



**PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO  
EM GEOCIÊNCIAS  
E MEIO AMBIENTE**

---

PARÂMETROS DE CONTROLE DE TÚNEIS MECANIZADOS  
ESCAVADOS EM MACIÇOS INTEMPERIZADOS:  
METRÔ DE SÃO PAULO, LINHA 5 - LILÁS (LOTE 3)

Luís Cesar Esteves Flamínio Filho

---

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Campus de Rio Claro



LUÍS CESAR ESTEVES FLAMÍNIO FILHO

PARÂMETROS DE CONTROLE DE TÚNEIS  
MECANIZADOS ESCAVADOS EM MACIÇOS  
INTEMPERIZADOS: METRÔ DE SÃO PAULO,  
LINHA 5 - LILÁS (LOTE 3)

Orientador:

Prof. Dr. Marcos Eduardo Hartwig

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro - SP

2021

F579p

Flamínio Filho, Luís Cesar Esteves

Parâmetros de controle de túneis mecanizados escavados em maciços  
intemperizados : metrô de São Paulo, Linha 5 - Lilás (lote 3) / Luís Cesar  
Esteves Flamínio Filho. -- Rio Claro, 2021

115 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

1. TBM. 2. EPB. 3. Face Mista. 4. Perfil Litológico. 5. Parâmetros de  
Escavação. I. Título.

Luís Cesar Esteves Flamínio Filho

**PARÂMETROS DE CONTROLE DE TÚNEIS MECANIZADOS  
ESCAVADOS EM MACIÇOS INTEMPERIZADOS: METRÔ DE  
SÃO PAULO, LINHA 5 - LILÁS (LOTE 3)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. MARCOS EDUARDO HARTWIG  
CCENS / UFES/Alegre (ES)

Prof. Dr. ROGÉRIO PINTO RIBEIRO  
EESC / USP/São Carlos (SP)

Dra. DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA  
TunGeo / São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP  
08 de Abril de 2021

## **Agradecimentos**

À Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP), pela concessão do acesso aos documentos técnicos, os quais serviram como alicerce e ponto de partida deste estudo.

Ao meu orientador, professor Marcos Eduardo Hartwig, pela disponibilidade e acompanhamento exercido durante toda a execução do trabalho. Também pela confiança, ensinamentos, dedicação, críticas e amizade, que certamente contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

À Seção Técnica da Pós Graduação do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), em especial ao coordenador Prof. César Augusto Moreira e à secretária Rosangela Vacello (Rô), por todo o auxílio prestado mesmo que de forma remota.

Ao professor Peter Christian Hackspacher, pelo conhecimento transmitido, amizade e bons momentos vividos durante as aulas presenciais e viagens pela região de Rio Claro.

Ao amigo Carlos Henrique (Cacau), pelo auxílio com o software de modelagem geológica durante a fase inicial de elaboração do modelo.

Ao colega de turma Alex J. Choupina (Rodox), sem cuja ajuda fundamental, seria logisticamente impossível a realização da inscrição neste curso de mestrado.

À Dona Norma, minha mãe, pela dedicação na criação dos filhos e por ter sempre acreditado e apoiado nos momentos em que precisei.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Também obtive auxílio pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, através de concessão de bolsa de estudos durante os meses iniciais da pesquisa (proc. nº 133310/2019-1).

*The beauty of dystopia is that it lets us vicariously  
experience future worlds - but we still have the power  
to change our own.*

*Ally Condie*

## Resumo

A utilização de máquinas pressurizadas do tipo EPB - *Earth Pressure Balance* para a escavação de túneis em áreas urbanas é ainda bastante escassa no Brasil. Apesar de ser considerada uma técnica de escavação segura e apresentar bom desempenho tanto em maciços terrosos quanto rochosos, a escavação pode se tornar bastante desafiadora e complexa em condições de frente mista. No presente estudo, analisou-se os dados geológicos e os parâmetros de escavação de um trecho da Via 2 do Lote 3 da Linha 5 – Lilás do Metrô de São Paulo, compreendido entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Este trecho representa uma das primeiras experiências em frente mista com tuneladoras EPB no Brasil. Sua escavação apresentou taxa de avanço média de 7,7 m/dia, na qual foram interceptados gnaisses, saprólitos e solos residuais em diferentes proporções. Os resultados mostram como os parâmetros de escavação estão diretamente associados ao tipo de material escavado. Os trechos em frente mista transicional provocaram diversos impactos negativos na escavação, como os descritos em outros projetos. Finalmente, os resultados também indicaram que o torque operacional instalado no equipamento foi insuficiente para a escavação do trecho estudado.

**Palavras-chave:** TBM, EPB, face mista, perfil litológico, parâmetros de escavação.

## **Abstract**

The use of EPB - Earth Pressure Balance shields is still very modest on tunneling in urban areas in Brazil. Despite considered a safe method and presenting good performance in soil excavation, the operation can become quite complex and challenging in mixed face conditions. In this study, were analyzed the geological data and excavation parameters of a stretch of Route 2 (Lot 3) of São Paulo Metro Line 5 - Lilac, between Campo Belo Station and PVSE Jesuíno Maciel. This stretch represents one of the first experiences in mixed face in Brazil excavated with pressurized shield machines. The excavation performed an average advance rate of 7.7 m/day and intercepted different proportions of gneisses, saprolites and residual soils. The results show how the excavation parameters are associated with the type of geological material. The intervals excavated in mixed transitional ground conditions caused several negative impacts in the excavation process, similarly to what is described in other projects. Finally, the results also indicate the operating torque installed in the equipment was insufficient for the excavation of the stretch.

**Keywords:** TBM, EPB, mixed face, lithological profile, excavation parameters.



## LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
AR	<i>Advance Rate</i> (Velocidade de Avanço)
BSSP	Bacia Sedimentar de São Paulo
CAI	<i>CERCHAR Abrasivity Index</i>
cf	Concentração do tensoativo (surfactante)
CF	<i>Contact Force</i> (Força de Contato)
CMSP	Companhia do Metropolitano de São Paulo
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DBF	<i>Data Base Files</i>
EPB	<i>Earth Pressure Balance</i>
EPBS	<i>Earth Pressure Balanced Shield</i>
eQc	Conteúdo de Quartzo-Equivalente
FER	<i>Foam Expansion Ratio</i> (Taxa de Expansão da Espuma)
FIR	<i>Foam Injection Ratio</i> (Taxa de Injeção de Espuma)
FM	Face Mista
FMT	Face Mista Transicional

ISRM	<i>International Society of Rock Mechanics</i>
$K$	Coeficiente de Permeabilidade
MTG	<i>Mixed Transitional Ground</i>
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
$N_{SPT}$	Número de golpes de SPT
PR	<i>Penetration Rate</i> (Taxa de Penetração)
PTBM	<i>Pressurized Tunnel Boring Machine</i> (Tuneladora Pressurizada)
PVSE	Poço de Ventilação e Saída de Emergência
$Q_f$	Massa do tensoativo (surfactante)
$Q_F$	Volume de espuma
$Q_I$	Solução (água + tensoativo)
$Q_L$	Volume da fração líquida injetada
RAI	<i>Rock Abrasivity Index</i>
RCSB	Rift Continental do Sudeste do Brasil
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
RDO	Relatório Diário de Obra
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo

SACI	Sistema para Acompanhamento e Controle de Instrumentação
SAPE	Sistema de Acompanhamento de Parâmetros de Escavação
SE	Specific Energy (Energia Específica)
SPT	<i>Standard Penetration Test</i> (Ensaio de Penetração Padrão)
SS	<i>Slurry Shield</i>
T	<i>Torque</i>
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i> (Tuneladora)
TR	Topo Rochoso
VCA	Vala à Céu Aberto
WIR	Taxa de Injeção de Água ( <i>Water Injection Ratio</i> )

# Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	15
2.2. EARTH PRESSURE BALANCE – EPB .....	15
2.2.1. Princípio de funcionamento .....	16
2.2.2. Campos de aplicação.....	18
2.2.3. Modos de operação .....	20
2.3. PARAMETROS DE CONTROLE DA ESCAVAÇÃO .....	22
2.3.1. Torque e força de avanço.....	22
2.3.2. Energia específica.....	22
2.3.3. Pressão de suporte .....	23
2.3.4. Condicionamento do solo.....	25
2.3.5. Densidade aparente .....	29
2.4. ESCAVAÇÃO DE MACIÇOS INTEMPERIZADOS COM MÁQUINAS EPB.....	29
2.4.1. Face mista (FM) versus face mista transicional (FMT).....	30
2.4.2. O caráter irregular do topo rochoso em maciços intemperizados .....	33
2.4.3. Abrasividade .....	34
2.4.4. Problemas frequentemente encontrados na escavação de maciços rochosos intemperizados .....	37
2.4.4.1 O exemplo do túnel Kranji em Singapura .....	48
3. ÁREA DE ESTUDO .....	52
3.1. ASPECTOS GERAIS DA VIA 2.....	53
3.2. CARACTERÍSTICAS DA TUNELADORA E DO REVESTIMENTO .....	55
4. ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DO LOTE 3 .....	58
4.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	58
4.2. ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	60
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	62
6. RESULTADOS .....	65
6.1. MODELOS LITOLÓGICO E DE VALORES DE SPT .....	65
6.2. PARÂMETROS DE ESCAVAÇÃO .....	72
6.2.1. Dados de Produção .....	72
6.2.2. Rotação da cabeça de corte, Velocidade de avanço e Taxa de penetração .....	74
6.2.3. Pressão de suporte .....	77
6.2.4. Condicionamento do Solo .....	80
6.2.5. Torque e Força de contato .....	82

6.2.6. Densidade Aparente.....	85
6.2.7. Energia Específica .....	87
7. CORRELAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÕES .....	89
8. CONCLUSÕES .....	102
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
GLOSSÁRIO .....	113

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem ocorrendo um crescente aumento no uso do espaço subterrâneo em algumas capitais do país, especialmente onde existe maior demanda por mobilidade urbana, como São Paulo (COMULADA *et al.*, 2016; AGUIAR *et al.*, 2017; GERACE *et al.*, 2017; PEIXOTO DA SILVA *et al.*, 2017), Rio de Janeiro (MAIDL & PIERRE, 2014) e Fortaleza (FORTES *et al.*, 2011). De acordo com Guglielmetti *et al.* (2008), conexões subterrâneas diminuem o tempo de deslocamento e reduzem o consumo de energia, ao mesmo tempo que, maximizam a segurança, reduzem impactos visuais, limitam a poluição acústica e preservam o ambiente em superfície.

Escavações subterrâneas em áreas densamente ocupadas, impõem uma série de desafios técnicos e operacionais, pois geralmente compreendem escavações rasas, muitas vezes em materiais saturados e semi-consolidados. Condições como estas impulsionaram o aprimoramento dos métodos de escavação mecanizada, sobretudo aqueles que oferecem pressão de suporte na frente de escavação, como as tuneladoras TBM - *Tunnel Boring Machine* do tipo EPB - *Earth Pressure Balance*.

Estas máquinas têm sido utilizadas com sucesso em áreas urbanas no mundo todo, graças ao seu amplo escopo de aplicabilidade, versatilidade e desempenho (EFNARC, 2005; BABENDERERDE *et al.*, 2005; ZHAO *et al.*, 2007; TÓTH *et al.*, 2013; ROBY & WILLIS, 2014; COMULADA *et al.*, 2016). As tuneladoras EPB permitem equilibrar rapidamente os empuxos externos causados pelas colunas de solo e de água sobre o túnel, provocando o mínimo de perturbação no entorno do empreendimento (SHIRLAW, 2005; ROCHA *et al.*, 2014; PEIXOTO DA SILVA *et al.*, 2016). No entanto, escavações com equipamentos EPB TBM também estão sujeitas a dificuldades construtivas decorrentes das condições geológico-geotécnicas ao longo do traçado, sobretudo, quando são interceptadas condições de frente mista.

Oliveira & Diederichs (2016) e Oliveira *et al.* (2017<sub>a</sub>) introduziram o termo *mixed transitional ground* (MTG) ou face mista transicional (FMT) para o material resultante de intemperismo químico de maciços rochosos, muito comum em países de clima tropical. Faces mistas transicionais segundo estes autores são constituídas por diferentes proporções de solo e rocha de mesma origem geológica, que apresentam contrastes de resistência mecânica, sendo impossível delimitar com precisão seus limites.

Ma *et al.* (2015) baseados nas características geológicas de projetos de escavações mecanizadas em diferentes locais do mundo, classificaram três tipos de frente mista: (a) camadas inclinadas ou bandas formadas por diques, falhas ou zonas de cisalhamento; (b) interface entre solo e rocha em maciços intemperizados; e (c) blocos e matacões rochosos resultantes ou não de intemperismo esferoidal isolado em meio a material terroso (solo ou sedimento).

De acordo com Shirlaw (2016), a natureza e extensão dos problemas durante a escavação de um túnel em frente mista depende de um conjunto de fatores, como o tipo, *design* e operação da tuneladora, assim como das características da rocha e da proporção do túnel em faces mistas. Segundo o autor, nos últimos 20 anos houve um número significativo de escavações com máquinas EPB em faces mistas em países asiáticos. Os principais problemas encontrados compreendem: (a) dificuldades na manutenção da pressão de suporte na frente de escavação para equilibrar os empuxos; (b) desabamentos e deslocamentos intensos na superfície; (c) baixas taxas de avanço; (d) perda de solo e formação de capelas<sup>1</sup>; (e) dificuldades no condicionamento do solo<sup>2</sup>; (f) rápido desgaste e danos das ferramentas de corte; (g) intervenções hiperbáricas de manutenção frequentes e prolongadas; (h) entupimentos, seja por argilas de alta aderência ou materiais de granulometria grosseira; e (i) extravasamentos de fluido de escavação em superfície. Todos estes fatores, segundo o autor, afetam o desempenho<sup>3</sup> da escavação e podem impactar o cronograma e os custos do empreendimento.

A Linha 5 - Lilás está localizada na região metropolitana de São Paulo e estende-se entre as estações Capão Redondo e Chácara Klabin, totalizando um trajeto de 20 km de extensão. O projeto de expansão desta linha está dividido em dois lotes (3 e 7). O trecho estudado pertence ao Lote 3, o qual possui 5,3 km de extensão e compreende o trecho entre a Vala à Céu Aberto (VCA) Conde de Itú e a Estação Bandeirantes. O Lote 3 é composto por dois túneis paralelos de vias singelas (vias 1 e 2) escavados com tuneladoras do tipo EPB com 6,89 m de diâmetro. Estes túneis atravessam sedimentos inconsolidados das formações São Paulo e Tremembé incluídos na Bacia Sedimentar de São Paulo (BSSP), assim como gnaisses pré-cambrianos do Complexo

---

<sup>1</sup> Desestabilização e ruptura do material, formando uma cavidade no teto e na frente de escavação.

<sup>2</sup> Melhoria do comportamento do solo por meio da adição de água e “detergentes”, no intuito de tornar sua consistência mais “pastosa”.

<sup>3</sup> Desempenho diz respeito a eficiência no ciclo de escavação, que compreende o número de intervenções de manutenção, efeitos em superfície, produtividade, efeitos em superfície, etc.

Embu e seus produtos de alteração. O objetivo principal deste estudo foi analisar e correlacionar os aspectos geológicos e alguns parâmetros de operação da tuneladora EPB do trecho entre a Estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel da Via 2, onde foram encontradas, pela primeira vez no Lote 3, condições de escavação em face mista transicional (FMT).



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com Pelizza & Peila (1999), nas fases iniciais de projeto e construção de túneis devem ser considerados os seguintes parâmetros econômicos:

- Efetividade dos custos (depende da escolha do método de escavação adequado);
- Velocidade de execução (depende do método de escavação e sua flexibilidade, visando o mínimo de interrupções);
- Redução de incertezas entre projeto e construção (depende do conhecimento prévio das condições geológico-geotécnicas e da flexibilidade de execução do método de escavação);
- Condições de segurança (depende da escolha do método de escavação e da habilidade e treinamento da equipe).

Observa-se, portanto, que a escolha do método de escavação representa o maior impacto em termos de custo, cronograma e segurança em um projeto de escavação subterrânea.

Atualmente existem quatro tipos de máquinas que se destacam ao atender a estes requisitos: *Slurry Shield (SLS)*, *Earth Pressure Balanced (EPBS)*, *Variable Density (VDS)* e as híbridas *Multi-Mode (HYS)*. Daub (2020) fornece recomendações detalhadas e atualizadas quanto aos diferentes métodos de escavação e tipos de tuneladoras, bem como os principais fatores e critérios a serem considerados na seleção do método mais adequado.

O presente capítulo tratará de explicar alguns dos fatores mais importantes relacionados ao funcionamento, aplicação e operação da tecnologia *Earth Pressure Balanced*, e terá como foco principal aspectos associados às escavações em faces mistas transicionais (FMT).

### 2.2. EARTH PRESSURE BALANCE – EPB

Tuneladoras *Earth Pressure Balanced (EPB)* foram desenvolvidas no Japão no início da década de 1970 e em 1974, na cidade de Tóquio, tiveram uma de suas primeiras aplicações (MAIDL *et al.* 2012). São máquinas de escudo pressurizadas que

possuem amplo escopo de aplicação, e entregam versatilidade e flexibilidade na escavação de maciços terrosos e/ou rochosos. São capazes de escavar terrenos inconsolidados e saturados (sob o lençol freático), oferecendo pouca ou nenhuma interferência no regime hidrogeológico do maciço.

### 2.2.1. Princípio de funcionamento

Nas escavações com máquinas EPB (Figura 1) a face é tipicamente sustentada pelo *muck*, que consiste no próprio material escavado, remoldado, condicionado e acumulado na câmara de escavação. Esta é separada do restante da máquina por uma parede confinante (*pressure bulkhead*). Durante o avanço, o solo é escavado pela rotação da cabeça de corte na parte frontal da máquina, equipada com ferramentas adequadas e aberturas por onde entra o material. Na câmara de escavação, braços misturadores ajudam a trabalhar o material escavado até que atinja a consistência adequada. A pressão da câmara é medida através de sensores distribuídos em diferentes alturas na parede confinante. Um parafuso sem-fim com vedação à prova de pressão remove o material da câmara de escavação. A pressão de suporte na câmara é controlada através da velocidade de rotação do parafuso sem-fim, pela extensão dos macacos hidráulicos e pela ação dos agentes condicionadores do solo, tendo como objetivo equilibrar as pressões de terra e hidrostática (Figura 2) (MAIDL *et al.* 2012).

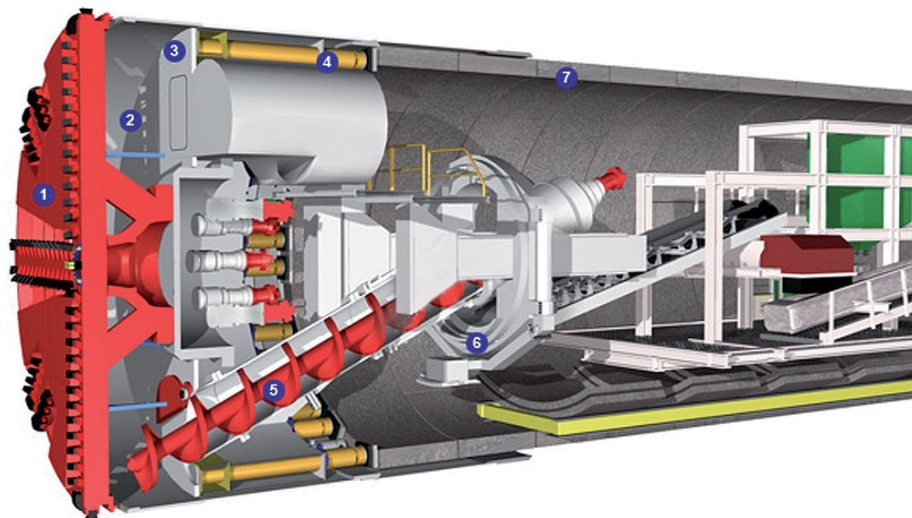


Figura 1. Componentes básicos de uma tuneladora EPB. Legenda: 1) cabeça de corte; 2) câmara de escavação; 3) parede confinante; 4) macacos hidráulicos; 5) parafuso sem-fim; 6) eretor de anéis; 7) revestimento pré-moldado. Fonte: Herrenknecht *et al.* (2011).

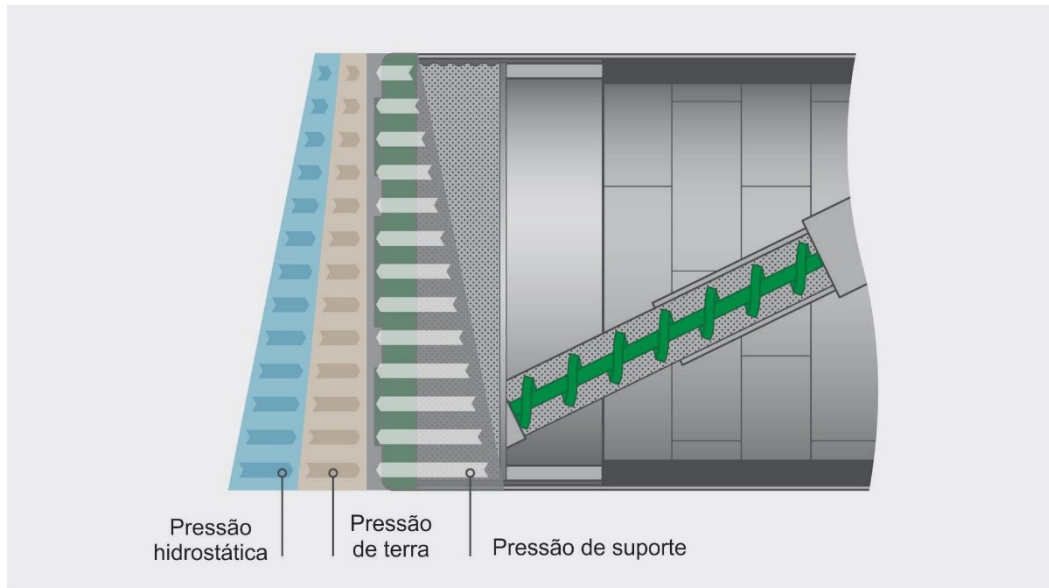


Figura 2. Princípio da aplicação da pressão de suporte de frente para equilibrar os empuxos produzidos pelo maciço. O empuxo do solo é proporcional à cobertura sobre a coroa do túnel e o empuxo hidrostático à altura da coluna d'água. Fonte: Herrenknecht AG<sup>4</sup>, adaptado.

Simultaneamente à escavação, a tuneladora avança através da extensão dos macacos hidráulicos (cilindros de avanço), apoiando e empurrando o último anel montado, projetando-se contra o maciço. O espaço anular existente entre o perfil escavado (diâmetro da máquina) e o diâmetro externo dos anéis de revestimento é preenchido com *grout*<sup>5</sup>, sob pressão apropriada e volume mínimo igual ao seu volume teórico. O material é removido da câmara de escavação pela rosca sem-fim e conduzido por esteiras transportadoras (ou outras formas adaptadas) até um bota-fora. O eretor de segmentos levanta e instala aduelas de concreto pré-moldado nas paredes do túnel recém-escavado dentro do escudo. A máquina inicia o próximo ciclo de escavação apoiando novamente os macacos hidráulicos no último anel instalado e empurrando a tuneladora contra a face. É de extrema importância o controle correto do volume teórico a ser escavado e o volume extraído pelo parafuso sem-fim, pois seu desequilíbrio pode levar a sobre-escavação (GUGLIELMETTI *et al.* 2008).

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/>. Acessado em 03/2021.

<sup>5</sup> Argamassa usada no preenchimento de vazios, falhamentos e juntas durante a construção do túnel.

### 2.2.2. Campos de aplicação

Tuneladoras EPB foram originalmente desenvolvidas para serem utilizadas em modo fechado (modo EPB), em solos com teor de finos ( $< 0,06$  mm) acima de 30%. Segundo Maidl *et al.* (2012), condições ótimas de atuação destas máquinas são oferecidas por solos argilo-siltosos ou silto-arenosos, que quando trabalhados assumem consistência mole e pastosa (Figura 3).

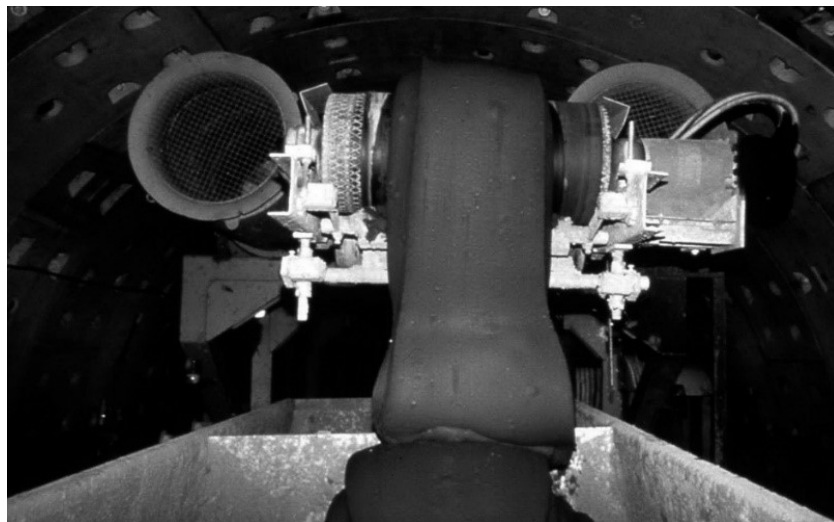


Figura 3. *Muck* derivado de solo silto-argiloso, trabalhado mecanicamente sem adição de aditivo, Metrô de Taipei, 1992. Fonte: Maidl *et al.* (2012).

Com a finalidade de estender o escopo de aplicação da tecnologia EPB, o condicionamento do solo tem mostrado grande efetividade, tanto em solos de granulometria fina quanto grosseira. Budach & Thewes (2015) elaboraram um diagrama relacionando o panorama dos campos de aplicação de máquinas EPB com o tipo de condicionamento mais adequado (Figura 4). O diagrama ainda compara resultados de estudos desenvolvidos em laboratório (BUDACH, 2012), com resultados mais antigos, derivados de experiência prática (MAIDL, 1995).

De acordo com Budach (2012), quando a curva de distribuição granulométrica do material estiver dentro do campo I, a máquina EPB pode escavar abaixo da coluna d'água utilizando condicionamento com espuma. No campo II, a adição de polímeros e suspensão de finos permite um avanço efetivo. Estes aditivos alteram as propriedades do *muck* para atender às condições de trabalhabilidade, compressibilidade e permeabilidade adequadas. Esses objetivos somente serão alcançados quando a curva do solo estiver entre os campos I e II. Quando a curva do

material se encontra no campo III, a combinação de aditivos leva a valores adequados de trabalhabilidade e compressibilidade, mas não a uma redução suficiente na permeabilidade (BUDACH & THEWES, 2015).

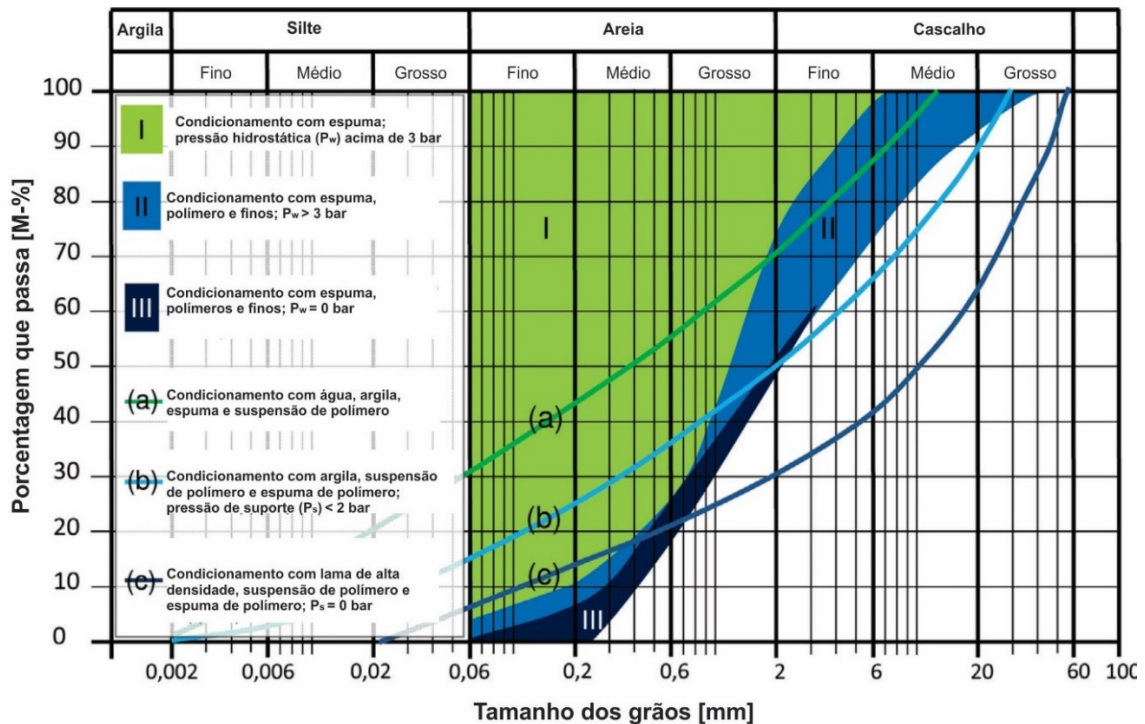


Figura 4. Campos de aplicação para tuneladoras EPB baseados em estudos de laboratório (BUDACH, 2012) e experiências práticas (curvas a, b e c) (MAIDL, 1995). ( $P_w$ ) Pressão hidrostática; ( $P_s$ ) Pressão de suporte. Fonte: adaptado de Budach & Thewes (2015).

Segundo Maidl (1995), a linha verde (a) demarca o limite para aplicação em solos com índice consistência ( $I_c$ ) entre 0,4-0,75, onde o material escavado pode ser condicionado com água, argila, suspensão de polímero ou espumas. O solo deve conter mais de 30% de teor de finos. Budach & Thewes (2015) afirmam, baseados em resultados de testes em laboratório, que a aplicação do método EPB pode ser estendida para solos com menor teor de finos, caso a curva de distribuição granulométrica do material escavado esteja dentro do campo I.

Para Maidl (1995), agentes condicionadores como argila, suspensão de polímero e espumas de polímero, podem ser utilizados quando a pressão hidrostática ( $P_w$ ) for menor que 2 bar (linha b). Neste caso, conforme Budach & Thewes (2015), é possível ainda estender o campo de aplicação para solos de granulometria mais grossa se a curva do material escavado estiver dentro dos campos I ou II. Em solos

de curva de distribuição granulométrica limitada pela linha (c), o condicionamento pode ser realizado com lama de alta densidade, suspensão de polímero e espuma de polímero, no entanto, é recomendável que a pressão hidrostática seja nula ( $P_w = 0$ ).

Budach & Thewes (2015) concluíram que o uso de diferentes aditivos condicionadores permite a extensão do escopo de aplicação de tuneladoras EPB para solos de granulometria mais grossa. Com a utilização de combinações de alguns aditivos (e.g. polímeros e suspensão de finos), escavações EPB tornam-se viáveis mesmo em solos não-coesivos e abaixo do nível freático.

### **2.2.3. Modos de operação**

Uma das maiores vantagens do método EPB é a versatilidade para escavar uma grande variedade de tipos de terrenos, muito em função de sua flexibilidade de operação. De acordo com Maidl *et al.* (2012), tuneladoras EPB operam em diferentes modos, variando de acordo com o tipo de suporte da frente e de transporte do material escavado. Os autores atentam para o fato de que, atualmente, não existe uma definição universal acerca da classificação destes modos de operação. Serão descritos abaixo os três modos de operação mais utilizados (Figura 5).

O modo aberto é utilizado na escavação de rochas competentes ou solos rígidos e autoportantes. Neste modo, as máquinas EPB operam sob pressão atmosférica, sem o acúmulo de material na câmara de escavação, sem oferecer pressão de suporte. Geralmente, nessas condições, toda a superfície da cabeça de corte é equipada com discos cortadores, por vezes, combinados com *scrapers* (raspadores). Durante paralisações em zonas saturadas, é possível utilizar ar comprimido na câmara de escavação para conter o ingresso de água do freático (MAIDL *et al.* 2012).

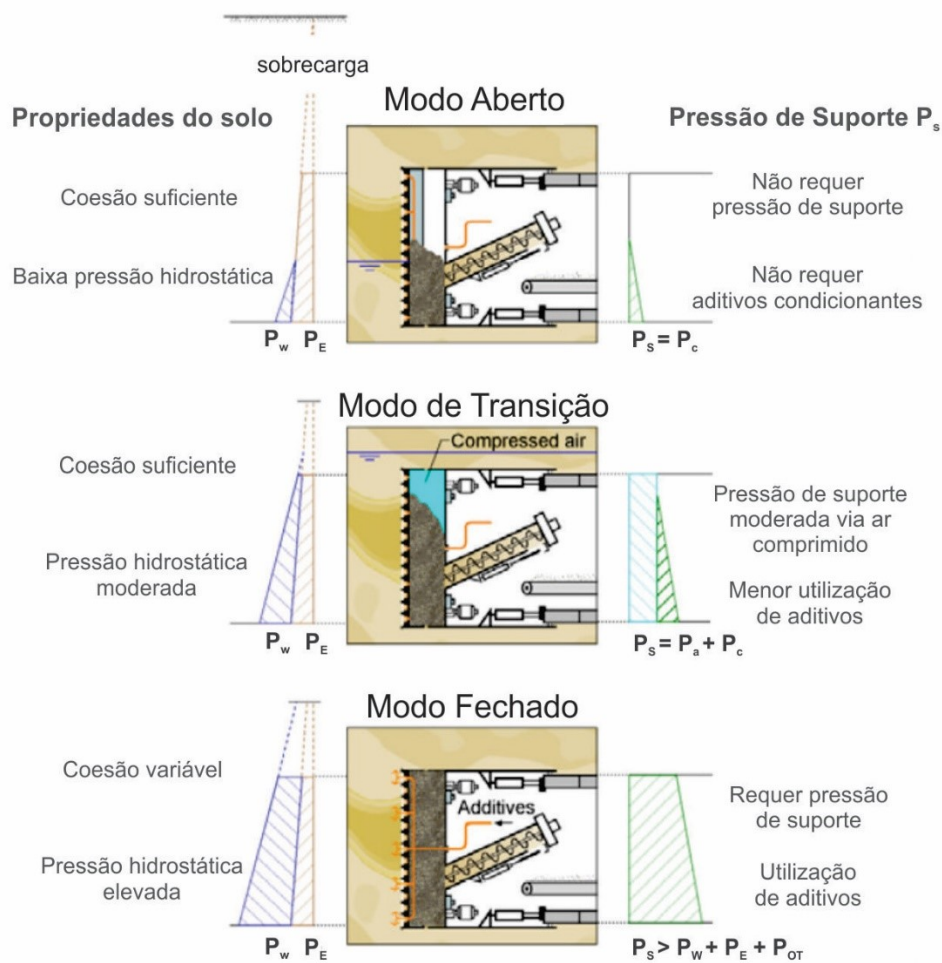


Figura 5. Modos de operação das tuneladoras EPB. Legenda:  $P_w$  (pressão hidrostática),  $P_E$  (pressão dos empuxos de terra),  $P_s$  (pressão de suporte),  $P_c$  (pressão de preenchimento da câmara),  $P_a$  (pressão de ar comprimido) e  $P_{OT}$  (Pressão de tolerância operacional da máquina). Fonte: Babendererde *et al.* (2005) adaptado.

O modo de transição (ou semi-EPB) é geralmente utilizado em solos saturados e semi-consolidados (temporariamente estáveis). A tuneladora pode trabalhar com a câmara de escavação parcialmente preenchida pelo material escavado e parcialmente preenchida com ar comprimido na parte superior. Essa medida reduz significativamente o ingresso de água na frente de escavação. Nessas condições, o modo de transição favorece a elevação da velocidade de avanço, diminuição do desgaste das ferramentas de corte e uma redução no consumo de aditivos condicionantes. Entretanto, este modo também possui algumas desvantagens. O material escavado é mais rijo, o que dificulta uma selagem adequada dentro do parafuso sem-fim, resultando em *blow-outs*. Adicionalmente, dependendo da abrasividade do material, ocorre um rápido desgaste da rosca sem-fim.

O modo EPB fechado normalmente é utilizado em solos finos, saturados e inconsolidados, com alguma ou nenhuma capacidade de autossustentação. Neste modo, a máquina opera com a câmara de escavação sempre pressurizada e completamente preenchida, utilizando o próprio material escavado para oferecer a pressão de suporte, a fim de contrabalancear os empuxos externos na frente de escavação. O material é removido da base da câmara por um parafuso sem-fim até o interior do túnel sob pressão atmosférica.

Quando utilizado em rochas, o modo EPB requer medidas extremamente elaboradas para que o sistema de remoção via parafuso sem-fim não sofra as consequências da falta de ductilidade do material (MAIDL *et al.*, 2012). Cabe mencionar que a utilização deste modo implica em uma elevação no torque.

### **2.3. PARAMETROS DE CONTROLE DA ESCAVAÇÃO**

Existem muitos parâmetros de controle monitorados durante o processo de escavação com tuneladoras EPB. Considerando os objetivos da presente pesquisa, destacam-se o torque, força de avanço, energia específica, pressões de suporte de frente, condicionamento do solo e densidade aparente na câmara de escavação. Estes parâmetros são continuamente monitorados durante o ciclo de escavação e interferem diretamente na produtividade e nos recalques verticais em superfície.

#### **2.3.1. Torque e força de avanço**

Segundo Camposinhos (2008), o torque (CT) é a força motriz que corta o maciço através do giro da cabeça de corte. A força de avanço é o impulso que move a máquina no sentido da escavação e contra o maciço. Segundo o autor, torque muito elevado provoca maior tensão nos motores da máquina, refletindo em maior desgaste da cabeça e ferramentas de corte. Força de contato excessivamente alta compromete a vida útil dos motores.

#### **2.3.2. Energia específica**

Um importante parâmetro utilizado na avaliação do desempenho de uma escavação mecanizada pressurizada é a energia específica (SE), que pode ser



representada pela quantidade de energia necessária para escavar 1 m<sup>3</sup> de material (solo e/ou rocha). De acordo com Shirlaw (2015), a energia específica pode ser determinada conforme a expressão:

$$SE = \frac{[(Fn.P)+(2.\pi.N.T)]}{A.P} [MJ.m^{-3}] \quad (Eq. 1)$$

F<sub>n</sub>: força de contato da cabeça de corte (MN)  
 P: taxa de penetração (mm/min)  
 N : velocidade de rotação da cabeça de corte (rev/min)  
 T: torque (MN.m)  
 A: área da seção transversal (m<sup>2</sup>)

### 2.3.3. Pressão de suporte

A estabilidade de face de um túnel é um dos elementos essenciais na escavação de maciços terrosos em áreas urbanas. A pressão de suporte é um dos principais parâmetros de controle nas tuneladoras EPB. Mantê-la estabilizada, tendo em vista as condições geotécnicas e hidrogeológicas cambiantes, é fundamental para a segurança da escavação e controle de recalques.

De acordo com Guglielmetti *et al.* (2008), se a pressão de suporte na frente de escavação não for adequada, poderá ocorrer deslocamentos do maciço, que podem culminar no colapso da face.

Como mencionado, o controle de pressão de suporte é feito através de células de pressão instaladas no interior da câmara de escavação (Figura 6). As pressões adotadas para manter a frente estável são definidas com base nos empuxos externos, devido ao peso do solo e ao peso da coluna d'água, que atuam sobre a coroa do túnel. Por esta razão, adota-se, como valores de referência, os sensores de pressão superiores.

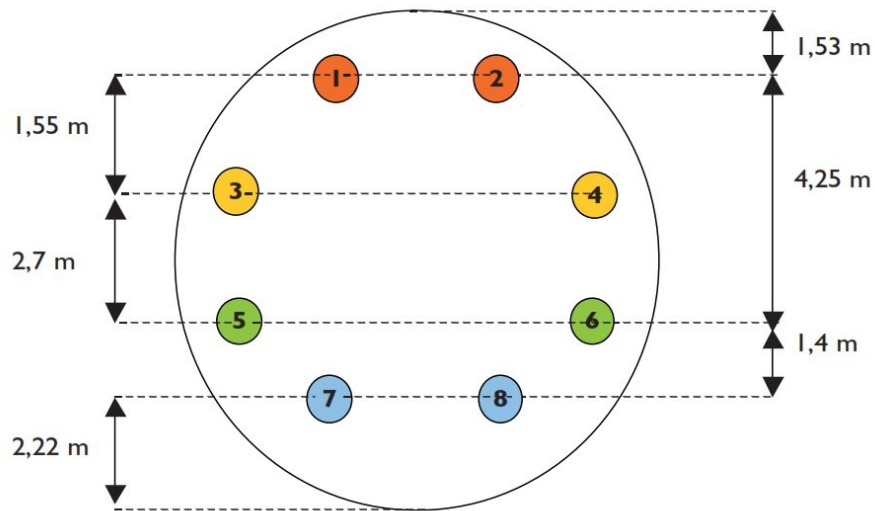


Figura 6. Posição dos sensores de pressão na câmara de escavação de uma tuneladora EPB. Fonte: Guglielmetti *et al.* (2008).

O controle da pressão de suporte é realizado pela sincronização da taxa de extensão dos macacos hidráulicos, condicionamento do material e pela velocidade de revolução do parafuso sem-fim (Figura 7). Segundo Yang (2009), caso ocorra uma redução na pressão de suporte, o operador pode compensá-la aumentando a velocidade de avanço ou reduzindo a velocidade de rotação do parafuso sem-fim. De acordo com o autor, este controle não considera o condicionamento do solo.

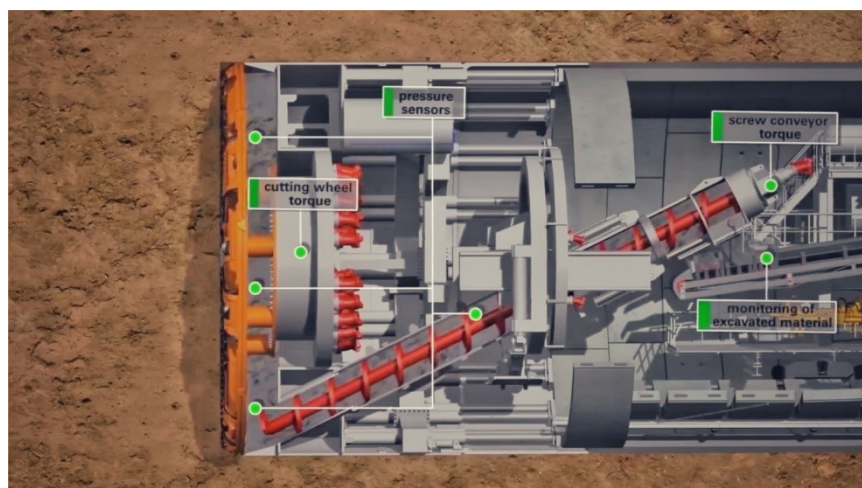


Figura 7. Parâmetros de controle da pressão de suporte em EPBs. Fonte: Herrenknecht AG<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Print Screen de vídeo disponível em: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/epb-schild/>. Acessado em Out/2019.

### 2.3.4. Condicionamento do solo

Nas escavações com máquinas EPB, existe a possibilidade de utilizar o próprio solo natural (sem aditivos condicionadores) como meio de suporte, porém o material deve apresentar boa ductilidade plástica, consistência pastosa, baixo atrito interno, e baixa permeabilidade. Poucos solos reúnem estas características e geralmente precisam ser condicionados. O *muck* resultante da simples mistura do material escavado com água, dificilmente garante uma transmissão efetiva da pressão de suporte na frente de escavação (GUGLIEMETTI *et al.* 2008).

Existe um aumento mundial na demanda de agentes condicionadores de solo associado a máquinas EPB. Ao invés de mudanças e adaptações onerosas nestes equipamentos, é mais simples tratar o material escavado de forma que forneça as propriedades requeridas (EFNARC, 2005).

Nas máquinas EPB, os agentes condicionadores são geralmente injetados na frente da cabeça de corte e, frequentemente, na câmara de escavação e parafuso sem-fim (EFNARC, 2005). Uma consistência pastosa, aliada à boa ductilidade do material, garante que a pressão de suporte atue de forma uniforme na frente de escavação e que o fluxo durante sua remoção seja contínuo (Figura 8).

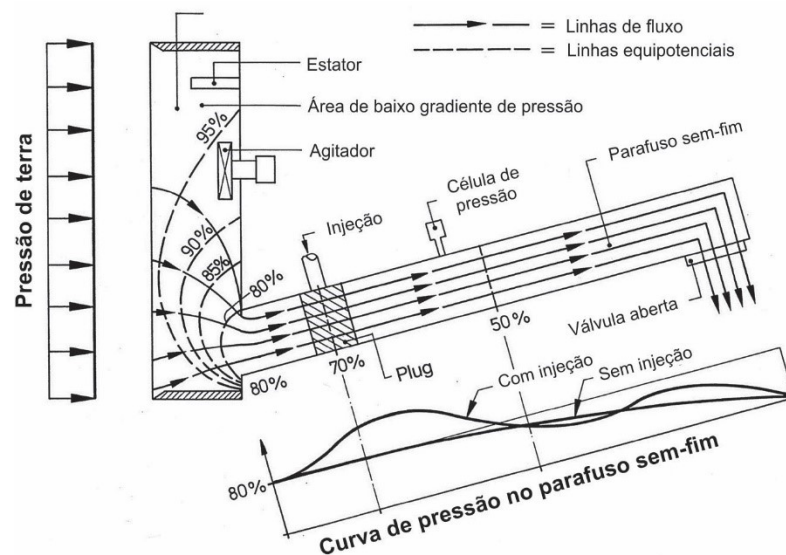


Figura 8. Gradiente de pressão na câmara de escavação e no parafuso sem-fim. Fonte: adaptado de Maidl *et al.* (2003).

O material escavado é “empurrado” pela base da câmara de escavação e despressurizado ao longo do parafuso sem-fim. O sistema de vedação funciona pelo

princípio do estrangulamento mecânico do material no interior do parafuso sem-fim, que em rotação contínua e uniforme, compacta o material aumentando a densidade e diminuindo a permeabilidade. A formação deste *plug* (tampão) é importante, pois evita a entrada de água da câmara de escavação. Em seguida, é transferido para dentro do túnel sob pressão atmosférica (MAIDL *et al.*, 2012).

Segundo Budach & Thewes (2015), os principais objetivos do condicionamento, dependendo das propriedades do solo, são:

- Boa trabalhabilidade para solos de granulometria grossa, garantindo fluxo adequado na câmara de escavação e no parafuso sem-fim;
- Redução da permeabilidade do *muck* em solos permeáveis para garantir uma pressão de suporte efetiva e evitar infiltração;
- Aumento da compressibilidade do *muck* para melhorar o amortecimento das flutuações de pressões causadas por variações do volume de material escavado, resultantes da combinação da velocidade de escavação com a velocidade de rotação do sem-fim;
- Redução do atrito interno do solo para diminuir o torque da cabeça de corte e do parafuso sem-fim, reduzindo assim o desgaste de ferramentas de corte e estruturas de aço na câmara de escavação.

Além das características da máquina e das propriedades do solo predominante, o condicionamento é também influenciado pelo teor de água, limite de liquidez e índice de plasticidade. Estes parâmetros são comumente controlados pela adição de água, bentonita, argila, polímeros ou espumas (MAIDL *et al.* 2012). Outros aditivos incluem *anti-clogging* especiais e antiabrasivos para a cabeça e ferramentas de corte, bem como para o parafuso sem-fim (EFNARC, 2005).

A desvantagem na utilização de água como agente condicionador principal em tuneladoras EPB é que a mistura pode se tornar muito fluida, resultando em vazamentos na rosca sem-fim e dificultando o transporte através da esteira transportadora. Bentonita ou partículas finas (*fillers*) podem ser adicionados a solos com deficiência de finos. Outros aditivos são usados para evitar a segregação e reduzir a permeabilidade do *muck*.

De forma geral, os produtos abaixo podem ser utilizados para os seguintes propósitos (EFNARC, 2005):

- Espuma: manutenção da pressão, efeito de fluidização do solo, formação de pasta homogênea, redução da permeabilidade, redução do torque, redução da aderência e redução da abrasão;
- Aditivos *anti-clogging*: usados principalmente em solos altamente argilosos;
- Outros aditivos: melhorar a estrutura e estabilidade da espuma em solos não-coesivos, retenção de água e melhorar a viscosidade;
- Agentes antiabrasivos: utilizados em solos muito abrasivos ou rochas.

Polímeros também são utilizados para modificar a viscosidade da pasta na câmara de escavação, reduzir a permeabilidade e aumentar a estabilidade da espuma em escavações em solos granulares, além de reduzir a adesão de argilas nas partes metálicas da cabeça de corte (*clogging*). Quando adicionados à espuma, funcionam como estabilizantes, pois acrescentam força e estabilidade às bolhas (GUGLIELMETTI *et al.*, 2008).

De acordo com Thewes *et al.* (2012), para produzir a espuma, água e um agente tensoativo são misturados por meio de agitadores em proporções definidas, produzindo uma solução surfactante. A contínua agitação desta solução promove a formação da espuma. O controle do condicionamento do solo com a utilização de espumas depende basicamente de quatro parâmetros:

- Concentração do tensoativo (surfactante): a concentração de agente surfactante ( $c_f$ ) descreve a porcentagem da massa de surfactante ( $Q_f$ ) na solução ( $Q$ ) (água e surfactante) e varia de 1,5-5%, de acordo com a aplicação:

$$c_f = \frac{Q_f}{Q_l} \quad (\text{Eq. 2})$$

- FER (*Foam Expansion Ratio*): é a taxa de expansão da espuma. Corresponde à relação entre o volume de espuma ( $Q_F$ ) e o volume de líquido injetado ( $Q_L$ ). Em solos argilosos utiliza-se espuma mais líquida (FER baixo), enquanto que em terrenos arenosos a espuma deve ser mais seca (FER alto). De acordo com Thewes *et al.* (2012), este parâmetro varia tipicamente entre 10 e 25.

$$FER = \frac{Q_F}{Q_L} \quad (\text{Eq. 3})$$

- FIR (*Foam Injection Ratio*): corresponde à taxa de injeção de espuma. É a razão entre o volume de espuma injetada ( $Q_F$ ) e o volume de solo escavado ( $Q_S$ ), e pode ser calculada de acordo com a velocidade de avanço ( $v$ ) e a área da face de escavação ( $A_S$ ) (Eq. 4). O FIR é fortemente controlado pela presença de água subterrânea. Em solos granulares utiliza-se FIR mais baixo. De acordo com Saavedra & Martínez (2011), este parâmetro varia entre 10 e 80% e na maioria dos casos entre 30 e 60%.

$$FIR = \frac{Q_F}{Q_S} = \frac{Q_F}{v \cdot A_S} \quad (\text{Eq. 4})$$

- WIR (*Water Injection Ratio*): razão de injeção de água livre. Corresponde a quantidade (litros/min) de água injetada na frente de escavação, na mistura da espuma com solo para resfriamento ou em complemento às espumas no condicionamento. O uso excessivo de água pode desestruturar a espuma, porém desempenha papel importante na mitigação do *clogging*.

A espuma é misturada com o material escavado e ocupa o espaço entre os grãos. Isso faz com que diminua a densidade aparente e reduza o atrito entre os grãos do material. Segundo Maidl *et al.* (2008), o material passa então a ter propriedades plásticas, o que permite maior controle da pressão de suporte na face de escavação.

Para a utilização de espuma em escavações EPB, é importante conhecer o período total durante o qual a espuma permanece na estrutura do *muck*, tanto no interior da câmara de escavação quanto no parafuso sem-fim. Durante este período, um eventual colapso da espuma causaria problemas como a diminuição da pressão de frente e uma diminuição na trabalhabilidade do material escavado. (MAIDL *et al.*, 2012)

### 2.3.5. Densidade aparente

Durante a escavação com tuneladoras EPB é fundamental ter estimativas (em tempo real) acerca da consistência do material escavado e do nível de preenchimento da câmara de escavação. Segundo Guglielmetti *et al.* (2008) e Saavedra e Martínez (2011), o risco e a magnitude de possíveis colapsos na frente de escavação são muito menores quando a câmara de escavação está completamente preenchida por material com densidade próxima a 14 - 15 kN/m<sup>3</sup>. Segundo os autores, o material com esta densidade é capaz de transmitir uma pressão efetiva contra o maciço, contrabalanceado os empuxos externos.

A densidade aparente é um parâmetro calculado a partir da razão entre a diferença nos valores de pressão entre dois sensores quaisquer e a diferença entre suas alturas (GUGLIELMETTI *et al.* 2008). Como a diferença de altura é um valor fixo para um mesmo par de sensores, quanto maior a diferença entre os valores de pressão, maior é a densidade do material na câmara de escavação. Portanto, para o caso no qual há muita espuma (ar) no interior da câmara de escavação, a diferença de pressão é muito pequena, e a densidade aparente assume um valor muito baixo (inferior à unidade). Por outro lado, quando os valores de densidade aparente são muito elevados, com densidade acima da densidade natural do solo, isso indica o tamponamento das aberturas da cabeça de corte, por onde o material escavado flui, diminuindo a velocidade de avanço e aumentando o torque e a força de contato (Mori *et al.* 2017).

## 2.4. ESCAVAÇÃO DE MACIÇOS INTEMPERIZADOS COM MÁQUINAS EPB

Nos últimos 20 anos houve uma quantidade considerável de EPBs empregadas na escavação de rochas intemperizadas. A maioria destes projetos se concentraram em cidades como Hong Kong, Singapura, Kuala Lumpur, Bangalore, Shenzhen e Guangzhou (SHIRLAW *et al.*, 2016a).

Em regiões de clima tropical, o perfil de alteração gerado pelo intemperismo químico pode alcançar dezenas de metros de profundidade (FUTAI, *et al.*, 2012). Zhao *et al.* (1995) encontraram saprólitos a uma profundidade de 60 m em Singapura. Vargas (1981) mencionou que a espessura dos solos residuais no Brasil pode alcançar mais de 100 m.

Embora estas rochas estejam concentradas em áreas tropicais e subtropicais, elas também podem ser encontradas em regiões temperadas. Logo, rochas afetadas por intemperismo químico correspondem a uma considerável proporção na superfície terrestre (SHIRLAW *et al.*, 2000) (Figura 9). É esperado, portanto, que escavações de túneis nestas áreas estejam bastante propensas a atravessar terrenos transicionais.

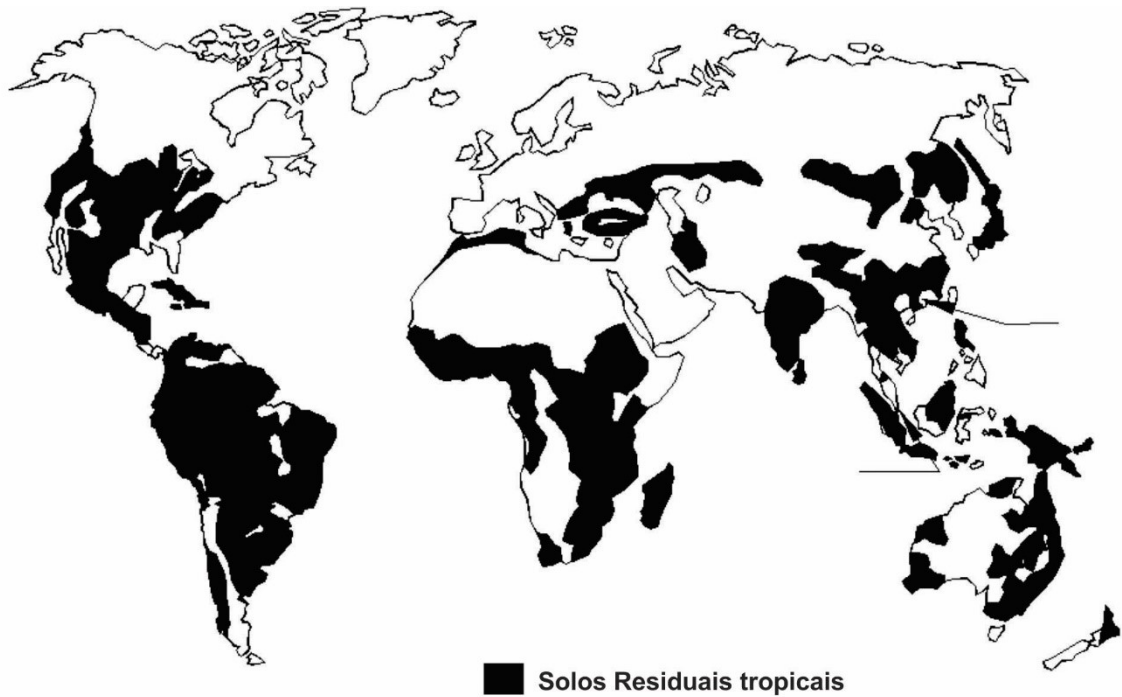


Figura 9. Solos residuais tropicais baseados em *F.A.O World Soil Map*. Fonte: adaptado de Shirlaw *et al.* (2000).

#### 2.4.1. Face mista (FM) versus face mista transicional (FMT)

O processo de intemperismo é favorecido por temperaturas e taxa de precipitação elevadas, e envolve enfraquecimento progressivo da rocha sã até a condição de solo residual que, apesar da aparência terrosa, herdamos aspectos estruturais da rocha mãe. De acordo com SHIRLAW *et al.*, 2000, maciços intemperizados detêm a estrutura reliquiar do seu passado geológico, fato que condiciona seu comportamento geotécnico, constituindo aí a maior diferença dos depósitos sedimentares. Descontinuidades reliquiares definem o padrão de intemperismo e controlam o fluxo da água no maciço, afetando as propriedades geotécnicas do maciço.

Diversos sistemas foram elaborados para a classificação de maciços intemperizados. Em Singapura, utiliza-se para a maioria das rochas, o *Approach 2* do



BS 5930:1999 (ANON, 1999). Em Hong Kong é adotado um método similar, conforme descrito em *GeoGuide3* (ANON, 1988). Outras classificações, como por exemplo, Deere & Patton (1971) serviram como base para a classificação de Vargas (1980). Vaz (1996) dividiu os horizontes do solo em função de suas características geológicas e propriedades de escavação e perfuração. A Companhia do Metropolitano de São Paulo desenvolveu sua própria nomenclatura baseada em Kutner & Bjornberg (1997).

Todas estas classificações estão fundadas no conceito de perfil de alteração típico, conforme o proposto por Little (1969) (Figura 10), tendo variações apenas quanto à nomenclatura e critérios de divisão.

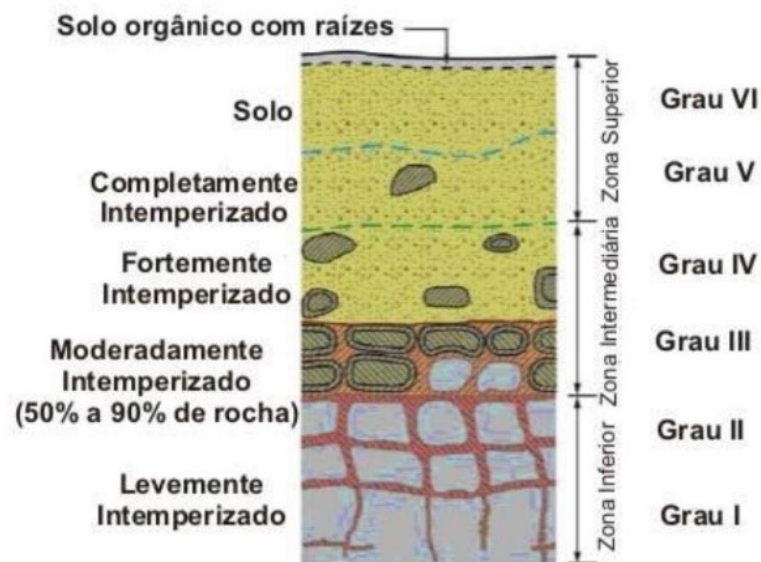


Figura 10. Esquema de um perfil de intemperismo típico para rochas graníticas. Fonte: adaptado de Little (1969).

De acordo com Oliveira *et al.* (2017<sub>a</sub>), quanto mais heterogênea a rocha, mais irregular e imprevisível a transição solo/rocha. Em algumas situações a tuneladora pode interceptar, em uma mesma seção de escavação, dois ou mais materiais com comportamentos geotécnicos bastante distintos, configurando condição de face mista (FM).

Büchi (1992) afirma que o termo “face mista” é usado quando na face de escavação existem ao menos dois tipos de materiais de escavabilidades completamente distintas, e sugere o ensaio de resistência à Compressão Uniaxial (RCU) como uma referência direta a escavabilidade dos materiais. Baseado neste conceito, a definição de FM contendo materiais contrastantes com uma diferença

mínima de 1:10 no RCU tem, aparentemente, ganho alguma aceitação (STEINGRIMSSON, 2002).

Recentemente, alguns pesquisadores propuseram que FM pode ser definida simplesmente como a ocorrência simultânea na face de escavação de duas ou mais áreas com propriedades consideravelmente desiguais, e que afetem o desempenho da tuneladora (STEINGRIMSSON *et al.*, 2002; ZHAO *et al.*, 2007; TOTH *et al.*, 2013). De acordo com Dong *et al.* (2006), as propriedades geotécnicas de maciços mistos incluem propriedades mecânicas, diferenças de resistência e proporções de rocha e solo na face de escavação.

Oliveira *et al.* (2017<sub>a</sub>) definem FM como a presença de dois ou mais materiais, na seção de escavação, com comportamentos bastante distintos, assumindo valores muito diferentes de resistência, coesão, consistência, rigidez, grau de alteração, comportamento hidrogeológico, etc., e que resultem em um desempenho claramente diverso para a escavação e estabilização do maciço. Desta forma, com ilustrado na Figura 11, tanto maciços transicionais derivados de intemperismo tropical, quanto lentes de argila rija e compacta em meio à espessa camada de areia, estariam em conformidade com a definição de FM apresentada, contanto que reflitam em queda acentuada no desempenho da escavação.

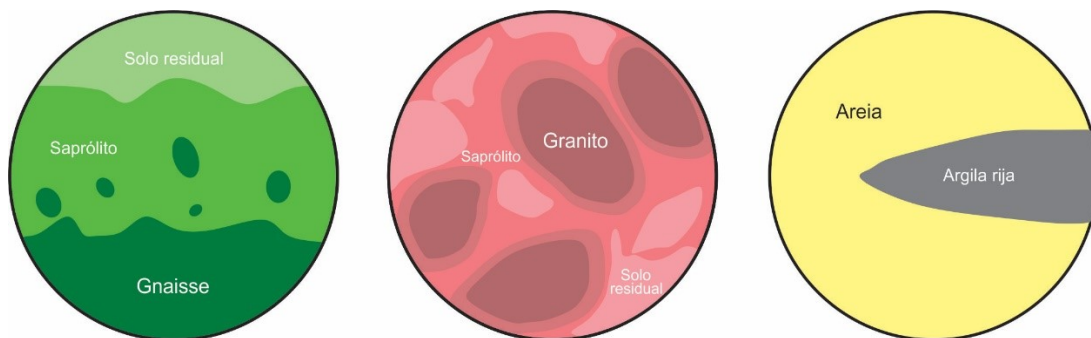


Figura 11. Exemplos de faces mistas transicionais (à esquerda e centro) e face mista sedimentar (à direita), frequentemente encontradas em projetos de escavação com máquinas EPB.

Oliveira & Diederichs (2016) e Oliveira *et al.* (2017<sub>a</sub>) introduziram o termo *mixed transitional ground* (MTG) ou face mista transicional (FMT) para o material altamente heterogêneo, resultante de intemperismo químico de maciços rochosos. Esse tipo de terreno é composto por uma combinação de porções de solo e rocha, com componentes de resistência e integridade variáveis, porém de mesma origem

geológica. De acordo com Oliveira (2018) é impossível delimitar com precisão a interface de contato entre estes materiais.

Ma *et al.* (2015), baseados nas características geológicas de projetos de escavações mecanizadas em diferentes locais do mundo, classificaram três tipos de FM: (a) camadas ou bandas formadas por diques, falhas ou zonas de cisalhamento; (b) interface entre solo e rocha de maciços intemperizados; e (c) blocos e matacões rochosos resultantes ou não de intemperismo esferoidal isolado em meio ao solo.

Shirlaw (2015), ao estudar escavações de rochas graníticas quimicamente intemperizadas em Singapura, definiu como face mista, aquela em que há pelo menos 15% de rocha na seção de escavação.

#### **2.4.2. O caráter irregular do topo rochoso em maciços intemperizados**

De acordo com Oliveira (2018), condições de FM podem ser encontradas em praticamente qualquer lugar do mundo, mas é principalmente em ambientes urbanos onde elas dificilmente podem ser evitadas devido às restrições de alinhamento dos túneis. Segundo os autores, o caráter irregular e imprevisível da interface solo/rocha é um dos aspectos mais importantes a serem considerados em escavações EPB em FMT.

A previsão do topo rochoso (TR) em maciços intemperizados indicará se determinado ponto no túnel se encontra totalmente em rocha, integralmente em solo ou em ambos. Tendo em vista a natureza errática da interface solo/rocha em maciços intemperizados, existe um elevado grau de incerteza na definição do topo rochoso por meio de furos de sondagem (SHIRLAW, 2015). A Figura 12, procura ilustrar esta situação para um trecho do túnel C855 Circle Line em Singapura. Na Figura 12a, o perfil geológico foi interpretado com base em apenas 5 sondagens, enquanto na Figura 12b, a geologia do mesmo trecho foi interpretada a partir de 15 sondagens. De acordo com Shirlaw (2015), as reais condições do maciço (*as built*) são ainda distintas daquela prevista na Figura 12b.

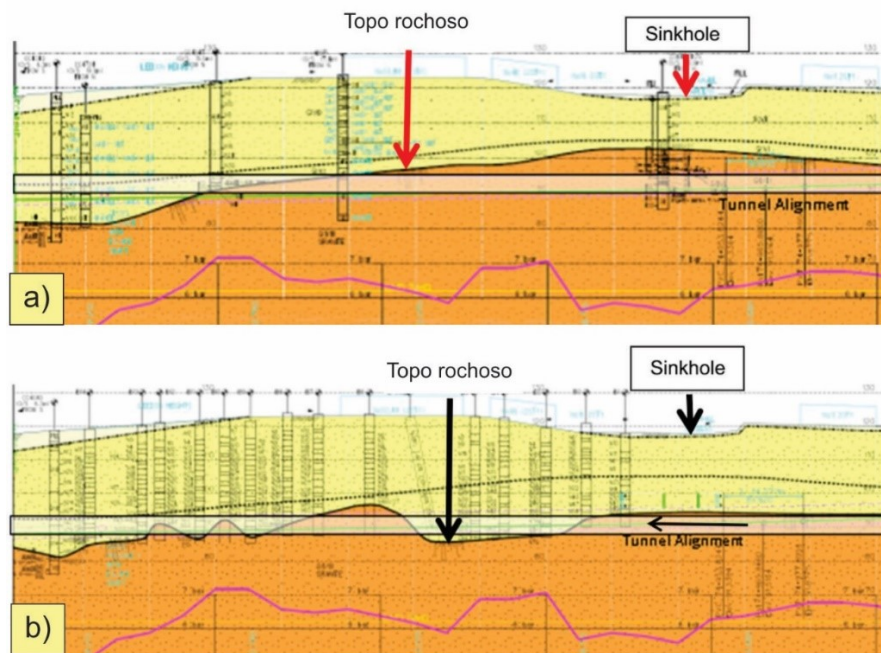


Figura 12. Perfil geológico de um trecho de projeto do túnel C855 Circle Line em Singapura: a) investigação original do projeto básico com interpretação do TR baseada em apenas 5 sondagens e b) reavaliação do perfil original com base em 15 sondagens. Fonte: adaptado de Shirlaw (2015).

### 2.4.3. Abrasividade

A abrasividade corresponde ao efeito da perda de volume provocada por rochas e minerais quando em contato direto com outros materiais. Segundo Plinninger (2010), o termo abrasividade descreve o potencial de uma rocha ou solo causar desgaste em uma ferramenta, tendo importante relação com a vida útil e eficiência dos equipamentos utilizados nas escavações. É uma propriedade ligada às características das rochas, como mineralogia, estrutura, textura, compactação, alteração, etc. O consumo de ferramentas de corte, por efeito da abrasividade das rochas e solos, é um dos aspectos mais importantes no estudo de escavações subterrâneas mecanizadas, pois pode elevar significativamente os custos do empreendimento e gerar atrasos significativos no cronograma.

De acordo com Herrenknecht & Frenzel (2005) e Prieto (2012), existem dois tipos de desgaste (ou consumo) de ferramentas de corte:

- Desgaste primário: é o desgaste que as ferramentas de corte sofrem no contato direto com o maciço rochoso e que requer substituição rotineira em intervalos de tempo apropriados;

- Desgaste secundário: trata-se de um desgaste não planejado, que ocorre em estruturas internas da máquina, como parafuso sem-fim, braços misturadores, etc.

Os ensaios recentes utilizados para a determinação da abrasividade de rochas e solos consideram não apenas a quantidade de quartzo presente nas amostras, mas também características como granulometria e resistência mecânica. Plinninger (2010) menciona que abordagens exclusivas de índices baseados apenas na mineralogia das rochas mostraram-se bastante limitadas. Segundo Monteiro & Rocha (2017), foi observado que os valores dos parâmetros de abrasividade decrescem bastante com o aumento do grau de alteração. Aspectos mineralógicos não são suficientes para avaliar a abrasividade com boa representatividade, sendo necessária uma abordagem que considere a resistência mecânica dos materiais.

De acordo com Monteiro & Rocha (2017), existem diversos índices para avaliação das propriedades abrasivas de materiais geológicos, porém todos possuem aplicações específicas. Os estudos realizados no Brasil têm empregado métodos de classificação internacionalmente utilizados, tais como o conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) e o índice de abrasividade CERCHAR (CAI).

O conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) é obtido através de análise petrográfica realizada em lâminas petrográficas, e fornece a potencialidade abrasiva das rochas a partir da presença de minerais abrasivos. A porcentagem dos minerais abrasivos é obtida visualmente sob microscópio petrográfico, e multiplicada pela abrasividade Rosiwal<sup>7</sup>, calculada a partir da perda de volume de um mineral quando submetido ao atrito com o mineral coríndon:

$$eQc = \sum_{i=0}^n 1. Ai. Ri \quad (Eq. 5)$$

eQc: teor de quartzo-equivalente  
 Ai: quantidade de cada mineral  
 Ri: dureza *Rosiwal* de cada mineral

O Índice de Abrasividade CERCHAR (CAI), expresso pela Eq. 6, é obtido pelo ensaio homônimo, onde, uma ponteira de características conhecidas e submetida a

---

<sup>7</sup> A escala de Rosiwal baseia sua medição em valores absolutos, ao contrário da escala de Mohs na qual os valores são relativos.

uma carga de 70N (7kg), é deslizada sobre a superfície da amostra. O desgaste na ponteira representa o CAI e sua classificação está indicada na Figura 13.

$$CAI = 10 \times d/c \quad (Eq. 6)$$

d: diâmetro da área plana na ponteira formada pelo desgaste (mm)  
c: fator de correção unitário (mm)

Índice de Abrasividade CERCHAR	Classificação
> 4,00	Extremamente abrasiva
2,00 – 4,00	Muito abrasiva
1,00 – 2,00	Abrasividade média
< 1,00	Pouco abrasiva

Figura 13. Quadro de classificação da abrasividade CERCHAR. Fonte: Monteiro & Rocha (2015).

Muitas rochas ígneas e metamórficas são altamente abrasivas e essa característica geralmente é herdada pelos produtos de alteração. O grau de alteração de uma rocha é um indicador do estágio de alteração química e mineralógica, devido aos processos de intemperismo. O estado de alteração é muito importante pois afeta a abrasividade e a resistência mecânica das rochas (ABGE, 2013). A classificação do grau de alteração a partir de amostras de testemunhos de sondagem, pode ser descrita conforme segue (CMSP, 2013):

- A1 – Rocha sã: ao avaliar a amostra não se percebe qualquer indício de alteração física ou química dos minerais. Os minerais apresentam brilho intenso (Figura 14a);
- A2 – Rocha pouco alterada: ao avaliar a amostra, observa-se uma incipiente descoloração de alguns minerais associada ao início da alteração destes (Figura 14a);
- A3 – Rocha medianamente alterada: ao avaliar a amostra, observa-se que os minerais se encontram alterados e não apresentam brilho (Figura 14b). A rocha, de maneira geral, possui alteração de sua coloração inicial e as propriedades físico-mecânicas apresentam-se inferiores às da rocha em classes de alteração A1 e A2;

- A4 – Rocha muito a extremamente alterada: as amostras apresentam minerais intensamente alterados e pulverulentos, com passagem para solo de alteração (solo residual). (Figura 14c)



Figura 14. a) rocha granítica em grau de alteração A1/A2; b) rocha granítica em grau de alteração A3. Notar a coloração esbranquiçada do feldspato e a perda do brilho dos minerais; e c) rocha gnáissica em grau de alteração A4. Observar o aspecto terroso e desagregável do material. Fonte: adaptado de Metrô-SP, *apud* Monteiro & Rocha (2017).

Monteiro & Rocha (2014) mostraram que a ação intempérica pouco afeta o conteúdo de quartzo da rocha, pois este mineral sofre pouco intemperismo químico. Monteiro & Rocha (2017) constataram que quanto maior o grau de alteração de algumas rochas ígneas e metamórficas, menor é a sua abrasividade.

De acordo com Monteiro & Rocha (2017), em regiões de clima tropical, quando avaliamos o desgaste primário de ferramentas de corte, é importante avaliar a natureza da rocha, a sua estruturação e todos os aspectos relacionados à sua textura a fim de se verificar seu grau de vulnerabilidade a alteração intempérica. Caso o litotipo seja sensível a este processo, a análise deve se voltar, preferencialmente, ao grau de alteração do litotipo, como principal fator potencial à abrasividade.

#### **2.4.4. Problemas frequentemente encontrados na escavação de maciços rochosos intemperizados**

Maciços intemperizados impõem uma série de desafios durante a escavação, geralmente relacionados com a abrasividade, faces mistas e comportamento das partículas de granulometria fina, etc. Estes aspectos estão enraizados na natureza da rocha e possuem íntima relação com a penetração desigual do intemperismo através do maciço (SHIRLAW *et al.* 2016<sub>a</sub>).

De acordo com Zhao *et al.* (2007), quando o solo predomina na seção de escavação, o material mole não consegue gerar força de giro suficiente para os discos

de corte superarem a pré-carga<sup>8</sup> (pré-torque) de seus rolamentos (*disc bearings*), resultando em paradas frequentes na rotação dos discos. Mesmo uma curta paralisação no movimento de giro, pode levar a um desgaste plano nos cortadores, reduzindo sua força de corte e sobrecarregando os discos adjacentes.

Em condições de face mista, os discos de corte que atuam sobre a rocha recebem maior força de impulso do que àqueles posicionados sobre o solo (STEINGRIMSSON et al., 2002). Ao se moverem pela face, os discos assumem cargas altamente variáveis e desiguais, bem como impactos tangenciais intensos quando giram do solo para a rocha, resultando em desgaste excessivo, geração de calor, alto nível de vibração, problemas com a estabilidade da face, sobrecavação, deslocamentos superficiais e colapsos, etc.

Thewes (2004) descreve dois contextos bastante desfavoráveis de escavação em frente mista. A Figura 15a mostra a tuneladora pressurizada em modo EPB, com a face de escavação predominantemente em solo, com pouca proporção de rocha na base. Nesta situação, durante a escavação, ao girarem de uma camada pouco competente (solo) para uma muito resistente (rocha), os discos de corte sofrem um grande impacto, levando-os a um rápido desgaste ou a rupturas mecânicas, culminando em longas e frequentes intervenções para substituição de ferramentas de corte. De acordo com Shirlaw (2015), isto pode ainda ser agravado de acordo com o tempo necessário para o resfriamento da câmara de escavação antes de cada intervenção hiperbárica de manutenção da cabeça de corte, o que implica em um baixo desempenho e atrasos no cronograma. Comulada *et al.* (2016) ressaltam ainda a importância de limitar a força de contato para evitar a sobrecarga nos discos de corte a baixas taxas de avanço.

Segundo Thewes (2004), e conforme ilustrado na Figura 15b, quando ocorre face mista com grande quantidade de rocha, o material escavado será praticamente composto por fragmentos de rocha, sendo então incapaz de atingir a consistência desejada, mesmo que condicionado. Isso acarreta em perda e incapacidade de manter a pressão de frente.

---

<sup>8</sup> Pré-carga de rolamento é o processo de adicionar uma carga axial sustentada a um rolamento, independente de cargas externas. Realizar a pré-carga adequada do rolamento pode aumentar sua longevidade e eliminar a vibração e o ruído que resultam da folga especificada, precisão de fabricação e desgaste. Fonte: Smalley The Engineer's Choice



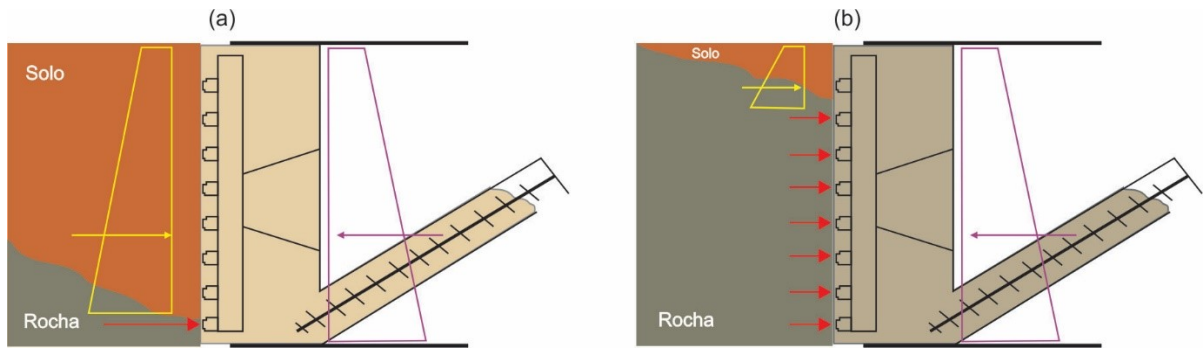


Figura 15. A figura ilustra duas situações de face mista: (a) pouca proporção de rocha e (b) grande proporção de rocha. Fonte: adaptado de Thewes (2004).

Pelo fato desses materiais não se misturarem a ponto de formarem uma pasta homogênea, ocorre decantação do material escavado dentro da câmara de escavação. Nesta situação, o material rochoso e mais denso decanta na base, enquanto o material fino permanece na parte superior, misturado com espuma de condicionamento. Esta condição requer um esforço adicional para o condicionamento do solo, a fim de viabilizar o fluxo de remoção do material da câmara de escavação e ao mesmo tempo manter a pressão de suporte. No entanto, o excesso de espuma injetada pode agravar a decantação e provocar a formação de uma bolha de ar no topo da câmara. Esse ar acumulado na parte superior representa um risco para a escavação, podendo resultar em infiltração de água do freático, fuga de ar para o maciço, perda repentina de pressão de suporte, instabilidades, etc.

De acordo com Oliveira & Diederichs (2017<sub>a</sub>), para minimizar estes efeitos no modo EPB convencional (câmara cheia), a velocidade de rotação da roda de corte teria que ser elevada, resultando em danos severos nas ferramentas de corte. Nesta situação, a tuneladora pode atuar de forma híbrida, convertendo a tecnologia EPB temporariamente em *Slurry Shield*, adicionando lama bentonítica diretamente na frente de escavação, minimizando a formação da bolha de ar e evitando fugas para o maciço.

A Tabela 1 resume alguns dos principais trabalhos publicados nos últimos 20 anos acerca de escavações com EPB em faces mistas em maciços intemperizados.

**Tabela 1.** Coletânea de publicações com foco em escavações de maciços intemperizados com máquinas EPB.

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Shirlaw <i>et al.</i> (2000)	Hong Kong e Singapura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande variação nas propriedades dos materiais conforme a penetração desigual do intemperismo;</li> <li>• Cimentação residual;</li> <li>• Permeabilidade do maciço mais elevada do que a estimada na distribuição granulométrica;</li> <li>• Desenvolvimento de argilas expansivas; materiais colapsáveis;</li> <li>• Materiais propensos ao <i>piping</i>;</li> <li>• Lixiviação intensa do material levam ao desenvolvimento de estruturas abertas, propensas a colapsar;</li> <li>• Desintegração física (<i>rock slake</i>); Dificuldades com o grouting durante execução revestimento devido às desigualdades no perfil de escavação;</li> <li>• Formação de <i>hardpans</i> (precipitação de Fe ou Al).</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo revisa alguns dos aspectos particulares de projetos de escavação em FMT (Face Mista Transicional) gerados por intemperismo tropical, e tem foco na compreensão da evolução intempérica em quatro rochas distintas pré-selecionadas (2 graníticas e 2 sedimentares) encontradas em Hong Kong e Singapura;</li> <li>• O comportamento dessas rochas é afetado basicamente pela natureza da rocha parental e pelas condições climáticas e topográficas, e controlado pelas estruturas reliquias da rocha parental, definindo o padrão de intemperismo no maciço, resistência anisotrópica e fluxo de água;</li> <li>• Conceitos de escala material e escala de maciço;</li> <li>• Saprólitos do Granito de Hong Kong comumente possuem 50% de vazios (50% do peso específico da rocha são) implicando em permeabilidade muito elevada.</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Babendererde <i>et al.</i> (2005)	Portugal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granito com grande variação no grau de alteração (padrão errático) mesmo em curtas distâncias;</li> <li>• Intensa heterogeneidade do maciço;</li> <li>• Sobre-escavação, infiltração e instabilidades locais que chegaram a ter consequências fatais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação exclusivamente em modo EPB fechado;</li> <li>• Introdução do Sistema de Suporte de Face Ativo (injeção de bentonita na região da coroa).</li> </ul>	-
Zhao <i>et al.</i> (2007)	Singapura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas devido à fina camada de granito completamente intemperizado (saprólito - alta permeabilidade) na coroa, incluindo perda de groute na cimentação anular, erosão e deterioração da camada intemperizada;</li> <li>• Escape de ar comprimido (relaxação da câmara) durante paralisações gerando instabilidades de frente;</li> <li>• Intensa infiltração de água;</li> <li>• Desgaste excessivo e sobrecarga nas ferramentas de corte;</li> <li>• Baixa taxa de utilização da máquina (&lt;20%);</li> <li>• Taxa de avanço &lt; 6m/dia;</li> <li>• Problemas com vedação do parafuso sem-fim (escape de material sob pressão).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do nº de discos, aumento das aberturas e aumento no nº de dentes dos <i>scrapers</i>;</li> <li>• Instalação de parafuso sem-fim extra ou troca por outro mais longo;</li> <li>• Instalação de britador na frente da cabeça de corte para pedregulhos e matacões;</li> <li>• Diminuição da inclinação das correias transportadoras;</li> <li>• Condicionamento do material com foco em redução da permeabilidade (adição de bentonita);</li> <li>• Rebaixamento do freático à frente da máquina para melhorar condições das paralisações e controle da pressão de suporte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Após as modificações na TBM a taxa de utilização da máquina dobrou;</li> <li>• O impacto e sobrecarga nas ferramentas de corte continuaram prejudicando o desempenho mesmo após as modificações, causando vibração excessiva.</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Tóth <i>et al.</i> (2013)	Singapura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo desempenho.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do nº de discos, aumento das aberturas e aumento no nº de <i>scrapers</i>;</li> <li>• Instalação de parafuso sem-fim extra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboração de método para previsão de taxa de penetração (PR) em FM para planejamento e otimização de projetos.</li> </ul>
Roby & Willis (2014)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O condicionamento do solo é o fator de maior relevância para o desempenho em FM (redução do desgaste das ferramentas e aumento da taxa de avanço);</li> <li>• Os melhores desempenhos estão relacionados com a prática de testagem laboratorial do condicionamento antes do início da escavação;</li> <li>• Design adequado da cabeça de corte (aberturas e ferramentas adequadas) e parafuso sem-fim calculado para máxima pressão de suporte, presença e tamanho de blocos e cascalhos;</li> <li>• Investigação geológica executada por pessoal experiente, com a maior quantidade e representatividade (profundidade do túnel) de amostragem possível;</li> <li>• Campanha de testes de laboratório para regime de condicionamento recomendado;</li> <li>• Partes da TBM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo analisa projetos recentes nos quais obteve-se elevado nível de desempenho em FMT buscando identificar fatores que contribuíram para o avanço acelerado da tuneladora;</li> <li>• Total de 25 projetos revisados realizados em 10 diferentes países;</li> <li>• Na seleção dos projetos foi utilizado um critério de "metragem média semanal";</li> <li>• Foram revisadas 40 máquinas EPB com diâmetros mais frequentes variando de 6 m a 6,5 m.</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
			<p>com revestimento resistente à abrasão;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Testagem de condicionamento <i>on-site</i>.</li> </ul>	
<p>Ma <i>et al.</i> (2015)</p>	<p>Vários</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste excessivo, achatamento ou quebra das ferramentas de corte;</li> <li>• Deslocamentos superficiais;</li> <li>• Problemas com a remoção do material;</li> <li>• Intensa infiltração de água na câmara;</li> <li>• Perda de solo e colapso de face.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do nº de discos, aumento das aberturas e aumento no nº de <i>scrapers</i>;</li> <li>• Instalação de parafuso sem-fim extra ou troca por outro mais longo;</li> <li>• Instalação de britador na frente da cabeça de corte para pedregulhos e matacões;</li> <li>• Avaliar a possibilidade de mudança da TBM para <i>Slurry</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Otimizações adicionais da TBM: redução da força de contato em até 50%;</li> <li>• Atenção quanto a locais com queda repentina na taxa de penetração (PR);</li> <li>• Identificar condições do terreno e rapidamente tomar medidas efetivas: diminuição da PR, torque (T) e rotação da cabeça de corte (CR);</li> <li>• Inspeção diária e troca das ferramentas danificadas em tempo de não prejudicar as adjacentes. Selecionar torque de partida adequado.</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Shirlaw (2015)	Hong Kong e Singapura	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilização do modo de transição (semi-EPB);</li> <li>• Rebaixamento do lençol freático;</li> <li>• Condicionamento do solo intenso com espuma, lama bentonítica e polímeros (redução de permeabilidade, alteração da viscosidade e redução da abrasão).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspectos críticos para escavações com TBMs em locais de intenso intemperismo tropical: extensão em FM, tipo de rocha (resistência, abrasividade), estabilidade do saprólito, comportamento da fração argilosa (argilas expansivas = <i>clogging</i>), tipo de máquina, design da cabeça e ferramentas de corte, e experiência do operador.</li> </ul>
Comulada et al. (2016)	São Paulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escavação em ambiente intensamente urbanizado;</li> <li>• Saprolitos: instáveis, arenosos e altamente abrasivos (eQc);</li> <li>• Baixo desempenho no saprólito com torque (<math>T &gt; 4000</math> kN);</li> <li>• Dificuldades em escavar saprolitos em modo EPB fechado;</li> <li>• Desgaste excessivo e danos nas ferramentas;</li> <li>• Aquecimento do material na câmara;</li> <li>• Intervenções longas e frequentes;</li> <li>• Desgaste primário e secundário intensos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escavação do saprólito requer espumas reforçadas com polímeros e injeção regular de água livre;</li> <li>• PR controlada a fim de se evitar formação de <i>clogging</i>;</li> <li>• Foi utilizado modo de transição (semi-EPB) com injeção contínua de bentonita da câmara;</li> <li>• Isso possibilitou a continuação das escavações, porém ainda com baixos valores de PR.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo apresenta como os desafios foram enfrentados utilizando-se de todo o potencial maximizado da tecnologia EPB;</li> <li>• A escavação em solo residual obteve excelente desempenho (PR= 25 mm/rev, AR= 50 mm/min, <math>T &lt; 3000</math> kN).</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Gong <i>et al.</i> (2016 <sub>a</sub> )	Singapura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste excessivo, achatamento ou quebra das ferramentas de corte;</li> <li>• Problemas com a estabilidade da face de escavação;</li> <li>• Deslocamentos superficiais acentuados e colapso de face em áreas urbanas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do nº de discos, aumento das aberturas e aumento no nº de dentes dos <i>scrapers</i>;</li> <li>• Instalação de parafuso sem-fim extra ou troca por outro mais longo;</li> <li>• Instalação de britador na frente da cabeça de corte para pedregulhos e matacões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo apresenta um panorama das escavações com TBMs em quatro tipos de condições adversas: face mista, maciço rochoso altamente tensionado, maciço rochoso altamente fraturado e rochas de escavabilidade limitada.</li> </ul>
Shirlaw <i>et al.</i> (2016 <sub>b</sub> )	Singapura	<p>Apenas para EPB:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escavação em modo de transição (semi-EPB) com perda de pressão durante as intervenções hiperbáricas;</li> <li>• Desgaste excessivo e danos nas ferramentas de corte que geraram frequentes intervenções;</li> <li>• Mudanças e redesenho da cabeça de corte. Desgaste acentuado do parafuso sem-fim necessitando de troca durante a escavação;</li> <li>• Registro de 1 colapso em superfície (<i>sinkhole</i>);</li> <li>• Intensa geração de calor (&gt;70 °C) na câmara de escavação comprometendo a vedação do parafuso sem-fim, aumentando o desgaste secundário e atrasando o início de cada intervenção (12 a 36h para resfriamento);</li> <li>• Baixas taxas de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A fim de evitar o clogging na área do <i>tool gap</i>: injeção de água ou (preferencialmente) lama bentonítica no diretamente no <i>tool gap</i> para lubrificação e resfriamento dos fragmentos de rocha;</li> <li>• Minimizar o trajeto das partículas do momento da escavação até as aberturas;</li> <li>• Utilização de discos maiores, são mais robustos e aumentam a área do <i>tool gap</i>;</li> <li>• Manter pressão de intervenção a menor possível;</li> <li>• Utilizar <i>filter cake</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os autores compararam escavações de dois túneis em faces mistas de rochas ígneas intemperizadas, um com máquina EPB e outro <i>Slurry</i>, em termos de índice de penetração (PI) e energia específica (SE);</li> <li>• Segundo Shirlaw (2015) atualmente existe uma tendência (Hong Kong e Singapura) pela escolha de máquinas <i>Slurry</i> para escavar maciços de rochas ígneas intemperizadas, e EPB para rochas sedimentares intemperizadas;</li> <li>Apenas para EPB: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Foi considerada FM neste projeto como seções com &gt;15% de rocha;</li> <li>• Aumento acentuado em PI e SE com &gt;50% de rocha na face (e valores extremos com 85%) culminando em baixas taxas de avanço (3m/semana) e</li> </ul> </li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
		avanço e grande atraso no cronograma.		longas intervenções (> 1 semana); • Ocorrência de "clogging de partículas grosseiras" pelo acúmulo de fragmentos (25 mm a 100 mm) na área do <i>tool gap</i> (150 mm); • Este problema foi bastante evidente em seções com >50% de rocha.
Vergara & Saroglou (2017)	Singapura	-	-	• Modelo para previsão de desempenho da TBM em condições de FM; • Introdução do termo <i>Mixed Face Penetration Index</i> (MFPI).
Oliveira <i>et al.</i> (2017 <sub>b</sub> )	-	• Formação de <i>clogging</i> causando diminuição da taxa de avanço e aumento das intervenções.	• Campanha de avaliação preliminar de condicionamento do solo visando à redução de custos e melhora no desempenho de máquinas EPB; • Deve ser incluída no programa de gerenciamento de riscos de cada projeto.	• O estudo reúne os principais aspectos relacionados à escavação de terrenos transicionais mistos com máquinas EPB e investiga particularidades vitais dos solos para este tipo de escavação; • O estudo tem como foco a formação e o comportamento do <i>clogging</i> das partículas argilosas.



Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
Oliveira <i>et al.</i> (2017c)	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo apresenta resultados de compilação dos dados mundialmente publicados acerca de testes <i>in-situ</i> e de laboratório, visando caracterizar a variabilidade das propriedades dos solos residuais tropicais derivados de gnaisse, granito e migmatito.</li> </ul>
Shirlaw (2018)	Singapura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão de suporte elevada requerida para evitar colapsos de face em solos (incluindo solos de alto SPT);</li> <li>• Desgaste excessivo e danos nas ferramentas de corte;</li> <li>• Intervenções hiperbáricas frequentes, baixas taxas de avanço e alto nível de vibração;</li> <li>• Total de 59 ocorrências em 86 Km de deslocamentos superficiais superiores a 150 mm (1/1,46 Km).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilização de ar comprimido, <i>jet grouting</i> e congelamento (pela superfície) para estabilizar a face para intervenções.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação dos fatores de riscos associados com ocorrências de deslocamentos superficiais acentuados ou colapso (sinkhole) de sete projetos de escavações com EPBs em FMT;</li> <li>• Os maiores deslocamentos em superfície são resultados de perda de solo na seção de escavação, consequência de pressões de frente inadequadas e sobre-escavação;</li> <li>• Durante intervenções a perda de solo pode ocorrer devido: à utilização de pressão de ar comprimido menor que a pressão da coluna d'água, possibilitando intervenções mais longas; no momento da mudança do modo EPB fechado para semi-EPB, devido às maiores variações de pressão; à perda</li> </ul>

Autoria	Local	Impactos Negativos	Ações Mitigadoras	Observações
				gradual de estabilidade no decorrer do tempo; ao efeito desestabilizador da vibração; e ao grande número de intervenções em áreas mais resistentes do maciço.
Wang <i>et al.</i> (2020)	China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensa infiltração de água na câmara;</li> <li>• Características do <i>muck</i>: baixa coesão, alta permeabilidade e baixa densidade (lamacento);</li> <li>• Deslocamentos superficiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adição de bentonita na câmara;</li> <li>• Utilização do modo semi-EPB em maciços saturados autoportantes;</li> <li>• Tempo máximo de escavação de 2h/anel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudo dos fenômenos (<i>soil sliming/spewing</i>) e condições críticas da câmara de escavação;</li> <li>• Elaboração de método de cálculo de infiltração de água na câmara.</li> </ul>

#### 2.4.4.1 O exemplo do túnel Kranji em Singapura

O túnel Kranji é parte do *Deep Tunnel Sewerage System* em Singapura, e possui 12,6 km de extensão escavados com duas EPB-TBM ( $\varnothing = 4,9$  m), que atravessaram maciços graníticos intemperizados, sob coberturas que variaram de 15 a 50 metros. De acordo com Zhao *et al.* (2007), durante a escavação, a frequência na qual as condições da face passaram de rocha sã para solo residual foi muito maior do que a esperada (Figura 16). Isto fez com que fosse necessário alternar frequentemente entre os modos de operação aberto (face em rocha), transição (face mista) e modo EPB (face em solo residual). Segundo os autores, isso resultou em problemas como desgaste excessivo e achatamento das ferramentas de corte, instabilidades na face, colapsos, infiltração de água e atraso no cronograma.

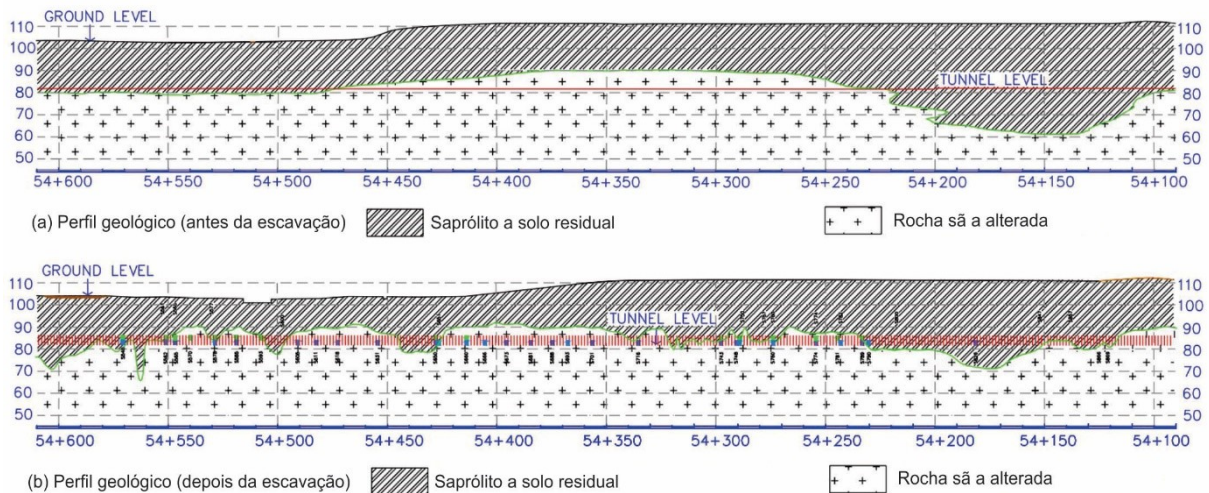


Figura 16. Comparação entre os perfis geológicos de projeto (a) e *as built* (b). Fonte: adaptado de Zhao *et al.* (2007).

Segundo Zhao *et al.* (2007), a presença de uma fina camada de saprólito, mais arenosa e com permeabilidade além da esperada, causou diversos problemas durante a escavação e nas intervenções de manutenção. Elevadas pressões hidrostáticas intensificaram a infiltração de água na câmara (Figura 17a), modificando a consistência do material e comprometendo a estabilidade da face. Devido à alta permeabilidade da camada saprolítica, o fluxo de água passando causou erosão, que resultaram em um aumento no volume da infiltração de água, induzindo consideráveis deslocamentos superficiais e colapsos localizados (Figura 17 c).

Devido às condições instáveis e à infiltração excessiva de água do maciço, a máquina operou em modo EPB ou em modo de transição. Os autores relatam que houve dificuldade em transferir os fragmentos de rocha para dentro da câmara, fazendo com que se acumulassem na região do *tool gap*. Segundo os autores, a cabeça de corte permaneceu girando e moendo o material solto, já “liberado” do maciço, ao mesmo tempo em que o material era comprimido à medida em que a máquina avançava. Isso aumentou o desgaste das ferramentas de corte e outros componentes máquina (Figura 17 b).

Devido a consistência líquida do material escavado, não houve a formação de *plug* (tampão) no parafuso sem-fim, resultando na saída de fluido pressurizado na correia transportadora e seu acúmulo na porção inferior do túnel (Figura 17d).

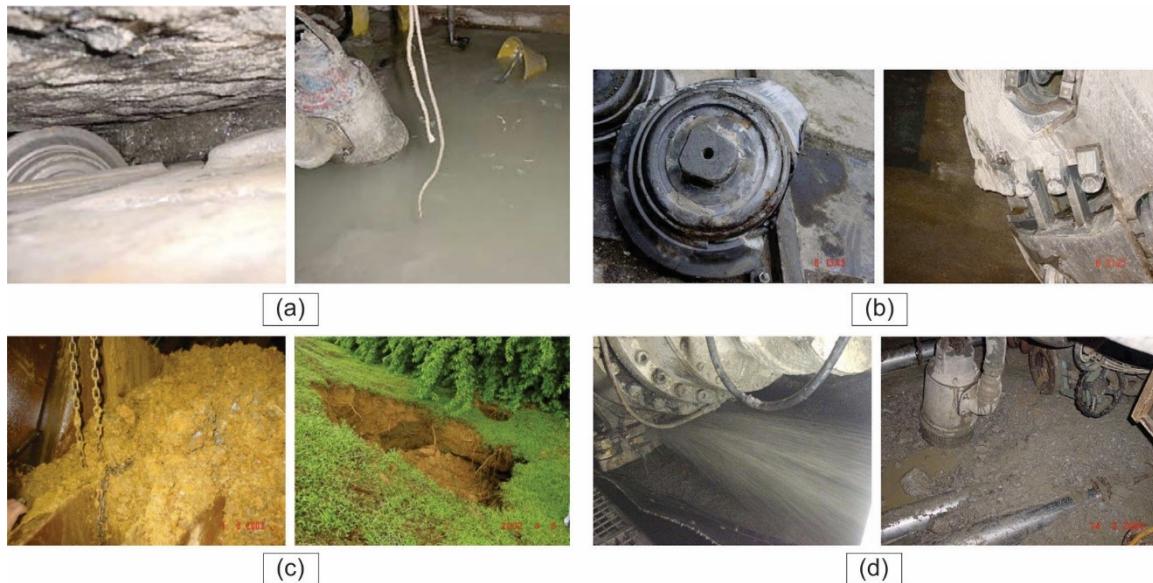


Figura 17. Ilustração dos problemas encontrados durante a escavação do túnel Kranji (Singapura): (a) camada de saprólito de permeabilidade elevada e infiltração na câmara de escavação; (b) achatamento e quebra de ferramentas de corte; (c) instabilidade da face e colapso em superfície; (d) descarga de material aquoso pressurizado no parafuso sem-fim. Fonte: adaptado de Zhao *et al.* (2007).

Zhao *et al.* (2007) atentam para o elevado nível de vibração gerado na máquina durante a escavação, resultando no aumento do número de intervenções para troca de componentes. De acordo com os autores, no trecho mais crítico, a máquina teve um fator de utilização de apenas 20% com um avanço médio inferior à 6 metros/dia.

Frente aos problemas e impactos no desempenho da máquina e na produtividade da escavação, foram executadas, segundo os autores, as seguintes medidas mitigadoras:

- Redução do nº de discos, aumento das aberturas e aumento no nº de dentes dos *scrapers* (para melhor desempenho em solos residuais), visando à melhora do fluxo de material da face para a câmara de escavação;
- Instalação de parafuso sem-fim extra ou troca por outro mais longo, para melhor controle de pressão;
- Instalação de britador na frente da cabeça de corte para pedregulhos e matacões;
- Condicionamento do material por meio da adição de bentonita, com foco na redução da permeabilidade;
- Rebaixamento do freático à frente da máquina para melhorar as condições das paralisações e controle da pressão de suporte.

Dentre todas as medidas propostas segundo Zhao *et al.* (2007), a mais efetiva foi o aumento das aberturas na cabeça de corte, e, portanto, redução no número dos discos de corte. A Figura 18 mostra a cabeça de corte original e a “otimizada” para as condições reais encontradas.

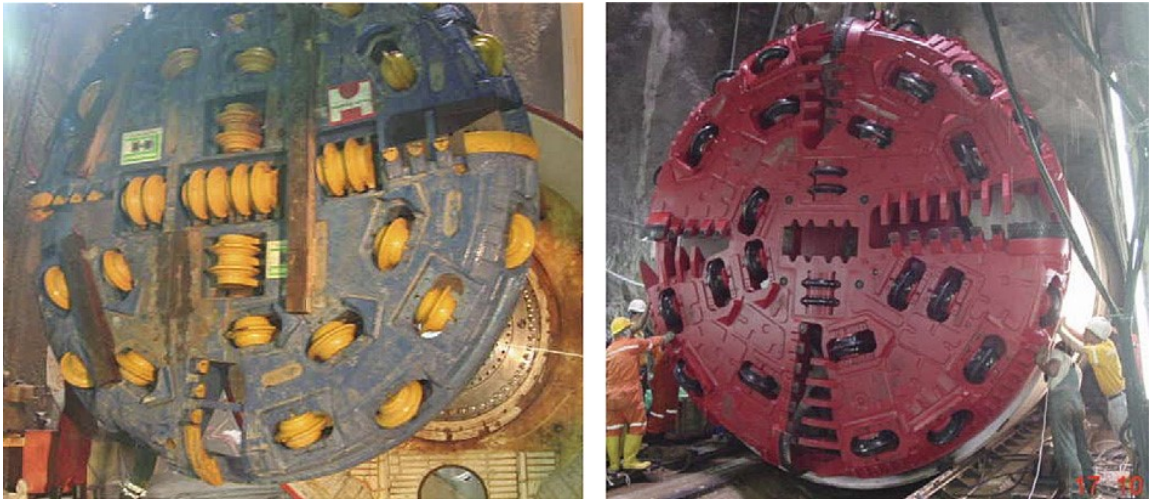


Figura 18. Cabeça de corte original (a) e modificada (b). Fonte: adaptado de Zhao *et al.* (2007).

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A Linha 5 – Lilás atravessa toda a Zona Centro-Sul da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), cobrindo as regiões de Santo Amaro, Largo Treze, Borba Gato, Brooklin, Moema e Parque do Ibirapuera, além de atender às proximidades do Aeroporto de Congonhas. A linha, que transporta atualmente cerca de 600 mil passageiros diariamente, estende-se entre as estações Capão Redondo e Chácara Klabin, totalizando 17 estações concluídas (6 ainda em projeto) em um trajeto de 20 km de extensão (Figura 19). Em conjunto com as Linhas 1 (Azul), 2 (Verde) e 9 (Esmeralda), a Linha 5 forma uma malha de alta capacidade ligando o bairro Santo Amaro a importantes polos de atividades terciárias (serviços), como Moema, Vila Mariana e Brooklin.

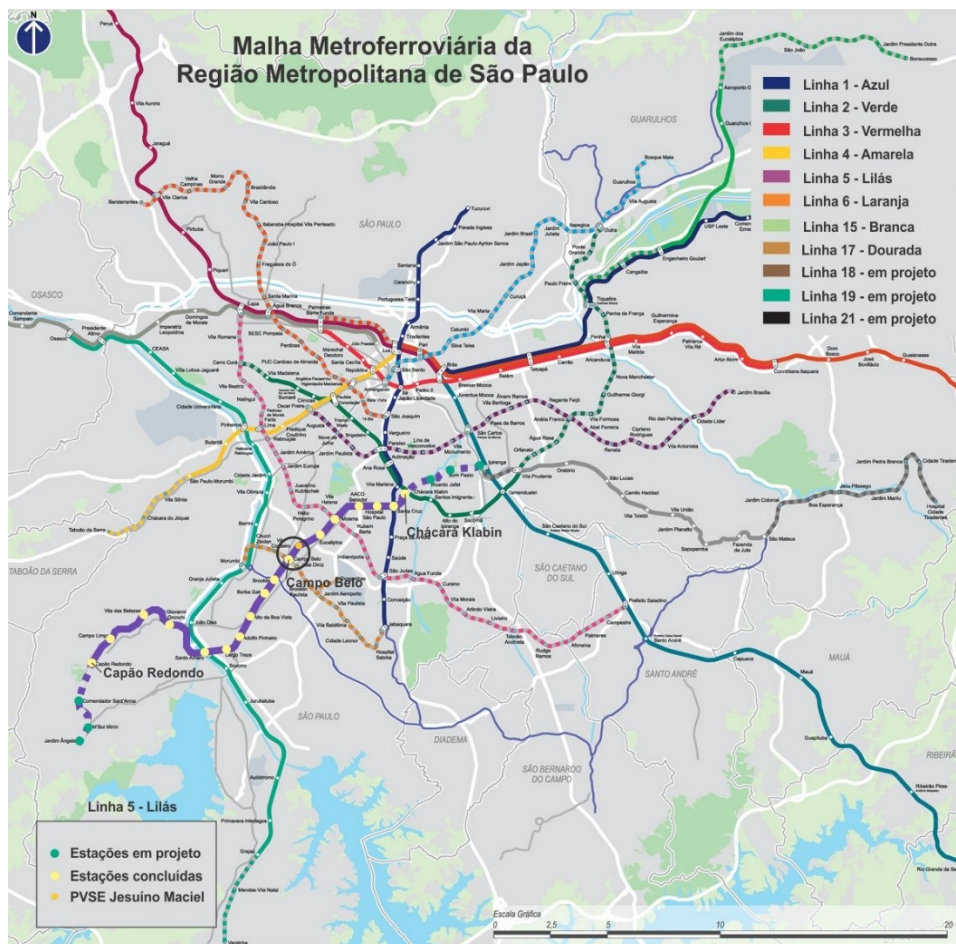


Figura 19. Malha metroferroviária da RMSP com destaque para a Linha 5 – Lilás. A área de estudo está delimitada por um círculo preto. Fonte: adaptado de Viatrolebus<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Disponível em: <https://viatrolebus.com.br/2020/04/relatorio-do-metro-mostra-nova-linha-na-zona-leste-e-linha-5-ate-o-ibirapuera>. Acessado em 26/10/2020.

A construção da Linha 5 foi iniciada ainda no início da década de 1990. O trecho estudado está inserido no projeto de extensão da linha, que entre 2012 e 2018, culminaria com a conclusão de 10 estações, distribuídas ao longo de 11 Km e interconectadas por túneis de duas vias singelas ( $\varnothing = 6,9$  m) e túnel de via dupla ( $\varnothing = 10,5$  m).

O projeto de extensão da Linha 5 - Lilás foi construído em 7 lotes e, além das estações, inclui 10 poços de ventilação e saídas de emergências (PVSE), 1 poço de estacionamento para os trens, 2 poços técnicos, sendo um deles para o lançamento das tuneladoras utilizadas para escavar as vias do Lote 3, conforme esquematizado na Figura 20.

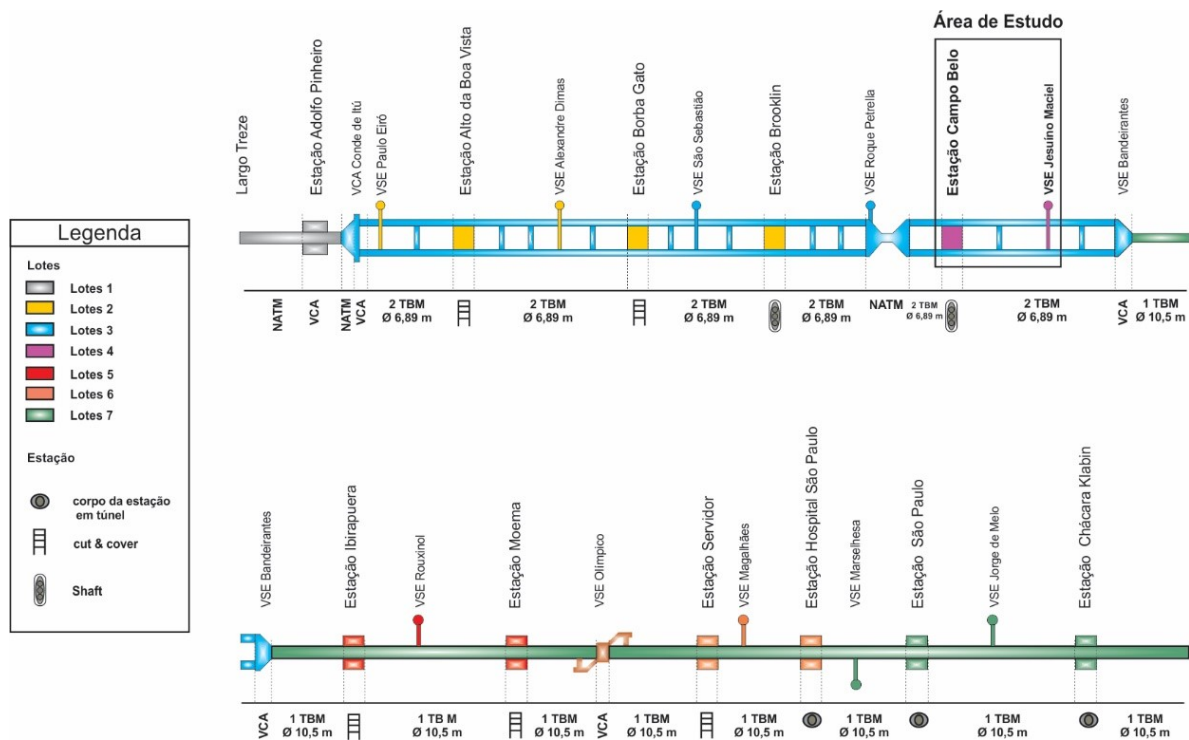


Figura 20. Projeto de extensão da Linha 5 – Lilás. Fonte: CMSP.

### 3.1. ASPECTOS GERAIS DA VIA 2

O Lote 3 da Linha 5 - Lilás do Metrô de São Paulo possui 5,3 km de extensão e compreende quatro estações (Alto da Boa Vista, Borba Gato, Brooklin e Campo Belo) e sete poços de emergência/ventilação. O Lote 3, como citado anteriormente, foi escavado simultaneamente em duas vias singelas: (a) via 1 TBM EPB S-790 "Nila" e (b) Via 2 TBM EPB S-789 "Tarsila", ambas com 6,89 m de diâmetro.

Neste estudo, foram analisados os dados da Via 2 de um trecho do Lote 3 de aproximadamente 560 m de comprimento, compreendido entre a Estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Neste trecho, as vias distam de 11 a 27 m entre si e as coberturas variam entre 13 e 25 m. As duas vias foram escavadas com uma defasagem de 18 diâmetros de distância (124 m), sempre com a tuneladora da Via 2 (S-789 *Tarsila*) à frente da tuneladora da Via 1 (S-790 *Nila*) para evitar que a escavação de uma das vias influenciasse na escavação da outra. O trecho foi escavado sob a Avenida Santo Amaro, em área intensamente urbanizada e composta por edificações lindeiras (Figura 21).

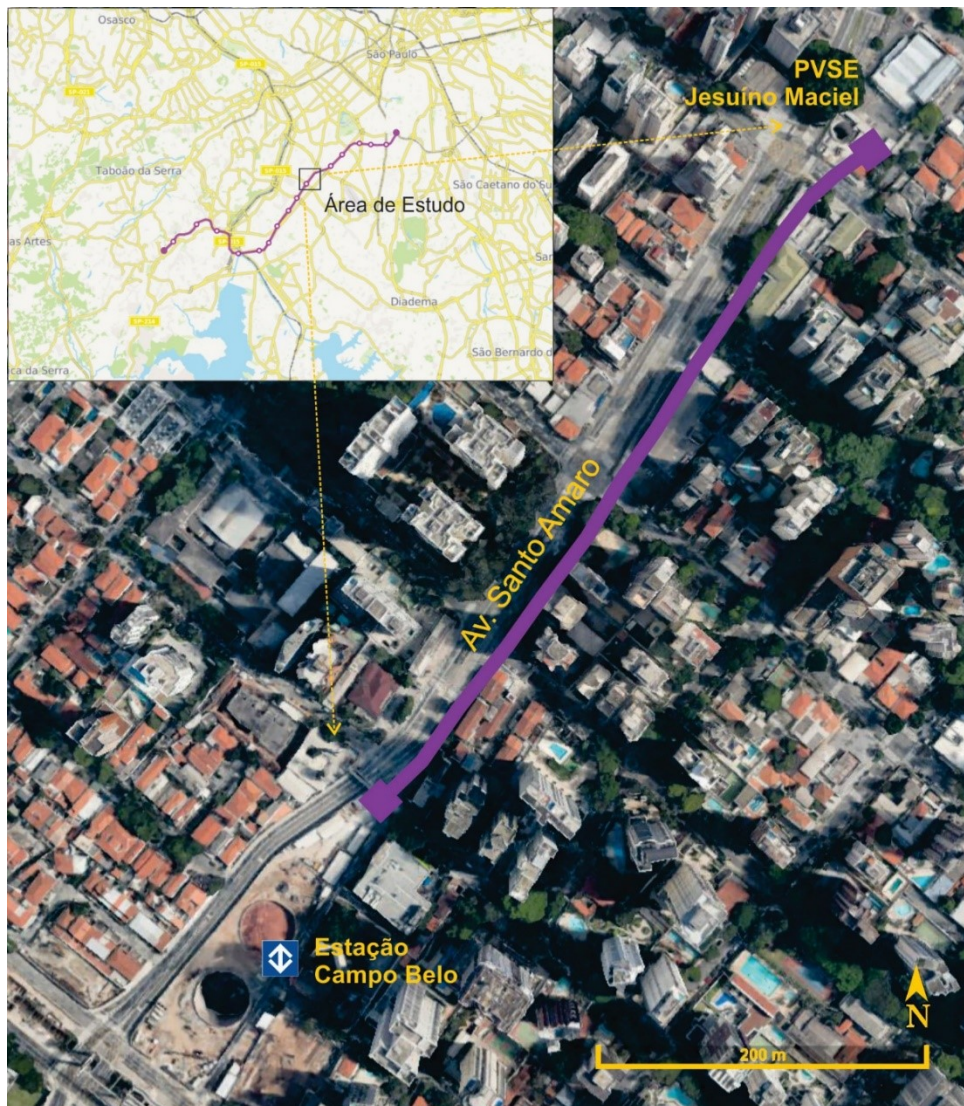


Figura 21. Localização do trecho analisado no contexto da Linha 5 – Lilás do Metrô de São Paulo. Imagem do Google Earth tomada a 10/01/2021. Fonte: Elaborado pelo autor.



O trecho estudado da Via 2 situa-se entre os anéis de revestimento de número 2179 e 2549 (progressivas 14+460 a 15+020) e foi escavado entre os dias 19 de agosto a 29 de outubro de 2015. A previsão seria iniciar a escavação deste trecho com a Estação Campo Belo já concluída, porém, dos 5 poços secantes da estação, apenas o poço 2 e 4 estavam escavados. Sendo assim, a escavação da estação foi interrompida e os poços aterrados para possibilitar a passagem das tuneladoras (RISSOLI, 2018).

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DA TUNELADORA E DO REVESTIMENTO

A máquina utilizada na escavação da Via 2 do Lote 3 foi uma TBM pressurizada do tipo *Earth Pressure Balance* (EPB), modelo S-789 da marca Herrenknecht AG. Suas características principais estão resumidas na Tabela 2. A Figura 22 ilustra a máquina utilizada na escavação do Lote 3 da Linha 5 do metrô de São Paulo.

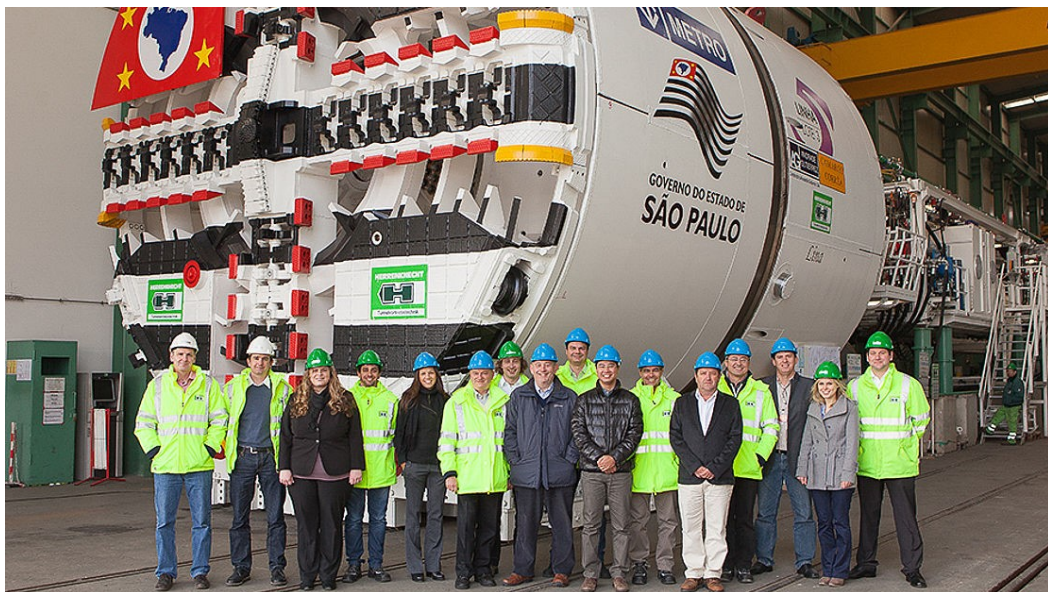


Figura 22. TBM EPB utilizada na escavação da Via 2 do Lote 3 do metrô de São Paulo. Fonte: Herrenknecht AG.

A escavação de tuneis em frente mista, exige um *design* da cabeça de corte (CC) que atenda a requisitos para a escavação tanto em solo quanto em rocha (Figura 23). Ferramentas estáticas para solos, quando combinadas com discos cortadores, permitem escavar face mista. De acordo com Nôro (2014), a combinação destas ferramentas é de extrema importância, pois permite a raspagem do solo e a desagregação da rocha alterada, ao mesmo tempo em que corta a rocha sã.

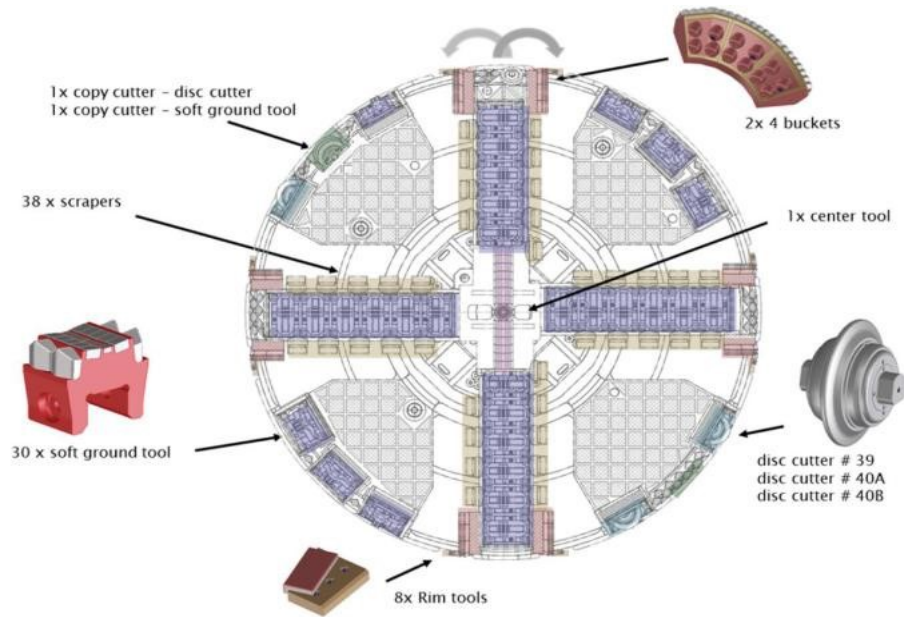


Figura 23. Representação da cabeça de corte da tuneladora EPB utilizada no Lote 3, com indicação das ferramentas para escavar solo e rocha. Fonte: Silva *et al.* (2016)

**Tabela 2.** Características principais da tuneladora S-789 utilizada na escavação da Via 2.

Características	Valores
Diâmetro do túnel	6,89 m
Comprimento do escudo	12 m
Comprimento total da máquina	107 m
Peso do escudo	450 ton
Peso total da máquina	780 ton
Número de cilindros de avanço	16 pares
Força nos cilindros de avanço	60.800 kN
Número de sensores de pressão de terra	6
Número de linhas de injeção de <i>grout</i>	6
Torque nominal	3.560 kN.m
Potência da cabeça de corte	1.600 kW
Número de ferramentas de corte ( <i>disc + ripper + scraper</i> )	41
Taxa de abertura da cabeça de corte	39%

Fonte: Adaptado de Hartwig *et al.* (2018).

Para escavar os solos residuais ou os depósitos terciários, a cabeça de corte é equipada com *rippers* (cortadores) e *scrapers* (raspadores), para a remoção do solo da frente de escavação. Estas ferramentas estão distribuídas por toda a área transversal, incluindo também as zonas periféricas da superfície externa da cabeça de corte. Os *buckets* possuem a função de recolher o material da face e direcioná-los para o interior da câmara de escavação. Nos trechos em que ocorre face mista, onde saprólito e/ou rocha pouco alterada são interceptados, algumas ferramentas são substituídas por

discos cortadores (*disc cutters*), posicionados alguns centímetros à frente das outras ferramentas para evitar desgaste desnecessário (SILVA *et al.*, 2016).

O revestimento dos túneis do Lote 3 da Linha 5 é formado por anéis pré-fabricados em concreto armado convencional (A) e em concreto com fibras de aço (F). Constituem anéis de 6,5 m de diâmetro externo, 30 cm de espessura e 1,5 m de comprimento. Cada anel é composto por seis segmentos de concreto pré-moldado, do tipo *cônico universal* em esquema 5+1, sendo que um deles é o segmento chave, instalado por último (Figura 24). Os segmentos estão equipados com juntas *water-stop*, constituídas por bandas de neoprene, instaladas em todos os lados dos segmentos. Estas bandas uma vez comprimidas durante o processo de montagem do anel, garantem a estanqueidade do túnel. A união dos segmentos que formam os anéis é feita mediante o uso de parafusos metálicos, cuja função é permitir o alinhamento dos segmentos e manter comprimidas as bandas *water-stop* durante a fase de montagem do anel no escudo.



Figura 24. Vista lateral dos segmentos no pátio de anéis do VCA Conde de Itú.

## 4. ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DO LOTE 3

### 4.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS

O Lote 3 da Linha 5 – Lilás interceptou materiais inclusos na Bacia Sedimentar de São Paulo (BSSP), onde experiências prévias foram adquiridas com as escavações mecanizadas da Linha 4 – Amarela (OLIVEIRA, 2017<sub>d</sub>). No entanto, pela primeira vez na cidade de São Paulo, tuneladoras atravessaram o embasamento cristalino pré-cambriano e seus produtos de alteração intempérica (saprólito e solos residuais).

A estratigrafia da área de estudo compreende quatro unidades principais: a) embasamento pré-cambriano (Complexo Embu), composto basicamente por gnaisses migmatíticos em diferentes graus de alteração, saprólito e solos residuais; b) sedimentos terciários das formações Resende e São Paulo; c) coberturas quaternárias compostas por areias não consolidadas, argilas orgânicas e turfas com elevado potencial de compactação; e d) depósitos tecnogênicos (aterros). Entretanto, a escavação atravessou apenas rochas do embasamento cristalino e seus produtos de alteração.

O complexo Embu representa a unidade geológica de maior ocorrência na RMSP, ocupando uma faixa de afloramentos de direção NE-SW, formada por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses migmatizados, corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciossilicáticas. É limitado ao norte, pelo sistema de falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari e ao sul, pela Falha de Cubatão, separando-o dos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, e do Complexo Costeiro, respectivamente (Monteiro et al., 2012). Apesar de em alguns locais da BSSP serem encontrados sedimentos até 300 metros de profundidade, em alguns outros é possível encontrar solos residuais do Complexo Embu a pequenas profundidades (FUTAI *et al.*, 2012).

Na área de estudo, o Complexo Embu é constituído por rochas gnáissicas e seu manto de alteração é subdividido em função da intensidade da alteração intempérica, o que confere a cada horizonte propriedades geotécnicas distintas. A Tabela 3 detalha a classificação do perfil de alteração adotado pelo Metrô - SP para produtos de alteração de rocha.

A rocha sã (ou alterada dura) é constituída por biotita gnaisses de granulação média e coloração cinza e branca, compostos predominantemente por feldspato,

quartzo e biotita. A textura é protomilonítica e orientada segundo a direção NE-SW. Pode conter veios de quartzo (PEIXOTO DA SILVA *et al.*, 2016).

**Tabela 3.** Classificação de perfil de alteração utilizada pelo Metrô/SP.

Horizonte	Descrição	Estrutura	Comportamento	Avaliação
<b>Solos Eluviais</b>	Produtos finais da decomposição das rochas. São solos argilosos avermelhados com intensa incidência de processos pedogenéticos.	Estrutura homogênea e isotrópica.	Comportamento típico da mecânica dos Solos.	Amostrável e avaliável pelo SPT.
<b>Solo Residual Maduro 5SR1</b>	Produto da decomposição das rochas em elevado grau de intemperização (alteração). De maneira geral são siltes argilosos; os feldspatos já se transformaram em caulim (fração argila). Vários elementos solúveis já foram lixiviados. Já possui algum grau de laterização.	Estrutura homogênea e isotrópica.	Comportamento típico da mecânica dos Solos.	Amostrável e avaliável pelo SPT.
<b>Solo Residual Jovem 5SR2</b>	Produto da decomposição das rochas em médio grau de intemperização (alteração). De maneira geral são siltes arenosos micáceos. Os minerais remanescentes conservam a a estrutura original, porém com resistência mecânica muito reduzida.	Apresenta estruturas reliquias da rocha matriz, é anisotrópico e relativamente heterogêneo.	Podem ocorrer vários matacões. É considerado solo para a Geotecnia.	Amostrável e avaliável pelo SPT com trado e lavagem por tempo.
<b>Saprólito 5SP</b>	Transição entre solo e rocha. É composto basicamente por blocos ou porções de maciço rochoso em vários estágios de alteração, com dimensões variáveis e recoberto por solo residual.	Apresenta estruturas originais da rocha, entretanto a resistência da matriz está muito reduzida devido ao intenso intemperismo químico.	A ocorrência de matacão é significativa. Possui propriedades geotécnicas tanto da Mecânica das Rochas como dos Solos.	Não é possível avaliar com SPT. Penetrável apenas com ferramenta de lavagem à percussão e equipamento de sondagem rotativa.
<b>Rocha 5R</b>	Rocha dura. Predomínio de rocha com eventuais preenchimentos de solo nas descontinuidades.	Rocha nos diversos graus de alteração, coerência, fraturamento e dureza.	Domínio da Mecânica das Rochas.	Amostrável com sondagem rotativa.

Fonte: Rocha (2004).

O saprólito (ou solo de transição) é predominantemente constituído por biotita gnaisses muito alterados, com porções de silte arenoso micáceo, com fragmentos de

rocha, de coloração cinza, castanha e branca, muito compactos. Possuem maior teor de areias em relação as camadas de alteração sobrejacentes e, normalmente, são detectados somente por prospecção rotativa, exibindo baixa recuperação.

O solo residual jovem ou solo saprolítico, apresenta menor evolução pedológica e menor teor de argila em relação ao solo residual maduro. Compreende materiais que preservaram estruturas (foliação e descontinuidades) da rocha mãe. São constituídos predominantemente por siltes arenosos, micáceos, de cor acinzentada, castanha e branca, podendo ou não conter fragmentos de rocha (blocos e matacões), medianamente compacto a compacto.

O solo residual maduro ou solo laterítico, não apresenta texturas reliquias da rocha mãe, é mais homogêneo e argiloso. Constituem-se de siltes argilosos a arenosos de coloração avermelhada clara, de caráter laterítico, consistência mole a média, fofa a pouco compacta.

#### **4.2. ASPECTOS GEOTÉCNICOS**

Oliveira *et al.* (2017<sub>d</sub>) apresentaram resultados de alguns ensaios de laboratório para gnaisses e produtos de alteração para a Linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo (Tabela 4). De acordo com os resultados da análise granulométrica, a quantidade de finos (silte + argila) aumenta do saprólito para o solo residual maduro, enquanto que o teor de areia diminui do saprólito para o solo residual maduro. Já o índice de plasticidade, tende a aumentar do saprólito para o solo residual maduro.

De acordo com Futai *et al.* (2012), a condutividade hidráulica (k) dos solos residuais de gnaisses na RMSF apresentam grande dispersão, variando de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$ . Segundo Oliveira *et al.* (2017<sub>d</sub>), biotita gnaisses alterados possuem resistência à compressão simples entre 3,6-63,6 MPa.

**Tabela 4.** Resultados de ensaios geotécnicos. Legenda: A=argila; Af=areia fina; Am=areia média; Ag=areia grossa; P=pedregulho; LL=limite de liquidez, LP=limite de plasticidade e IP=índice de plasticidade.

Parâmetro	Solo Residual Maduro 5SR1	Solo Residual Jovem 5SR2	Saprólito 5SP	Gnaise Migmatítico 5R
Peso Específico ( $\gamma$ ) [KN/m <sup>3</sup> ]	13,7 - 21	17,7 - 20,6	20	25
Coesão Efetiva (c) [Kpa]	19 - 30	10 - 35	20 - 30	50
Ângulo de Atrito ( $\phi$ ) [°]	24,2 - 41	31 - 62	31 - 42	35
Deformabilidade (E <sub>0</sub> ) [Mpa]	65 - 75	100	250	800
Granulometria [% retida]	<b>A:</b> 7-58 <b>S:</b> 20-59 <b>Af:</b> 16-30 <b>Am:</b> 4-23 <b>Ag:</b> 0-13 <b>P:</b> 0-6	<b>A:</b> 8-17 <b>S:</b> 29-51 <b>Af:</b> 16-27 <b>Am:</b> 11-27 <b>Ag:</b> 2-10 <b>P:</b> 1-7	<b>A:</b> 6-11 <b>S:</b> 30-48 <b>Af:</b> 19-26 <b>Am:</b> 16-31 <b>Ag:</b> 4-7 <b>P:</b> 2-4	-
Índices de consistência	<b>LL:</b> 29-57% <b>LP:</b> 16-29% <b>IP:</b> 13-28	<b>LL:</b> 32-40% <b>LP:</b> 22-25% <b>IP:</b> 10-16	<b>LL:</b> 30% <b>LP:</b> 18% <b>IP:</b> 12	-
N <sub>SPT</sub> [golpes]	10 - 19	20 - 35	35 - 57	-

Fonte: Oliveira *et al.* (2017<sub>d</sub>)

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foram utilizados os seguintes materiais:

- 19 boletins de sondagens rotativas e percussivas;
- Arquivos em formato de banco de dados ou *Data Base Files (DBF)*, contendo todas as informações registradas pelo sistema de controle da tuneladora. Cada arquivo DBF armazena, a cada 10 segundos, registros de *348 parâmetros* envolvidos no funcionamento da máquina. Neste estudo, no entanto, foram analisados os principais parâmetros para a avaliação do desempenho da escavação, conforme descritos adiante. Os arquivos DBF, designados conforme o código dos anéis de revestimento, referem-se aos dados de escavação do local onde se encontrava a roda de corte no momento da montagem/instalação do último anel de revestimento no escudo. Essa diferença entre a frente de escavação (roda de corte) e o local de instalação dos anéis equivale a 10,5 m (ou seja, sete anéis). Foram analisados dados de um total de 371 anéis (2179 ao 2549), equivalentes a 556,5 m escavados, referentes ao trecho compreendido entre a saída da Estação Campo Belo até a entrada no PVSE Jesuíno Maciel (Figura 25);
- Programa *SAPE – Sistema de Acompanhamento de Parâmetros de Escavação* (HARTWIG & MOREIRA, 2018) para tratamento e análise dos parâmetros de escavação selecionados. O software possibilita a seleção de intervalos específicos de anéis (arquivos DBF) e a geração de gráficos dos parâmetros mais importantes para fins de acompanhamento do desempenho de escavações mecanizadas. Devido ao custo computacional envolvido na geração de gráficos contendo todos os registros de cada arquivo DBF, estipulou-se que quando mais de dez arquivos são carregados no software, apenas as médias por anel de cada um dos parâmetros são exibidas. ;
- Programa *LeapfrogGeo (Seequent)* para a elaboração do modelo geológico e geotécnico do maciço;
- Desenhos de projeto de instrumentação geotécnica: DE-5.08.04.00/6I7-004, DE-5.08.04.00/6I7-001, DE-5.08.04.00/6I7-002, DE-5.08.04.00/6I7-002 (A);



- Desenhos de projeto de localização dos anéis de revestimento: DE-5.00.00.00/6G3-112 (A1), DE-5.00.00.00/6G3-113 (A1), DE-5.00.00.00/6G3-114 (A1);
- Programa *AutoCad 2018 (Autodesk)* para a manipulação de desenhos de projeto;
- Relatório Técnico de Geologia/Geotecnia: RT-5.08.00.00/6C3-001;
- Relatórios Diários de Obra (RDOs).

Todos os documentos técnicos referentes à escavação, necessários para o desenvolvimento deste estudo, foram cedidos pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô (CMSP).

Neste estudo, foram analisados dados geológico-geotécnicos procedentes dos boletins de sondagens e os dados dos parâmetros de escavação oriundos do banco de dados da tuneladora EPB.

Inicialmente, avaliou-se os dados de sondagens, como valores de SPT (*Standard Penetration Test*), tipo de material perfurado (horizontes geológicos), nível d'água, profundidade dos furos e a cota das “bocas” dos furos. Estes dados foram tabulados no EXCEL (Microsoft) para a geração do modelo geológico e geotécnico no software *LeapfrogGeo (Seequent)*. A topografia do modelo foi gerada através das cotas georreferenciadas das bocas de cada furo de sondagem. Os túneis foram plotados em profundidade de acordo com as informações dos desenhos técnicos de projeto. Após a geração dos modelos, foram geradas seções longitudinais e transversais.

Em seguida, analisou-se os principais parâmetros de escavação normalmente utilizados para fins de acompanhamento de tuneladoras EPB:

- 1 - Produção (horas)
- 2 - Velocidade de Avanço (mm/min)
- 3 - Taxa de Penetração (mm/rev)
- 4 - Rotação da Cabeça de Corte (rpm)
- 5 - Pressão de Suporte de Terra (bar)
- 6 - FIR [*Foam Injection Ratio*] (%)
- 7 - FER [*Foam Expansion Ratio*] (-)
- 8 - WIR [*Water Injection Ratio*] (L/min)

- 9 - Torque (kN.m)
- 10 - Força de Contato (kN)
- 11 - Densidade Aparente (kN/m<sup>3</sup>)
- 12 - Energia Específica (MJ/m<sup>3</sup>)

Estes parâmetros foram analisados graficamente no software SAPE (HARTWIG & MOREIRA, 2018), com base nos valores de referência de projeto, nos aspectos geológico-geotécnicos, bem como nos Relatórios Diários de Obra - RDOs.

ab	DATE	ab	TIME	9.0	NO_RING	9.0	STATE	9.0	SEC_1970	9.0	W18030180	9.0	W18030380	9.0	W24000022	9.0	W24000023	9.0	W24000024
✓	19.08.20...		10.39.01		2179		2		1439987942		75.000		68.000		5.707		136.963		795.403
✓	19.08.20...		10.39.11		2179		2		1439987951		75.000		71.000		5.397		131.215		762.913
✓	19.08.20...		10.39.21		2179		2		1439987961		75.000		74.000		6.286		146.202		858.307
✓	19.08.20...		10.39.31		2179		2		1439987972		75.000		77.000		7.653		183.696		1025.747
✓	19.08.20...		10.39.41		2179		2		1439987981		75.000		80.000		5.595		147.339		785.866
✓	19.08.20...		10.39.51		2179		2		1439987992		75.000		84.000		5.649		157.837		781.424
✓	19.08.20...		10.40.01		2179		2		1439988001		75.000		87.000		6.634		186.013		894.557
✓	19.08.20...		10.40.11		2179		2		1439988011		75.000		90.000		7.147		211.293		953.002
✓	19.08.20...		10.40.21		2179		2		1439988021		75.000		93.000		5.245		166.357		739.999
✓	19.08.20...		10.40.31		2179		2		1439988031		75.000		96.000		5.902		176.498		811.899
✓	19.08.20...		10.40.41		2179		2		1439988042		75.000		99.000		7.126		241.382		952.601
✓	19.08.20...		10.40.51		2179		2		1439988051		75.000		102.000		6.547		277.007		889.038
✓	19.08.20...		10.41.01		2179		2		1439988062		78.000		102.000		5.847		234.797		810.021
✓	19.08.20...		10.41.11		2179		2		1439988071		81.000		102.000		5.702		231.168		788.329
✓	19.08.20...		10.41.21		2179		2		1439988081		83.000		102.000		7.875		336.896		1036.019
✓	19.08.20...		10.41.31		2179		2		1439988091		86.000		102.000		6.115		167.486		838.838
✓	19.08.20...		10.41.41		2179		2		1439988101		89.000		102.000		5.671		134.660		787.523
✓	19.08.20...		10.41.51		2179		2		1439988112		93.000		102.000		5.769		136.430		789.811
✓	19.08.20...		10.42.01		2179		2		1439988121		95.000		102.000		7.709		190.701		1003.748
✓	19.08.20...		10.42.11		2179		2		1439988131		98.000		102.000		5.934		168.192		813.445
✓	19.08.20...		10.42.21		2179		2		1439988141		102.000		102.000		5.470		177.682		756.818
✓	19.08.20...		10.42.31		2179		2		1439988151		105.000		102.000		5.885		207.136		796.847
✓	19.08.20...		10.42.41		2179		2		1439988161		108.000		102.000		6.920		176.504		927.487
✓	19.08.20...		10.42.51		2179		2		1439988171		111.000		102.000		5.754		154.924		800.075
✓	19.08.20...		10.43.01		2179		2		1439988182		114.000		102.000		5.371		146.122		753.420
✓	19.08.20...		10.43.11		2179		2		1439988191		114.000		104.000		7.130		220.749		949.593
✓	19.08.20...		10.43.21		2179		2		1439988201		114.000		107.000		6.653		213.950		905.543
✓	19.08.20...		10.43.31		2179		2		1439988211		114.000		110.000		5.774		124.912		803.147
✓	19.08.20...		10.43.41		2179		2		1439988221		114.000		113.000		5.398		101.164		752.969
✓	19.08.20...		10.43.51		2179		2		1439988232		114.000		117.000		8.209		132.945		1078.942
✓	19.08.20...		10.44.01		2179		2		1439988241		114.000		120.000		5.960		117.644		824.772
✓	19.08.20...		10.44.11		2179		2		1439988252		114.000		123.000		5.226		97.888		739.707
✓	19.08.20...		10.44.21		2179		2		1439988261		114.000		126.000		6.432		115.533		863.633
✓	19.08.20...		10.44.31		2179		2		1439988272		114.000		130.000		6.695		140.495		908.599
✓	19.08.20...		10.44.41		2179		2		1439988281		114.000		132.000		5.283		106.765		740.837
✓	19.08.20...		10.44.51		2179		2		1439988292		114.000		136.000		5.685		100.609		780.242
✓	19.08.20...		10.45.01		2179		2		1439988301		114.000		139.000		7.750		137.166		1030.475
✓	19.08.20...		10.45.11		2179		2		1439988311		114.000		141.000		6.177		130.479		855.140
✓	19.08.20...		10.45.21		2179		2		1439988322		117.000		141.000		5.842		126.631		820.443

Figura 25. Ilustração do arquivo DBF referente ao anel 2179 da Via 2 com 664 registros armazenados a cada 10 segundos.

## 6. RESULTADOS

Os resultados deste estudo serão apresentados em dois itens individuais e sequenciais: 7.1) modelos litológico e de valores de SPT; e 7.2) parâmetros de escavação.

### 6.1. MODELOS LITOLÓGICO E DE VALORES DE SPT

A Figura 26 mostra a planta de localização das sondagens para a construção dos modelos no trecho compreendido entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Dentre estas sondagens, seis (6) referem-se a sondagens mistas e treze (13) a sondagens a percussão.

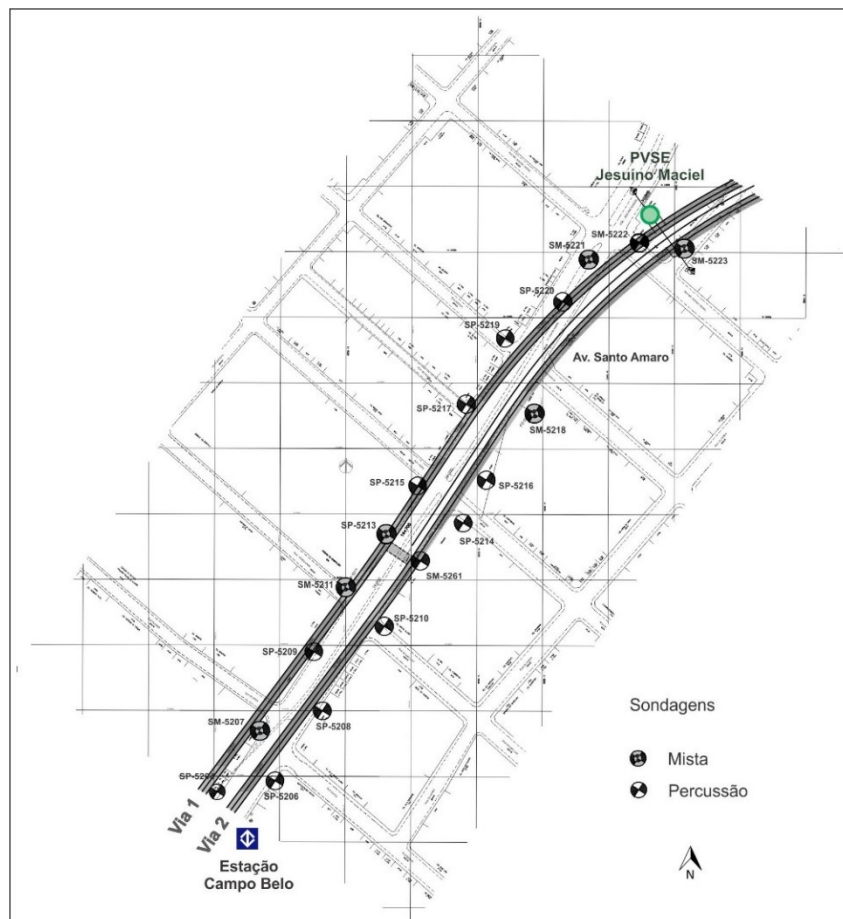


Figura 26. Planta de localização dos furos de sondagem no trecho compreendido entre a Estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Adaptado do desenho DE-5.00.00.00/6G3-112.

A figura 27 retrata o modelo litológico 3D (com visada para NE) entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

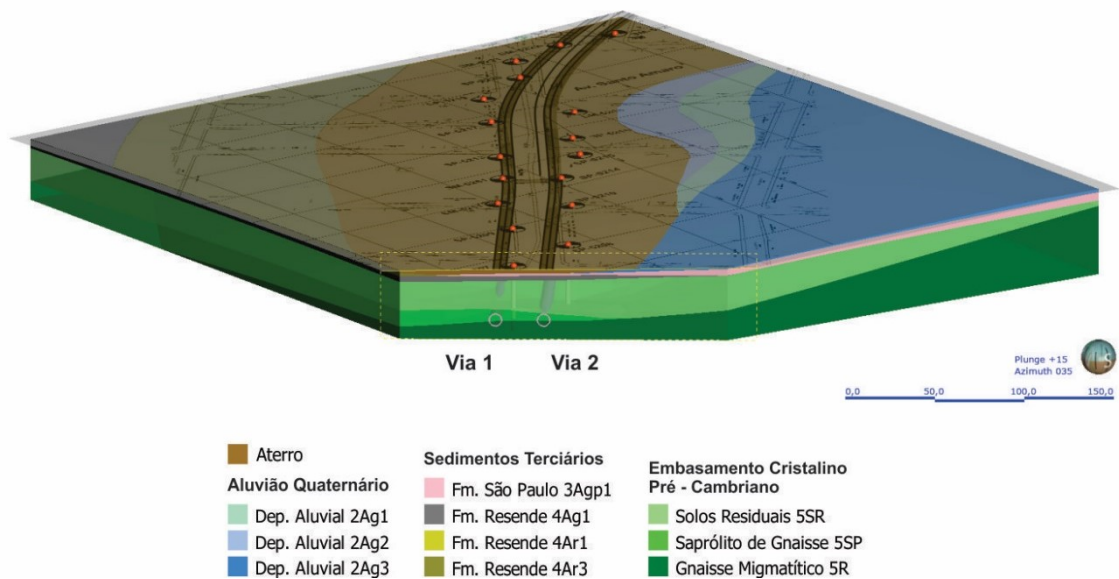


Figura 27. Modelo litológico 3D do trecho compreendido entre a Estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

A Figura 28 retrata o perfil litológico longitudinal da Via 2. Conforme esta figura, os estratos litológicos estão distribuídos horizontalmente e a escavação encontra-se completamente em meio a gnaisses, saprólito e solo residual (Figuras 29 e 30). No presente estudo, os horizontes solo residual jovem e solo residual maduro foram agrupados em uma única unidade, uma vez que não há ocorrência de solo residual maduro na seção de escavação no trecho estudado, segundo os dados das sondagens. A Figura 31 ilustra alguns perfis transversais em face mista nos quais o material rochoso apresenta-se em diferentes proporções na frente de escavação. Conforme esta figura, estas se caracterizam pela presença de rocha-saprólito ou rocha-saprólito-solo residual. Os trechos nos quais a rocha encontra-se em maior proporção estão nos intervalos de anéis 2179-2244 e 2321-2515.

O perfil litológico também mostra que o nível d'água estático encontra-se próximo a superfície do terreno, variando entre a 7 e 24 m acima da coroa do túnel. Ainda segundo o perfil, as coberturas tendem a diminuir no sentido da escavação, variando de 25 m (Estação Campo Belo) a 14 m (PVSE Jesuíno Maciel).

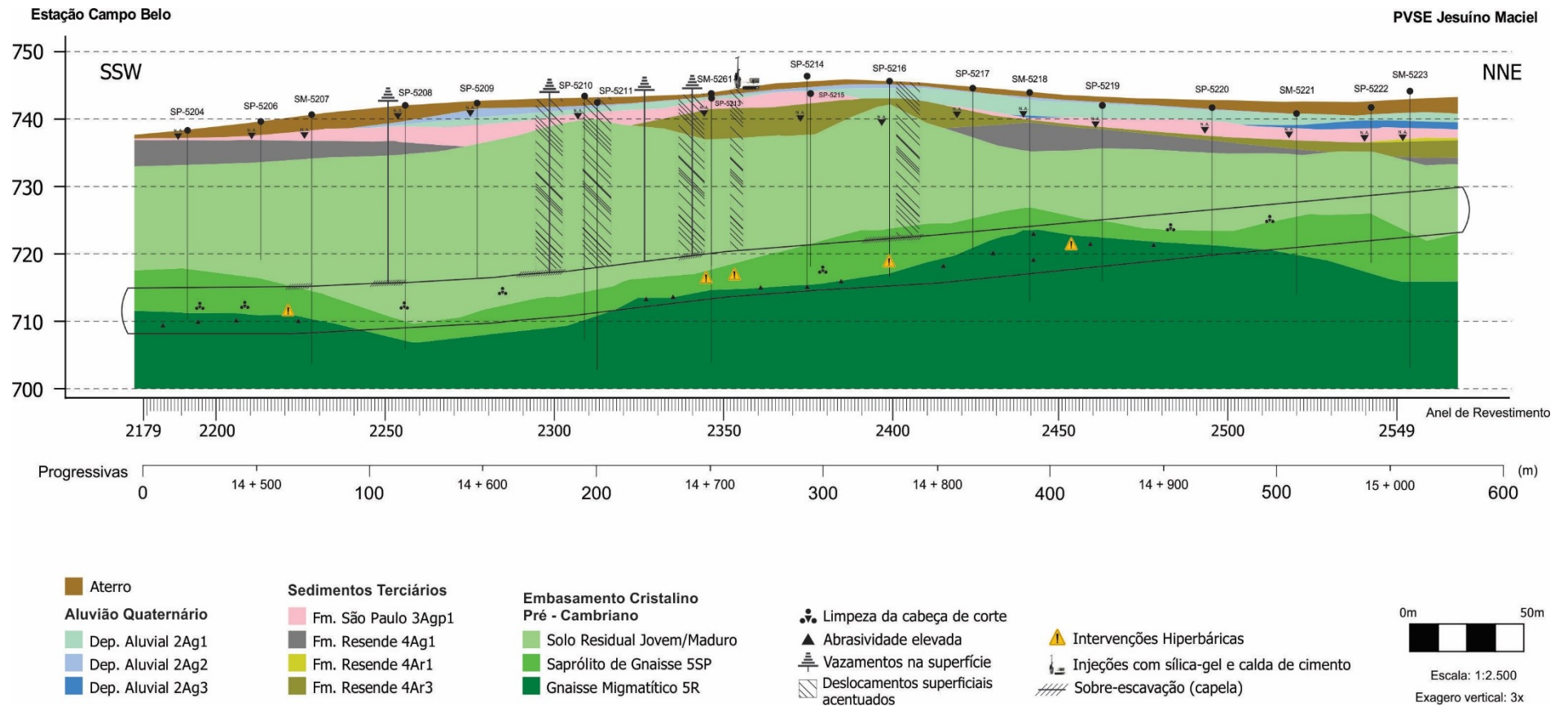


Figura 28. Seção litológica longitudinal do túnel da Via 2 entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.



Figura 29. Fragmentos de rocha fresca encontrados durante a escavação do anel 2193 (21/08/2015) e correspondente a unidade geológica 5R (gnaisse migmatítico).



Figura 30. Solo siltoso micáceo cinza, transportado na esteira durante a escavação do anel 2267 (10/09/2015) e correspondente à unidade geológica 5SR (solos residuais).

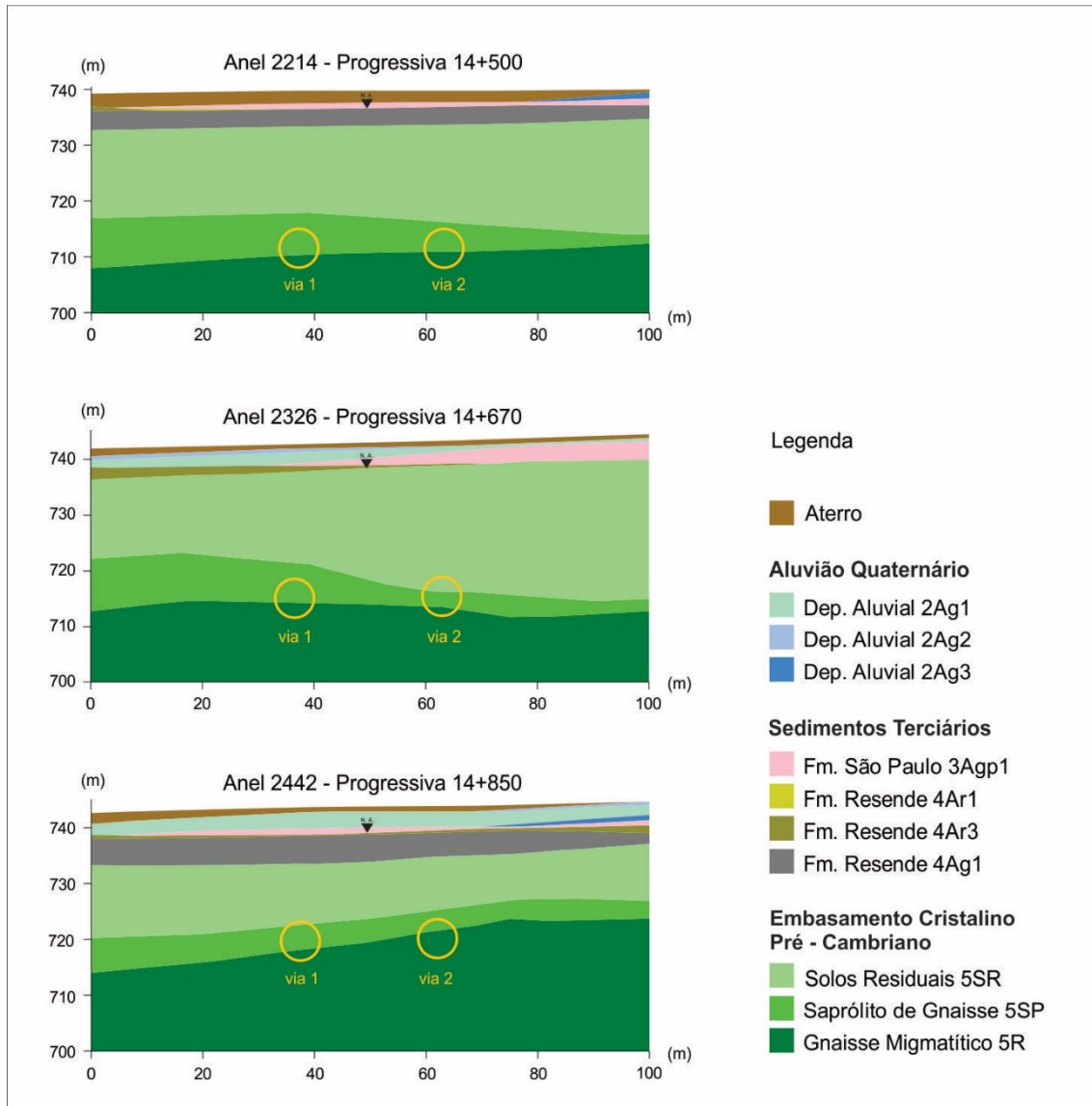


Figura 31. Exemplos de seções litológicas transversais em face mista entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel para as vias 1 e 2.

A Figura 32 mostra blocos em perspectiva em diferentes visadas dos valores de SPT e a Figura 33, o perfil longitudinal dos valores de SPT da Via 2 no trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. De acordo com as imagens, há um aumento progressivo nos valores de SPT com a profundidade, sendo que na seção do túnel, predominam valores de SPT > 30 golpes. As definições “impenetrável ao SPT” e “impenetrável à lavagem por tempo” conforme indicado na Figura 33, correspondem as interfaces solo residual-saprólito e saprólito-rocha, respectivamente.

Conforme pode-se observar, os valores mais elevados de SPT coincidem com os locais onde o topo rochoso encontra-se mais raso, conforme indicado no perfil litológico. Contudo, como mostra a Tabela 5, a extensão dos trechos com rocha na

seção de escavação é distinta entre os modelos gerados a partir da interpolação das litologias (Figura 28) e a partir dos valores de SPT (Figura 33).

**Tabela 5.** Extensão e localização dos trechos com rocha entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel para a Via 2 com base no perfil litológico e no perfil de valores de SPT.

Dados	Anéis	Total de anéis	Extensão (m)
Perfil litológico	2179-2238 e 2320-2510	251	376,5
Perfil de valores de SPT	2206-2239, 2320-2355, 2421-2464	114	171

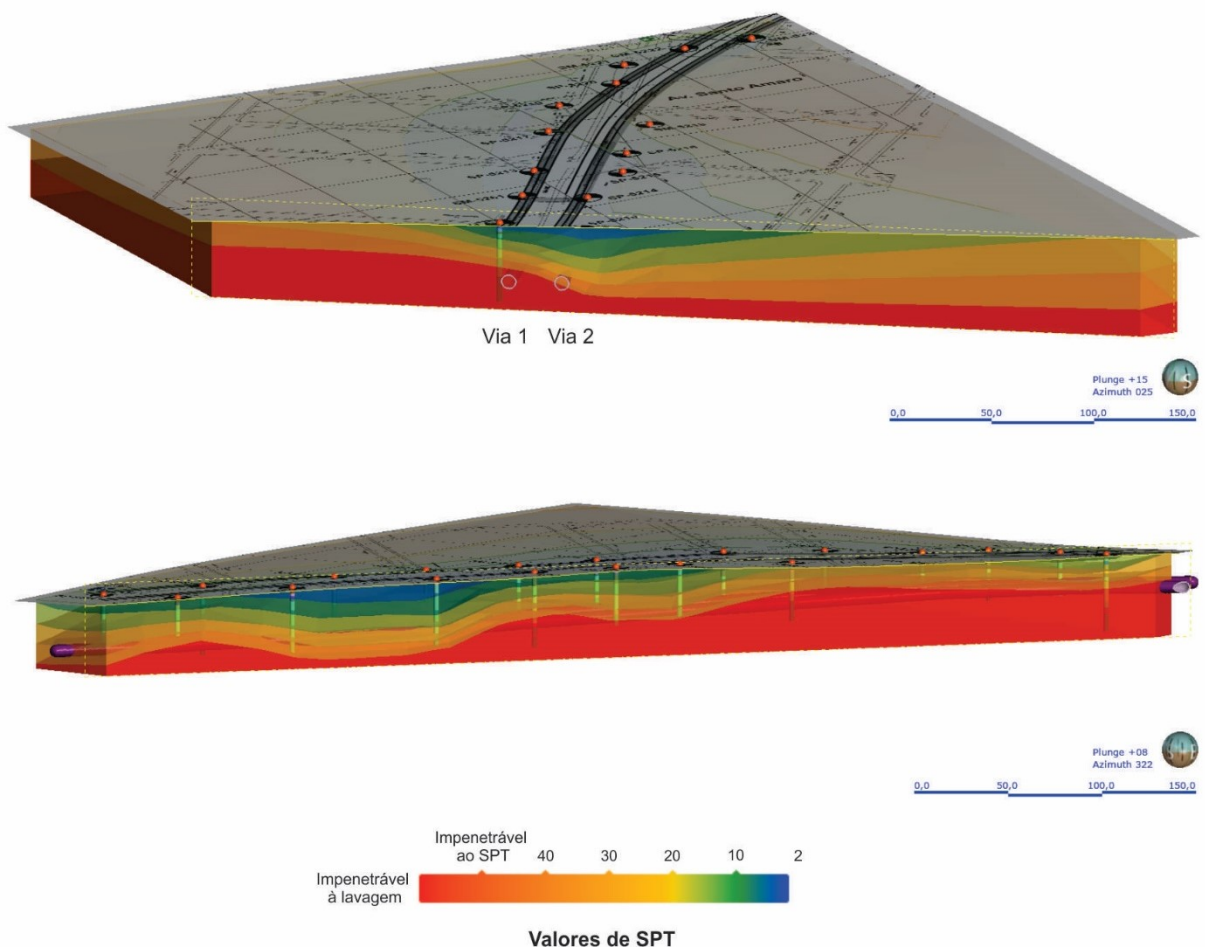


Figura 32. Blocos em perspectiva dos valores de SPT da Via 2 no trecho compreendido entre a Estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.



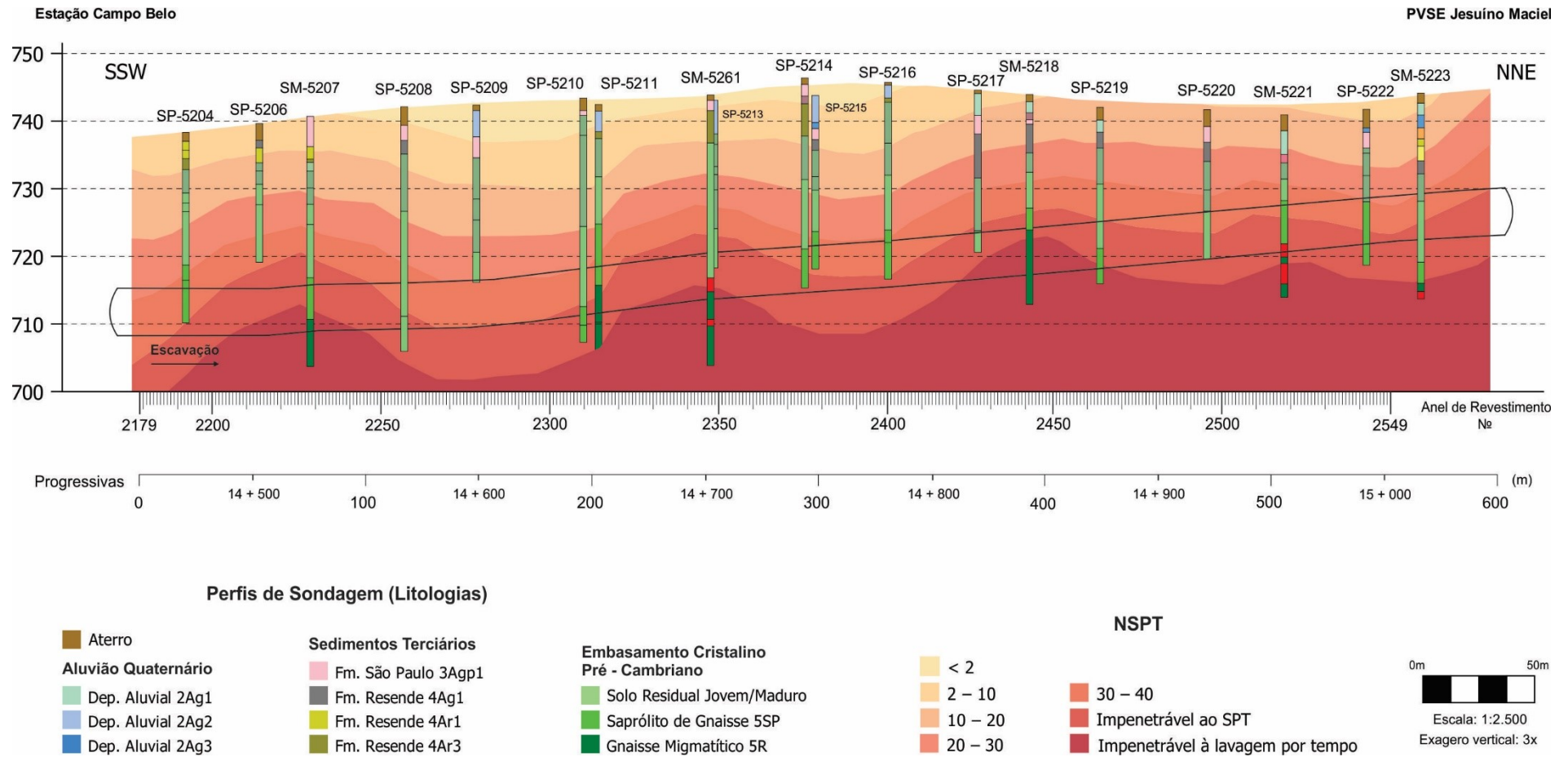


Figura 33. Seção longitudinal dos valores de SPT da Via 2 do trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

## 6.2. PARÂMETROS DE ESCAVAÇÃO

Neste subitem serão apresentados os parâmetros de escavação na seguinte ordem: 1) dados de produção; 2) velocidade de avanço, taxa de penetração e rotação da cabeça de corte; 3) pressão de suporte; 4) condicionamento do solo (FER, FIR e vazão de injeção de água livre); 5) torque e força de contato; 6) densidade aparente; e 7) energia específica.

### 6.2.1. Dados de Produção

Os anéis 2179 a 2549 (371 anéis  $\cong$  557 metros) foram instalados entre os dias 19/08/2015 e 29/10/2015 (72 dias), o que equivale a uma produção média de 5,15 anéis/dia (7,7 m/dia) para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Zhao et al. (2007) descrevem produção média semelhante (6 m/dia) durante a escavação de faces mistas graníticas intemperizadas em parte do *Deep Tunnel Sewerage System* em Singapura (Ásia).

Os gráficos da Figura 34 mostram o tempo do ciclo de escavação de cada anel (escavação, montagem e paralisação) ao longo do trecho estudado. O eixo y foi limitado em 5 horas de modo a realçar o tempo das etapas do ciclo de escavação dos anéis. De acordo com as informações, o tempo total de escavação dos anéis entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel variaram entre 1,0 e 3,6 horas. Conforme este gráfico, os maiores tempos de escavação foram consumidos para os seguintes conjuntos de anéis: a) 2183-2188 (6), b) 2201-2261 (61), c) 2341-2354 (14) e d) 2395-2467 (73). Para o trecho entre os anéis 2201-2261 (61) foram registrados tempos de escavação de anéis irregulares, variando de 1 a 2,7 horas.

A Tabela 6 resume a relação de anéis nos quais foram efetuadas intervenções hiperbáricas para a manutenção da tuneladora. Segundo esta tabela, as paralisações mais prolongadas coincidem com os anéis onde foram realizadas intervenções hiperbáricas de manutenção ou com os locais onde ocorreram problemas na máquina. Além disso, observa-se que alguns trechos que apresentaram taxas de produção mais acentuadas foram precedidos por intervenções hiperbáricas de manutenção, como nos anéis 2221, 2353 e 2454. A Tabela 6 também mostra o número de ferramentas de escavação trocadas no trecho (total de 102), confirmando a abrasividade elevada do material, conforme descrito por Monteiro & Rocha (2015).

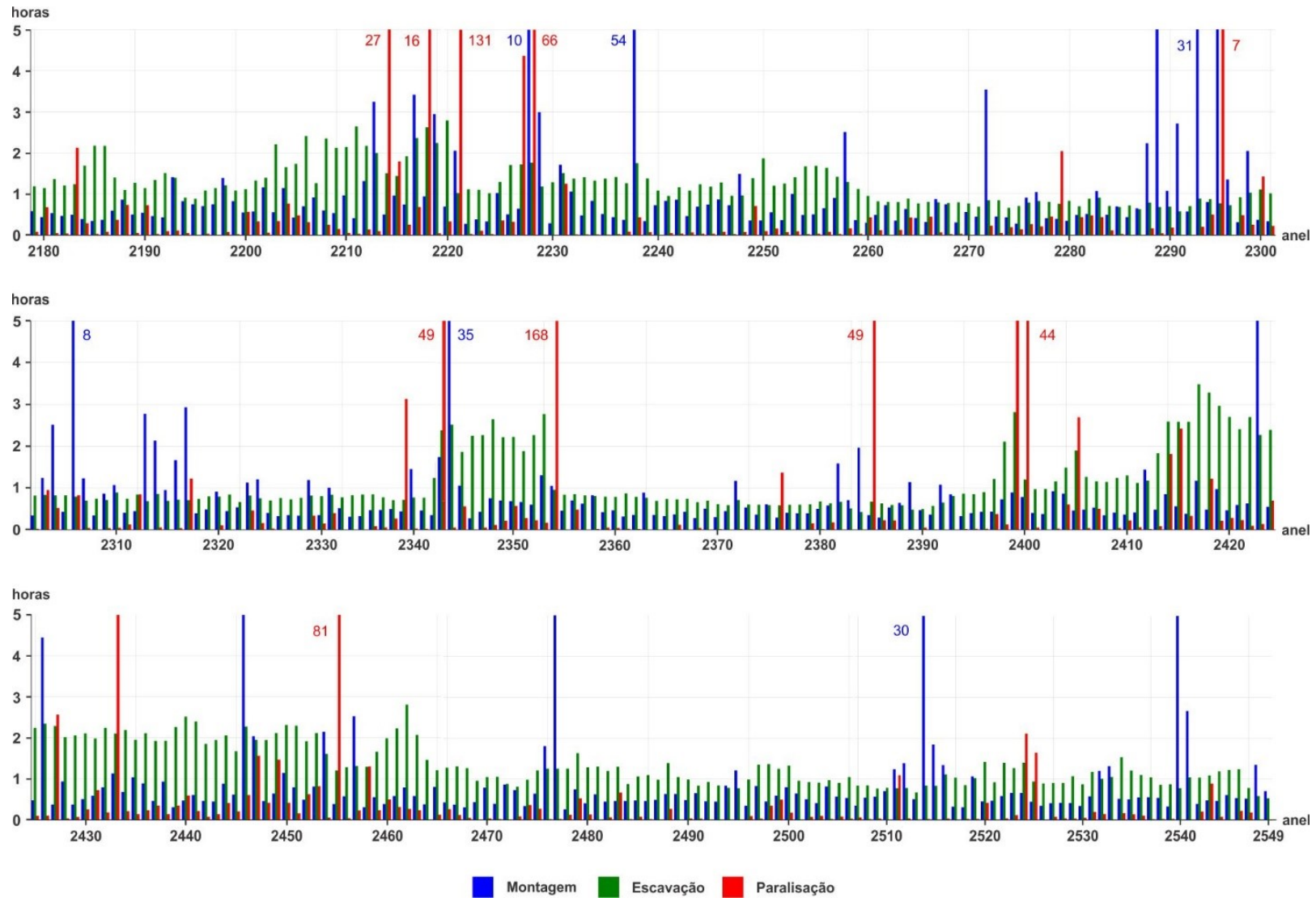


Figura 34. Gráfico de produção em horas entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. O tempo total em horas das etapas de maior duração está indicado ao lado das barras.

**Tabela 6.** Principais ocorrências construtivas registradas no trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel segundo os RDOs.

Anel	Pressão de intervenção (bar)	Tempo (h)	Atividades
2221	2,7	131	Troca de 35 discos de corte, 1 <i>ripper</i> e 1 <i>scraper</i> . Limpeza da cabeça de corte.
2228	-	80	Manutenção geral. Limpeza das linhas de injeção de <i>grout</i> . Paralisação devido à problemas na bomba dos cilindros de propulsão.
2344	2,4	84	Troca de 7 discos de corte. Injeção de polímero.
2353	2,5	168	Troca de 14 discos de corte e 1 <i>ripper</i> . Limpeza da cabeça de corte. Manutenção geral. Paralisação interrompida devido ao deslocamento de material.
2384	-	49	Emenda da correia transportadora. Limpeza da cabeça de corte e manutenção geral.
2399	2,3	44	Troca de 2 discos de corte. Limpeza da cabeça de corte. Limpeza das linhas de injeção de espuma. Injeção de 30 m <sup>3</sup> de bentonita. Injeção de polímero.
2454	2,3	81	Troca de 10 discos de corte, 21 <i>rippers</i> e 10 <i>scrapers</i> . Limpeza da cabeça de corte. Injeção de polímero.

### 6.2.2. Rotação da cabeça de corte, Velocidade de avanço e Taxa de penetração

Segundo a Figura 35, a velocidade de rotação da cabeça de corte ( $R_{cc}$ ) oscilou entre 1,8 e 2,6 rpm para todo o trecho analisado. Para os trechos entre os anéis 2179-2342 (164) e 2518-2549 (32) foram adotados os maiores valores (2,4-2,5 rpm), enquanto que para o trecho entre os anéis 2391-2427 (37) foram adotados valores menores de  $R_{cc}$  (2,1 rpm). Os demais trechos foram escavados com  $R_{cc}$  de aproximadamente 2,3 rpm. Portanto, a  $R_{cc}$  no trecho apresentou variação limitada (2,1-2,5 rpm) visando a preservar as ferramentas de corte.

A velocidade de avanço ( $V_a$ ) variou de 7-57 mm/min e a taxa de penetração ( $T_p$ ) variou de 4-24 mm/rev (Figura 35). Estes parâmetros mostram-se em relação direta ao longo de todo o trecho e ambos apresentam relação inversa com o tempo de escavação. Os trechos onde foram registrados os menores valores de velocidade de avanço e taxa de penetração coincidem com aqueles onde foram registrados os maiores tempos de escavação: a) 2183-2188 (6), b) 2201-2261 (61), c) 2341-2354 (14) e d) 2395-2467 (73). Os valores mais elevados de velocidade de avanço e taxa

de penetração foram registrados entre os anéis 2261-2341 (81) e 2354-2395 (42), com 32 mm/min e 12 mm/rev, respectivamente.

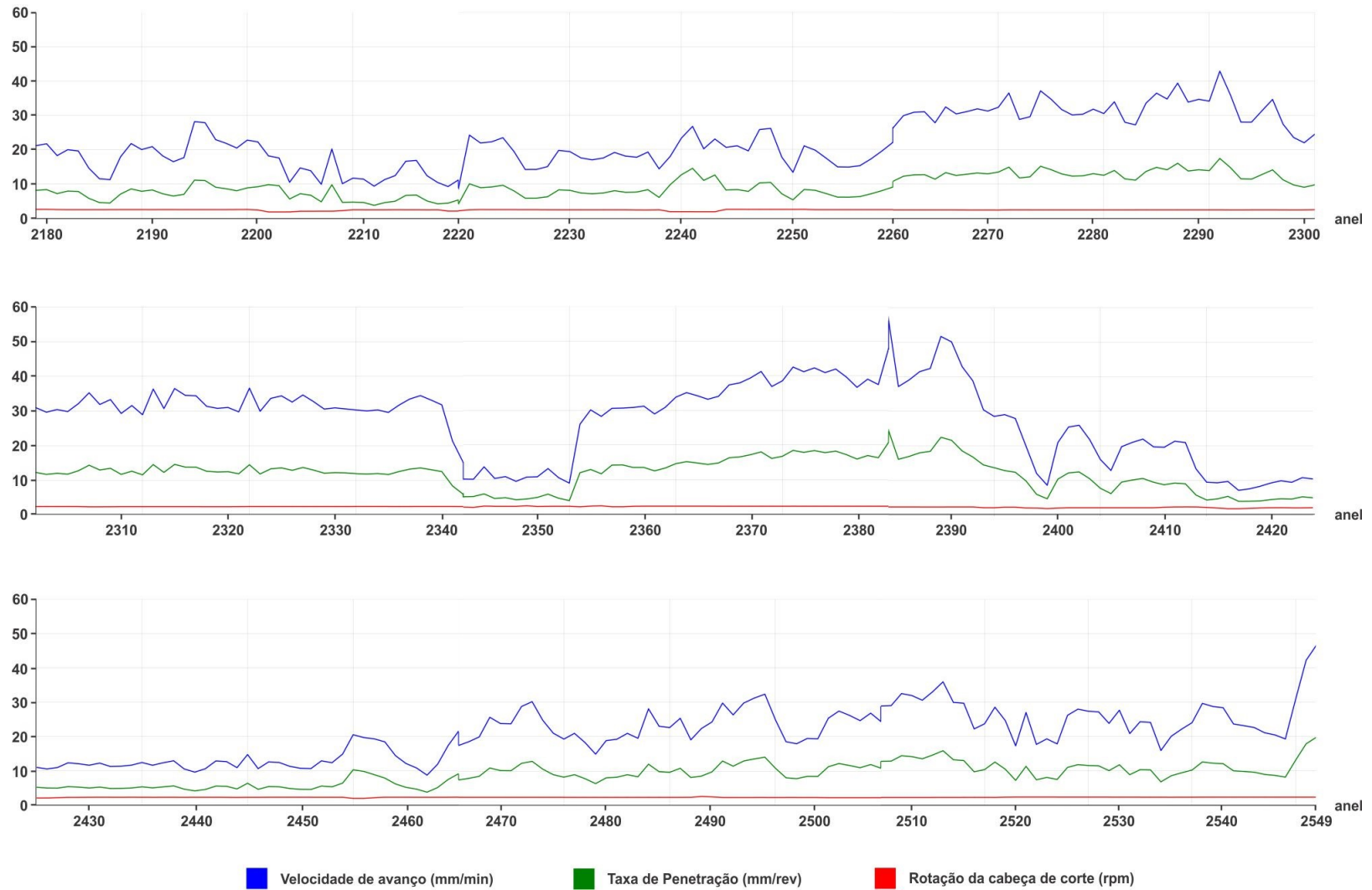


Figura 35. Velocidade de avanço (mm/min), taxa de penetração (mm/rev) e rotação da cabeça de corte (rpm) para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

### 6.2.3. Pressão de suporte

A Figura 36 mostra a distribuição dos seis sensores de pressão instalados na parede que separa a câmara de escavação do restante da máquina. Portanto, segundo esta figura, a sequência de valores de pressão em condições normais seria  $S1 < S6 < S2 < S5 < S4 < S3$ , aumentando progressivamente do topo para a base. Os valores de referência de projeto para o sensor superior (S1), no trecho estudado varia de 1,5 a 2,7 bar. Este sensor é utilizado como referência para o controle das deformações do solo e estabilidade da frente de escavação.

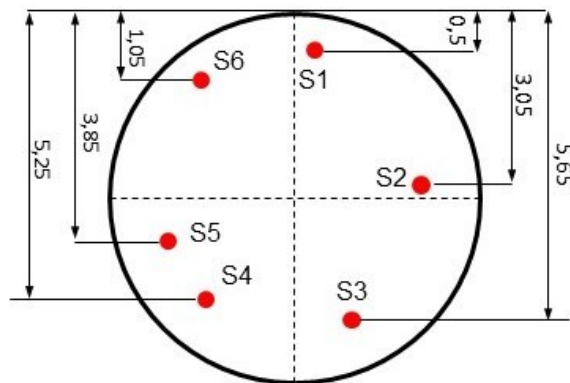


Figura 36. Ilustração da distribuição dos sensores de pressão de terra na câmara de escavação.

Conforme mostra a Figura 37, entre os anéis 2179-2183 há um aumento progressivo nos valores de pressão, devido a saída da Estação Campo Belo. Segundo esta figura, ao longo de todo trecho escavado, o sensor de pressão S1 registrou valores de pressão entre 1,6 e 2,5 bar. Os valores registrados por todos os sensores tendem a acompanhar as variações da cobertura de solo sobre a coroa do túnel. Ou seja, os maiores valores de pressão estão associados às coberturas mais espessas, enquanto que os menores valores de pressão, o oposto.

As pressões de suporte mostram certo paralelismo entre as curvas, não havendo variações bruscas que indiquem ruptura do solo ou escape de material para a superfície (despressurização). No entanto, algumas curvas mostram-se invertidas. Por exemplo, no trecho entre os anéis 2248-2265 o sensor S5 registra os maiores valores de pressão entre todos os sensores. Estes valores anômalos estão relacionados à aderência de material na superfície do sensor ou a sua descalibração. Outro efeito que pode afetar os valores de pressão dos sensores é o sentido de

rotação da cabeça de corte. Adicionalmente, segundo Rafie & Skelhorn (2012), os valores registrados nos sensores de pressão da porção inferior também tendem a apresentar maior flutuação, o que se deve ao fato dos mesmos terem maior contato com o material escavado.



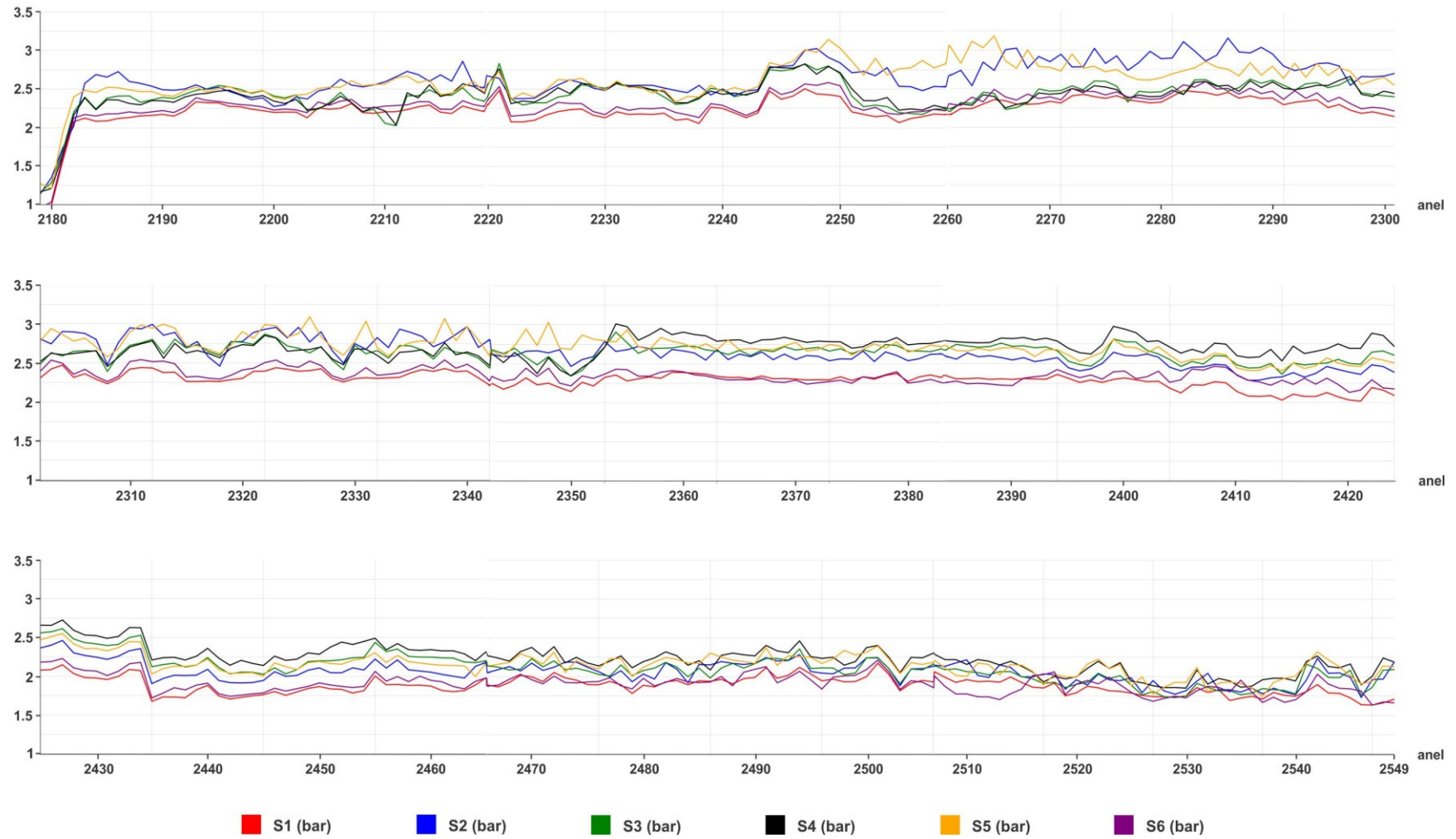


Figura 38. Pressão de suporte de terra para o trecho entre os anéis 2179-2549.

#### 6.2.4. Condicionamento do Solo

A Figura 38 mostra as curvas dos parâmetros de condicionamento do solo. De acordo com esta figura, água livre foi injetada em quantidades variáveis e inferiores a 150 L/min entre os anéis 2179-2256 e 2397-2549. No intervalo entre os anéis 2256-2397 praticamente não se utilizou água livre.

O FER variou no trecho estudado entre 2 e 11. Os trechos onde utilizou-se valores mais elevados são 2251-2289 (FER = 8,5) e 2463-2549 (FER = 7,5) e o trecho que apresentou valores mais reduzidos está compreendido entre os anéis 2398-2463 (FER = 4,0). Nos demais trechos utilizou-se valores intermediários (FER = 6,0-6,5).

Os valores de FIR para o trecho analisado ficaram entre 50 e 280%. Entre os anéis 2179-2265 os valores de FIR oscilaram entre aproximadamente 100 a 200%. Entre os intervalos de anéis 2265-2354 e 2396-2433 o FIR assume valores da ordem de 120%. No intervalo entre os anéis 2354-2396 os valores de FIR são da ordem de 80%. A partir do anel 2433, os valores de FIR decrescem progressivamente de 120 para 50%.

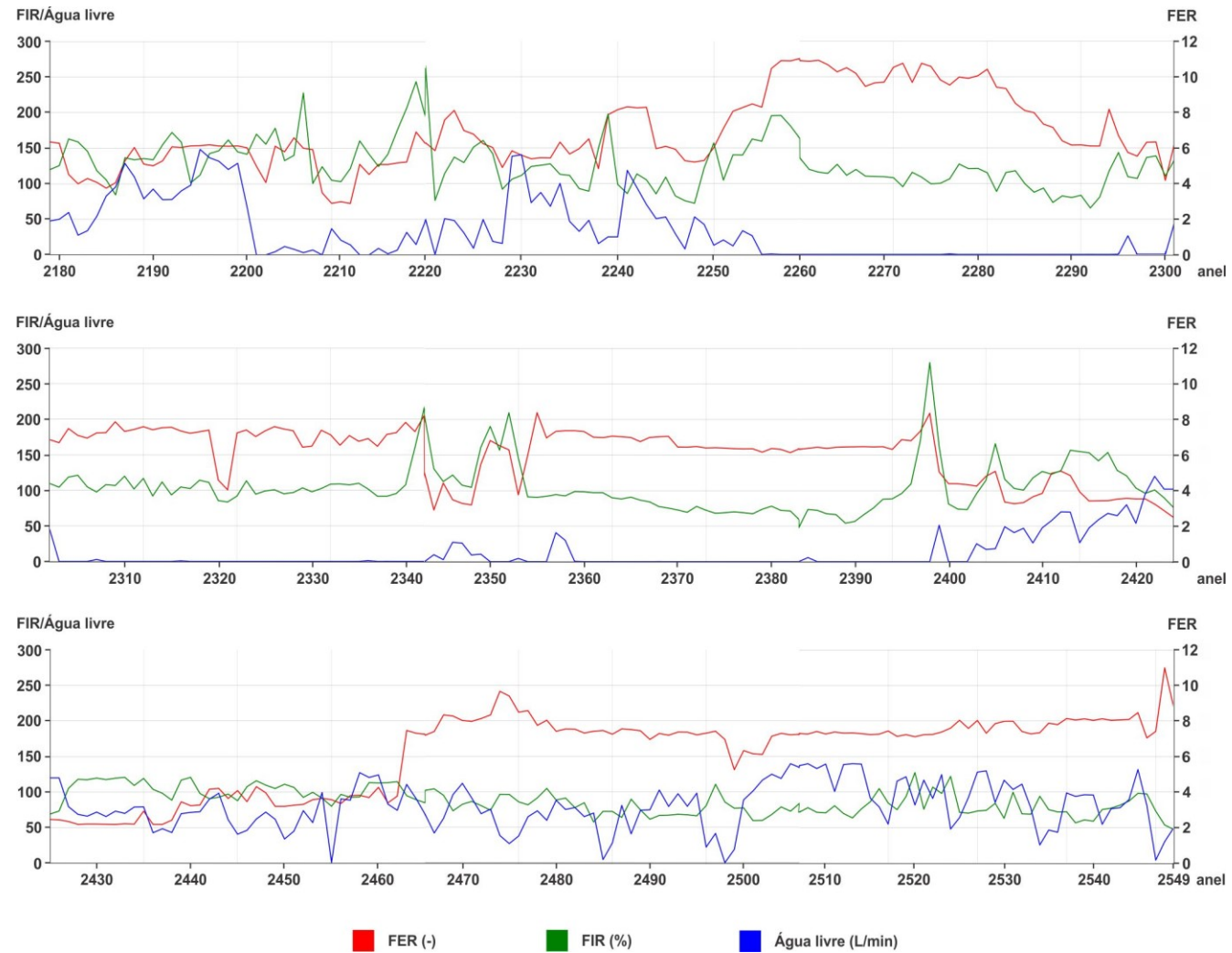


Figura 38. Valores de FIR, FER e de taxa de injeção de água livre para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

### 6.2.5. Torque e Força de contato

A Tabela 7 sintetiza os parâmetros de referência para a interpretação do torque e da força de contato da tuneladora utilizada na escavação do trecho estudado. O torque máximo de operação (torque nominal) é de 3.560 kN.m. No entanto, quando necessário, a tuneladora oferece uma capacidade extra por curto período de tempo, atingindo 4.984 kN.m (torque excepcional). Em situações extremas, pulsos de torque de desbloqueio de até 5.340 kN.m podem ser ativados, porém implica em um maior consumo de energia.

**Tabela 7.** Parâmetros de referência para a interpretação das curvas de torque e de força de contato da tuneladora *Herrenknecht S-789*.

Parâmetros	Valor (kN.m)
Torque Nominal (ou operacional)	3.560 kN.m
Torque Excepcional	4.984 kN.m
Torque de Desbloqueio	5.340 kN.m
Força Máxima	50 x 10 <sup>3</sup> kN

As Figuras 39 e 40 apresentam os valores de torque e força de contato registrados durante a escavação do trecho. Como pode-se notar, estes parâmetros mostram uma correlação direta. Observa-se pela Figura 39 que os valores de torque permaneceram elevados (próximos ao torque nominal) em quase todo o trecho escavado, com exceção dos anéis: 2260-2295 (36), 2305-2335 (31) e 2360-2390 (31). Já os valores de força de contato não ultrapassaram 25.000 kN.

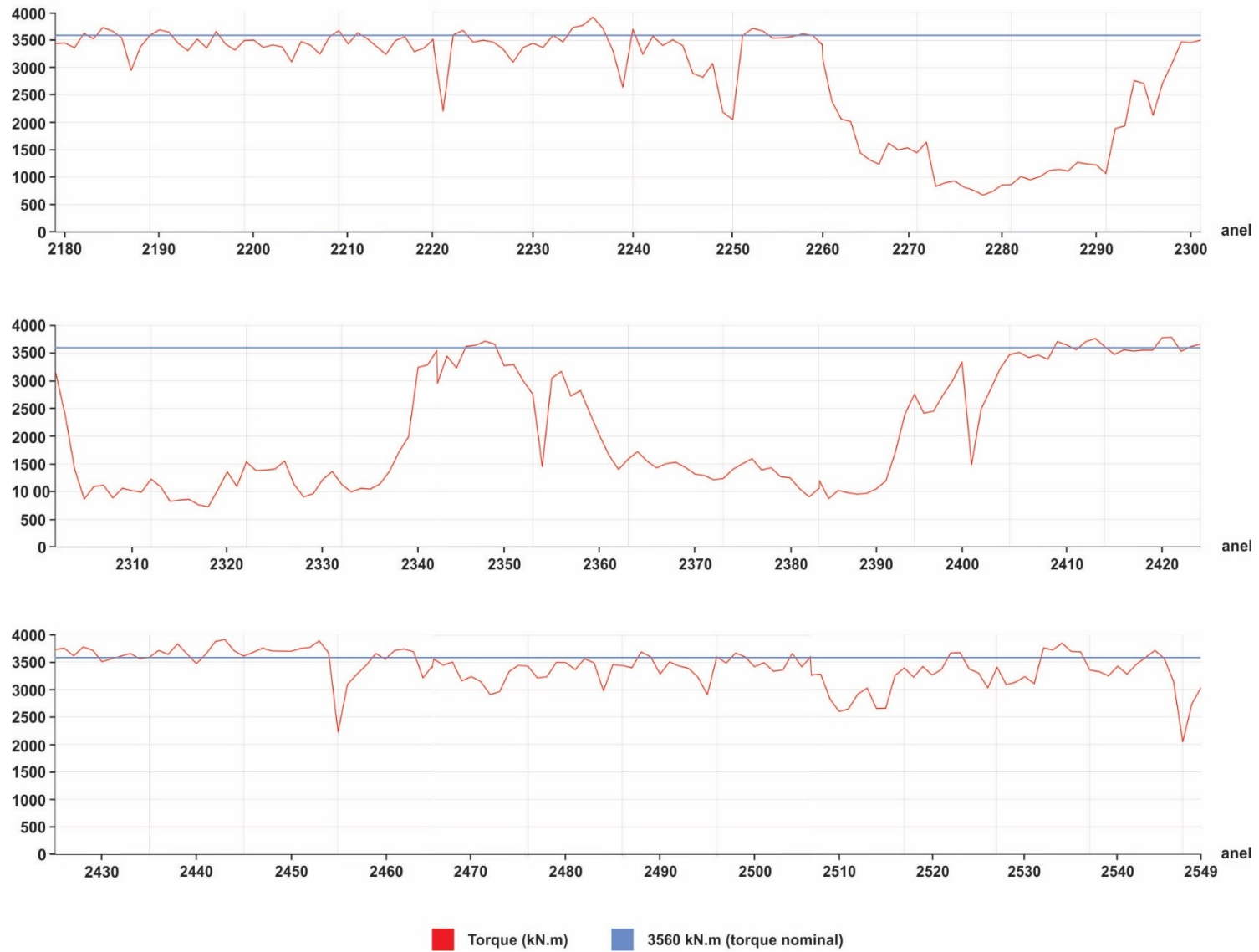


Figura 39. Torque (kN.m) para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

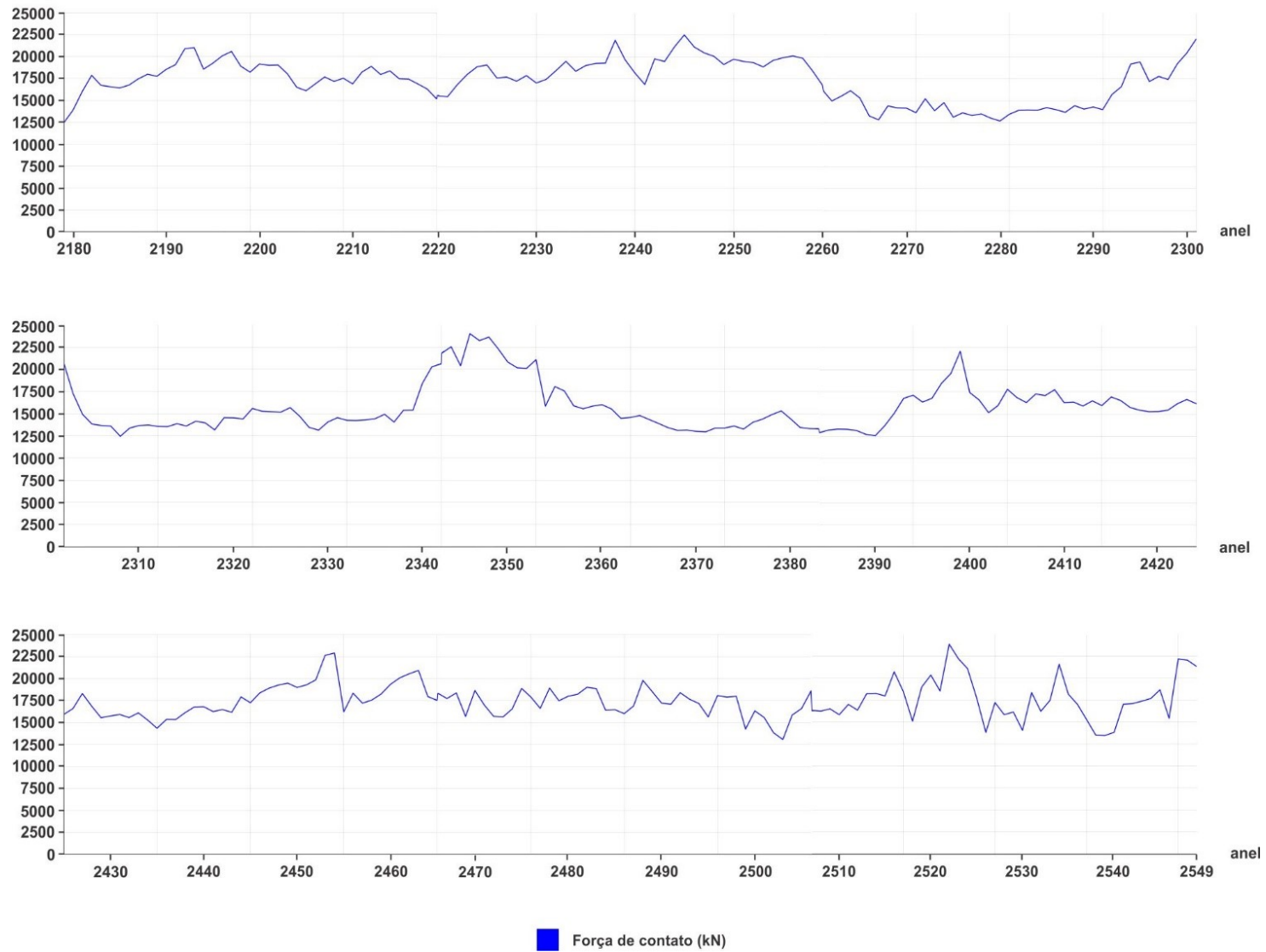


Figura 40. Força de contato (kN) para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

### 6.2.6. Densidade Aparente

O cálculo da densidade aparente é feito a partir dos sensores de pressão instalados na metade superior da câmara de escavação, conforme descrito no subitem 2.3.2. No presente caso, correspondem aos pares de sensores S1-S2 e S6-S5. Estes pares de sensores são utilizados, no intuito de se compreender o efeito do sentido de rotação da cabeça de corte, que pode mascarar os valores de densidade aparente. A densidade natural dos solos residuais e do saprólito no trecho estudado varia entre 18-20 kN/m<sup>3</sup>.

O gráfico da Figura 41 mostra as curvas de densidade aparente determinadas para estes dois pares de sensores. A curva média entre ambas indica que entre os anéis 2244-2387 (144) as densidades aparentes são superiores a 14 kN/m<sup>3</sup>, ao passo que entre os anéis 2387-2549 (163) ocorre o oposto. Isso mostra que o primeiro trecho foi escavado no modo EPB clássico (*closed*) ao passo que o segundo trecho foi escavado no modo semi-EPB (*transition mode*). No trecho entre os anéis 2179-2244 (66) as curvas oscilam. Isso sugere que os modos EPB clássico e semi-EPB foram utilizados de forma alternada.

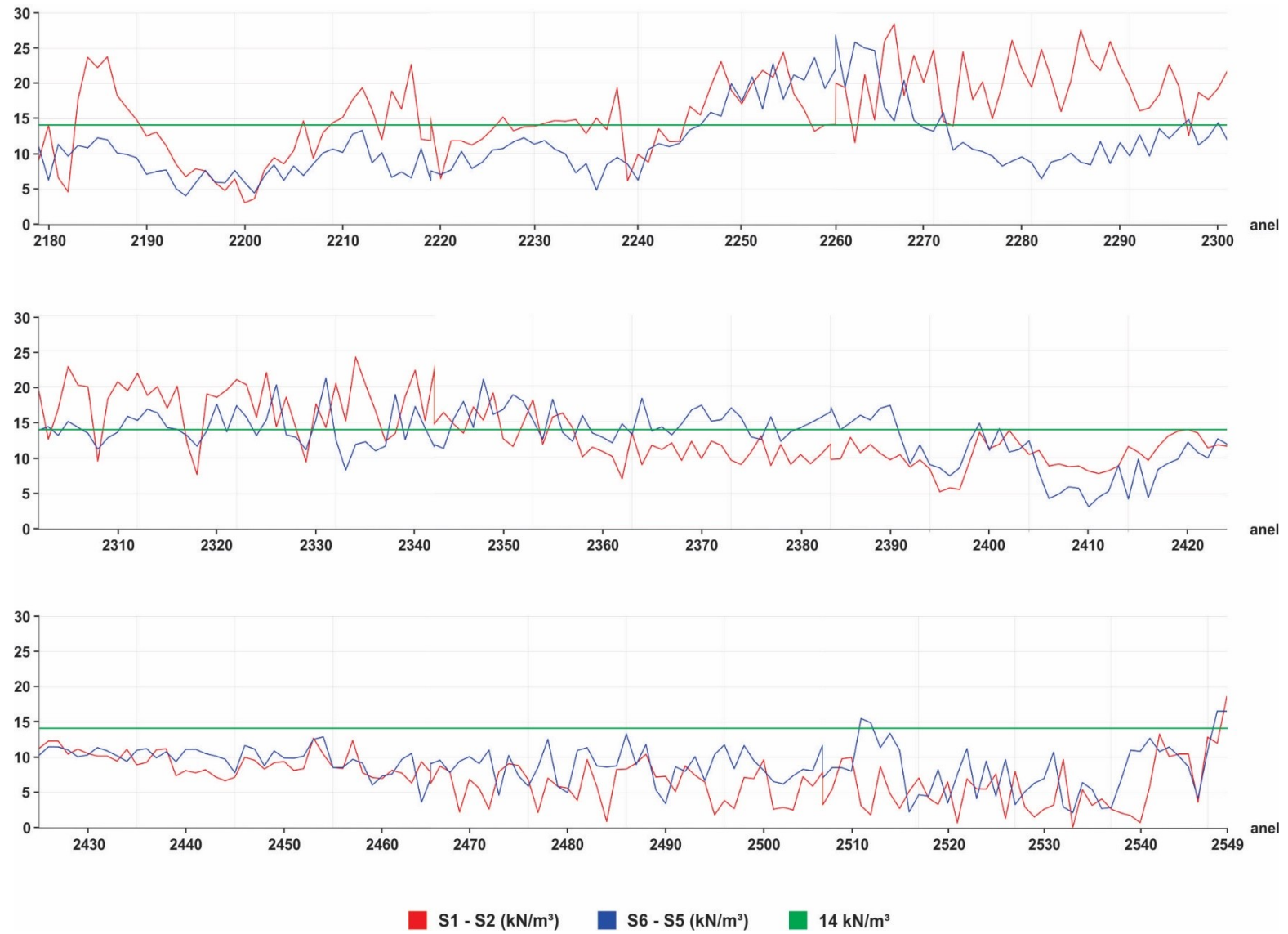


Figura 41. Densidade aparente para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.



### 6.2.7. Energia Específica

A Figura 42 retrata os valores de EE para o trecho estudado. Conforme pode ser visto, os valores variaram entre 16 a 350 MJ/m<sup>3</sup>. Os valores mais elevados de EE foram registrados entre os anéis 2179-2260 (82), 2340-2354 (15) e 2396-2465 (70). Entre os anéis 2179-2260 (82) os valores oscilam e mostram uma tendência progressiva de queda de aproximadamente 170 para 70 MJ/m<sup>3</sup>.

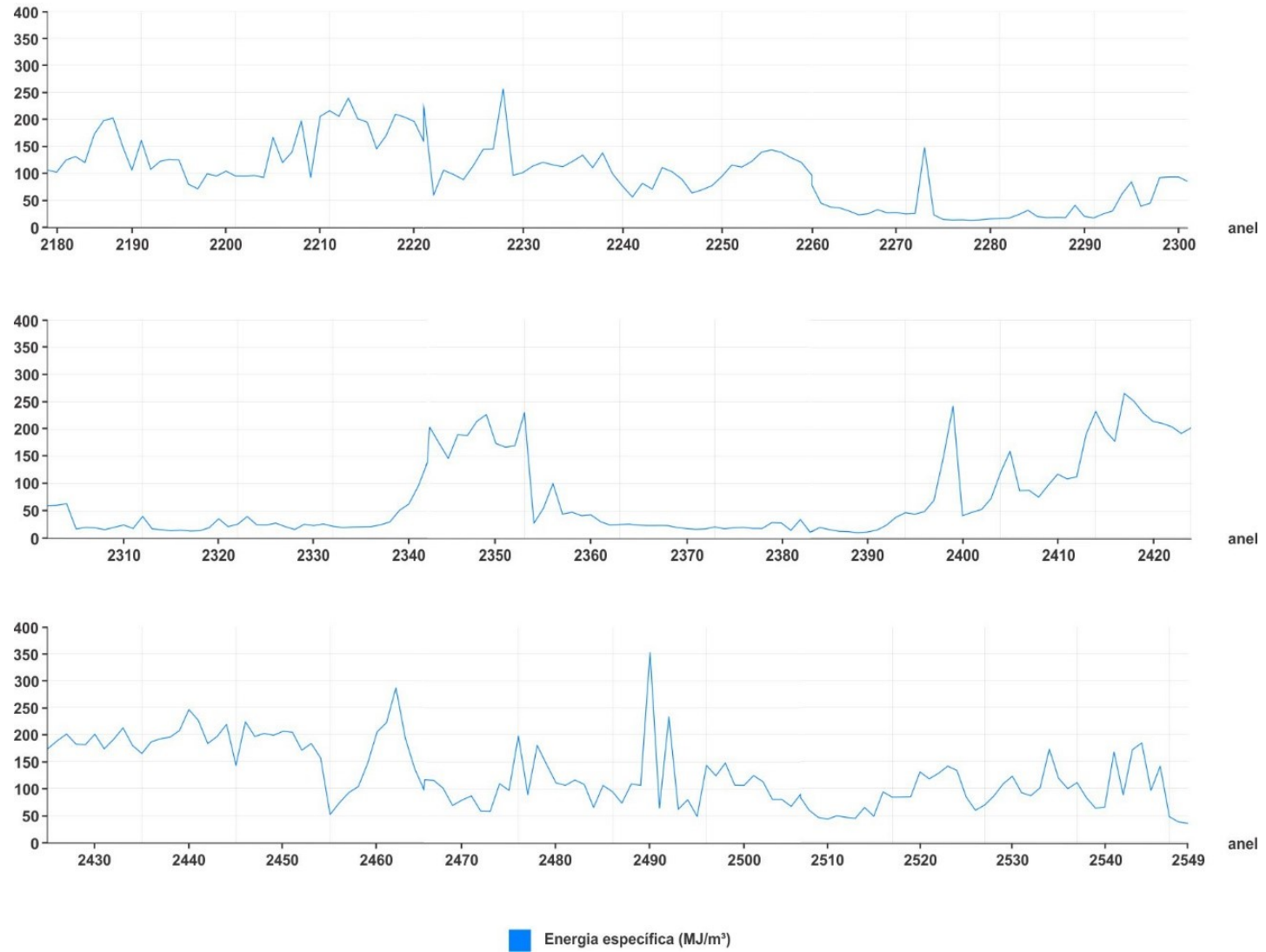


Figura 42. Energia Específica (EE) para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel.

## 7. CORRELAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os parâmetros registrados durante a escavação do trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel, foram agrupados e comparados aos perfis litológico e de valores de SPT. Estes perfis foram combinados em uma única figura, no intuito de facilitar as interpretações.

A Figura 43 correlaciona o perfil litológico e de valores de SPT com os gráficos de velocidade de avanço, taxa de penetração, rotação da cabeça de corte e produção. De acordo com a Figura, a velocidade de rotação da cabeça de corte mostra pouca relação com os dados do perfil, já que foi mantida aproximadamente constante em torno de 2,5 rpm até o anel 2340 e a partir deste, foi ajustada para aproximadamente 2,2-2,3 rpm. Portanto, uma variação de apenas 13,6%.

Segundo a Figura 43, velocidade de avanço e taxa de penetração apresentam correlação direta e ambos mostram correlação inversa com o tempo de escavação dos anéis. Ou seja, quando ambos aumentam, o tempo de escavação por anel reduz e quando diminuem, ocorre o oposto. Conforme esta figura, a velocidade de avanço e a taxa de penetração podem ser classificadas em valores relativos baixo, moderado e alto. Valores baixos ocorrem nos intervalos de anéis 2204-2241, 2340-2357 e 2413-2466, valores moderados ocorrem a partir do anel 2466 e valores altos ocorrem nos intervalos de anéis 2241-2340 e 2357-2413. Segundo os perfis de litologia e de valores de SPT os valores mais baixos se associam a escavação de rocha-saprólito. Valores moderados estão associados predominantemente a escavação de saprólito segundo o perfil de SPT e de solo residual-saprólito-rocha segundo o perfil litológico. Finalmente, valores altos estão relacionados a escavação principalmente de solo residual, segundo o perfil de SPT, e de solo residual e saprólito-rocha, segundo o perfil litológico (Tabela 8). Portanto, de acordo com o perfil de valores de SPT, produtividades mais baixas foram registradas em rocha, moderadas em saprólito e produtividades mais elevadas em solo residual. Destaca-se que os trechos que apresentaram produtividade mais alta, foram precedidos por intervenção hiperbárica para a troca de ferramentas de corte e limpeza da roda de corte.

Os locais onde foram registradas mais ocorrências construtivas, como sobre-escavações, deslocamentos superficiais excessivos<sup>10</sup> e vazamentos em superfície ocorrem entre os anéis 2241-2413 (Figuras 44 e 45). Neste intervalo de anéis, a camada de argila 4Ag1 da Formação Resende, de aproximadamente 4 metros de espessura, coincidentemente, não aparece no perfil litológico.

**Tabela 8.** Produtividade *versus* perfil litológico e de valores de SPT.

Intervalo de anéis	Extensão	Produtividade	Perfil litológico	Perfil de valores de SPT
2204-2241	38 (57 m)	baixa (Va = 12-15 mm/min, Tp = 7-8mm/rev e tempo médio escavação anel = 2 h)	rocha-saprólito	
2340-2357	18 (27 m)			
2413-2466	54 (81 m)			
> 2466	84 (126 m)	moderada (Va = 24 mm/min, Tp = 11 mm/rev e tempo médio escavação anel = 1,2 h)	rocha-saprólito-solo	saprólito > solo residual
2241-2340	100 (150 m)	alta (Va = 34 mm/min, Tp = 13-14 mm/rev e tempo médio escavação anel = 0,8-0,9 h)	solo residual > saprólito	
2357-2413	57 (85,5 m)		saprólito > rocha	solo residual = saprólito

<sup>10</sup> Aqueles que produzem reflexos visíveis em superfície, como rachaduras, abatimentos, etc.

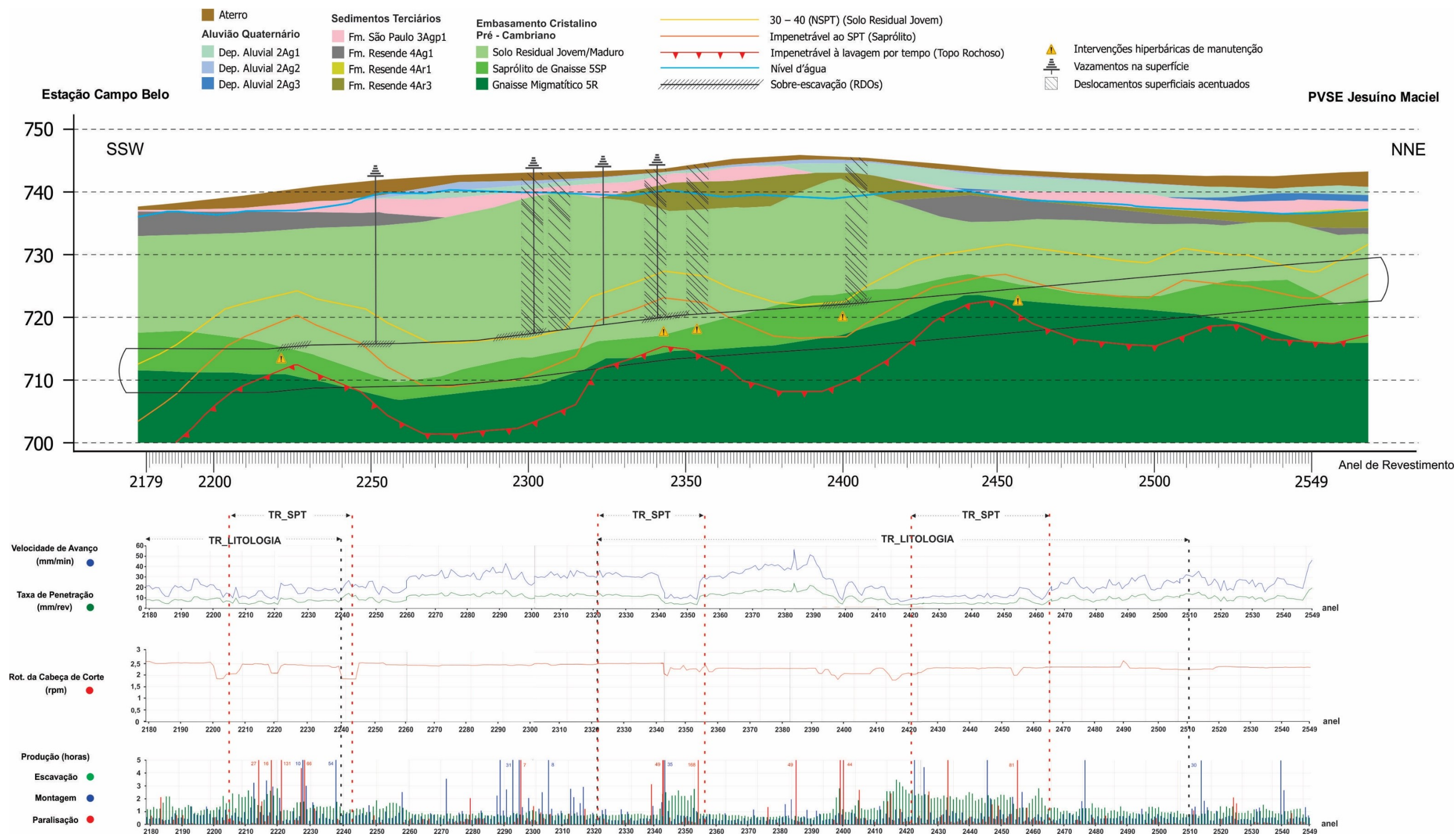


Figura 43. Correlação do perfil litológico e de valores de SPT com os dados de velocidade de avanço, taxa de penetração, rotação da cabeça de corte e produção, com o perfil geológico-geotécnico longitudinal do trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Legenda: TR – trecho com rocha segundo os perfis litológico e de valores de SPT.



Figura 44. Ocorrências em superfície (Av. Santo Amaro): (a) vazamento de espuma/solo na altura do anel 2340; e (b) deformação em superfície provocando rachaduras em muro de alvenaria (anel 2348).

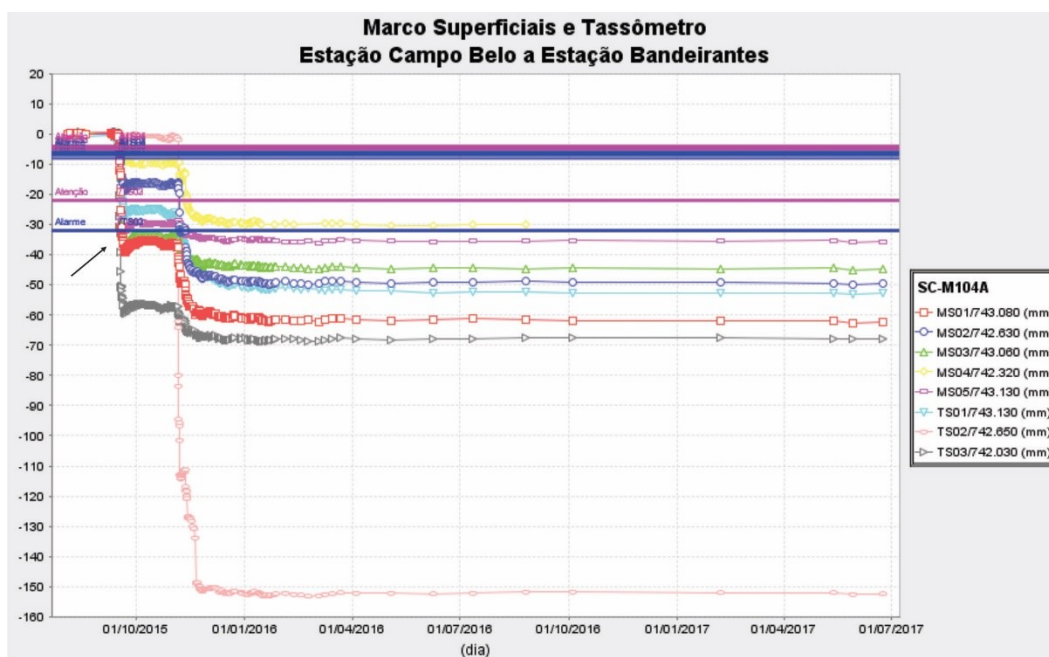


Figura 45. Exemplo de seção instrumentada afetada pela passagem das tuneladoras na altura do anel 2312. O primeiro patamar deve-se a passagem da Via 2 e o segundo patamar a passagem da Via 1. O marco superficial (MS-03) está posicionado imediatamente acima da geratriz superior da Via 2. Fonte: SACI – Sistema para Acompanhamento e Controle de Instrumentação.

A Figura 46 relaciona as curvas de pressão de suporte, densidade aparente e parâmetros de condicionamento do solo com o perfil litológico e de valores de SPT. O padrão serrilhado e irregular das curvas de pressão de suporte em alguns trechos, como por exemplo entre os anéis 2300-2350, pode indicar dificuldades de manutenção da pressão devido ao comportamento do material na câmara. Variações na equidistância das curvas de pressão, como observado no anel 2365, podem indicar a formação de bolha de ar no topo da câmara de escavação. Quedas acentuadas nos sensores basais (S3 e S4), como ocorrido na altura do anel 2210, podem estar associadas ao efeito de sucção do parafuso sem-fim frente ao material denso e mal condicionado na base da câmara. Queda de pressão nos sensores, como a ocorrida no anel 2435, pode estar relacionada a uma diminuição de cobertura e/ou de pressão hidrostática, acompanhada de soerguimento do topo rochoso, ocupando quase que integralmente a seção de escavação, conforme indicado no perfil litológico e de valores de SPT. Elevação nas pressões de suporte dos sensores, como a ocorrida no anel 2245, pode ser devida ao preenchimento da câmara de escavação, como mostra o gráfico de densidade aparente. O aumento de pressão ocorrido na altura do anel 2245, também coincide com vazamentos de espuma em superfície.

Como descrito anteriormente, no modo EPB procura-se sempre manter a densidade aparente na câmara de escavação próximo a 14-15 kN/m<sup>3</sup>, de modo a garantir a efetividade da pressão de suporte, de modo a contrabalancear os empuxos externos. Entretanto, tendo em vista a variabilidade geológica e hidrogeológica na frente da escavação, o condicionamento do solo e, conseqüentemente, a manutenção da densidade aparente, tornam-se tarefas bastante complexas.

Babendererde *et al.* (2005) estudaram a escavação de um trecho de integração do Sistema Metropolitano do Porto (Portugal), onde uma EPB de 8,9 m de diâmetro, sob coberturas variando de 3 a 32 m, atravessou granitos intensamente intemperizados e rocha sã. Condições de grande heterogeneidade geológica e hidrogeológica, marcadas por passagens de rocha sã para solo residual em curtas distâncias, levaram a dificuldades no fornecimento de pressão de suporte, resultando em sobre-escavação e instabilidades na face de escavação, que culminaram em conseqüências fatais.

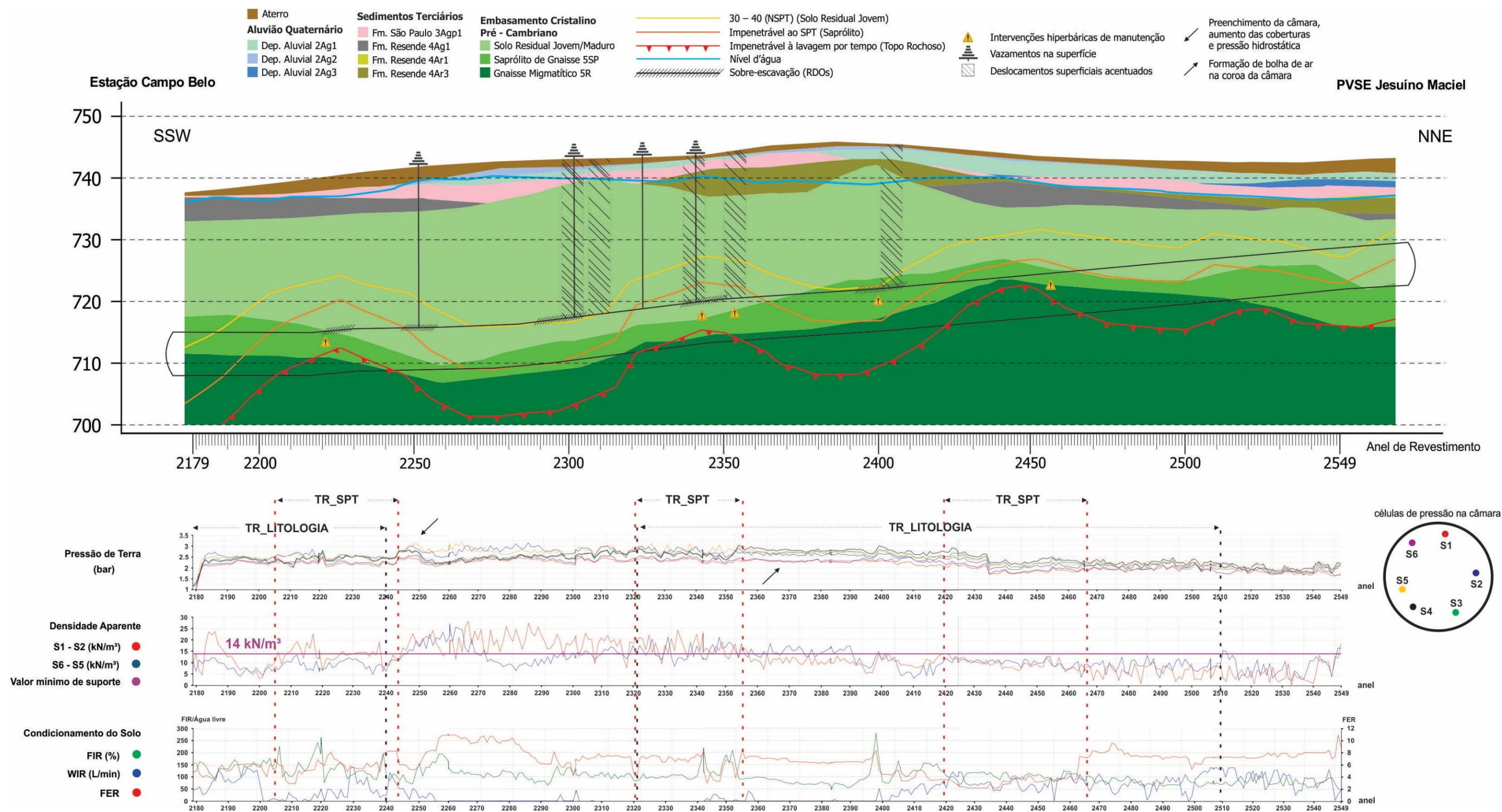


Figura 46. Correlação do perfil litológico e de valores de SPT com os dados de pressão de suporte, densidade aparente e parâmetros do condicionamento do solo para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Legenda: TR – trecho com rocha segundo os perfis litológico e de valores de SPT.



Para os autores, estas condições combinam muitos elementos negativos relacionados ao controle de suporte de frente. A solução para o problema, segundo os autores, foi operar a máquina em modo EPB clássico (fechado) e criar uma membrana impermeável na face através da injeção de lama bentonítica na câmara de escavação.

A escavação da Via 2 no trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel atravessou maciços com diferentes proporções de solos micáceos silto-arenosos saturados, rocha alterada e rocha sã. Estas são condições de escavação similares as descritas por Babendererde *et al.* (2005). De acordo com a Figura 46, cerca de 70% de todo o trecho (anéis 2179-2244 e > 2387) foi escavado com valores de densidade aparente abaixo do limite mínimo de referência. As faces com rocha na seção foram escavadas utilizando-se FIR  $\geq 100\%$  (máx. 250%), FER de 5 a 8 e água livre > 100 L/min. Durante sua escavação, o maior volume de espuma e água injetadas resultam na segregação da fração sólida (mais densa) no fundo da câmara e formação de bolha de ar na coroa da câmara (PEIXOTO DA SILVA *et al.*, 2016). Portanto, nestes trechos, a máquina foi operada em modo de transição (semi-EPB). Por outro lado, na escavação do saprólito e solo residual, devido a maior permeabilidade e presença de água, foi utilizado menor volume de espuma (FIR de 50% a 100%), sendo esta mais seca, com FER variando entre 10 e 12, sem injeção de água livre, como mostram os gráficos de condicionamento a partir dos anéis 2250 e 2460.

Comulada *et al.* (2016) relatam que as faces mistas (solo-rocha) no Lote 3 da Linha 5 – Lilás foram escavadas em modo de transição (semi-EPB), devido aos seguintes fatores: (a) pouca plasticidade e elevado peso específico do material, dificultando sua remoção e gerando elevado desgaste secundário, intensificado pela abrasividade do gnaiss; (b) alta resistência do gnaiss limitou a taxa de penetração, intensificando o desgaste secundário; (c) a transição entre saprólito e rocha dura gerou impactos mecânicos, danificando e achatando os discos de corte; e (d) a fim de se evitar sobrecarga nos discos de corte, a força de contato foi controlada, o que impactou a velocidade de avanço.

Recentemente, Wang *et al.* (2020) estudaram um trecho de aproximadamente 1 km do túnel da Linha R2 do metrô de Jinan (China), onde uma máquina EPB com diâmetro de 6,68 m e taxa de abertura da cabeça de corte de 40% atravessou um diorito apresentando diferentes níveis de alteração química. O trecho foi escavado

sob coberturas de 9-17 metros com nível d'água próximo da superfície e coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) de aproximadamente  $10^{-5}$  m/s. Para melhorar o desempenho da escavação em faces mistas, a máquina foi operada em modo de transição. No entanto, baixas pressões exercidas na parte superior da câmara resultaram em infiltração de água, tornando o material mais fluido, inibindo sua função de suporte. Considerando a influência do nível da água dentro da câmara, o tempo de escavação, o coeficiente de permeabilidade do maciço e o nível do lençol freático, os autores propuseram duas medidas preventivas: i) restringir o tempo de escavação para menos de duas (2) horas por anel; e ii) manter a câmara de escavação parcialmente preenchida (2/3 da sua capacidade) com material escavado, caso a velocidade de avanço não possa ser elevada.

A Figura 47 relaciona os parâmetros torque, força de contato e energia específica com o perfil litológico e de valores de SPT. Conforme a figura, torque e força de contato apresentam boa correlação. A força de contato ao longo de todo o trecho estudado, foi de apenas 50% da força máxima instalada (50.000 kN). O torque permaneceu abaixo do valor de referência apenas nos intervalos de anéis 2260-2292 (33), 2307-2339 (33) e 2357-2393 (37). Segundo o perfil litológico, foram escavados nestes intervalos de anéis solo residual > saprólito, solo residual-saprólito-rocha e saprólito > rocha, respectivamente. Segundo o perfil de valores de SPT foram escavados nestes mesmos trechos solo residual, solo residual-saprólito-rocha e saprólito-solo, respectivamente. Isso revela que os locais onde foram registrados os menores valores de torque não coincidem com os locais onde a rocha encontra-se mais bem exposta na seção de escavação. Nos demais locais, o torque manteve-se muito próximo ou acima do valor de referência. Situação semelhante foi relatada por Shirlaw *et al.*, (2016<sub>b</sub>).

Shi *et al.* (2011) afirmam que o torque total de tuneladoras EPB é controlado pelos seguintes fatores: a) atrito; b) abertura da cabeça de corte, sendo que quanto maior a taxa de abertura, menor o torque; c) coberturas. As cargas exercidas pela cobertura de solo e estruturas civis na superfície, como edificações, comprimem as partículas do solo aumentando o atrito interno entre os grãos. Assim, para solos inconsolidados, existe uma relação direta entre a cobertura e a capacidade de giro da roda de corte; e d) condicionamento do solo.

Diversos autores apresentaram modelos (físicos e empíricos) para estimar o torque de máquinas EPB (REILLY, 1999; KRAUSE, 1987; HITACHI- ZOSEN, 2010;

SHI *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2012; GODINEZ *et al.*, 2015). Reilly (1999) mostrou como o torque se relaciona com o diâmetro da máquina por meio de um coeficiente empírico ( $\alpha$ ), ilustrado na Figura 48. Segundo esta figura, para uma tuneladora com diâmetro de 7 m, o torque deveria estar entre 3.481 e 8.740 kN.m. Portanto, o torque nominal da tuneladora utilizada na escavação da Via 2, encontra-se muito próximo do limite inferior estabelecido por Reilly (1999), o que explicaria os valores elevados registrados em quase todo o trecho estudado.

Ainda segundo a Figura 47, o gráfico de energia específica (EE) mostra baixos valores relativos ( $\sim 25 \text{ MJ/m}^3$ ) entre os anéis 2260-2340 (81) e 2356-2403 (48), valores moderados ( $\sim 90 \text{ MJ/m}^3$ ) entre os anéis 2290-2308 (19) e 2457-2549 (93) e altos valores relativos ( $\sim 180 \text{ MJ/m}^3$ ) entre os anéis 2179-2260 (82), 2340-2357 (18) e 2404-2457 (54). Segundo o perfil litológico e o perfil SPT, os maiores valores de EE estão associados à presença de rocha na seção de escavação, enquanto os menores valores, estão relacionados à solo residual > saprólito. Valores moderados de EE ocorrem a partir do anel 2457. O perfil litológico indica solo residual-saprólito-rocha neste trecho ao passo que o perfil de SPT mostra saprólito > solo residual. Com base no perfil de valores de SPT, constata-se, portanto, que os maiores valores de EE estão associados a rocha, valores intermediários à saprólito e valores baixos à solo residual.

Maidl *et al.* (2012) descrevem que o melhor desempenho em solos residuais é explicado pela sua distribuição granulométrica. A natureza mais granular do saprólito requer maior energia específica, resultando em uma menor produtividade.

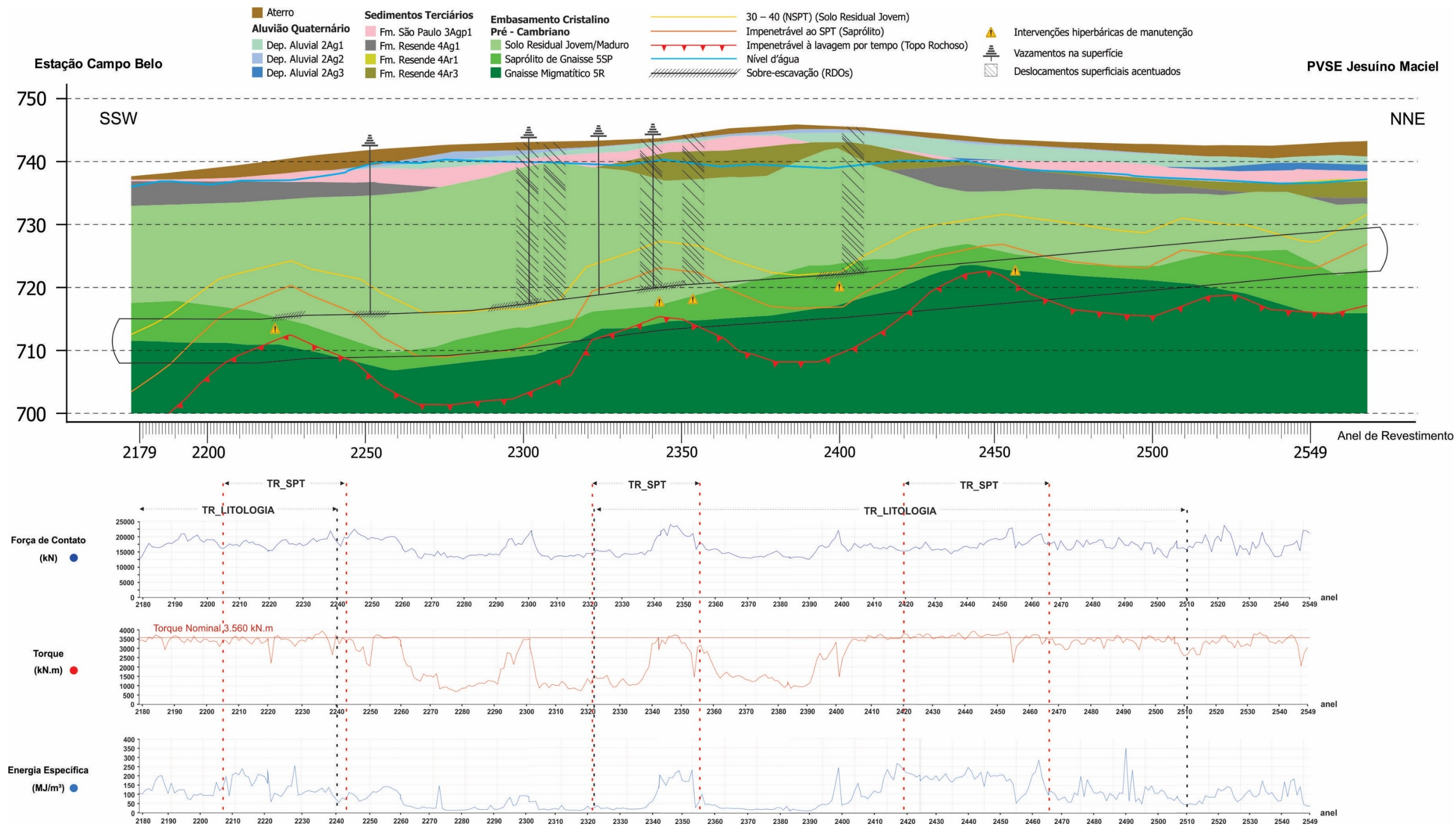


Figura 47. Correlação do perfil litológico e de valores de SPT com os parâmetros força de contato, torque e energia específica para o trecho entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel. Legenda: TR – trecho com rocha segundo os perfis litológico e de valores de SPT.

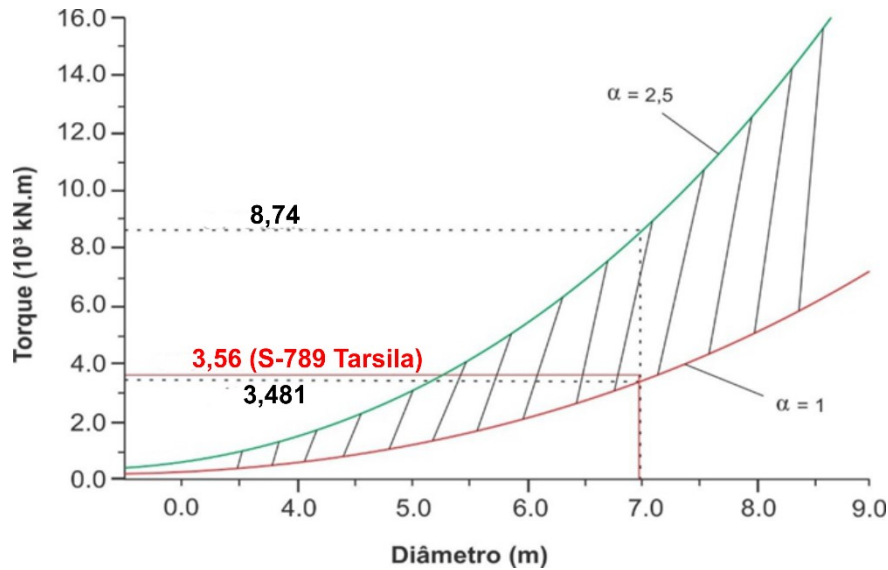


Figura 48. Relação entre torque e diâmetro para tuneladoras EPB. Fonte: Shi *et al.* (2011) modificado.

A Figura 49 compara valores instantâneos de torque, força de contato, energia específica, taxa de penetração e velocidade de avanço para os anéis 2274, 2520, 2342 e 2442. Os dois primeiros (2274 e 2520), estão associados a seções de escavação compostas majoritariamente por solo residual e saprólito, respectivamente. Os dois últimos (2342 e 2442), a seções de escavação contendo proporções distintas de rocha.

Conforme esta figura, o anel 2520, escavado predominantemente em saprólito, apresenta valores mais irregulares para todos os parâmetros analisados, quando comparado ao anel 2274, escavado em solo residual. Observa-se também, que mesmo com uma força de contato mais elevada, os valores de produção ( $T_p$  e  $V_a$ ) foram cerca de 1,7 a 1,8 vezes menores que os valores observados para o anel 2274. Adicionalmente, a EE para o anel 2520 foi cerca de 6 vezes maior que para o anel 2274. Finalmente, o anel 2520 também mostra valores instantâneos de torque acima do limite operacional instalado, mesmo com valores de cobertura mais baixos.

Os gráficos dos anéis 2342 e 2442 mostram valores de torque similares (diferença < 15%). O anel 2342 mostra valores ligeiramente maiores de  $T_p$  e  $V_a$ , justificados por valores médios de  $F_c$  maiores. Contudo, o anel 2442, revela um gasto médio de EE, 34% maior que para o anel 2342. Ambos os anéis também mostram valores de torque elevados ( $\sim 3.500$  kN.m).

A velocidade de avanço é elevada com o aumento da força de contato até que determinado valor crítico de torque seja alcançado. Dessa forma, a velocidade de

avanço pode ser limitada pelo torque instalado. De acordo com Mori (2016), o torque é determinado, principalmente, pelos seguintes fatores: a) resistência ao cisalhamento do solo natural e condicionado; b) atrito entre as partes móveis da máquina e o solo; c) pressão na câmara; e d) o impulso aplicado à face. Solos mal condicionados e materiais com alta densidade aparente, implicam em um maior atrito e em valores mais elevados de torque (RAFIE & SKELHORN, 2012). O condicionamento do material escavado reduz o atrito e a resistência ao cisalhamento do solo natural, melhorando as condições para o avanço da máquina. De acordo com Vinai *et al.* (2007), o condicionamento adequado do solo pode reduzir o torque em até 25% durante a escavação.

Shirlaw (2016) analisou os parâmetros de escavação e desgaste de ferramentas de corte de uma tuneladora EPB (com diâmetro de 9,23 metros e taxa de abertura da cabeça de corte de 33%) em faces mistas compostas de solo e rocha ígnea alterada. O autor demonstrou que quando há mais de 15% de rocha na face, a velocidade de avanço da máquina operada em modo EPB clássico é consideravelmente reduzida, atingindo desempenho mínimo quando a rocha ocupa entre 85 e 95% da face.

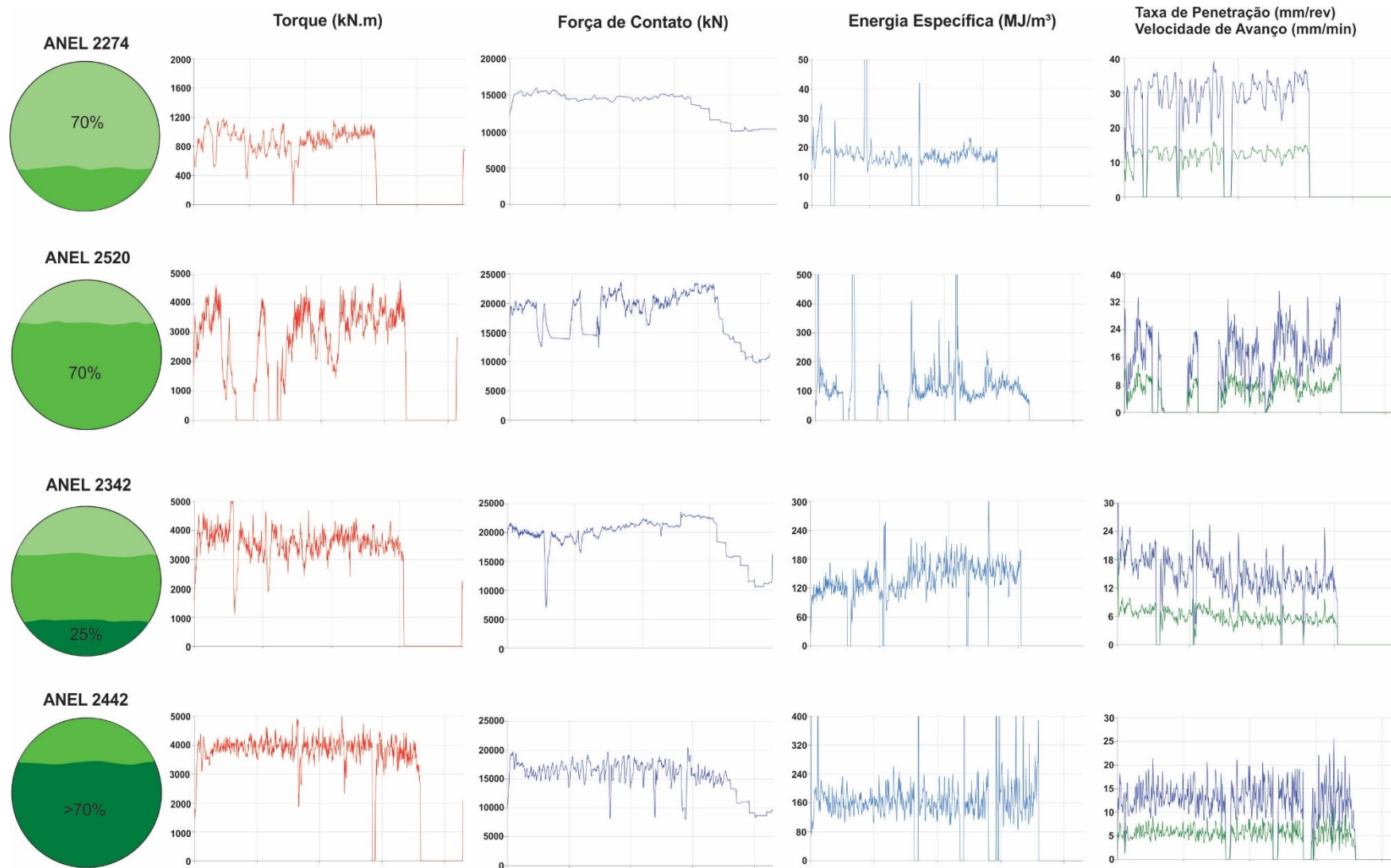


Figura 49. Valores instantâneos de torque, força de contato, energia específica, taxa de penetração e velocidade de avanço para alguns anéis escavados com diferentes proporções de solo residual, saprólito e rocha, segundo os perfis litológico e de valores de SPT.

## 8. CONCLUSÕES

O objetivo do presente estudo foi o de analisar e comparar os dados de sondagens com alguns parâmetros de escavação da Via 2, no trecho compreendido entre a estação Campo Belo e o PVSE Jesuíno Maciel da Linha 5 (Lote 3) do metrô de São Paulo.

O trecho escavado representa a primeira experiência de escavação em frente mista do Lote 3. Considerou-se como frente mista no presente estudo, seções de escavação que possuem rocha e material terroso. Estas representam, segundo o perfil litológico, aproximadamente 70% do trecho escavado. Estes trechos, segundo os gráficos de densidade aparente, foram escavados no modo semi-EPB.

O trecho estudado, atravessa gnaisses pré-cambrianos, saprólitos e solos residuais siltosos micáceos (com valores de SPT > 30 golpes) em diferentes proporções. A interceptação de frente mista, trouxe diversos impactos negativos na escavação, em consonância ao que é descrito em outros projetos, como aderência de material na roda de corte, desgaste de ferramentas de corte, vazamentos de espuma em superfície, recalques excessivos, intervenções hiperbáricas prolongadas e frequentes, sobre-escavações, etc. Observou-se, que estas ocorrências construtivas, incidem em um trecho da escavação no qual a camada de argila terciária 4Ag1 da Formação Resende não aparece no perfil litológico.

A produção média global do trecho foi de 7,7 m/dia, similar ao registrado por outros autores. As maiores taxas de produção, foram precedidas por intervenções hiperbáricas de manutenção, e estão associadas à escavação de faces com predominância de solos residuais, enquanto que as menores taxas de produção estão associadas à escavação de frente mista. Produtividades intermediárias, associam-se a escavação de saprólito.

Observou-se também, que os locais com produtividade relativa mais acentuada exibem baixa energia específica e que o aumento na proporção de rocha na seção de escavação, implica em um aumento na energia específica. Portanto, a energia específica é um bom indicador do tipo de material escavado.

Os resultados mostraram que o perfil de valores de SPT possui melhor correlação com os parâmetros energia específica, velocidade de avanço, taxa de penetração e tempo de escavação por anel que o perfil litológico, o que evidencia a importância de ambos para o entendimento dos parâmetros de escavação.



Por fim, os resultados também mostram que o torque nominal instalado no equipamento pode ter sido insuficiente para a escavação do trecho, exigindo um maior esforço para o condicionamento do solo e impactando a produtividade da escavação.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, G. *Túneis escavados em solo por máquina tuneladora: conceituação, comportamento do maciço e modelagem numérica*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017, 148p.
- AGUIAR, G.; PEIXOTO DA SILVA, M.A.A.; KATAYAMA, L.; ROCHA, H. C. *Acompanhamento técnico de tuneladora EPB: avaliação dos parâmetros operacionais da máquina*. Congresso Brasileiro de Túneis, 4, São Paulo, 2017.
- ALMEIDA, F.F.M.; AMARAL, G.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K. *The Pre-Cambrian Evolution of the South American cratonic margin south of Amazon River*. In: NAIRN, A.E.; STEHLI, F.G. *The Ocean Basins and Margins*. New York, Plenum publ., 1973, 1:411-446.
- ANON. *GeoGuide3: Guide to rock and soil descriptions*. Geotechnical Control Office, Government Printer, Hong Kong, 1988.
- ANON. *British Standard BS 5930:1999, Code of practice for site investigations*. British Standards Institution.1999.
- BABENDERERDE, S. *Tunnelling machines in soft ground: a comparison of slurry and EPB shield systems*. Tunnelling and Underground Space Technology (6) Issue 2, 1991, p. 169-174.
- BABENDERERDE, S.; HOEK, E.; MARINOS, P.G.; CARDOSO, A.S. *EPB-TBM face support control in the Metro do Porto Project, Portugal*. Proceedings of the Rapid Excavation & Tunneling Conference, Seattle, 2005, p. 1-12.
- BARLA, G.; PELIZZA, S. *TBM tunnelling in difficult ground conditions*. In: GeoEng2000 – An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering. Melbourne, Australia, 2000, p. 20.
- BIENIAWSKI, R.; CELADA, B.; TARDAGUILA, I. *Selección de tuneladoras para macizos rochosos com frentes estables*. Ingeopress, 2009, 181:16-22.
- BÜCHI, ET. *New TBM generation with 20' cutters: tunnelling experience at Klippen Hydropower Sweden*. In: TBM symposium 1992, Stockholm; 1992.
- BUDACH, C. *Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigem Lockergestein* (Transl.: *Investigations for extended use of EPBShields in coarse-grained soils*). Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2012.
- BUDACH, C.; THEWES, M. *Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research*. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 50, 2015, p. 296-304.
- CAMPOSINHOS, R.P. *Acompanhamento e Controlo de Tuneladoras EPB. Caso de Obra: Metro de Turim - Lote 2*. Portugal, 2008, 19p.

CARDU, M; ORESTE, P. *Tunneling in urban areas by EPB machines: technical evaluation of the system*. Earth Science Research Journal. Vol. 15, nº 1 (July, 2011): 5-11.

CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; DANTAS, A.S.L. *Contribuição ao estudo da litoestratigrafia do Grupo São Roque na Faixa Jaraguá-Cristais, SP*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, Anais, 1984, p. 3212-3226.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. *Especificação Técnica de Sondagens*. ET-9.00.00.00/3W9001; CMSP, São Paulo, 2013, 6p.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO - CMSP. *Relatórios diários de obra*. Ref. Anéis 2176 - 2544. São Paulo, 2015.

COMULADA, M., MAIDL, U., PEIXOTO DA SILVA, M.A.A., AGUIAR, G., FERREIRA, A. *Experiences gained in heterogeneous ground conditions at the twin tube EPB Shield tunnels in São Paulo Metro Line 5*. Proc. of the ITA 2016 WTC, San Francisco, 2016, p. 1-11.

COSTA, M.L. *Introdução ao intemperismo laterítico e à laterização*. In: Licht et al. (Eds.) *Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Brasília: CPRM, 2007, p.199-244.

DAUB. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen*. Erarbeitet von MAIDL, U., KIRSCHKE, D., LEUCKER, R., RIEKER, K., THEWES, M. und WEHRMEYER, G. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) & German Tunnelling Committee (ITA-AITES). Köln, 2020, 55p.

DEERE, D.U.; HENDRON, A.J.; PATTON, F.D.; CORDING, E.J. *Design of surface and near surface construction in rock*. In: U.S. Symp. Rock Mech., AIME, New York, 1967, p.237-302.

DEERE, D.U.; PATTOON, F.D. *Slope stability in residual soils*. State of the art paper. In: Pan. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 4, San Juan. Proceedings... New York: ASCE, 1971, v.1, p. 87-170.

DONG, A.; MA, G.; GONG, Q.; ZHAO, J. *Numerical simulation on rock cutter performance in mixed ground*. GeoShanghai International Conference 2006, 2006, p. 199-204.

EFNARC. *Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock*. EFNARC, UK, 2005, 40p.

FORTES, R. S; ARAGÃO, F.E.P; BLANES, J.R.; LEME R.M. *Uso de TBM em areia: Uma solução para a Linha Leste do Metrô de Fortaleza*. 17ª Semana de tecnologia Metroferroviária, Aeamesp, São Paulo, 2011.

FUTAI, M.M.; CECÍLIO JR, M.O.; ABRAMENTO, M. *Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo*. Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba, 2012, p. 155-187.

GALLI, M.; THEWES, M. *Investigations for the application of EPB shields in difficult grounds / Untersuchungen für den Einsatz von Erddruckschilden in schwierigem Baugrund*. Geomechanics and Tunneling, 7(1), 2014, p. 31–44.

GEO REPORT No. 298. *Ground control for EPB TBM tunneling*. Kowloon, Hong Kong: HKIE Geotechnical Division - Working Group on Cavern and Tunnel Engineering and Geotechnical Engineering Office. 2014, 82p.

GERACE, M.; GRASSO, P.; SOARES, D.; FILGUEIRAS, L. *Extensão da Linha 5 do Metrô de São Paulo: resumo das principais lições aprendidas na conclusão do projeto e do acompanhamento técnico de obra*. 4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. Seminário Internacional "Latin American Tunneling Seminar - Lat 2017". São Paulo, 2017.

GODINEZ, R.; HONGJIE, Y.; MOONEY, M; GHARAHBAGH, E. A.; FRANK, G. *Earth pressure balance machine cutterhead torque modeling: learning from machine data*. Colorado School of Mines, 2015. 11p.

GONG, Q.; YIN, L.; MA, H.; ZHAO, J. *TBM tunnelling under adverse geological conditions: an overview*. Tunn. Undergr. Space Technol. 57 (2016a), p 4–17.

GONG, Q.; LIU, Q.; MA, H., ZHANG, Q. *Tunnel boring machines (TBMs) in difficult grounds*. Tunneling and Underground Space Technology 57 (2016b), p. 1–3.

GUGLIELMETTI, V.; GRASSO, P.; MAHTAB, A.; SHULIN, X. *Mechanized tunneling in urban areas: design methodology and construction control*. Balkema: Taylor & Francis, 2008. 507p. ISBN 978-0-415-42010-5.

HARTWIG, M.E. *Análise da escavação dos túneis em shield do Lote 3 da Linha 5 - Lilás, com vistas a identificação de vazios remanescentes no subsolo*. Relatório Técnico (ATO). São Paulo, 2016, 20p.

HARTWIG, M.E. & MOREIRA, C.A. *A new computational tool for the follow up of mechanized excavation of tunnels: the case study of the subway Line 5-LILAC in São Paulo, Brazil*. REM International Engineering Journal, Ouro Preto, vol. 71 (4), 2018, p. 521-529.

HASSANPOUR, J.; AZALI, S.T.; ROSTAMI, J. *TBM Performance and tool wear prediction along two lots of Dyaaba Headrace Tunnel (Uma-Oya Project, Sri Lanka)*, Proc. North American Tunneling, 2014, p. 236-244.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.C.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANISI, V.A. *Província Mantiqueira*. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Ed. Beca. São Paulo, 2004, p. 203-235.

HERRENKNECHT M. & FRENZEL C. *Long tunnels in hard rock – a preliminary review*. Bauingenieur, 2005, 80:343-349.

HERRENKNECHT, M.; THEWES, M.; BUDACH, B. *The development of earth pressure shields: from the beginning to the present / Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart*, 2011, 4(1), 11–35.

HITACHI-ZOSEN. *Earth Pressure Balanced Type Shield Machine - Calculation Sheets*. Osaka, Japan. 2010.

HOLLMANN, F.S.; THEWES, M. *Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanized tunneling*. *Tunneling and Underground Space Technology*, v.37, 2013, p. 96-106.

HORN, N. *Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflächen von Tunnelröhren*. In: Landeskonferenz der Ungarischen Tiefbauindustrie, 1961, p. 7–16.

ITA-AITES. *Recommendations and guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*. ITA-AITES, 2000, 118p.

JANASI, V.A. & ULBRICH, H.H.G.J. *Late Proterozoic granitoid magmatism in State of São Paulo, southeastern of Brazil*. *Precambrian Research*, 1991, p. 351-374.

KRAUSE, T. *Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erdgestützter Ortsbrust*. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, 1987, 24p.

KUTNER, A.S.; BJORNBERG, A.J.S. *Contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico da bacia de São Paulo: litotipos, notação estratigráfica e feições estruturais relevantes*. *Revista Engenharia*, 1997, n.522, p. 66-73.

LANGMAACK, L. *Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling*. Presented at the North American Tunneling, 2000. 525–542.

LEPSCH, I.F. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de textos, 2002, 178p.

LITTLE, A.L. *The engineering classification of residual soils*. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, 1969.

MA, H.; YIN, L.; GONG, Q.; WANG, J. *TBM tunneling in mixed-face ground: Problems and solutions*. *Int J Min Sci Technol* (2015).

MAIDL, U. *Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum* (Transl.: *Extension of application ranges of Earth Pressure Balance Shields by soil conditioning with foam*). Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1995.

MAIDL, B.; HERRENKNECHT, M.; MAIDL, U.; WEHRMEYER, G. *Mechanised shield tunneling*, 2nd ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2012, 470p.

MAIDL, B.; THEWES, M.; MAIDL, U. *Handbook of tunnel engineering II basics and additional services for design and construction*. Berlin: Ernst & Sohn, 2014, 428p.

MAIDL, U. & CORDES, H. *Active Earth Pressure with Foam*. Proc.: World Tunnel Congress. Amsterdam, 2003, p. 791–797.

MAIDL, U.; PIERRI, J. *Innovative hybrid EPB tunneling in Rio de Janeiro*. *Geomechanics and Tunneling*, v. 7, n. 1, 2014, p. 55-63.

MONTEIRO, M.D.; GURGUEIRA, M.D.; ROCHA, H.C. *Geologia da região metropolitana de São Paulo*. In: *Twin Cities - Solos das cidades de São Paulo e Curitiba*. São Paulo. ABMS, 2012, p. 15-44.

MONTEIRO, M.D. & ROCHA, H.C. *A abrasividade de rochas nos estudos do metrô de São Paulo: ensaios, classificações, influência do grau de alteração e considerações sobre o consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas*. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental*, 2014, p. 71-86.

MONTEIRO, M.D. & ROCHA, H.C. *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. 2015, p. 119-124.

MONTEIRO, M.D. & ROCHA, H.C. *Teor de quartzo-equivalente (eqc) ou grau de alteração? qual destes parâmetros é mais importante nos estudos de abrasividade em regiões tropicais?* 4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, 2017, 14p.

MONTEIRO, M.D. *Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2016, 112p.

MORI, L. *Advancing understanding of the relationship between soil conditioning and Earth Pressure Balance tunnel boring machine chamber and shield annulus behavior*. Thesis submitted to the Colorado School of Mines. Golden, Colorado, 2016. 191p.

MORI, L., ALAVI, E., MOONEY, M. *Apparent density evaluation methods to assess the effectiveness of soil conditioning*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 67. 2017, p. 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.006>

MOSAVAT, K.; MOONEY, M.A. *Examination of Excavation Chamber Pressure on a 17.5m Diameter Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine*. In: *Proceedings International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Ground*. Singapore 2015.

NAKANO, A.; SAHABDEEN, M.M.; KULAINDRAN, A.; SEAH, T.P. *Excavation management for slurry TBM tunneling under residential houses at C853 (CCL3) Project*. *Proceedings of the Underground Singapore*, Singapore, 2007, p. 38-45.

NILSEN B.; DAHL F.; HOLZHAUSER J.; RALEIGH P. *New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling*. In: *Rapid Excavations and Tunneling Conference, Proceeding*, 2007, p. 104-116.

NÔRO, A.C.M. *Análise de construção de túneis com tuneladoras*. Coimbra (Portugal), 2014. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, p. 16-18, 79p.

OLIVEIRA, D.G.G.; DIEDERICHS, M.S. *TBM interaction with soil-rock transitional ground*. TAC 2016 Annual Conference, Ottawa. 2016.

OLIVEIRA, D.G.G.; DIEDERICHS, M.S.; PEIXOTO DA SILVA, M.A.A. *Interação de tuneladoras com face mista transicional*. Conference Paper, 2017<sub>a</sub>, 11p.

OLIVEIRA, D.G.G.; DIEDERICHS, M.S.; RASMUSSEN, L.L.; CECÍLIO JR., M.O. *Tropical residual soil data compilation as guidance for laboratory tests and EPB excavation process simulation*. 9th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. IS – São Paulo. 2017<sub>b</sub>.

OLIVEIRA, D.G.G.; DIEDERICHS, M.S.; THEWES, M.; FREIMANN, S.; AGUIAR, G. *EPB conditioning of mixed transitional ground: investigating preliminary aspects*. ITA-WTC 2017, Bergen, ITA-AITES, 2017<sub>c</sub>, 10p.

OLIVEIRA, D.G.G.; MONTEIRO, M.D.; ROCHA, H.C.; DIAS, C.C. *Aspectos geotécnicos dos maciços ao longo do trecho entre Vila Sonia e Taboão da Linha 4-amarela, do metrô de São Paulo*. 4th Congresso Brasileiro de Túneis, 2017<sub>d</sub>.

OLIVEIRA, D.G.G. *EPB excavation and conditioning of cohesive mixed soils: clogging and flow evaluation*. A thesis submitted to the Department of Geological Sciences and Geological Engineering. Queen's University, Kingston, Canada, 2018, 260p.

OLIVEIRA, D.G.G.; THEWES, M.; DIEDERICHS, M.S.; LANGMAACK, L. *Consistency index and its correlation with EPB excavation of mixed clay-sand soils*. Geotech. and Geo. Eng. J. (2018<sub>a</sub>), <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-018-0612-x>.

OLIVEIRA, D.G.G.; THEWES, M.; DIEDERICHS, M.S.; LANGMAACK, L. *EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation*. Geomechanics and Tunnelling 11, Berlin, 2018<sub>b</sub> (4), p. 375-387.

PASTORE, E.L.; FONTES, R.M. *Caracterização e classificação de solos*. In: Oliveira, A.M.S e Brito, S.N.A. (editores), Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998, Capítulo 12, pp.197-210.

PEILA, D.; BORIO, L.; PELIZZA, S. *The behaviour of a two-component backfilling grout used in a Tunnel-Boring Machine*. Acta Geotechnica Slovenica, 2011. 15p.

PEIXOTO DA SILVA, M.A.A.P.; AGUIAR, G.; GONÇALVES, F.L. *Twin tunnels excavated in sandy soils in a density urban area*. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, Croatia, 2015.

PEIXOTO DA SILVA, M.A.A.P.; AGUIAR, G.; ARGIMIRO, A.F.; ROCHA, H.C.; HARTWIG, M.E. *Experience gained in the excavation of two parallel shields tunnels of 6.0 m for the São Paulo Metro*. In: *Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Cobramseg, 18*. Anais. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

PEIXOTO DA SILVA, M.A.A.P.; AGUIAR, G.; TEIXEIRA, I.F.; FERREIRA, A.A. *Desafios e soluções construtivas aplicadas na escavação de um túnel em saprólito e solo residual de gnaiss da Linha 5 – Lilás do metro de São Paulo*. In: Congresso Brasileiro de Túneis, São Paulo. 2017 (4), 11p.

PELIZZA, S.: *Interview with ITA President*. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 11(2) 1996, pp.135-139.

PELIZZA, S. & PEILA, D. *Soil and rock reinforcement in tunneling*. Tunneling and Underground Space Technology, 1999, 8: 357–372.

PELLEGRINI, L.; PERRUZA, P. *São Paulo Metro Project - Control of settlements in variable soil conditions through EPB pressure and bicomponent backfill grout*. RETC, Las Vegas, Nevada, June, 2009.

PLINNINGER, R.J. *Hardrock abrasivity investigation using the Rock Abrasivity Index (RAI)*. Geologically Alive, London, 2010, p. 3445-3452.

PIETRO, L.A. *The CERCHAR abrasivity index's applicability to dredging rock*. In: XXXII Western Dredging Association, San Antonio, Proceedings, 2012, p. 212-219.

RAFIE, K; SKELHORN, S. *Interpretation of EPB TBM graphical data*. Montreal TAC. Montreal, 2012, 15p.

REILLY, B.J. *EPBMs for the northeast line project*. Tunneling & Underground Space Technology, 1999, 14(4): 491–508.

RISSOLI, A.L.C. *Interpretação de instrumentação de túneis visando a deflagração de planos de ações emergenciais*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2018, 137p.

ROBY, J.; WILLIS, D. *Achieving fast EPB advance in mixed ground: a study of contributing factors*. North American Tunneling Conference, 2014, p. 182-194.

ROCHA, H.C. *Algumas características dos solos arenosos terciários de São Paulo e suas implicações em obras subterrâneas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1995, 136p.

ROCHA, H.C.; COMULADA, M.; MAIDL, U.; MAIA, C.H.T. *São Paulo Metro – Developments in Shield tunneling*. Geomechanics and Tunneling, 2014, 7, No. 3, p. 237-247.

SAAVEDRA, F.M.; MARTÍNEZ, R.F. *Escavación em túneles com máquinas integrais para rocas y suelos*. In: Jimeno, C.L. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. V. 1. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2011, p. 567-616.

SHI, H.; YANG, H.; GONG, G.; WANG, L. *Determination of the cutter head torque for EPB shield tunneling machine*. Automation in Construction. 2011, v. 20. p. 1087-1095. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.010>.



SHIRLAW, J.N. *The risk of very large settlements due to EPB tunnelling*. Conference: 12th Australian Tunnelling Conference - Brisbane, Australia, 2005.

SHIRLAW, J.N. *Mixed face conditions and the risk of loss of face in Singapore*. International Conference on Deep Excavations (ICDE 2008), 7p.

SHIRLAW, J.N. *Pressurized TBM tunneling in mixed-face conditions resulting from tropical weathering of igneous rock*. International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DIGs), Singapore, 2015, p. 1-28.

SHIRLAW, J.N. *Pressurised TBM tunneling in mixed face conditions resulting from tropical weathering of igneous rock*. Tunneling & Underground Space Technology, 2016<sub>a</sub>, 57:225–240.

SHIRLAW, J.N. *The choice of EPB or slurry shields for tunnelling in mixed face conditions resulting from tropical weathering*. Underground Singapore 2016<sub>b</sub>, 18p.

SHIRLAW, J.N.; HENCHER, S.R.; ZHAO, J. *Design and construction issues for excavation and tunnelling in some tropically weathered rocks and soils*, GeoEng2000, 2000, p. 1286-1329.

STEINGRIMSSON, J.; GRØV, E.; NILSEN, B. *The significance of mixed-face conditions for TBM performance*. World Tunnel, 2002 (9), p. 435–441.

TAKIYA, H. *Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991, 109p.

THEWES, M. *Schildvortrieb mit Flüssigkeits-oder Erddruckstützung in Bereichen mit Gemischter Ortsbrust aus Fels und Lockergestein*. Geotechnik 27, Nr.2, 2004, p. 214-219.

THEWES, M. & BUDACH, C.; BEZUIJEN, A.; *Foam conditioning in EPB tunneling*. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Viggiani (ed). London © 2012 Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-415-68367-8.

THEWES, M.; HOLLMAN, F. *Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs*. Tunneling and Underground Space, 2016, v. 57. p. 122-128.

TÓTH, A.; GONG, Q.; ZHAO, J. *Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface mixed ground*. Tunneling and Underground Space Technology 38 (2013) p. 140–150.

VARGAS, M. *Geotecnia do Terciário de São Paulo – Histórico. Aspectos geológicos e geotécnicos da bacia sedimentar de São Paulo*, ABGE/SBG, 1980, p. 37-46.

VARGAS, M. *The concept of tropical soils*, TropicLS'85, 1985, 3: 101-134.

VARGAS, M. *Os solos da cidade de São Paulo: histórico de pesquisas*. Artigo técnico da ABGE, São Paulo, 2002, 103p.

VAZ, L.F. *Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais*. Solos e Rochas, São Paulo, 1996, 19 (2), p. 117-136.

VERGARA, I.M.; SAROGLU, C. *Prediction of TBM performance in mixed-face ground conditions*. Tunnelling and Underground Space Technology 69 (2017) p. 116–124.

VINAI, R.; OGGERI, C.; PEILA, D. *Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research*. Tunneling and Underground Space Technology, v. 23, n. 3, 2007 p. 308-317.

WANG, L.; GONG, G.; SHI, H.; YANG, H. *A new calculation model of cutterhead torque and investigation of its influencing factors*. Science China Technological Sciences. China, 2012, v.55, p. 1581-1588.

WANG, L.; ZHU, W.; QIAN, Y.; XU, C.; HU, J.; XING, H. *Phenomenon and critical conditions of chamber soil sliming during EPB shield tunneling in water-rich weathered diorite: Case study of Jinan Metro, China*. Advances in Civil Engineer, 2020, v.5, p. 1-15.

YANG, H.; SHI, H.; GONG, G.; HU, G. *Earth Pressure balance control for EPB Shield*. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, China.

ZHAO, J.; LEE, K.W.; CHOA, V. *Construction and utilization of rock caverns in the Bukit Timah granite of Singapore*. Geotechnical Engineering Monograph 1. NTU-PWD Geotechnical research central, 1995.

ZHAO, J.; GONG, Q.M.; EISENSTEIN, Z. *Tunneling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore*. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, p.388–400.

## GLOSSÁRIO

Avanço	o processo de marchar para a frente; às vezes significa diretamente a distância escavada durante um determinado período de tempo
<i>Annular gap</i>	espaço anular criado entre a seção escavada e o diâmetro externo do anel de revestimento
Braços misturadores	barras montadas na parte traseira da cabeça de corte e na câmara de escavação para misturar o material
<i>Bucket</i>	dispositivo de remoção usado para coletar e transportar o material escavado da face até a câmara de escavação
<i>Cake</i>	membrana de lama fina formada na frente de escavação, proporcionando estabilidade para a face
Câmara de escavação	espaço localizado atrás da roda de corte de uma tuneladora, onde o material é condicionado e acumulado
Cilindros de avanço	macacos hidráulicos usados para avançar a tuneladora empurrando contra o último anel instalado
<i>Clogging</i>	ocorre quando partículas de argila aderem às superfícies metálicas da cabeça e ferramentas de corte devido às forças de atração das partículas e a presença de água entre a argila e o metal. Alguns autores relatam <i>clogging</i> também como resultado do acúmulo de fragmentos rochosos na área do <i>tool gap</i>
Condicionamento do solo	injeção de aditivos para adequar as propriedades e o comportamento do solo
Curva de aprendizado	trecho inicial de um túnel, onde a equipe de escavação aprende sobre o comportamento da máquina
Densidade aparente	gradiente vertical das pressões no interior da câmara de escavação
<i>Earth Pressure Balance</i>	método de escavação mecanizada que utiliza o material escavado como suporte para a face do túnel

Eretor	dispositivo presente dentro do escudo de tuneladora responsável por suspender e instalar os segmentos montando os anéis do revestimento
Escudo ( <i>Shield</i> )	sistema de suporte composto por estrutura de aço cilíndrica localizado na dianteira de tuneladoras projetadas para escavar solos inconsolidados
Espuma	trama de bolhas de ar em um líquido; aditivo usado para condicionar o solo, produzido pela dispersão de ar em uma solução de surfactante
Face/Frente	superfície de escavação logo à frente da tuneladora
<i>Foam Expansion Ratio</i>	proporção do volume total da espuma para o volume dos componentes líquidos em espuma; taxa de expansão da espuma
<i>Foam Injection Ratio</i>	relação entre o volume de espuma injetada e o volume de solo in situ escavado por tuneladora EPB; taxa de injeção de espuma
<i>Grout</i> (groute)	argamassa usada no preenchimento de vazios, falhamentos e juntas durante a construção do túnel
Intervenção	tempo de inatividade da máquina planejado para executar manutenção na cabeça de corte ou na câmara de escavação
Intervenção hiperbárica	intervenção em ambiente pressurizado, com a utilização de ar comprimido, mistura de gases ou técnicas de mergulho de saturação
<i>Mortar</i>	mistura de cimento, água, areia e aditivos usados normalmente para preencher o vazio anular
<i>Muck</i>	mistura do material escavado com os condicionantes, (água, espuma, polímeros, solos finos injetados)
Parafuso sem-fim	equipamento de remoção do material escavado do interior da câmara de escavação para o interior do túnel; lâmina helicoidal que gira em torno de um eixo tubular

Paralisação	tempo em que a tuneladora não está avançando
Perda de solo	remoção de quantidades de solo durante a construção do túnel, além do limite teórico
Polímero	aditivo usado no condicionamento do solo
Pressão de suporte	pressão criada na câmara de escavação de uma máquina EPB pelo acúmulo de material escavado
Sobre-escavação	escavação fora do diâmetro de projeto, geralmente necessário para auxiliar na direção do tuneladora ou para minimizar o efeito de desagregamento dos “jatos” de água e espuma na frente de escavação; pode ser intencional (para direção) ou não intencional, causando sobrecarga
Suporte ativo de face	suporte de face fornecido por lama ou material escavado remoldado, medido e monitorado baseado em cálculos de pressão de suporte
Surfactante	agente formador de espuma; detergente; tensoativo
Taxa de penetração	taxa de avanço de uma tuneladora medida em distância por revolução da cabeça de corte
<i>Tool Gap</i>	espaço entre a face de escavação e a cabeça de corte limitado geralmente pelos apoios dos discos de corte na face
<i>Tunnel Boring Machine</i>	método de escavação mecanizada o qual se utiliza uma máquina de corte transversal; máquina que pode escavar solo ou rocha e construir diretamente o revestimento final
Velocidade de avanço	velocidade de escavação, medida em distância por unidade de tempo de uma tuneladora durante o avanço
Velocidade de rotação	número de rotações completas por unidade de tempo