

Lições Aprendidas na Escavação de Túneis Paralelos da Linha 5 – Lilás do Metrô de São Paulo

Marco Aurélio Abreu Peixoto da Silva, M. Sc.

Andrade Gutierrez Engenharia, São Paulo, Brasil, marco.peixoto@agnet.com.br

Gustavo Aguiar, M.Sc.

Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, gustavoaguiar@usp.br

Argimiro Alvarez Ferreira

Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, Brasil, alvarez@metrosp.com.br

Hugo Cássio Rocha, M. Sc.

Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, Brasil, hcrocha@metrosp.com.br

Marcos Eduardo Hartwig, D.Sc.

Geólogo de Engenharia, Consultor Independente, São Paulo, Brasil, marcoshartwig@gmail.com

RESUMO: No primeiro trecho de expansão da Linha 5 – Lilás do Metrô de São Paulo duas tuneladoras de 6,89m de diâmetro executaram dois túneis paralelos com cerca de 5 km de extensão cada. A tecnologia EPB (“Earth Pressure Balanced”) foi a escolhida para este projeto. Parte da escavação desses túneis ocorreu em solos sedimentares da Bacia Sedimentar de São Paulo. Neste trecho as tuneladoras escavaram solos arenosos da Formação São Paulo, e argilas siltosas duras da Formação Resende, com cobertura de maciço variando de 15 a 20 m, e pressões hidrostáticas variando entre de 2 e 17 mca sobre a geratriz superior do túnel. A outra parte das escavações ocorreu em horizonte Precambriano de Gnaiss com vários graus de decomposição. Neste trecho, a cobertura de maciço variou de 20 a 30 m, e a pressão de água de 17 a 20 m. A condição de escavação em face mista ocorreu em ambos os horizontes geológicos, com impacto direto no desempenho das tuneladoras, tais como dificuldades de manutenção da pressão de frente, perdas de solo, instabilidades, baixas taxas de produção, fechamento da frente (“clogging”) e, como consequência, frequentes e longas intervenções hiperbáricas nas frentes das máquinas. Tais problemas ocorreram não só em maciço de alteração de rocha, como também onde ocorreu a combinação de areias finas a grossas pouco argilosas, com altas permeabilidades, sobrepostas a camada de argila dura na frente de escavação. Este artigo apresentará aspectos de projeto e de operação das tuneladoras. Resultados de análises de desempenho serão apresentados, bem como a sua relação com os parâmetros operacionais e geotécnicos. Atenção especial será dada à condição de face mista a fim de alertar para as dificuldades e os riscos em escavar sob tais condições. Análises de recalques serão relacionadas com o desempenho das tuneladoras, aplicando-se as aproximações por Gauss e Yield Density para inferir as perdas de solo. O objetivo deste artigo é mostrar que a escavação de túneis com tuneladoras tem seus riscos e desafios inerentes.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação Mecanizada; Tuneladora; Túneis Paralelos; Face Mista; Recalques; Vazios (Capelas); TBM; EPB.

1 INTRODUÇÃO

No primeiro trecho de expansão da Linha 5 – Lilás do Metrô de São Paulo duas tuneladoras

do tipo EPB, com 6,89m de diâmetro, executaram dois túneis paralelos com cerca de 5 km de extensão cada. A Figura 1 apresenta de forma esquemática o trecho com as estações e

os poços de ventilação e saídas de emergência. Outras informações e aspectos construtivos são apresentados por Silva et al (2013).

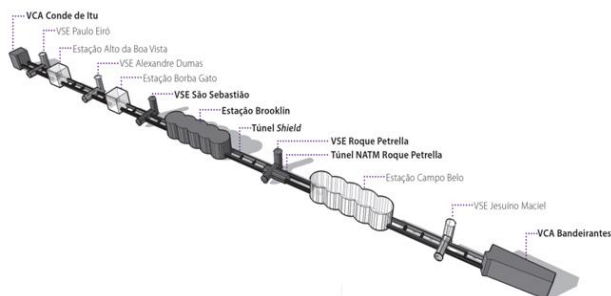


Figura 1 – Esquema do trecho com túneis paralelos, estações e poços.

Parte da escavação desses túneis ocorreu em solos da Bacia Sedimentar de São Paulo (BSSP). O restante ocorreu em materiais do Precambriano. A condição de face mista ocorreu em ambos os maciços, com impacto direto no desempenho das tuneladoras. O principal objetivo deste artigo é mostrar que a escavação de túneis com tuneladoras tem seus próprios riscos e desafios.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO/GEOTÉCNICO

O subsolo ao longo do trecho é constituído por depósitos aluvionares do Quaternário, sedimentos Paleógenos fluviais e lacustres das Formações São Paulo e Resende da BSSP, e solos residuais do embasamento Precambriano de Gnaiss (Figura 2). Mais detalhes a respeito dessa geologia encontram-se em Riccomini et al (2004) e Monteiro et al (2012). Quase 70% do traçado dos túneis ocorreram em solos do Paleógenos enquanto 30% ocorreram em solos residuais. Os depósitos aluvionares não foram escavados e, portanto, não serão abordados.

A Formação São Paulo é coberta por aterros e depósitos aluvionares e se sobrepõe à Formação Resende. É constituída por areias argilosas e argilas arenosas, com SPT variando entre 2 a 18 golpes. A cobertura de solo sobre o túnel foi de até 20 m, e o nível d'água variou entre um e 5 m sobre o túnel.

A Formação Resende é constituída por argilas pouco arenosas sobreadensadas (conhecidas por “Taguá”), com valores de SPT de 20 a mais de 50 golpes, e areais siltosas pouco argilosas. As escavações nesses materiais ocorreram principalmente nas argilas siltosas

entre BGT e RPT, com espessura de até 15 m acima dos túneis, boa parte com registros de ocorrência de provável hidrotermalismo.

Como a geologia da BSSP é composta de uma sucessão de camadas descontínuas, detectaram-se aquíferos empoleirados, e pressões hidrostáticas variando entre 10 e 20m sobre os túneis conforme medições em piezômetros do tipo “Casagrande”. Além disso, testes nos piezômetros mostraram permeabilidade entre 10^{-4} a 10^{-5} cm/s nas areias da Formação São Paulo.

O maciço Precambriano é oriundo do intemperismo físico-químico da rocha matriz, e compreende três unidades: solo residual, saprolito e biotita-gnaiss em vários graus de alteração. Os solos residuais são constituídos de siltes arenosos e siltes argilosos, com valores de SPT variando de 2 a 10. Nestes materiais o nível d'água varia entre 10 e 25m sobre os túneis. Os solos residuais contém, também, certa quantidade de rocha e estruturas geológicas herdadas da rocha – mãe. O termo saprolito aqui utilizado corresponde a rocha alterada impenetrável ao amostrador padrão do ensaio SPT ($SPT > 30$). A Tabela 1 apresenta uma compartimentação geológica do trecho.

Tabela 1- Contexto Geológico na Frente de Escavação

Trecho	Iniciais	Contexto Geológico
Conde de Itú – Alex. Dumas	CDI-ALD	Solos moles a médios da Form. São Paulo
Alex. Dumas – Borba Gato	ALD-BGT	Solos Precambrianos moles a médios Argilas duras da
Borba Gato – Roque Petrella	BGT- RPT	Formação Resende e areias fofas da Formação São Paulo
Roque Petrella – Campo Belo	RPT-CB	Solos Precambrianos moles a médios
Campo Belo – Jesuíno Maciel	CB-JES	Condições de face mista no Precambriano
Jesuíno Maciel - Bandeirantes	JES-BAN	Solos médios da Formação Resende

Os gnaisses biotíticos são altamente foliados e apresentam uma orientação NE-SW. Futai et al (2012) mostraram que esses materiais são muito heterogêneos. De fato, ensaios de compressão simples mostraram resistências entre de 5 a 60 MPa.

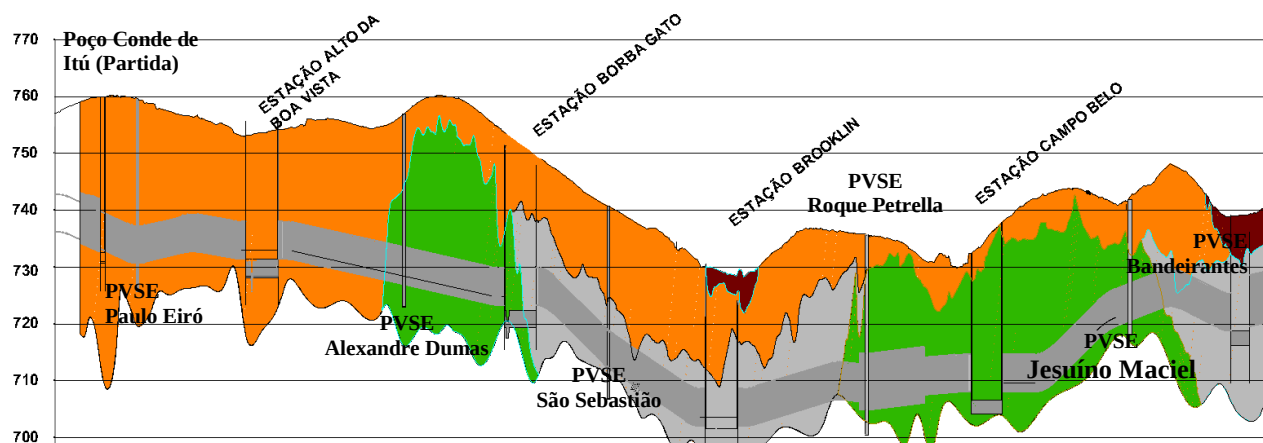
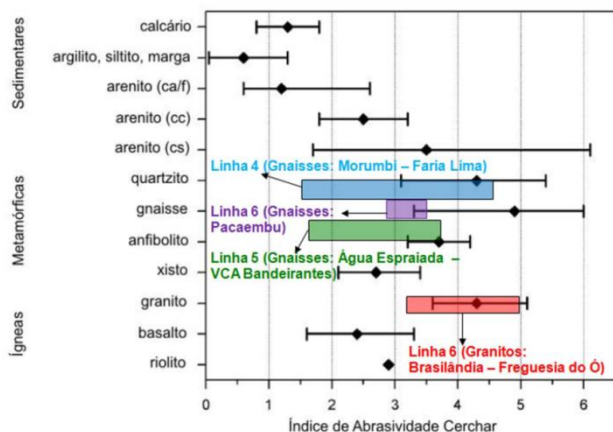


Figura 2 – Seção geológica simplificada: Formação São Paulo (Laranja); Formação Resende (Cinza); Materiais Precambrianos (Verde); e Depósitos aluvionares Quaternários (Marrom)

Além dessa heterogeneidade, Monteiro & Rocha (2015) mostram que os gnaisses biotíticos apresentam altos índices de abrasividade CERCHAR (Figura 3).



Índice CERCHAR	> 4	2 - 4	1 - 2	< 1
Abrasividade (Bieniawski et al., 2009)	Muito alto	Alto	Médio	Baixo

Figura 3 – Índice de abrasividade CERCHAR (adaptado de Monteiro & Rocha, 2015)

A Figura 4 mostra a distribuição granulométrica das camadas de solo, indicando que a tuneladora com tecnologia do tipo EPB é a mais adequada para escavação nesse maciço. Destaca-se que algumas curvas sugerem algum esforço de condicionamento da frente de modo a manter a aplicabilidade da tecnologia EPB. Além disso, análises de potenciais entupimentos ou “clogging” na frente de escavação foram realizadas. A Figura 5 correlaciona índices de plasticidade e consistência com o potencial de “clogging” segundo Thewes (2005), indicando médio potencial esperado para o trecho e,

portanto, algum esforço no condicionamento. Nas máquinas tipo EPB o risco é minimizado por injeções de espumas e eventuais polímeros.

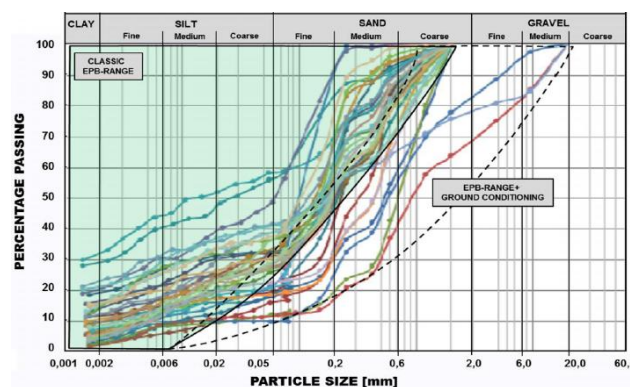


Figura 4 – Distribuição granulométrica do maciço

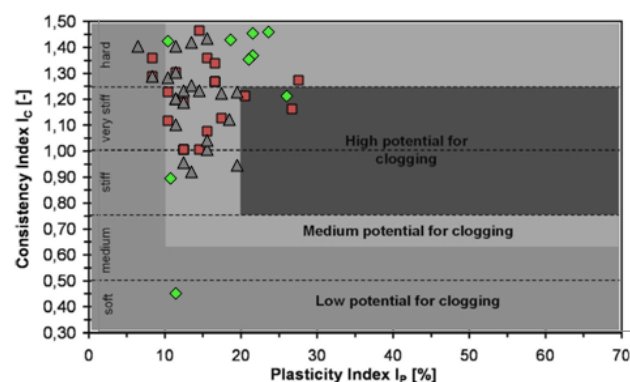


Figura 5 – Potencial de “clogging”: Argilas da Formação São Paulo (vermelho); Argilas da Formação Resende (cinza) e siltes argilosos do Precambriano (verde).

3 AS MÁQUINAS

A Tabela 2 apresenta as principais características das tuneladoras e a Figura 6 uma imagem da Cabeça de Corte (CC) e de suas ferramentas.

Tabela 2 – Características Principais TBM - EPB

Características	
Tipo	EPB
Diâmetro	6,89 m
Abertura da CC	39%
Torque Nominal	3.560 kNm
Torque Excepcional	4.984 kNm
Torque de desbloqueio	5.340 kNm
Número de Pistões	16x2
Força Total Instalada	60.801 kN
Força Máxima	50.000 kN
Ferramentas de Corte	Rippers, discs, and scrapers (#41)
Raio Curva Mínimo	250 m
Espessura Anel	30 cm
Comprimento Anel	1500 mm
Segmento Anel	5+1

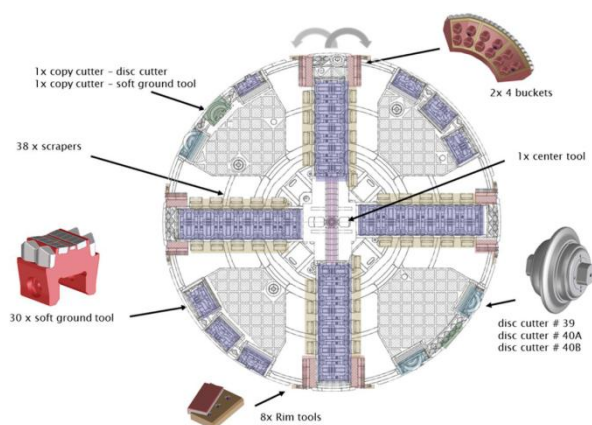


Figure 6 – Cabeça de Corte (CC) e suas ferramentas.

4 DESEMPENHO DE ESCAVAÇÃO

4.1 Parâmetros Principais

Os principais parâmetros utilizados nos equipamentos para avaliar os seus desempenhos estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais Parâmetros

Parâmetro	Finalidade
Pressão na calota EP1 (bar)	Contrabalanceamento das pressões de solo e água
Empuxo total -E (kN)	A soma de todas as forças necessárias ao avanço
Torque - Tor (MNm)	Capacidade de giro da CC
Força de contato- FC (kN)	Força de contato na CC
Velocidade - Vel (mm/min)	-
Penetração - P (mm)	Avanço/ revolução
Rotação - Rot (RPM)	-
Foam Injection Ratio - FIR (%)	Relação entre volumes de de espuma e de solo
Foam Expansion Ratio - FER (dl)	Relação entre vazões de espuma e líquidos
Water Injection Ratio - WIR (%)	Relação entre vazões de água livre e solo escavado

Além desses parâmetros, também foram

avaliadas a Energia Específica (EE) e o Índice de Penetração (IP) conforme Shirlaw (2015), e indicados nas equações (1) e (2):

$$EE = \frac{E \times \text{vel} + 2\pi \text{Rot} \times \text{Tor}}{(\text{Área de Escavação}) \text{Vel}} \quad (1)$$

$$IP = \frac{(FC / n^{\circ} \text{ferramentas de corte})}{P} \quad (2)$$

4.2 Desempenho em solos moles a médios das Formações São Paulo e Resende.

No trecho da Formação São Paulo foram utilizadas maiores pressões na frente na passagem sob edificações lindeiras (Silva et al, 2015). Nos demais trechos ao longo desta Formação, o sensor EP1 não superou o valor de 1,7 bar (Tabela 4). As curvas de recalques versus avanços das escavações indicam maiores valores de deslocamentos após a passagem das tuneladoras. De fato, a maioria desses recalques está relacionada a falhas no preenchimento do espaço anelar com “grout” durante o avanço da escavação. As perdas de solo foram menores que 1%, e sem reflexos na superfície.

Apesar do médio potencial de “clogging”, não ocorreram intervenções hiperbáricas por esse motivo. As intervenções foram devido aos desgastes das ferramentas, especialmente causadas pela alta presença de areias finas a grossas, e pedregulhos no maciço. A intercalação de camadas argilosas e arenosas na seção de escavação não foi um problema para o condicionamento da frente (água, tensoativos - detergente e ar).

Nos trechos de argilas médias da Formação Resende, o sensor EP1 variou entre 1,2 e 2,0 bars. Também nesse trecho não ocorreram recalques superficiais significativos, sendo que os recalques observados foram devido a falhas no preenchimento do espaço anelar por problemas decorrentes do desgaste das escovas de vedação. A menos de poucos trechos pontuais, as perdas de solo foram menores que 0,5%. Novamente, o potencial médio de “clogging” não causou a necessidade de intervenções hiperbáricas, e estas somente ocorreram devido ao desgaste das ferramentas de corte, e somente após longos trechos de escavação (mais de 100 anéis). Uma explicação

possível pode ser a baixa porcentagem de areias nessas argilas. Como resultado dessas condições favoráveis, as tuneladoras atingiram boas produtividades (até 23 anéis/ dia).

Tabela 4 – Parâmetros médios em solos moles a médios

Parâmetro	Solos moles a médios da Formação SP	Argilas médias da Formação Resende
EP1	1,4 – 2,5 bars	1,5 – 1,75 bars
Empuxo	12 – 20 MN	17 – 23 MN
Torque	1,5 – 3,0 MNm	3,2 MNm
FC	8 – 15 MN	17 MN
EE	25 – 50 MJ/m ³	30 – 60 MJ/ m ³
IP	5 – 10 MN/ m/ rev	15 – 30 MN/ m/ rev
Velocidade	30 – 40 mm/min	30 – 60 mm/ min
Penetração	14 mm/ rev	15-20 mm/ rev
Rotação	2 – 2,8 rpm	2,5 – 3,0 rpm
FIR	60%	54%
FER	4	3,5
WIR	10%	10%

4.3 Desempenho nas argilas duras da Formação Resende.

No trecho BGT-RPT as tuneladoras escavaram argilas extremamente duras (SPT>40) da Formação Resende. Apesar da pequena pressão necessária para a estabilidade da frente, torques elevados foram obtidos, e assim, foi aplicada a condição de operação em “modo de transição”, com metade da câmara com ar comprimido. A penetração das tuneladoras atingiu valores menores que 20 mm/ minuto, e também não foram capazes de executar a própria limpeza na frente de escavação. Aquecimento e “clogging” na cabeça de corte foram frequentes, sendo necessárias paradas das tuneladoras para limpeza por intervenções hiperbáricas.

De fato, o problema principal enfrentado na escavação dessas argilas foi “clogging” da CC. O condicionamento da frente de escavação foi complexo, a ponto de se obterem parâmetros incomuns de FIR (acima de 80%) e FER (extremamente baixo), bem como altos volumes de injeção de água na câmara (WIR) para evitar/ minimizar o “clogging” da CC. O efeito negativo do excesso de água livre na estrutura da espuma não afetou o condicionamento e o processo de escavação neste caso, uma vez que a face do túnel estava estável. No entanto, ficou evidente que essas argilas não reagiram com a espuma ou a água livre para formar um composto homogêneo. Uma possível explicação

pode ser a alta dureza dessas argilas hidrotermalizadas. Vários tipos de agentes tensoativos e polímeros, bem como diferentes concentrações foram utilizadas, inclusive em porcentagens incomuns.

Argilas de consistência rija a dura requerem esforços específicos de condicionamento. É uma condição que está além das recomendações comuns de trabalho e, portanto, não pode ser desprezada no projeto. Thewes (2015) apresenta algumas considerações a respeito de “clogging” nessas argilas, incluindo as dificuldades de condicionamento desses materiais.

As condições de escavação pioraram quando uma camada de areia fina a grossa pouco compacta, pouco argilosa, e permeável ocorreu na coroa do túnel. Embora as argilas duras necessitem de maiores volumes de água para serem escavadas e evitar o entupimento “clogging”, escavações em areias necessitam de espumas secas e estáveis a fim de manter a estabilidade da frente. A água em excesso liquefaz a espuma da frente provocando instabilidade parcial ou colapso do maciço nas camadas de areias. No entanto, a ausência de água na frente (em argila) levava ao “clogging”.

Três instabilidades ocorreram nesse trecho, mas nenhuma associada diretamente ao processo de escavação. Elas foram associadas a procedimentos de intervenções hiperbáricas em condições de frentes mistas (argilas na face e areias na coroa do túnel).

Comulada et al (2016) apresentam aspectos complementares de escavações de tuneis em maciços de solos da Formação Resende.

A Tabela 5 mostra uma compilação de parâmetros de desempenho das tuneladoras neste contexto geológico.

Tabela 5 – Parâmetros médios em argilas duras

Parâmetro	Argilas duras da Formação Resende
EP1	1,2 – 2,2 bar
Empuxo	11 – 25 MN
Torque	2,8 – 3,5 MNm
FC	12 – 14 MN
EE	50 – 80 MJ/ m ³
IP	20 – 50 MN/ m/ rev
Velocidade	10 – 35 mm/ min
Penetração	10 – 15 mm/rev
Rotação	1,5 – 2,5 rpm
FIR	150 – 210%
FER	6 – 13
WIR	10 – 20%

4.4 Desempenho em maciço Precambriano.

Em maciços Precambrianos siltosos moles a médios, as máquinas obtiveram grande desempenho e baixos recalques induzidos. Já em condições de frentes com faces mistas de solo residual, saprolito e rocha, encontradas no trecho CB-JES, as máquinas apresentaram o pior desempenho de todo o trecho. O torque e as forças de contato estiveram sempre próximos dos limites operacionais. Velocidades baixas e inconstantes foram associadas com a alta heterogeneidade do maciço. Além disso, a abrasividade desses materiais associada aos esforços de condicionamento gerou temperaturas elevadas, e consequentes interrupções do avanço para resfriamento.

Devido a este contexto, o condicionamento do maciço foi o principal ponto a ser gerenciado. Rochas e saprolitos são materiais de difícil condicionamento (Thewes, 2005), e precisam de água para o seu desmonte e resfriamento. Ao mesmo tempo, solos residuais arenosos de baixa compacidade (SPT<6 golpes) necessitam de espuma seca e estável. Por consequência, sempre ocorrerá uma segregação desses materiais na frente.

Assim, as tuneladoras não puderam operar em modo EPB, mas em modo de transição com ar comprimido (Maidl et al, 2012), o que aumentava a probabilidade de sobre-escavação, mesmo com a manutenção de pressões altas na frente de escavação (EP1≈2,5 bar). O manejo da bolha de ar na câmara foi a chave para evitar qualquer instabilidade na frente. Mesmo assim, três instabilidades neste trecho foram associadas a este processo de operação.

Também por conta do alto desgaste das ferramentas de corte ocorreu um grande número de intervenções hiperbáricas no trecho CB-JES. Algumas dessas demandaram muito tempo e foram abortadas devido à instabilidades da frente. Estas ocorrências foram associadas com a alta permeabilidade do maciço em relação ao ar, e a impossibilidade de manter as pressões constantes durante os trabalhos.

Injeções químicas e cimentícias foram realizadas no maciço para o preenchimento de vazios formados devido à sobre-escavações, e também em avanço a fim de permitir a continuidade da escavação em condição segura.

A dificuldade pode ser explicada, também, em termos de EE (Tabela 6). No saprolito a EE variou entorno 100 MJ/m³. Na face mista com rocha e saprolito, os valores foram superiores a 150 MJ/m³, indicando a presença de material muito duro na frente, e a necessidade de altos esforços para o avanço das tuneladoras. Estes altos valores de energia podem esclarecer o alto desgaste e número de intervenções hiperbáricas deste trecho. Em solos residuais os valores de SE variaram entre 20 e 70 MJ/m³. Finalmente, desempenhos diferentes foram observados nas duas tuneladoras, como pode ser constatado pela quantidade de intervenções hiperbáricas em cada tuneladora (#4 para a Tuneladora 2 e #14 para a Tuneladora 1).

Tabela 6 – Parâmetros médios no Precambriano

Parameter	Solo Residual	Condições de face mista no Precambriano
EP1	1,7 – 2,2 bars	1,8 – 2,5 bars
Empuxo	13 – 24 MN	20 – 30 MN
Torque	1,5 – 3,5 MNm	3,0 – 4,0 MNm
FC	10 – 15 MN	17 – 20 MN
EE	20 – 70 MJ/m ³	100 – 150 MJ/m ³
IP	30 – 40 MN/ m/ rev	20 – 50 MN/ m/ rev
Velocidade	20 – 50 mm/min	10 – 25 mm/min
Penetração	10 – 20 mm/ rev	5 – 15 mm/ rev
Rotação	2,0 – 2,5 rpm	1,9 – 2,6 rpm
FIR	60 – 120%	115 – 140%
FER	5 – 7	7 – 8
WIR	10 – 20%	8 – 15%

5 ANALISE DOS RECALQUES

Silva et al (2015) apresentaram algumas análises de recalques do trecho entre o poço de partida e a Estação Brooklin. Como mencionado, neste trecho, a maioria dos recalques ocorreram devido a falhas no processo de preenchimento do espaço anelar.

Entre a Estação Brooklin e o Poço Bandeirantes, elevadas perdas de solo foram observadas nos maciços rochosos Precambrianos (alguns superiores a 5%). Nos maciços de solos sedimentares do Terciário de São Paulo os valores de recalques foram diminutos e, assim, não serão tratados.

A maioria das ocorrências de perdas de solo nas escavações em maciços rochosos foi decorrente do modo de operação transição com ar comprimido, o que pode ter induzido a instabilidades na frente. No entanto, recalques

foram relacionados também à falhas no preenchimento do espaço anelar, e mesmo às propriedades reológicas dos materiais, uma vez que recalques foram observados mesmo após um longo período da passagem das tuneladoras (Figura 7). A Figura 8 apresenta alguns resultados do monitoramento da superfície.

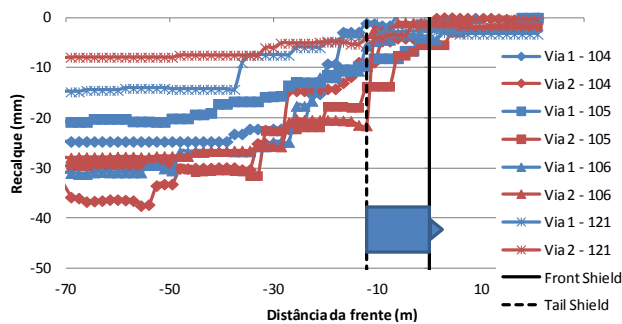


Figura 7 – Recalques x avanço do túnel

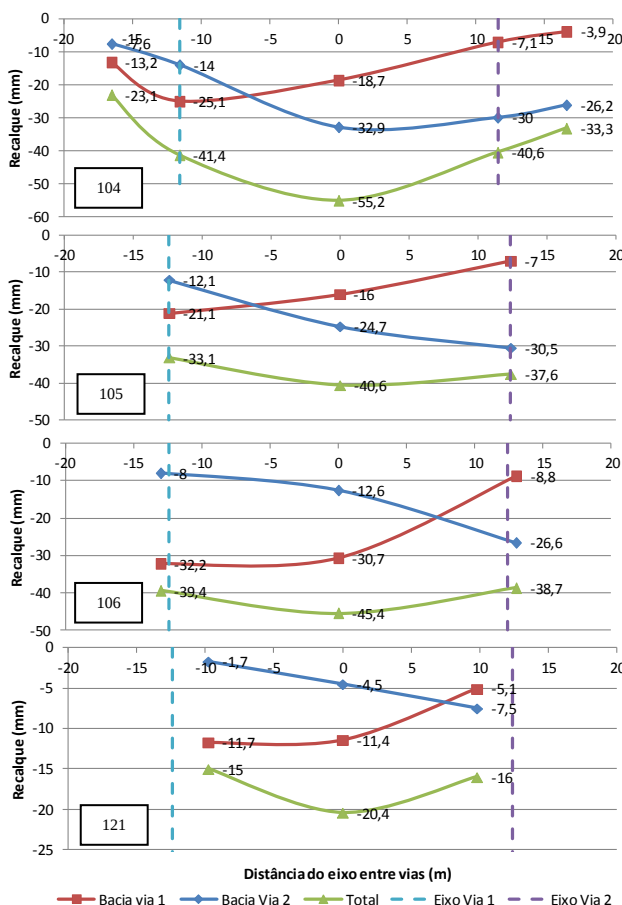


Figura 8 – Bacias de recalques

Análises de recalques foram realizadas a fim de avaliar a existência de vazios remanescentes no maciço. Neste artigo foram consideradas seções afetadas por instabilidades de frente durante as intervenções hiperbáricas (M104-1 e M106-2), e sabidamente com sobre-escavações

durante os avanços (M104-2; M105-ambos e M106-1). Também foi considerada uma seção de monitoramento (M121) em que não se verificou maiores problemas operacionais. Assim, foram aplicadas as metodologias de curva de Gauss (Peck, 1969) e Yield Density (Celestino e Ruiz, 1988) por meio das equações (3) e (4) respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

$$\rho = \rho_{\max} e^{\frac{-x}{i^2}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\rho_{\max}}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (4)$$

Tabela 7 – Aproximações Gaussianas e por Yield Density Gaussian Curve (Peck, 1969)

Section	$\rho_{\max}$ (mm)	i (m)	Vs (%)	R ²
104-1	25,2	14,54	2,46	1,0
104-2	33,7	17,75	4,01	0,89
105-1	21,1	16,83	2,38	1,0
105-2	30,7	18,45	3,80	1,0
106-1	34,7	16,73	3,89	0,91
106-2	24,7	13,76	2,28	0,85
121-1	12,7	16,65	1,42	0,81
121-2	7,58	12,66	0,64	1,0

Yield Density Curve (Celestino and Ruiz, 1998)					
Section	$\rho_{\max}$ (mm)	a (m)	b	Vs (%)	R ²
104-1	25,1	16,5	2,98	2,69	1,0
104-2	30,2	22,97	6,0	3,88	0,97
105-1	21,1	19,2	2,66	2,77	1,0
105-2	30,5	21,4	2,71	4,43	1,0
106-1	32,2	21,1	5,8	3,82	1,0
106-2	26,6	12	1,30	6,22	0,99
121-1	12,0	18,5	5,5	1,26	0,98
121-2	7,58	14,5	2,65	0,75	1,0

Conforme a Tabela 7, as perdas de solo calculadas com as curvas Yield Density foram maiores. Além disso, parece que estas curvas fornecem uma melhor estimativa de recalques, já que as perdas de solo inferidas têm correspondência com os dados obtidos das tuneladora nesse trecho crítico (~7% na Tuneladora-1 e ~5% na Tuneladora-2). Assim, parece que as curvas de Gauss podem subestimar as perdas de solo. Os resultados justificaram os tratamentos pela superfície.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou aspectos importantes obtidos durante a escavação dos tuneis pelas máquinas do tipo EPB neste trecho de expansão da Linha 5 – Lilás do Metro de São Paulo.

A condição de face mista de escavação foi o principal desafio. Argilas duras com areias fofas no topo do túnel exigiram alto esforço de condicionamento para evitar o “clogging” na cabeça de corte das máquinas e instabilidades de teto. Da mesma forma, face mista em maciços do Precambriano (rocha, saprolito e solo residual) provocou alto desgaste das ferramentas de corte, aquecimento e alta sedimentação de material na câmara. “Clogging” e desgastes das ferramentas de corte exigiram uma grande quantidade de intervenções hiperbáricas não programadas. Instabilidades de frente ocorreram em algumas dessas intervenções, exigindo tratamentos por injeções a partir da superfície.

Devido a alta sedimentação na câmara durante as escavações em face mista no maciço Precambriano as tuneladoras operaram em modo de transição e não em modo EPB clássico. Sobre-escavações e elevadas perdas de solo foram observadas nesse trecho. Três instabilidades foram associadas a estas condições de operação das tuneladoras.

As dificuldades de escavação no mesmo contexto geológico de maciço Precambriano podem ser verificadas ao analisar os distintos desempenhos entre as duas tuneladoras, como pode ser constatado pela quantidade de intervenções hiperbáricas em cada uma (#4 para a Tuneladora 2 e #14 para a Tuneladora 1).

Análises de recalques foram feitas a fim de avaliar vazios remanescentes no maciço. As curvas de Gauss e Yield Density foram aplicadas. Nesta abordagem, aparentemente, os resultados obtidos com as curvas Yield Density foram melhores, por outro lado, os resultados obtidos com as curvas de Gauss subestimaram as perdas de solos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia do Metropolitano de São Paulo e ao Consórcio Andrade Gutierrez – Camargo Correa a

oportunidade de publicar essa experiência na área de escavações mecanizadas de tuneis

REFERENCES

- CELESTINO, T. B. e RUIZ, A.P.T. (1998). “Shape of settlement troughs due to tunnelling through different types of soft ground”. *Felsbau*, Vol. 16, nº2, 118-121.
- COMULADA et al. 2016. “Experiences gained in heterogeneous ground conditions at the twin tube EPB shield tunnels in Sao Paulo Metro Line 5”. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress*. San Francisco, United States.
- FUTAI et al. 2012. Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade de Solos Residuais da Região Metropolitana de São Paulo. In: Negro et al. (Ed.). *Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS. p. 155-187.
- MAIDL, B.; HERRENKNECHT, M.; MAIDL, U.; WEHRMEYER, G.: “Mechanized shield tunnelling”. 2nd Edition. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- MASSAD, F. 2012. Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade dos Solos Sedimentares de São Paulo. In: Negro et al. (Ed.). *Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS. p. 109-135.
- MONTEIRO e ROCHA. 2015. A experiência do Metrô de São Paulo nos estudos de abrasividade de rochas: técnicas para previsão do consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas. *Revista Engenharia*. v. 625. 119-124p.
- MONTEIRO et al. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. In: Negro et al. (Ed.). *Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS. p. 17-46.
- PECK, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City State-of-the-Art volume, pp. 225–290.
- RICCOMINI et al. 2004. Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto et al. (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Becca. p. 383-406.
- SHIRLAW, N. ,2015. “Pressurised TBM Tunnelling in mixed face conditions resulting from tropical weathering of igneous rock”. *International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGS)*, Singapore, 2015.
- SILVA et al. 2013. “Construction Aspects for Lot 3 São Paulo Metro Line 5 Expansion”. In: *Proceedings of*

the World Tunnel Congress. Anagnostou, G., & Ehrbar, H. (editors), Geneva, Switzerland.

SILVA et al. 2015., “Twin tunnels excavated in sandy soils in a density urban area”. In: Proceedings of the World Tunnel Congress. Dubrovnik, Croatia.

THEWES, M.. “Geotechnical risks for tunnel drives with shield machines”. Proceedings of 2nd Summerschool on Rational Tunnelling, University of Innsbruck, Institute of Geotechnical and Tunnel Engineering, Innsbruck, 3.-6. Oct. 2005, pp. 239-268.

THEWES, M.; HOLLMANN, F. “Clogging of TBMs in clay soils and clay-rich rock”. Int. Conf. on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs), Singapore, 18–20 November 2015.