.* (2000). Outro fator importante para o cálculo de AR é o gradiente de decréscimo m , que está ligado a fatores operacionais e técnicos do equipamento. Na equação 7, é possível visualizar a expressão para o cálculo de AR .

$$AR = PR \cdot T^m \quad (7)$$

Onde:

AR = Taxa de Avanço (mm/hora);

PR = Taxa de Penetração (mm/rev);

T = Taxa de utilização (hora);

M = Gradiente de utilização;

Neste estudo foram adotados turnos de 8 horas de trabalho, as atividades eram desenvolvidas. Segundo Barton (2003), um valor típico e amplamente utilizado nos projetos é $m = -0,20$. O trecho analisado coincide com o início das escavações. Fatores como aprendizado da equipe devem ser levados em conta. A bibliografia existente afirma que os valores do parâmetro m podem variar entre -0,15 a -0,45. Para este trabalho utilizou-se $m = -0,15$.

O desgaste das ferramentas de corte depende de fatores como abrasividade do material escavado, direção das fraturas e dureza das rochas. Evidentemente, em estudos mais aprofundados, testes laboratoriais devem ser realizados para aferir este parâmetro, por exemplo o ensaio Cerchar. Bruland *et al.* (1995) e Nielsen & Ozdemir (1993), a partir de bancos de dados de túneis executados estabeleceram o conceito de índice de perfurabilidade (DRI). Este índice é relacionado com a resistência à compressão simples do material, ver Figura 5.

A relação entre a vida útil das ferramentas de corte (CLI) e DRI pode ser visualizada na

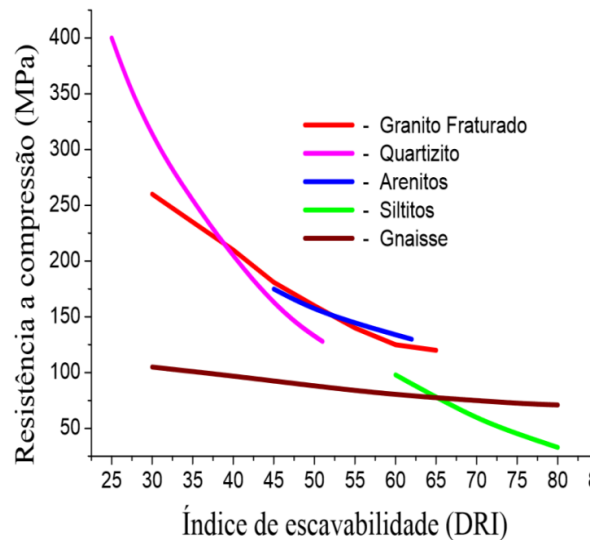


Figura 5 - Índice de escavabilidade e resistência a compressão -
 Fonte: Modificado de Movinkel & Johanssen (1986)

No caso específico dos discos de corte, Movinkel & Johanssen (1986) e NHT (1994) correlacionaram os dados de campo com

CLI de acordo com diâmetros usuais de mercado para os discos de corte. A relação pode ser vista na Figura 6.

No km 12,4+0,00 foi realizado o primeiro ciclo de escavação. Neste ponto ocorreu a instalação do primeiro anel. Cada anel escavado possuía 1,80m de comprimento. Na Tabela 2, é possível verificar as características principais dos diferentes trechos encontrados ao longo do projeto, e suas principais características utilizadas na classificação geomecânica do método Q_{TBM} . Os resultados demonstrados foram compilados através de ferramenta computacional programada em MATLAB - 14. Esta ferramenta leva em conta toda a base experimental exposta neste trabalho.

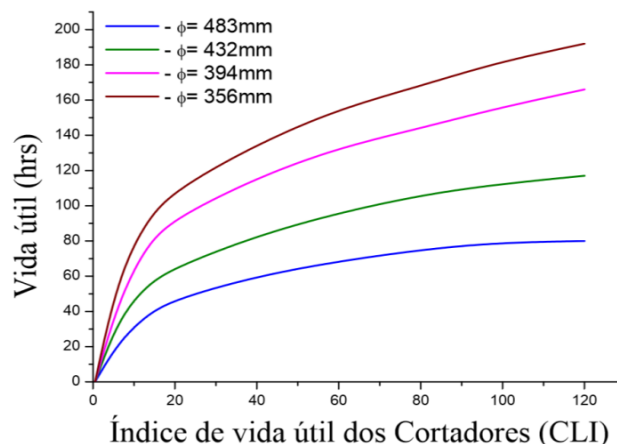


Figura 6 - Vida útil dos cortadores em horas e índice de vida útil CLI - Fonte: Movinkel & Johannssen (1986)

Analisando as Figuras 8, 9 e 10, nota-se que as estimativas fornecidas pelos métodos empíricos aproximam-se com certa acurácia dos dados reais da escavação. Especificamente, nos resultados de AR, percebem-se diferenças que variam entre 14 e 20% de forma aleatória. Entre os anéis 120 e 135 e no trecho entre os anéis 160 a 195, estas diferenças são mais pronunciadas.

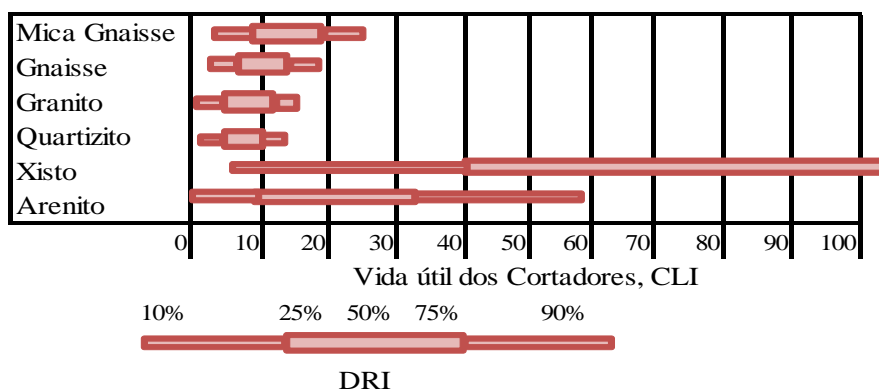


Figura 7 - Relação entre DRI e vida útil dos cortadores - Fonte: Modificado de Barton (2000)

Tabela 2 - Resumo dos dados de classificação do maciço - Fonte: Autor

Parâmetros	Trechos					
	Anel Escavado	Anel Escavado	Anel Escavado	Anel Escavado	Anel Escavado	Anel Escavado
	0 - 25	26 - 85	86 - 95	96 - 136	137 - 186	187 - 195
Rocha	Gnaiss Kinzigítico	Gnaiss Facoidal	Gnaiss Kinzigítico	Gnaiss Kinzigítico	Gnaiss Kinzigítico	Gnaiss Facoidal
R.C.S (Mpa)*	90	120	80	70	90	90
γ (kN/m ³)	27,0	27,5	26,0	27,5	27,5	25,7
Descrição de Fraturas	Levemente fraturada - Espaçamento entre juntas 1- 3m	Massiva - espaçamento entre juntas maior que 3 m	Levemente fraturada - Espaçamento entre juntas 1- 3m	Levemente fraturada - Espaçamento entre juntas 1- 3m	Levemente fraturada - Espaçamento entre juntas 1- 3m	Fraturada - Espaçamento entre juntas 0,50 a 1,0m
β (°)**	20	35	25	25	15	60
Jn	0,50	0,50	1,00	3,00	2,00	6,00
Jr	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	1,0
Ja	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	4,0
Jw	1,00	1,00	0,66	0,50	0,66	2,50
RQD (%)	90	95	75	90	80	65
SRF	2,5	2,5	5	2,5	2,5	10

* Resistência da rocha intacta

** Ângulo entre a frente de escavação e as principais fraturas

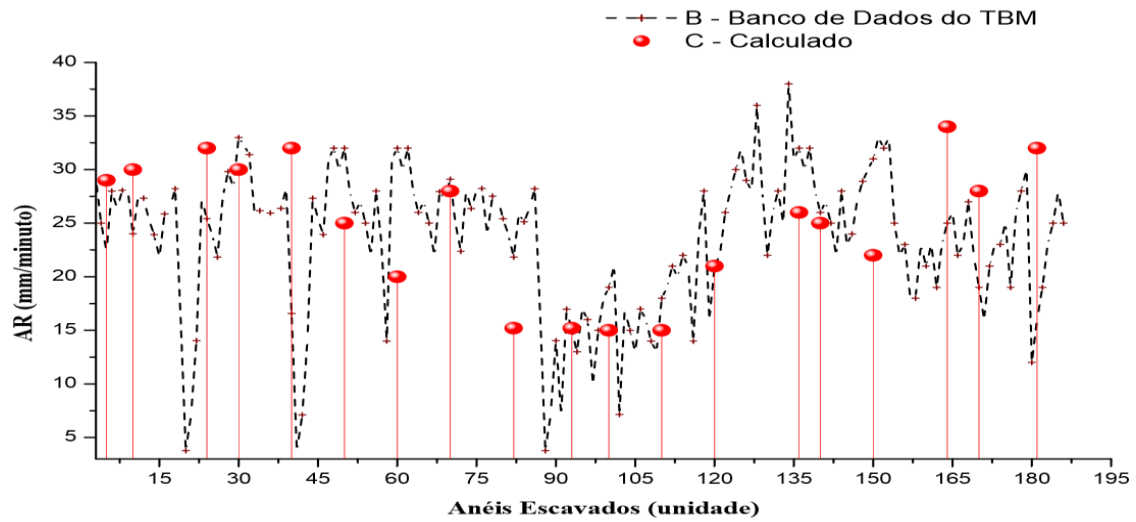


Figura 8 - Velocidade de avanço real de escavação e calculada

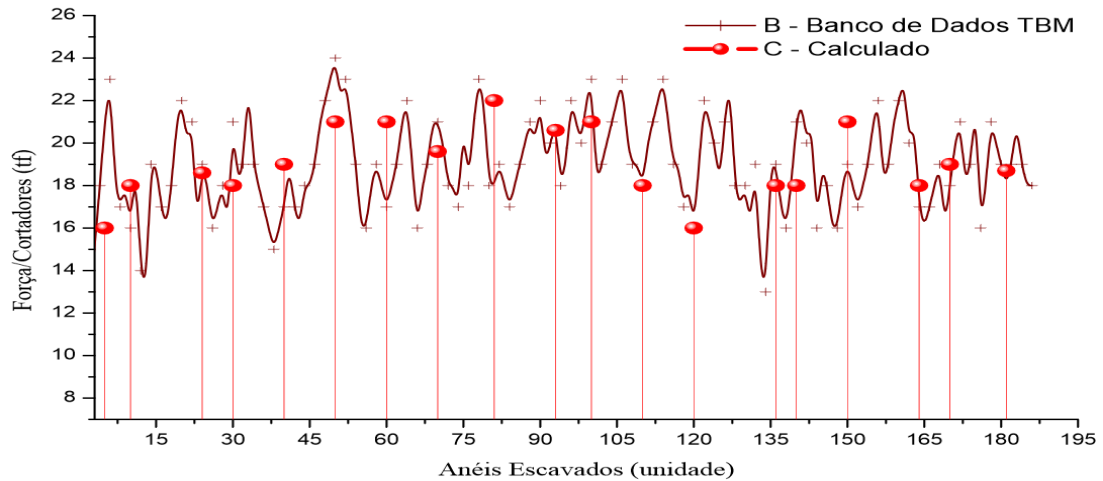


Figura 9 - Força imprimida em cada ferramenta de corte real de escavação e calculada

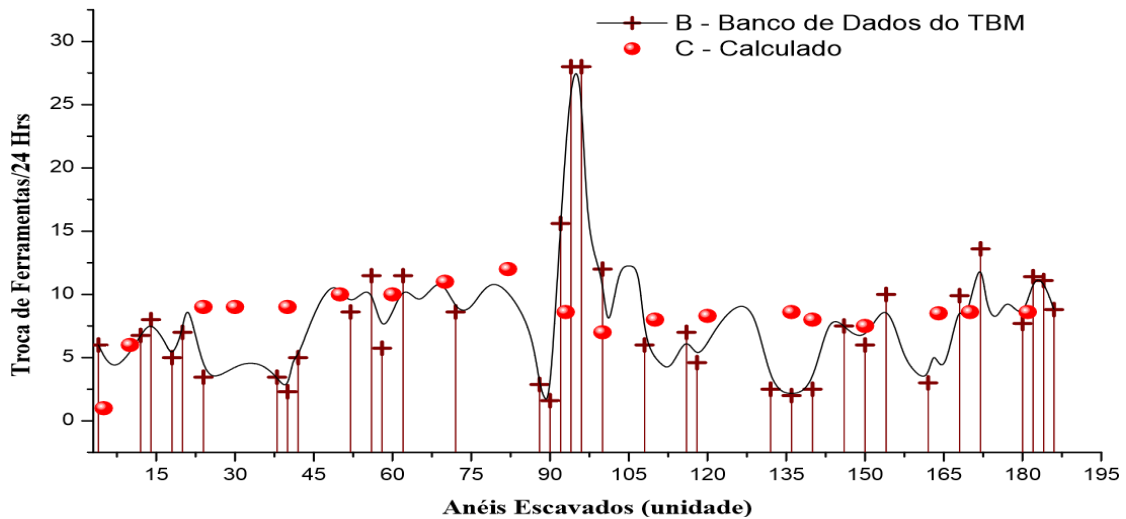


Figura 10 - Troca de ferramentas de corte por ciclo de 24 horas, real de escavação e calculado

O quesito troca de ferramentas teve como base os índices de penetração e as estimativas de vida útil das ferramentas de corte encontradas em Barton (2000). Os resultados referentes a este parâmetro apresentam variações entre 14 e 19%. Os resultados obtidos pelo algoritmo mantiveram-se próximos dos resultados reais de campo, exceto entre os anéis 25 e 40 e entre os anéis 90 e 100. Neste último trecho durante a fase de escavações encontrou-se gnaiss kinzigítico classe I com RCS superior à média do trecho (185 MPa). De maneira geral o gnaiss kinzigítico é uma rocha metamórfica rica em biotita e granada com microcristais de feldspato e quartzo.

Constataram-se diferenças entre o resultado da estimativa de força nos cortadores e os dados reais do TBM entre 10 e 15%, e que têm comportamento de maneira desordenada. Ora os

valores calculados são inferiores aos dados reais de campo, ora são superiores.

Quanto à vida útil dos cortadores, é possível visualizar os resultados por trechos de escavação na Figura 11. No geral, estes resultados permitem que sejam realizadas estimativas bastante realísticas na fase de orçamento do projeto. Estes dados podem ser extremamente úteis na composição de custos das ferramentas de corte de uma escavação com uso de TBM. Percebe-se de forma sistêmica, que nos trechos entre os anéis 0 e 25, e no trecho entre os anéis 186 e 195 o valor calculado é maior que o real. Nestes dois trechos foram constatados veios de granito em meio ao gnaiss. No geral, consideram-se aceitáveis estes resultados em obras de escavações subterrâneas.

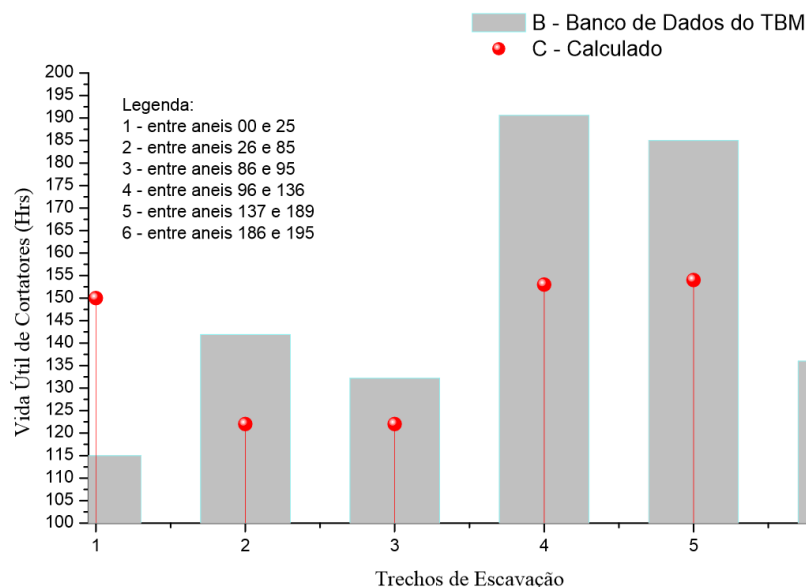


Figura 11- Vida útil de ferramentas de corte, comparação entre real de campo e calculado

3 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos da comparação entre uma tuneladora tipo mix shield usada para escavar o trecho em rocha entre os quilômetros 11,8+0,00 e 12,2+0,00 da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro - RJ, podemos perceber que:

1 - As bases empíricas abordadas em Barton e *et al.* (2000) demonstraram resultados satisfatórios em relação ao real obtido na execução da obra. Entendemos que as singelas diferenças obtidas nos resultados face às incertezas e aos problemas geológicos conferem a estas ferramentas uma boa aproximação da realidade.

2 - A possibilidade de utilização do modelo no auxílio de composição de cronogramas e

estimativas de custos é de extrema importância, pois estão intimamente ligadas ao prazo de entrega do empreendimento, planejamento e custos. Sabemos que a depender das condições geológicas encontradas ao longo do traçado de um túnel, muitas vezes é muito difícil estimar um custo realístico da obra.

3 - Finalmente, é importante notar que as relações empíricas discutidas acima são baseadas em classificações dos maciços rochosos, e esta fase geralmente ocorre durante a investigação do projeto, ou seja, torna-se possível melhorar o controle de custos e planejamento das fases de escavação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Odebrecht Infraestrutura, por permitir utilizar os dados da escavação da linha 4 do metro de Rio de Janeiro, para a elaboração deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa outorgada.

REFERÊNCIAS

- Innaurato N, Mancini R, Rondena E, Zaninetti A. Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy. *Proceedings of the Seventh International Congress ISRM*, Aachen, 1991.
- Innaurato N, Oggeri C, Oreste P. Validation techniques in tunnelling: the complementary approach of modelling, monitoring and excavation performance evaluation. *Proceedings of the AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress*, 2001. p. 217–26.
- Innaurato N, Mancini R, Stragiotti L, Rondena E, Sampaolo A. Several years of experience with TBM in the excavation of hydroelectric tunnels in Italy. *International Congress on “Tunnel and Water”*, Madrid, 1988
- Grandori R, Jaeger M, Antonini F, Vigl L. Evinos-Mornos Tunnel, Greece—construction of a 30km long hydraulic tunnel in less than three years under the most adverse geological conditions. *Proceedings of the RECT*, San Francisco, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1995. p. 747–67
- Barton N. TBM performance in rock using QTBM. *Tunnel Tunnelling Int*, Milan, 1999;31:41–8.
- Barton N. TBM tunnelling in jointed and faulted rock. Rotterdam: Balkema, 2000.
- Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech* 1974; 6(4):189–236.
- Barla G, Pelizza S. TBM tunnelling in difficult ground conditions. *GeoEngineering 2000*, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, 2000
- Alber M. Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics. *Tunnelling Underground Space Technol* 2000; 15(1):55–64.
- M. sapigni, M. Berti, E. Bethaz, A. Busillo, G. Gardone - (2002) TBM performance estimation using rock mass classification - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*.
- M. Bayati, J. K. Hamidi (2017) - A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement. *Tunnelling and Underground Space Technology*
- Sundaram NM, Rafek AG. The influence of rock mass properties in the assessment of TBM performance. *Proceedings of the Eighth IAEG Congress*, Vancouver, Balkema, 1998. p. 3553–9.
- Sundaram NM, Rafek AG. The influence of rock mass properties in the assessment of TBM performance. *Proceedings of the Eighth IAEG Congress*, Vancouver, Balkema, 1998. p. 3553–9.
- Dal Piaz GV, Hunziker JC, Martinotti G. La Zona Sesia-Lanzo e l'evoluzione tettonico—metamorfica delle Alpi nordoccidentali interne. *Mem Soc Geol Ital* 1972;11:433–66.
- Bethaz E, Fuoco S, Mariani S, Porcari P, Rosazza Bondibene E. Scavo in rimonta con TBM: l'esperienza del cunicolo di Maen. *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee* 2000;61:67–75
- Wickham GE, Tiedmann HR, Skinner EH. Ground control prediction model—RSR concept. *Proceedings of the Rapid Exc. and Tunnelling Conference*, AIME, New York. 1974. p. 691–707.