

# ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE CLOGGING E TRABALHABILIDADE DE MATERIAIS COESIVOS PARA ESCAVAÇÕES COM TUNELADORA EPB

CLOGGING POTENTIAL AND WORKABILITY ASSESSMENT OF COHESIVE MATERIALS FOR EXCAVATIONS WITH EPB TUNNELING MACHINE

DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA

*TunGeo Serviços e Consultoria Ltda, São Paulo, S.P., Brasil, Email: do@tungeo.com.br*

GUSTAVO AGUIAR

*BabEng GmbH, Lübeck, S.H., Alemanha, Email: ga@babeng.com*

## RESUMO ABSTRACT

As propriedades do material a ser escavado e condicionado têm grande influência no processo de escavação de túneis com tuneladoras EPBM (Earth Pressure Balance Machine). Com o intuito de modificar suas condições originais, adiciona-se água, espuma, polímeros e/ou finos nos solos e rochas triturados no processo de escavação. Antes mesmo da escavação se iniciar, a trabalhabilidade, fluxo e potencial de ocorrência de clogging devem ser avaliados, não só otimizando o processo, mas também diminuindo consideravelmente riscos e custos da obra. Essas características afetarão a manutenção da pressão de frente, no transporte do material condicionado ao longo do parafuso sem fim e das correias transportadoras, e, finalmente, em seu depósito ou até mesmo reutilização após retirado do túnel. Este artigo resume a importância do condicionamento de materiais escavados em tuneladoras EPB e descreve uma metodologia de laboratório utilizada para avaliação destas propriedades. Enfoca também na problemática de ocorrência de clogging, quando o material argiloso adere nas partes frontais da tuneladora. Finalmente, relatam-se algumas considerações feitas na aplicação desta metodologia em solos naturais já escavados por TBMs e a importância de ser realizado estes estudos já em fases iniciais de projeto, além é claro, durante o projeto executivo, para validação contínua de resultados preliminares.

**Palavras-chave:** Escavação mecanizada, EPB, condicionamento de solos, clogging, trabalhabilidade, ATUR

The properties of the material to be excavated and conditioned have a major influence on the tunneling process with EPBM (Earth Pressure Balance Machine). In order to modify its original conditions, soil and rocks crushed and grinded in the excavation process are added water, foam, polymers and/or fines. Even before the excavation begins, the workability, flow and clogging potential can be estimated, not only optimizing the process but also considerably reducing risks and costs of the tunnel work. These characteristics will affect the maintenance of the face pressure, in the conveying of the conditioned material along the screw conveyor and the conveyor belt, and finally in its deposit or even reuse after its removal from the tunnel. This article summarizes the importance of the conditioning of excavated materials in EPB tunneling machines, describing a laboratory methodology used to evaluate these properties. It also focuses on the problem of clogging when the clay material sticks to the front parts of the tunneling machine. Finally, it reports some considerations made in the application of this methodology in natural soils already excavated by TBMs and the importance of carrying out these studies already in early stages of design, and of course, during executive project, for continuous validation of the preliminary results.

**Keywords:** Mechanized excavation, EPB, soil conditioning, clogging, workability, ATUR

## 1 INTRODUÇÃO

A tendência mundial em direção à automação industrial estimula o mesmo desenvolvimento na escavação de túneis, com meta principal a interligação de comunidades urbanas de maneira mais sustentável. Mundialmente, se torna cada vez mais frequente a utilização de tuneladoras para a construção de túneis, principalmente em ambientes urbanos, já que a prática pode diminuir riscos de recalques na superfície, assim como a possibilidade de obter consideráveis taxas de avanço. E cada vez mais estas máquinas superam desafios, escavando trechos mais profundos, com maior cobertura, maior diâmetro, ou extremamente rasos, geologicamente mais complexos, com maiores pressões hidrostáticas e maior flexibilidade na escavação. Entretanto, há desafios a serem vencidos, principalmente porque há que se compreender melhor a interação destas máquinas com o subsolo, composto de materiais extremamente heterogêneos e de propriedades diversificadas.

No caso específico da tuneladora EPB, o material escavado pela cabeça de corte é temporariamente armazenado na câmara frontal de escavação. Tanto na cabeça de corte, assim como dentro da câmara, o material é misturado com aditivos, como, por exemplo, água, espuma, polímeros e/ou grãos finos (bentonita). O principal objetivo desse processo de mistura, denominado condicionamento de solo, é alterar as características desse material para que funcione melhor como um anteparo para a estabilidade da frente do túnel. Ou seja, é o próprio material escavado que mantém a frente de escavação estável. É através de um parafuso sem fim, localizado na parte inferior da câmara de escavação, que este material é controladamente retirado, passando de uma maior pressão (usualmente entre 1 e 6 bares) para a pressão atmosférica ao final deste parafuso. Este material condicionado ainda terá que ser transportado por correias, que geralmente são inclinadas, e posteriormente, depositado, havendo ainda a possibilidade de sua reutilização. Portanto, as propriedades desse material influenciam todo este processo (Maidl et al. 2012, Thewes, Budach & Bezuijen 2012, Oliveira et al. 2018ab, 2019ab, Wehrmeyer & Oliveira 2020).

Adicionalmente, no caso de materiais coesivos, com presença de argilo-minerais de média a alta plasticidade, existe a possibilidade de colagem de materiais argilosos escavados nas ferramentas da cabeça de corte, câmara de escavação e até mesmo parafuso sem fim. Este fenômeno é denominado clogging. Já é conhecida também a sua influência no aumento do torque da máquina, no desgaste secundário das ferramentas de corte e até mesmo nos danos causados em anéis de selagem, chegando a afetar os motores da cabeça de corte da tuneladora (Thewes & Burger 2004, Spagnoli et al. 2010, 2011ab, Classen 2016, Oliveira et al. 2019a). A ocorrência de clogging afeta diretamente a taxa de avanço e custos, pois intervenções devem ser realizadas com maior frequência para limpar a frente da máquina e ferramentas de corte. Custos diários de uma tuneladora parada chegam a valores bastante significativos, portanto, há grande preocupação de se evitar ou controlar este fenômeno, o que pode ser na maioria das vezes feito por meio do uso de surfactantes e/ou polímeros combinados com a operação da máquina.

Portanto, a caracterização do material a ser escavado, seja solos e/ou rochas (ou sua mistura, no caso de solos mistos), juntamente com a modificação deste por condicionantes, deve ser preferencialmente realizada antes e durante a escavação. Na maior parte dos casos, esta caracterização é praticamente ausente, sendo apenas feito ajustes durante a escavação, além de verificar as condições desse material na esteira. Se utiliza a técnica de tentativa e erro, até ajustar os parâmetros da máquina, afetando as propriedades do material escavado condicionado, denominado de muck. Entretanto, há riscos consideráveis em ficar testando soluções diretamente na escavação, além do custo que se requer ao adquirir quantidade suficientes de aditivos para serem testados in situ, quando comparado aos testes de laboratório. Ao se proceder com testes preliminares de laboratório, não só os custos diminuem, mas também se minimizam riscos implícitos ao se testar diretamente na tuneladora durante a escavação. Por outro lado, deixar estes testes nas mãos dos fornecedores dos produtos, seria o mesmo que perguntar à uma indústria farmacêutica que medicamento deve tomar, em vez de ir à um médico especialista. Ou seja, há necessidade de um parecer isento

de interesses na venda de produtos específicos, ainda mais que não há um produto ideal para todos os solos e rochas, já que qualquer variação nas propriedades do material terá influência no efeito de cada aditivo utilizado.

Visando auxiliar nesses desafios de condicionamento em tuneladoras EPB, uma rotina de testes de laboratório de caracterização da trabalhabilidade, do fluxo e do potencial de ocorrência de clogging foi estabelecida ao final de uma tese de doutorado, em uma cooperação entre as universidades Queens (Canadá) e Ruhr Bochum (Alemanha) (Oliveira 2018, Oliveira et al. 2018ab, Oliveira et al. 2019ab). Este artigo tem como objetivo principal divulgar esta metodologia, acrescentando considerações de testes realizados já com solos escavados ou a serem escavados em obras de túneis, assim como correlações sobre a escavação em EPB, com foco no seu processo de condicionamento e operação. Limitações desta metodologia são também apontadas, já com algumas soluções propostas.

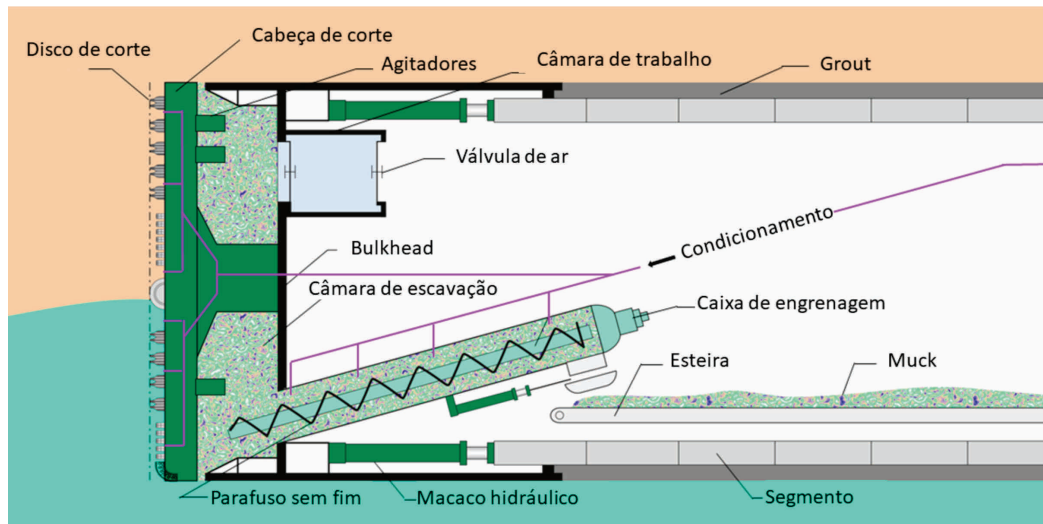
## 2 CLOGGING, TRABALHABILIDADE E FLUXO NAS ESCAVAÇÕES COM EPB

### 2.1 TBM-EPB – Princípio de funcionamento

A tuneladora do tipo EPB (e suas variantes) é o tipo de TBM mais frequentemente escolhida para projetos de túneis escavados em solos (Herrenknecht et al. 2011, Galli 2016). O campo ideal das máquinas EPB cresceu desde sua montagem original no Japão (Hanamura 1995, Maidl et al. 2012, Herrenknecht 2019), que é uma consequência direta do sucesso do condicionamento do solo (Maidl 1995, Langmaack 2000, EFNARC 2005,

Thewes, Budach & Bezuijen 2012). Uma máquina EPB (ou EPBM) consiste em um escudo fechado usado para a escavação de solos (inclusos solos mistos, com solo e rocha) onde o suporte da face e da pressão das águas subterrâneas é obtido por meio do material escavado pela cabeça de corte, que serve como um meio de suporte propriamente dito.

Conforme ilustrado da Figura 1, uma cabeça de corte equipada com ferramentas tais como cortadores de disco e raspadores, escava o material, que cai dentro de uma câmara de escavação. A câmara de escavação é pressurizada e separada do resto da máquina por um anteparo de pressão (bulkhead). Hastes metálicas instaladas na parte de trás da cabeça de corte e na parede de pressão fazem a função de agitadores para auxiliar na mistura do solo escavado. Sensores colocados na parede de pressão controlam a pressão dentro da câmara. Um parafuso sem fim dentro de uma câmara é responsável pela remoção do solo escavado, onde a pressão de suporte pode ser controlada variando a velocidade de rotação do parafuso sem fim. Macacos hidráulicos empurram a máquina para frente e ajudam a controlar a pressão à frente da máquina, empurrando a cabeça de corte para frente contra o solo. Segmentos de concreto pré-moldados são erguidos, funcionando como o revestimento final do túnel. Uma argamassa (grout) é injetada no fim do escudo para preencher os vazios que ficam ao redor desses segmentos. Por último, um selante de graxa é injetado entre escovas na extremidade interna da couraça da máquina, funcionando como um selo contra água subterrânea, evitando a infiltração destes elementos dentro do escudo.



**Figura 1.** Máquina tuneladora EPB e seus principais elementos.

Fonte: BabEng – arquivo interno.

## 2.2 Influência do condicionamento

Para que esta máquina escave sem produzir perdas de solo, a correta pressão de suporte para conter as pressões do solo e hidrostática deve ser mantida e o material escavado deve possuir certas propriedades que permitam a manutenção desta pressão. Como os solos naturais na maioria dos casos não apresentam essa característica, esta é uma das razões de proceder com o condicionamento deste material, adicionando água, espuma, polímeros ou partículas finas. E não é só com o objetivo de manter a pressão de frente que este material deve ser modificado, mas também para que seja devidamente transportado pelo parafuso sem fim, pelas esteiras (ou tubos de bombeamento<sup>1</sup>) e depois depositado.

O fluxo do material influenciará o transporte ao longo da esteira, aonde um material muito líquido, por exemplo, poderia se mover contra a direção de transporte, especialmente em inclinações íngremes da esteira. Um material muito rígido, por outro lado, sairia do parafuso em forma de blocos rígidos, que poderiam dificultar o processo e até bloquear as vias de transporte. Ambas as situações têm que ser consideradas antes mesmo da escavação, pois ambas podem causar o atraso na

operação do túnel, devido às exigências de limpeza (Wehrmeyer & Oliveira 2020).

Finalmente, é essencial considerar as propriedades deste material escavado e condicionado com relação ao seu depósito, tanto temporário como bota-fora, ou até mesmo reuso. Devido às novas leis ambientais e a preocupação com um processo sustentável, cada vez mais aumentam os cuidados nesse sentido, já que este material quando condicionado estará misturado com produtos químicos. Por exemplo, um dos melhores produtos químicos para evitar o clogging tem como sua base derivados de petróleo. Este produto já está proibido na maioria dos países, devido à legislação ambiental local, limitando ou até mesmo impedindo o seu uso. Também, se muita água é utilizada para diminuir o mesmo problema de clogging, será necessário áreas temporárias de secagem do material fora do túnel, o que implica em um custo significativo.

Em resumo, as principais vantagens buscadas com o condicionamento do solo escavado são as seguintes: aumento da trabalhabilidade e compressibilidade do muck; inibição de clogging, homogeneização e redução da permeabilidade e temperatura do muck; redução nos desgastes das ferramentas de corte e no torque na cabeça de corte, melhorando a performance da escavação; atingir a consistência desejada do muck para transporte e depósito/descarte.

<sup>1</sup> Método alternativo de retirada de material em tuneladoras EPB, denominado muck pumping.



**Figura 2.** Consistências inadequadas do muck: esquerda muito líquido, direita muito rígido.

Fonte: BabEng - arquivo interno.

### 2.3 Experiência prática – condicionamento e identificação de clogging

Conforme mencionado, existem diversos aditivos para condicionar o material, como espumas, polímeros e bentonitas. A escolha do tipo de aditivo a ser utilizado depende do tipo desse solo escavado e das propriedades físico-químicas dos aditivos. Bentonita é utilizada para aumentar a plasticidade do material escavado e reduzir sua permeabilidade. Polímeros são utilizados para modificar a viscosidade do muck na câmara de escavação e aumentar a estabilidade da espuma em escavações em solo de alta permeabilidade, além de também reduzir o clogging de argilas. As espumas são compostas por uma combinação de um tensoativo (surfactante) misturado na água com ar, de maneira que o volume da mistura se expanda formando bolhas. Três parâmetros são fundamentais para o controle da efetividade do condicionamento com espumas:

- razão de expansão da espuma (FER – foam expansion ratio): relação entre o volume de espuma e o volume de líquido injetado. Pode variar entre 2 e 20 em função do tipo de solo escavado. Em argila utiliza-se FER mais baixo (espuma mais líquida), enquanto em areia o FER é mais alto (espuma mais aerada);
- razão de injeção de espuma (FIR – foam injection ratio): relaciona o volume de espuma injetada com o volume de solo condicionado.

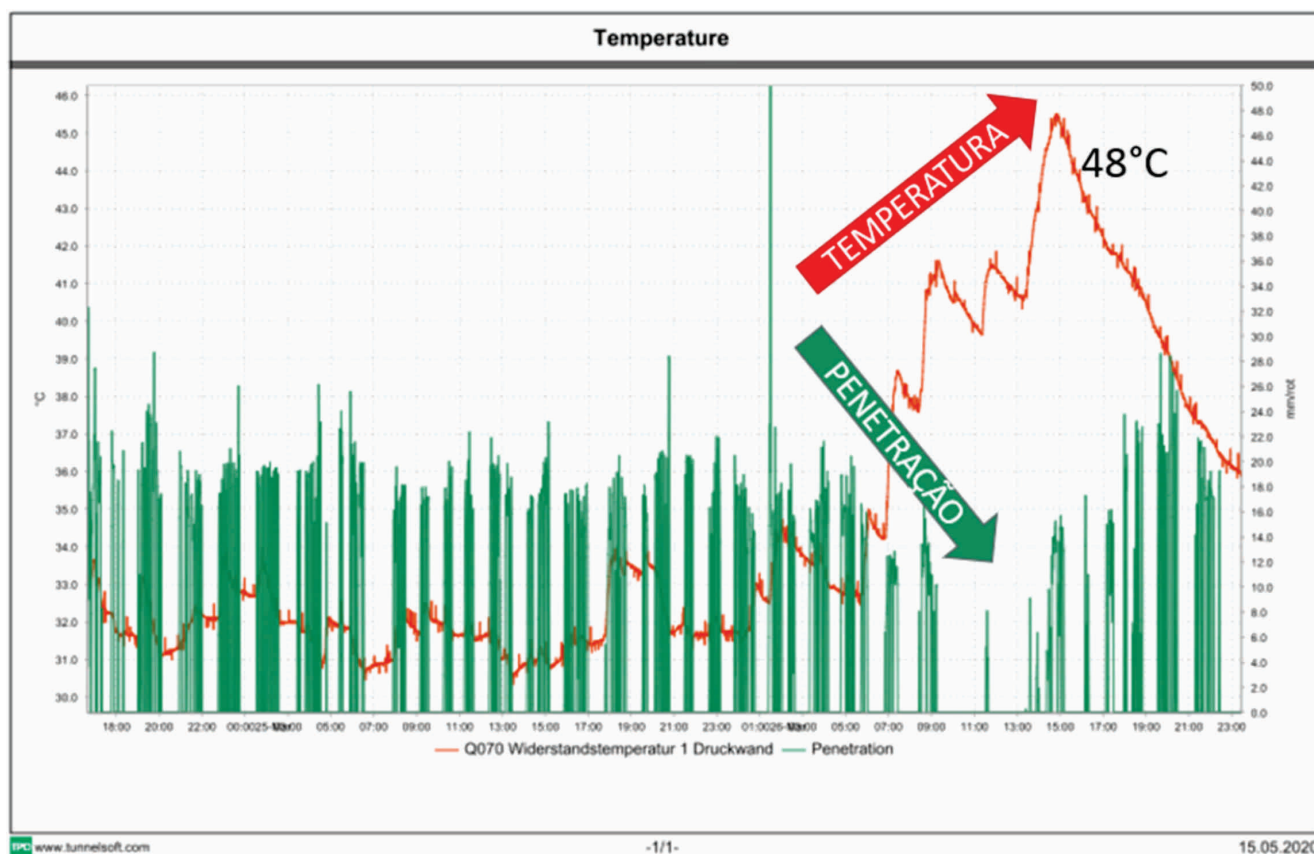
Normalmente utilizam-se valores entre 50 e 150 – em solos granulares utiliza-se FIR mais baixo;

- concentração do tensoativo na mistura com a água (CF – concentration factor). Usualmente é especificado pelo fornecedor. Entretanto, pode ser adaptado de acordo com o FER utilizado. Em geral, quanto menor o FER, menor a concentração necessária do tensoativo.

A operação de uma tuneladora se aproxima de um processo industrial, com elevado grau de automação e diversas atividades ocorrendo concomitantemente durante a escavação. Diferentemente de túneis convencionais, onde a visualização e o mapeamento da frente da escavação são essenciais, em escavações mecanizadas é essencial um conhecimento sobre a operação da máquina e o controle em tempo real dos principais parâmetros operacionais. As máquinas modernas dispõem de centenas a milhares de sensores de controle operacionais que fornecem informações em tempo real. Além disso, a alta velocidade de escavação, que pode chegar a até 30 m por dia, não permite que se dependa exclusivamente da análise de parâmetros externos, como leituras de instrumentação superficial, para adequar os parâmetros de escavação, é preciso ter dados em tempo real do desempenho da máquina para a tomada de decisões visando garantir a segurança da escavação e um bom desempenho de avanço.

Com relação à identificação de ocorrência de clogging durante a escavação, há duas atividades essenciais: a avaliação da consistência do muck na esteira, para se observar se a consistência está de acordo com a prevista e se o condicionamento está adequado; e a análise em conjunto de parâmetros operacionais, que permite se observar tendências que podem levar ao clogging ou identificar a ocor-

rência de clogging na cabeça de corte. Em geral, é possível identificar a ocorrência de clogging quando a escavação ocorre em solos argilosos e é observado aumento no torque, na força de contato e na temperatura na câmara de escavação juntamente com uma redução na penetração, conforme exemplificado no diagrama da Figura 3.



**Figura 3.** Exemplo da identificação de clogging nos parâmetros operacionais da TBM em túnel em argila rija – aumento da temperatura na câmara de escavação acompanhado da redução na penetração, tendo como abcissa, o tempo da escavação.

Fonte: TPC-BabEng – arquivo interno.

No caso de um túnel escavado utilizando uma EPB, o condicionamento do solo desempenha um papel crítico em todo o processo de escavação. Uma extensa campanha de testes de condicionamento do solo antes da escavação de um túnel pode reduzir riscos, custos e melhorar o desempenho geral da escavação EPB. Entretanto, na maioria dos projetos, a avaliação do condicionamento do solo é conduzida durante a construção em uma base de tentativa e erro e muitas vezes é feita para mitigar os problemas durante a escavação de forma retroativa. Muitas vezes, esta

avaliação é até mesmo realizada apenas pelos fornecedores de produtos químicos, o que poderia ser considerado como uma avaliação tendenciosa.

O ganho de uma fase preliminar de testes de condicionamento do solo foi exemplificado por Ye et al. (2016), em um caso estudado para dois túneis individuais implementados para a Linha 1 do Metrô Nanchang, na China. Os autores fizeram uma comparação entre um novo esquema de condicionamento, baseado em uma avaliação preliminar à escavação, com outra abordagem de tentativa e erro. O procedimento de tentativa e erro

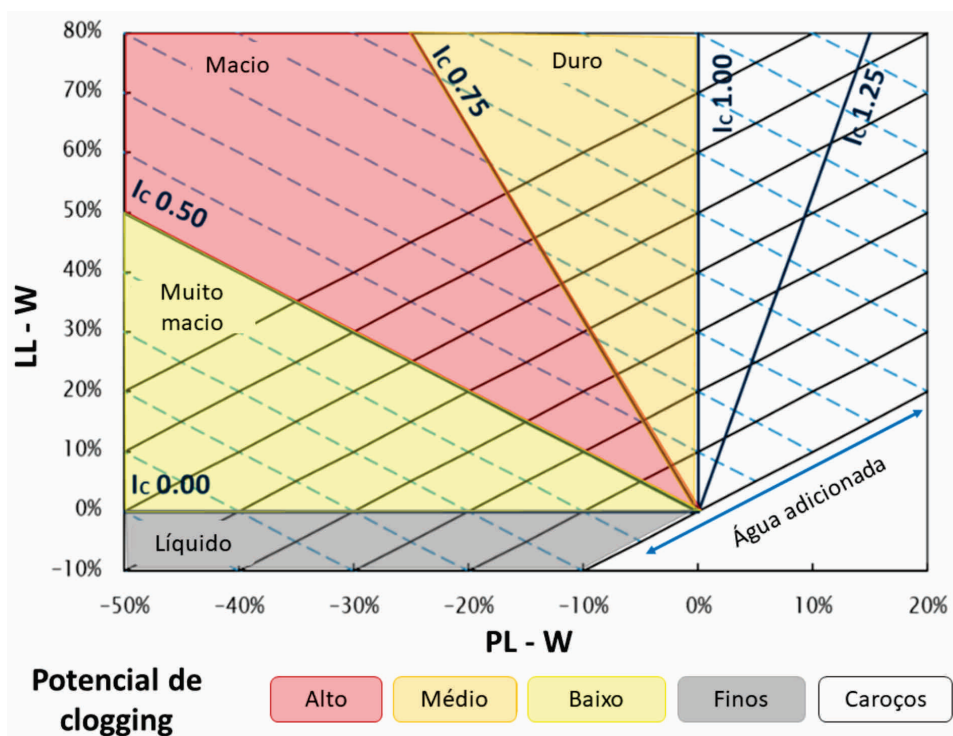
resultou em atrasos no projeto e dificuldades na obtenção da trabalhabilidade correta do material escavado dentro da câmara de escavação. Os problemas com as abordagens de condicionamento do solo experimental e de erro tornam-se ainda mais evidentes quando se está sendo escavado um subsolo desafiador, como em terrenos de solo misto.

## 2.4 Testes de laboratório para condicionamento e estimativa de clogging

Há alguns testes realizados em laboratório para caracterizar materiais a serem escavados por EPBs, antecipando seu possível comportamento frente à escavação. A maioria destes testes se originaram de testes de concreto, como o slump e a mesa de fluxo. Não há, todavia, uma metodologia padronizada tampouco suficientes validações de campo para a comprovação destes testes. Oliveira et al. (2018a, 2019b) apontam, por exemplo, a inviabilidade de se realizar testes tipo slump em fases de projeto básico, onde apenas há disponibilidade de amostras de sondagem, insuficientes

para os usuais 10 quilos requeridos para cada teste. Além da necessidade de uma grande quantidade de material para cada teste, o teste slump demanda muito esforço físico do que a alternativa de se utilizar a mesa de fluxo, que necessita apenas centenas de gramas para cada teste. Portanto, há muito espaço para melhorias, inovações e validações para testes de materiais condicionados para escavações em EPB, em termos de análise de estimativa de sua trabalhabilidade e fluxo.

Com relação à estimativa de ocorrência de clogging, há muitos métodos propostos, mas ainda assim poucos validados em escavações de túneis. Em parte, isso se deve à confidencialidade das obras, especialmente quando implica em custos e atrasos imprevistos, o que muitas vezes é a consequência de severa ocorrência de clogging. Pode-se dividir estes métodos em estimativas com base empírica, como o diagrama de Hollmann & Thewes (2012, 2013), como ilustrado na Figura 4, e com testes de laboratório, muitas vezes com a intenção de se medir a adesão do solo em superfícies metálicas, como por exemplo, os testes de Thewes (1999), Feinendegen et al. (2010, 2011), e de Zumsteg & Puzrin (2012).



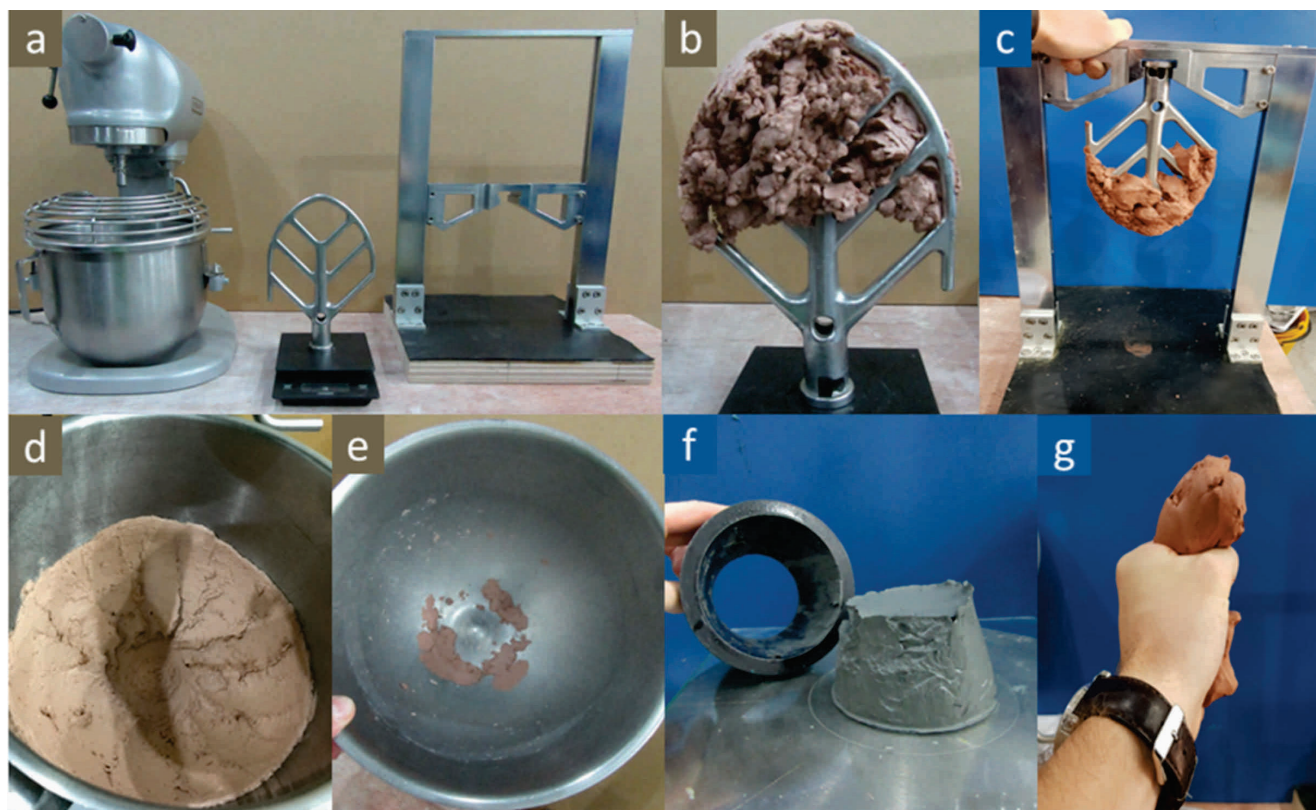
**Figura 4.** Diagrama universal de clogging considerando os limites líquidos e plásticos do solo, bem como seu conteúdo de água, classificando o potencial de clogging. A inclusão de água deve ser considerada, movendo a posição do solo para baixo.

Fonte: modificado de Hollmann e Thewes, 2012.

Oliveira et al. (2018a) perceberam que o método de avaliação de clogging proposto por Zumsteg e Puzrin (2012) não fornecia resultados realistas, especialmente nos casos de solos mistos com diferentes frações de argila e relevante contribuição de areia. Várias vezes o solo preso na pá, depois de misturado com uma batedeira, não estava totalmente preso a ele, e qualquer queda da ferramenta de mistura seria suficiente para soltar o solo. Outras vezes, porém, mesmo depois de várias quedas da pá, não se observava nenhuma perda de solo. Uma nova metodologia com um novo dispositivo chamado ATUR<sup>2</sup>, que permite uma queda livre do batedor, sempre da mesma altura, ao longo do mesmo eixo, foi então proposta. A seguir, a metodologia que inclui a estimativa de clogging, assim como fluxo e trabalhabilidade de solos a serem escavados por EPB é descrita.

### 3 METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

Uma extensa campanha de testes, parte de uma pesquisa de doutorado, resultou no desenvolvimento desta metodologia que inclui alguns testes. O objetivo da pesquisa foi investigar o potencial de ocorrência de clogging e o comportamento de fluxo e trabalhabilidade de solos coesivos, correlacionando os resultados com escavações com máquina EPB. Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2018ab, 2019ab) detalham esta metodologia que inclui testes com uma batedeira da marca Hobart<sup>3</sup>, o dispositivo de teste de clogging ATUR, uma mesa de fluxo tipo Hagerman<sup>4</sup> e as observações visuais-táteis sobre a mistura do solo com ou sem aditivos. A Figura 5 apresenta estes aparatos e respectivos estágios da metodologia.



**Figura 5.** Metodologia de teste: a- batedeira, pá e ATUR, b- pá com o solo, c- ATUR, d & e- diferentes condições de material grudado na tigela, f- teste de mesa de fluxo, e g- aperto do solo, como uma complementação de sua caracterização.

2 Adhäsive Tone Untersuchung RUB/Queens (Teste de argila adesiva RUB/Queens)

3 Esta batedeira foi escolhida porque é a mesma utilizada para testes de concreto, assim como na pesquisa que antecedeu essa, de Zumsteg & Puzrin 2012.

4 ASTM C230/C230M (2014) e ASTM C1437 (2015).



Esta metodologia combina uma sequência de testes, começando com a preparação das amostras, verificação do índice da consistência desejado e teste com a metodologia de bateadeira Hobart, seguida pela queda sequencial da pá da bateadeira no aparato ATUR, com posterior limpeza e lavagem da pá e da tigela, o teste da mesa de fluxo e, finalmente, a avaliação qualitativa das amostras, apertando-as (Oliveira et al. 2019a, Oliveira 2018). O teste para estimativa de clogging foi modificado do método de Zumsteg & Puzrin (2012), aonde a mesma bateadeira é utilizada, porém sem o estágio de queda da pá. Ao incluir a etapa de queda da pá no dispositivo ATUR, é possível perceber que nem toda a massa de solo que estava grudada na pá, segue aderida após a queda desta. A lógica é bastante simples, quanto menos massa de solo se desprende da ferramenta após diversas quedas, maior o potencial de clogging. A seguir, cada item é detalhado.

### 3.1 Preparação das amostras

É essencial ter conhecimento da umidade natural da amostra, pois se refere ao estado natural do solo a ser escavado, que algumas vezes pode até estar dentro do que se é considerado ideal para a operação da máquina EPB, não necessitando muitos aditivos. Portanto, como primeiro passo, deve-se obter a umidade natural, seguindo as normas técnicas existentes como ASTM D2210 (2010). Caso a amostra perca sua umidade natural, estas condições naturais deverão ser recriadas, acrescentando água, misturando e aguardando pelo menos 24 horas para a cura<sup>5</sup> das amostras. O teor de umidade deve então ser verificado, passando então para a obtenção dos limites de Atterberg, conforme as normas da ASTM D4318 (2017). Oliveira et al. (2018a) entretanto sugere a modificação desta rotina para melhor atender alguns casos de solos mistos, como os solos de alteração, cujas partículas de areia e argila já estão misturadas, não havendo sentido retirar os grãos maiores que 0,425 mm.



**Figura 6.** Preparação das amostras, à esquerda ralando rochas brandas argilosas e à esquerda, armazenando amostras em fase de obtenção da consistência. Esta é a etapa mais demorada da metodologia.

<sup>5</sup> Processo necessário para que a umidade seja espalhada na amostra homogeneamente.

O próximo passo será definir as consistências a serem testadas, buscando pontos espaçados entre consistências 0 e 1, considerando uma concentração maior de pontos entre 0.4 e 0.75, zona de maior ocorrência de clogging (Thewes 1999, Sass & Burbaum 2009, Feinendegen et al. 2010, Zumsteg & Puzrin 2012). A Equação (1) para cálculo do índice de consistência ( $I_c$ ) deve ser utilizada, sendo LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade) e W (umidade natural).

$$I_c = (LL - W) / (LL - LP) \quad (1)$$

No caso de rochas macias, as amostras precisam ser preparadas. Uma alternativa é ralar as amostras com um ralador de cozinha, como ilustrado na Figura 6. É essencial considerar que rochas brandas, como argilito ou siltito, se comportarão como solo ao serem escavadas com EPB, sendo uma das maiores ocorrências de clogging intenso.

Maiores quantidades de solo serão necessárias para testes com espuma e/ou polímeros, dependendo de quantos testes são programados (por exemplo, número de polímeros, espumas, ou mesmo concentração, FER ou FIR). Também é essencial mencionar que cada teste terá que ser repetido pelo menos três vezes, para fornecer resultados confiáveis. O mesmo solo pode ser facilmente reutilizado para um segundo ou terceiro procedimento de teste, com pouca perda de solo durante o processo. Entretanto, este não é o caso dos testes com aditivos, sempre requerendo uma nova amostra.

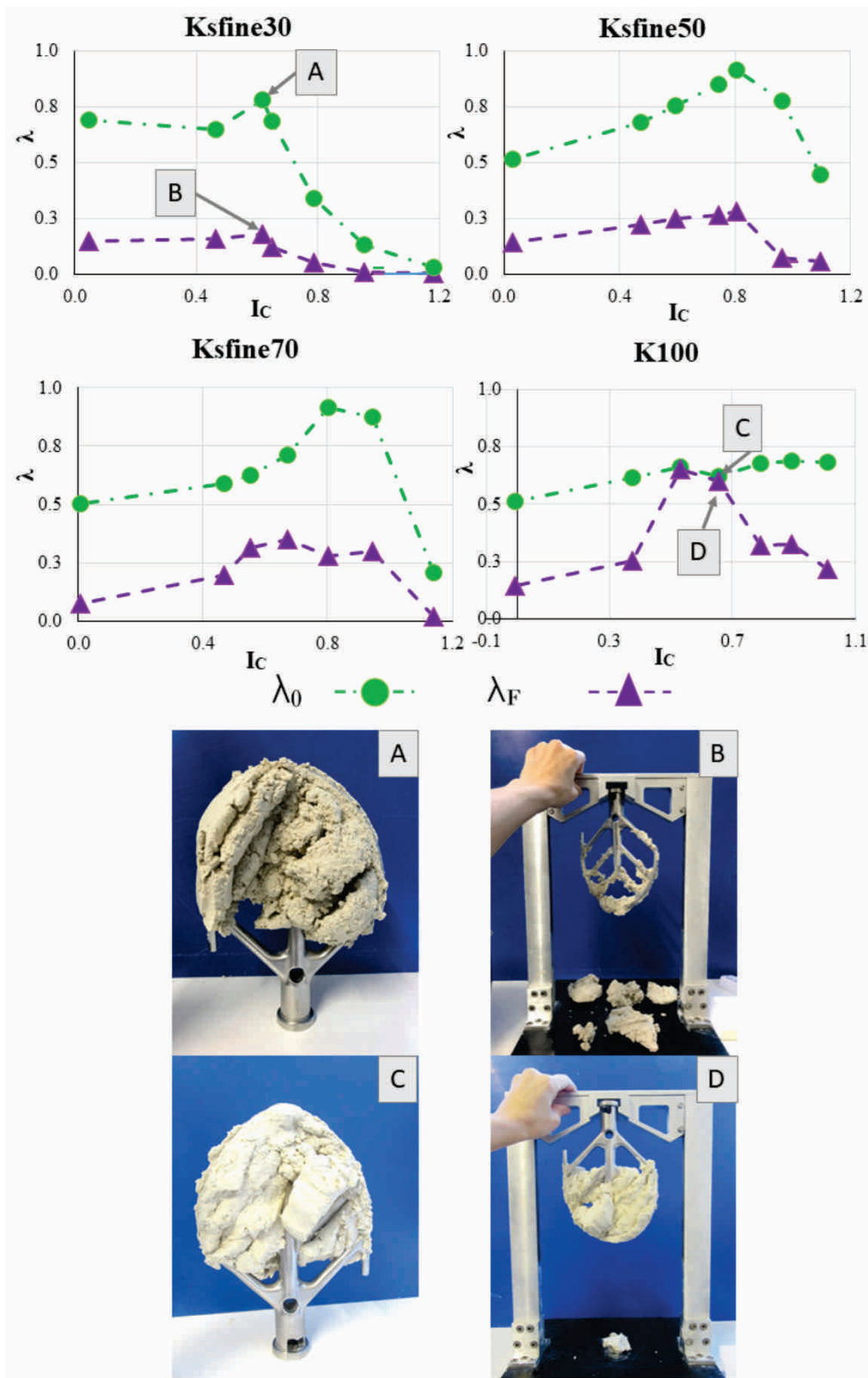
### 3.2 Estimativa de clogging

O ponto de partida desta etapa é quando o  $I_c$  alvo é atingido para aquela amostra. A partir desse ponto, a amostra a ser testada deve ser inserida na vasilha da bateadeira Hobart, acrescentando-a como caroços sempre que possível, o que se aproxima da realidade de escavação, já que as ferramentas de corte da TBM escavam o solo coesivo em caroços.

A quantidade a ser testada dependerá muito da resistência do material, pois uma amostra muito rígida, por exemplo, caulinita pura com  $I_c$  acima de 1.0, pode quebrar a bateadeira a partir de 900 gramas de material. Na maior parte dos casos, a quantidade gira em torno de 600 a 900 gramas (a variação dentro deste intervalo não interfere os resultados). A vasilha com a amostra deve ser pesada, desconsiderando a tara da vasilha, ou seja, obtendo a massa total do solo (parâmetro  $G_{TOT}$ ; como apresentado no item 3.4). A amostra deve ser misturada com a bateadeira por 3 minutos, na velocidade número 1, e após parar a máquina, a pá com o solo grudado deve ser retirada, fazendo a primeira pesagem do solo grudado nesta ferramenta (pese a pá antes para retirar a tara), obtendo o parâmetro  $G_{MT0}$ . O método até esta etapa é o descrito por Zumsteg & Puzrin (2012).

A próxima etapa é deixar a pá cair no aparato ATUR. Para tal, colocando a pá de cabeça para baixo no dispositivo, levantando-a até a altura máxima possível e soltando-a logo em seguida. A pá deve ser cuidadosamente removida e pesada, fornecendo o parâmetro  $G_{MT1}$ . O processo deve ser repetido, pesando novamente e obtendo  $G_{MT2}$  e, mais uma vez,  $G_{MT3}$ . Logo em seguida, a pá deve ser solta quatro vezes, obtendo  $G_{MT7}$ . A cada etapa, a superfície do aparato deve ser limpa e seca, evitando que se grude mais material por causa do solo grudado na superfície da base do ATUR.

A etapa seguinte é a limpeza da vasilha e pá, descrito em 3.3. Após cada teste, deve-se recolher uma amostra para cálculo da umidade, verificando, posteriormente, qual a consistência em que o teste foi efetuado. É importante salientar que todas estas etapas, incluso a limpeza descrita no item 3.4, foram calibradas com o diagrama do Hollmann & Thewes (2012, 2013), conforme detalhado em Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2019a). A Figura 7 ilustra estas etapas com o ATUR descritas acima, já com um exemplo de diagrama obtido, mostrando diferenças entre dois solos distintos, um com mais caulinita, que mesmo depois de todas as quedas não há desprendimento de solo, e outro que praticamente todo o material se perde com as quedas.



**Figura 7.** As imagens, assim como pontos no gráfico, A e C mostram duas amostras grudadas na pá antes de utilizar o aparato ATUR, e B e D é o resultado obtido após as sete quedas, sendo  $\lambda_0$  a variável de clogging sem as quedas da pá e  $\lambda_F$  a variável de clogging modificada, após sete quedas e o ajuste com a limpeza da pá e vasilha. Ou seja, para o solo com 100% de caulinita, mesmo com todas as quedas não há desprendimento de solo, com exceção de uma pequena porção, enquanto para 30% de caulinita praticamente toda a massa se desprende. A nomenclatura indica a percentagem de argila caulinita para cada amostra, sendo Ksfine30, 30% de caulinita, Ksfine50, 50%, Ksfine70, 70% e K100, 100%.

Fonte: Oliveira et al. 2019a.

### 3.3 Fator CB – Limpeza da vasilha e pá

Após uma grande quantidade de testes, utilizando diferentes amostras de solo, foi possível observar que o processo de limpeza dependia das propriedades do solo. Espécimes com propriedades similares podem não ser tão fáceis de se diferenciar do que solos com propriedades muito diferentes (ou seja, baixa versus alta plasticidade). Certamente, ainda é uma lacuna a ser pesquisada no futuro. Entretanto, extremos como a facilidade de remover e limpar a bacia após um teste feito com uma amostra contendo apenas 30% de fração de argila pouco plástica (caulinita, por exemplo), contra a dificuldade de limpeza do batedor e da tigela após uma amostra de 100% de fração argilosa muito plástica (bentonita, por exemplo), foram claramente evidentes. Além de registrar as dificuldades para remover e limpar a terra descrevendo-a em detalhes, fotos e até mesmo vídeos devem ser gravados, facilitando a comparação posterior entre as amostras (item 3.7).

As Figuras 8 e 9 ilustram alguns exemplos úteis de como é possível diferenciar entre as várias condições de aderência ao remover o solo e limpar as ferramentas. A Figura 10 apresenta a descrição de diferentes condições, onde os solos que são facilmente limpos recebem um fator superior, o que implica uma diminuição do valor final do potencial de clogging ( $\lambda_f$ ), conforme apresentado nos cálculos do item 3.4. É importante saber que este foi o ponto mais criticado durante a pesquisa pelos revisores e durante testes com solos naturais realizado em Singapura, percebeu-se que deveriam ser utilizadas frações em vez de apenas números inteiros (por exemplo, por comparação entre diferentes amostras, um peso diferente pode ser atribuído). Este aspecto da metodologia será revisado ao se validar o teste com testes de solos naturais escavados em obras, refinando este parâmetro.



**Figura 8.** Aumento dos níveis de dificuldade para limpar a tigela após um teste. A facilidade de remover o solo com uma colher também é considerada.



Figura 9. Níveis crescentes de dificuldade para limpar a pá.

Categoria principal	Sub-categoria	Descrição	Valor (CBFactor)
St (duro)	III	Todo material do teste é facilmente removido com as mãos, restando apenas película seca nos dedos.	3
	II	Porção considerável de material pode ser removida com as mãos, restando apenas pequenas porções a serem removidas com água. Quantidade pequena de material preso no fundo da vasilha.	2
	I	Porção significativa do solo fica grudado na pá e vasilhas, algumas vezes até cozido no fundo, precisando de esponja e água quente para remoção.	1
So (macio)	III	Parte do material gruda mas é facilmente removível com água fria, não precisa de sabão. Gruda pouco nas mãos, mas facilmente retirado até esfregando as mãos.	3
	II	Boa parte do material gruda, sendo necessário sabão e água morna para remoção, porém a limpeza não é demorada.	2
	I	Material gruda muito nas mãos, vasilha e pá, muito difícil de remover sem água quente e sabão, deixando esponja suja após limpeza. Precisa deixar de molho algumas horas.	1
Vs (muito macio)	III	Não se remove solo com as mãos porque é muito mole, mas facilmente removível com água fria.	3
	II	Não se remove solo com as mãos porque é muito mole, mas removível com água morna.	2
	I	Solo gruda bastante, deixando tudo sujo. Processo de limpeza é bastante demorado, requerendo água morna e sabão.	1

Figura 10. Fator de limpeza da vasilha e pá ( $CB_{Factor}$ ), com descrição das categorias e subcategorias no topo, incluindo os respectivos valores a serem adicionados na Equação 4, descrita no item 3.4. Estes valores podem ser fracionados dependendo das condições de limpeza. As setas indicam aumento da consistência ou plasticidade, aumentado em direção às cores mais quentes.

### 3.4 Cálculos de estimativa de potencial de clogging

Este item apresenta todas as equações necessárias para o cálculo do potencial de clogging. As primeiras equações referem-se aos parâmetros

de clogging  $\lambda_0$  a  $\lambda_r$ , sendo a Equação (2) utilizada para o cálculo da massa do material antes dessa ser colocada no aparato ATUR, e a Equação (3) utilizada para todas as etapas de queda do material, substituindo o  $x$  pelo número de quedas, ou seja, a primeira sendo  $G_{MT1}$  e a última,  $G_{MT7}$ .

$$\lambda_0 = G_{\text{MT0}} / G_{\text{TOT}} \quad (2)$$

Onde  $G_{\text{MT0}}$  é a massa total de solo presa inicialmente na pá e  $G_{\text{TOT}}$  a massa total de solo (método original de Zumsteg & Puzrin 2012).

$$\lambda_1 = G_{\text{MTx}} / G_{\text{TOT}} \quad (3)$$

Onde  $G_{\text{MTx}}$  é a massa total do solo preso na pá após  $x$  quedas com ATUR (sendo  $x = 1, 2, 3$  ou  $7$ , dependendo do número de quedas) e  $G_{\text{TOT}}$  a massa total do solo.

O parâmetro final de clogging é  $\lambda_F$ , que foi ajustado após vários testes com amostras de caulinita pura, combinado com o diagrama universal do potencial de entupimento de Hollman e Thewes (2012), como explicado em detalhes por Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2019a). Este diagrama é o único que foi baseado em uma extensa campanha de testes levando em conta ocorrência de clogging em obras de túneis.

O parâmetro  $\lambda_F$  é definido pela Equação 4, onde  $\lambda_x$  é a média de todos os valores  $\lambda$  obtidos, como indicado na Equação 5. O  $CB_{\text{Factor}}$  é calculado de acordo com as categorias/subcategorias da Figura 10. Finalmente, a Tabela 1 apresenta as principais categorias potenciais de entupimento. Estas categorias também foram definidas com o procedimento de calibração e precisam de ajustes, dependendo de validações futuras com o cruzamento de dados de laboratório e obras. No caso de amostras classificadas como duras ( $St$  na Figura 10,  $I_c > 0,75$ ), um baixo valor de clogging implicará na formação de caroços, assim como indicado no diagrama de Hollmann & Thewes (2012, Figura 4).

$$\lambda_F = (\lambda_x) / CB_{\text{Factor}} \quad (4)$$

$$\lambda_x = (\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_7) / 5 \quad (5)$$

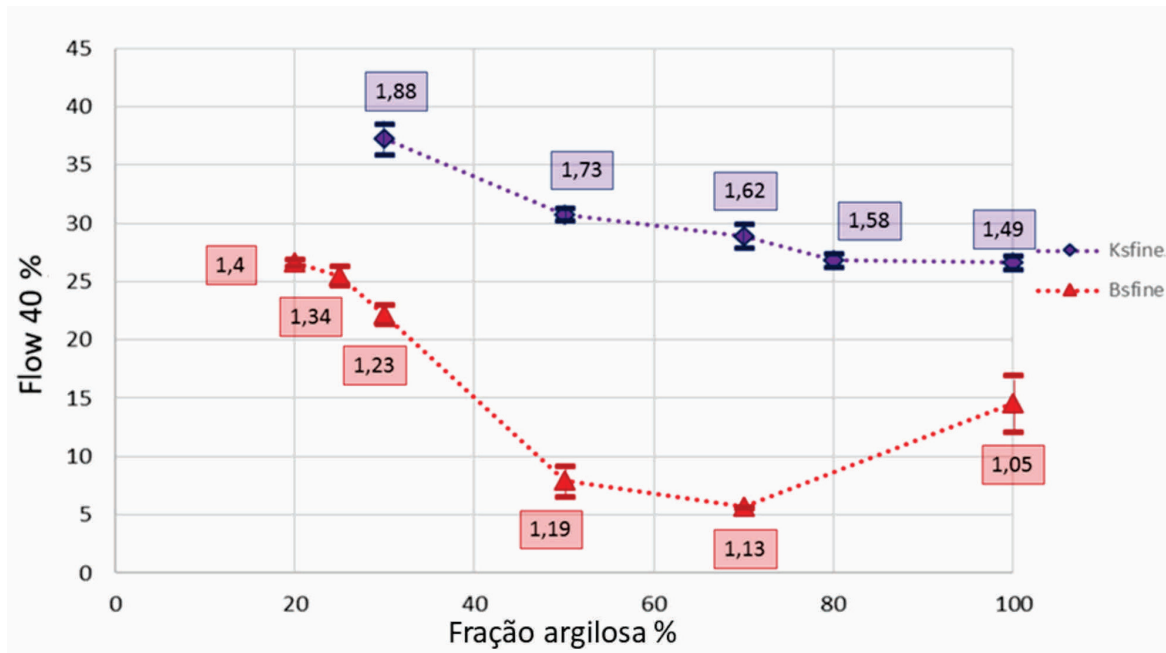
**Tabela 1.** Categorias potenciais de clogging definidas pelo parâmetro  $\lambda_F$ .

$\lambda_F$	Potencial de Ocorrência de Clogging
$\leq 0,27$	Baixo
$0,27 - 0,48$	Médio
$\geq 0,48$	Alto

É essencial mencionar a flexibilidade do  $CB_{\text{Factor}}$ , fornecendo a possibilidade de incluir frações para melhor representar duas subcategorias diferentes. Isto poderia ser usado como um tipo de fator de segurança, ou por exemplo, para aumentar os efeitos de clogging de uma superfície jateada de areia (similar a cabeça de corte de tuneladoras), que neste caso, sugere-se subtrair 0,5 do fator CBF final, aumentando o potencial de clogging. Entretanto, isso só pode ser validado com vários testes realizados diretamente na escavação de túneis, como uma reavaliação das estimativas realizadas em laboratório. Em resumo, uma amostra de solo que não tenha nenhuma perda de solo, mesmo após várias quedas (por exemplo,  $\lambda_7$ ), logicamente deve ter uma tendência maior de ocorrência de clogging do que outra que a maior parte do solo que se solte da pá logo após a primeira queda ( $\lambda_1$ ). Dificuldades para remover um solo da pá ou da vasilha durante os testes também são indicadores de desafios similares de limpeza da TBM durante intervenções no túnel.

### 3.5 Análise de fluxo e trabalhabilidade

EFNARC (2005) propôs o uso da mesa de fluxo para caracterização de solos arenosos condicionados com espuma. Oliveira et al. (2018b, 2019ab) modificaram o método incluindo medições de fluxo para solos coesivos. Os autores concluíram que solos com o mesmo índice de consistência têm valores de fluxo variáveis. Ajustando o método para se ajustar a solos coesivos, o número de quedas da mesa aumentou de 15 para 40. Propuseram também substituir o teste slump pela mesa de fluxo, apontando diversas vantagens, como a obtenção de uma resposta mais dinâmica do que o slump, a menor quantidade de solo requerido para este teste, possibilitando ser realizado em testemunhos de sondagens e menor demanda física em realizá-lo. A Figura 11 apresenta resultados dos testes com solos misturados com argilas caulinita (Ksfine; roxo no gráfico) ou bentonita (Bsfine; vermelho no gráfico), com diferentes proporções de areia, mas sempre mesma consistência ( $I_c = 0$ ).



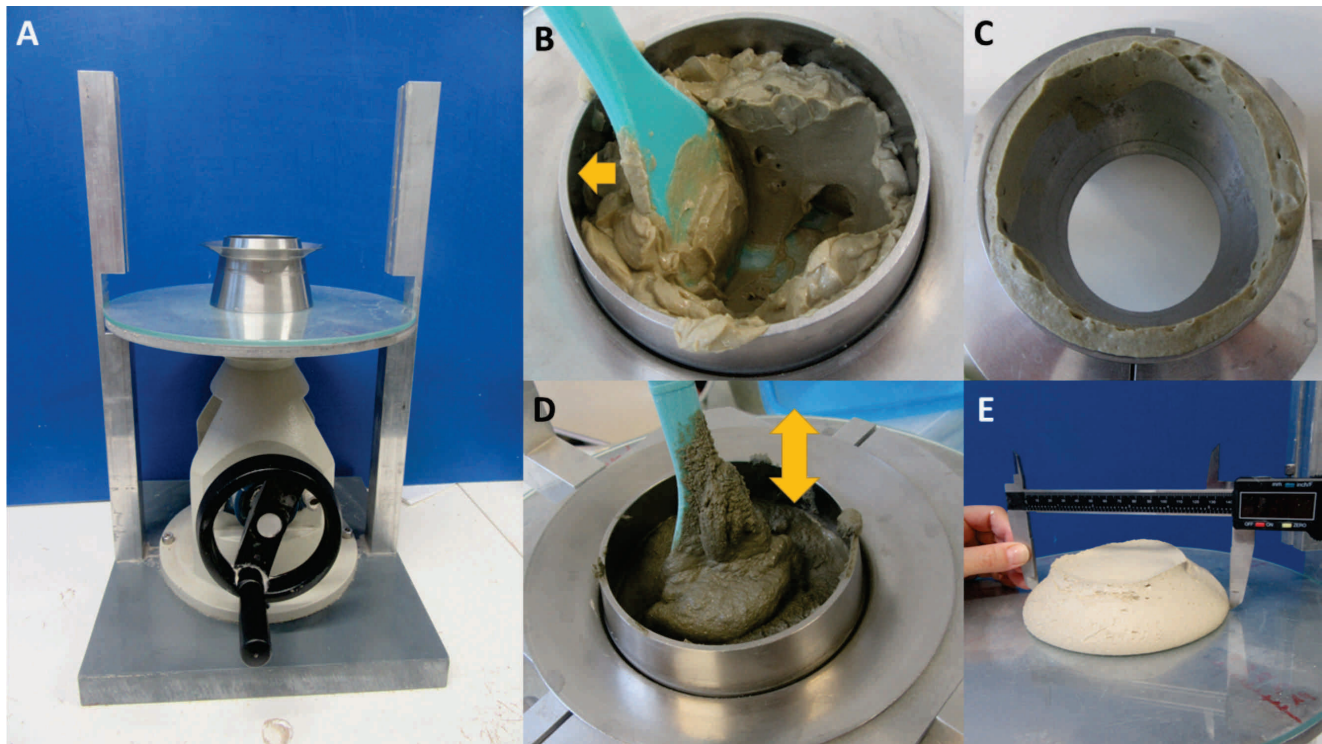
**Figura 11.** Flow<sub>40</sub> (%) para caulinita e bentonita misturados em porcentagens distintas com areia fina, para  $I_c = 0$ . O número em cada quadrado representa a densidade aparente de cada solo em  $g/cm^3$ .

Fonte: Oliveira et al. 2018b.

Este teste deve ser realizado depois da análise de clogging, com a mesma amostra, condicionada ou não, mas somente para amostras com  $I_c$  menor que 0,8 (não viável para amostras mais duras). Para tal, um cone é untado com óleo (película fina, como untar forma de bolo); o solo é moldado dentro do cone, pressionando-o em camadas e contra as paredes do molde para garantir o preenchimento completo. O cone deve ser levantado cuidadosamente e lentamente, e o diâmetro da base do solo medido ( $m_0$ ). A mesa é golpeada

40 vezes e uma média de três medidas de diâmetro deve ser tomada, obtendo-se  $m_{40}$ . Também são tiradas fotos do cone, de modo que sempre que o solo ficasse preso na superfície poderia indicar algumas tendências de potencial de clogging. A Figura 12 mostra a montagem e a rotina do teste e para cálculo do fluxo (Flow<sub>40</sub>) onde se utiliza a Equação (6).

$$\text{Flow}_{40}(\%) = ((m_{40} - m_0) / m_0) \times 100 \quad (6)$$



**Figura 12.** Mesa de fluxo: (a) mesa de fluxo, incluindo uma superfície de vidro; (b) solo sendo inicialmente pressionado contra os cantos do cone; (c) para se evitar que a amostra fique presa no cone, uma película de óleo deve ser anteriormente espalhada no cone; (d) movimentos de subida e descida devem ser feitos, assegurando o completo assentamento da amostra dentro do molde; (e) após o teste, o diâmetro de espalhamento deve ser medido.

### 3.6 Testes com espuma e polímeros

Certamente esta é a fase que necessita mais desenvolvimento e busca de alternativas, já que é bastante desafiante, desde a parte de se produzir a espuma e obter os parâmetros desejados, até misturá-la em uma amostra coesiva no tempo suficiente antes que a espuma se separe. Ainda mais para testes com amostras coesivas, aonde a espuma utilizada deve ter FER bastante baixo (FER de 5 a 10), caso sejam testados parâmetros mais realistas da operação da máquina. Uma espuma de FER 5 é consideravelmente líquida, já que há pouco ar inserido, se separando rapidamente.

Ressalta-se que o mesmo problema é enfrentado também por outros laboratórios de pesquisa, sem ainda encontrar uma solução ideal. De qualquer forma, o essencial é a comparação entre diferentes produtos e seu efeito na diminuição relativa do clogging, o que se torna possível de se realizar utilizando surfactantes e polímeros em fase líquida para solos coesivos. No caso de solos

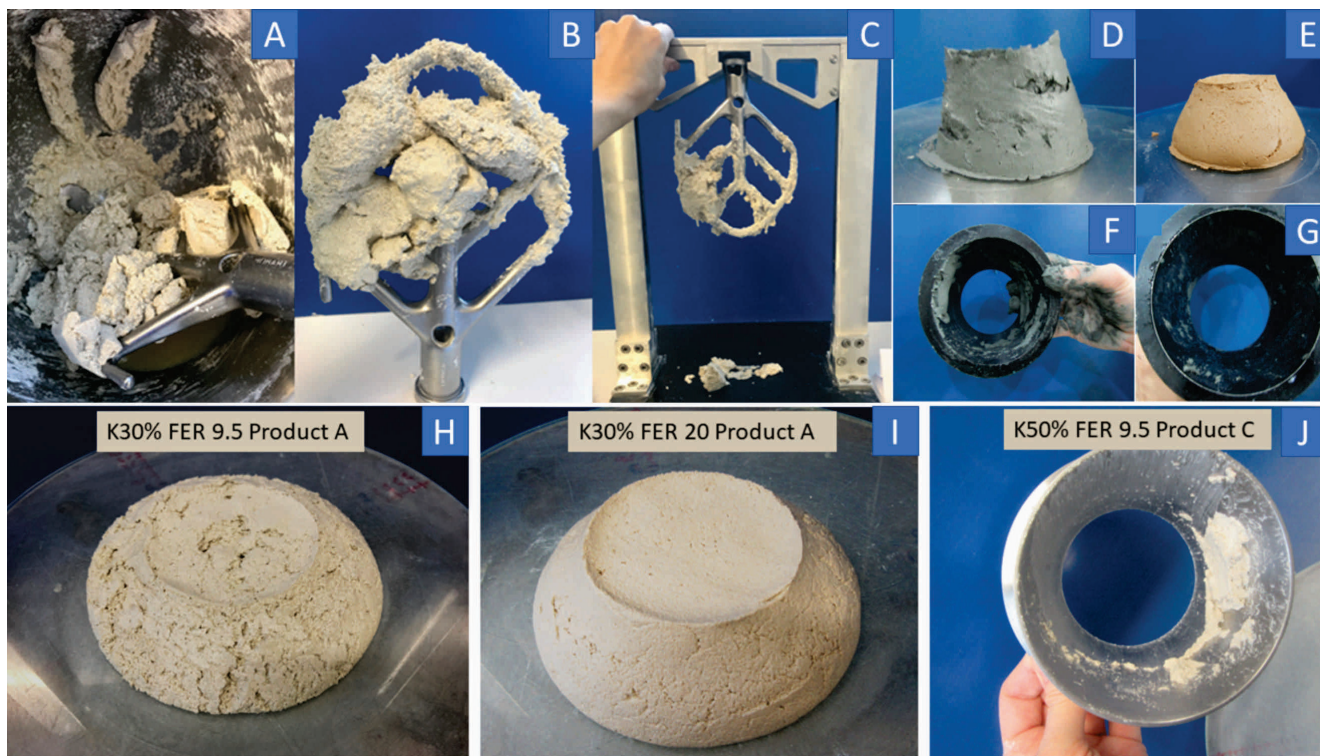
pouco coesivos, ou até mesmo arenosos, o mesmo desafio com a mistura com a espuma é inexistente.

Adicionalmente, uma das outras limitações da realização de testes com amostras condicionadas é devido a seu desempenho em pressão atmosférica e em um espaço aberto. Isto ignora um aspecto importante para o condicionamento do solo, que para alguns parâmetros de espuma, o ar fechado poderia se separar do muck (solo condicionado) e seria contido no topo da câmara de escavação, o que poderia representar um desafio para certos cenários de suporte da frente (ou seja, camadas soltas de solo no topo). Em testes de laboratório, esta característica se perde e o que pareceria um condicionamento bem-sucedido no laboratório poderia resultar em uma operação ineficaz do túnel. Isso vale para todas as diferenças entre os testes realizados em pressão atmosférica, enquanto os túneis estão sendo escavados com pressões mais elevadas, especialmente em termos de comportamento da espuma, como já foi apontado por Mooney et al. (2016).



Para a realização dos testes, é importante definir quais  $I_c$  serão testados. O  $I_c$  do solo deve ser inferior ao  $I_c$  desejado, e isto é um desafio para se definir, considerando o FER e o FIR de cada teste e ainda assim estar dentro de parâmetros realistas de operação. É essencial ter em mente que para cada teste, o solo não pode ser reutilizado, portanto, quanto mais testes, maior a quantidade de solo necessária. Portanto, o primeiro passo é planejar os testes necessários. E, uma vez planejados os parâmetros a serem comparados e definido um programa de testes, utiliza-se a mesma sequência descrita nos itens anteriores (3.1 a 3.5), porém adi-

cionando a espuma (ou líquido com surfactante e/ou polímero) na amostra de solo, pesando a massa total, e procedendo com os testes normalmente. A Figura 13 mostra alguns exemplos de amostras condicionadas testadas, assim como alguns resultados. Como mencionado, foi possível tirar principalmente conclusões qualitativas e a informação mais útil foi perceber que um determinado produto que deveria funcionar como um polímero antiaderente para argilas, estava na verdade levando a mais clogging do que apenas o uso de água, ou seja, seria um custo não só desnecessário, mas prejudicial ao andamento da obra.



**Figura 13.** Distintos testes com polímeros e espumas: A, B e C mostram efeito de polímero antiaderente para argilas (Oliveira et al. 2019a); D, E, F e G mostram efeito de condicionantes ou a ausência destes em amostras de solos naturais de Singapura, com ênfase em F, sem nenhum condicionante utilizado para a argila marinha e G, com polímero que funcionou eficientemente para diminuir o clogging. Finalmente H, I e J mostram efeito de distintas espumas e parâmetros. No caso de J, um polímero, também antiaderente, parece aumentou a ocorrência de clogging.

Fonte: Oliveira et al. 2018b.

### 3.7 Apertando a amostra, fazendo fotos e vídeos

Para compreender o comportamento de clogging, assim como o fluxo e trabalhabilidade de amostras condicionadas, é crucial incluir uma caracterização de-

talhada do solo condicionado com vídeos e imagens. Apertar o solo imita um procedimento de trabalho regular de “sentir o muck” e é uma ferramenta visual-tátil para descrever suas propriedades. Além disso, uma descrição do processo de limpeza das ferramentas para cada amostra enriquece as informações coletadas. Ela

fornece informações sobre os desafios que podem ocorrer durante as intervenções da TBM. Na caracterização geológico-geotécnica, a descrição é um dos aspectos mais importantes. Qualquer aspecto adicional que seja observado no teste poderá apoiar a compreensão da mistura do solo, facilitando assim a estimativa de seu comportamento frente à escavação com a tuneladora.

Com relação especificamente ao “aperto” da amostra, um muck bem condicionado, especialmente um material coeso, fluirá através de sua mão como se você estivesse espremendo uma pasta de dentes para fora do tubo. A forma desta pasta de dente – muck não deve cair facilmente para

o lado (muito macia, pode não manter o efeito tampão do solo na EPB), ou requerer muita energia para ser espremida (muito dura, pode levar a altos valores de torque para a máquina, ou falta de fluxo). A Figura 14 ilustra algumas imagens de solos testados sendo espremidos. Certamente, ele se apresenta como um método subjetivo, mas também facilita a comparação posterior com as condições no canteiro de obras. Também torna o executor do teste familiarizado com os solos, facilitando outras estimativas e comparações entre os solos a serem escavados com uma máquina.



Figura 14. Vários exemplos do material testado sendo espremido após cada teste.

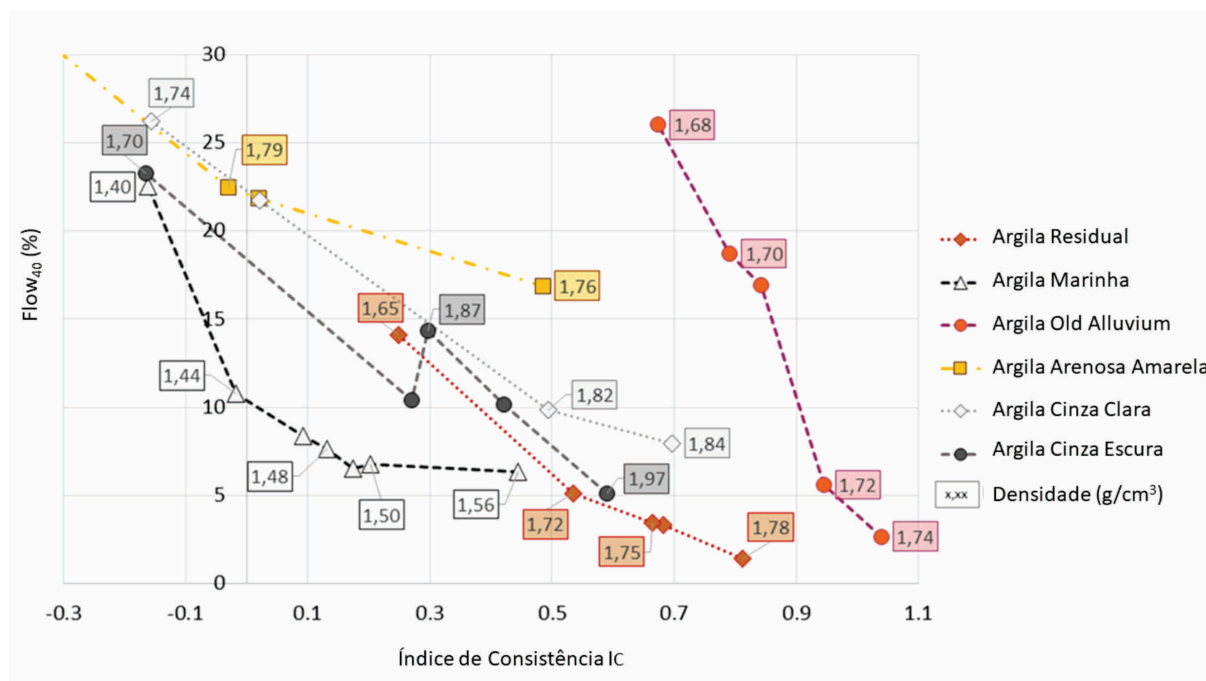
#### 4 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Quando a pesquisa estava restrita ao laboratório, não estava, todavia, clara se sua aplicação poderia ser estendida realmente a prática, ou seja, às obras de túneis escavados com tuneladoras. Entretanto, desde a finalização da tese de doutorado

algumas campanhas de testes de solos naturais a serem escavados, ou já escavados por tuneladoras foram realizadas, com resultados promissores. Testes foram realizados também dentro da tuneladora, muitos destes sendo pesquisas de caráter confidencial, não podendo, contudo, serem divulgados.

Em Singapura, por exemplo, foram testados todos os solos coesivos da região, todos eles já escavados por TBMs. Notou-se que o solo argiloso denominado de Old Alluvium apresentou um clogging bastante pronunciado quando os testes de laboratório foram realizados. E justamente é este solo que apresentou maior ocorrência de clogging durante escavações em distintos projetos. Este mesmo solo precisou de 40 quedas com o aparato ATUR até que uma pequena massa de

solo se desprendesse, enquanto outros solos como a argila amarela, ou a argila residual do granito Bukih Timah, se desprenderam logo depois da primeira ou terceira queda da pá da bateadeira. Também foram testados alguns polímeros, sendo que um deles apresentou resultados bastante significantes ao desprender todo o material coesivo tanto da pá como do molde da mesa de fluxo. As Figuras 15 e 16 resumem os resultados dos testes realizados em Singapura.



**Figura 15.** Potencial de clogging versus índice de consistência para os solos testados em Singapura. Os valores nos quadrados mostram as densidades dos solos.

Conforme mencionado, os ensaios permitem também comparar a efetividade de produtos de diferentes fornecedores ao serem aplicados em amostras de solo com potencial de clogging. O gráfico da Figura 17 apresenta um estudo para um projeto em fase de planejamento, onde a efetividade de diferentes produtos quanto à redução de

clogging em amostras obtidas em sondagens do projeto foi testada. Como base para comparação, é utilizada a curva com o condicionamento com água. Plotando-se o potencial de clogging ( $I_f$ ) medido em diferentes umidades da amostra, ou seja, diferentes acréscimos de espuma, é possível observar a diferença de performance dos produtos.

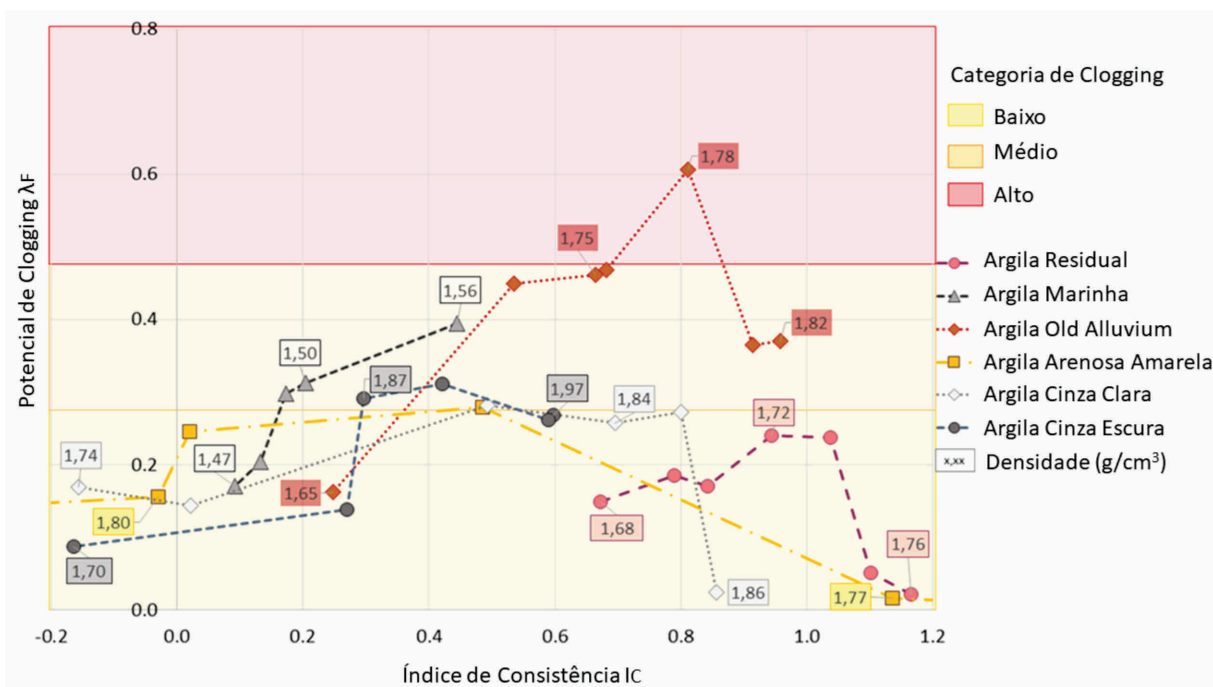


Figura 16. Valores de fluxo após 40 quedas da mesa, comparando diâmetro de espalhamento em relação ao diâmetro inicial.

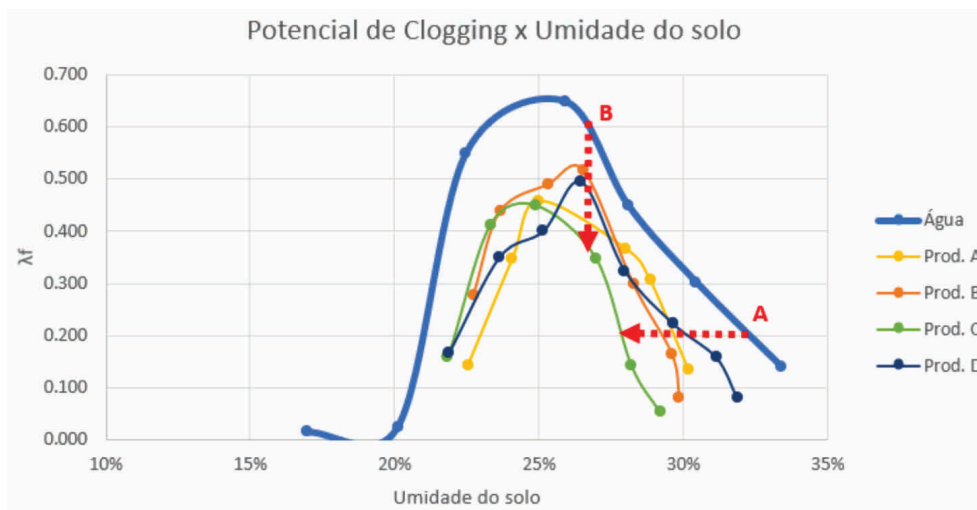


Figura 17. Comparação de diferentes produtos quanto à redução do potencial de clogging.

Diversas conclusões de grande importância para a fase de execução do túnel podem ser obtidas a partir do resultado do ensaio. A reta horizontal "A" mostra que a utilização de espumas permite reduzir a quantidade de líquido que é necessário se acrescentar ao solo (condicionamento) mantendo-se o mesmo potencial de clogging. Neste caso, a utilização de espumas permite reduzir de 8 a 18% no volume de líquido a ser acrescentado. Isso significa redução na quantidade de

água a ser usada e redução no volume de material a ser descartado. A reta vertical B mostra a diferença na efetividade dos produtos. Para a mesma umidade da amostra, ou seja, mesma quantidade de espuma acrescentada, verifica-se uma diferença expressiva no potencial de clogging medido. Com relação ao ensaio com água, o uso de espumas reduz o coeficiente de potencial de clogging de 15 a 40%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há diversos projetos de escavação de túneis utilizando tuneladoras EPB a se iniciar tanto no Brasil como na América Latina, havendo uma tendência e aceitação cada vez maior no mercado latino-americano para este método construtivo. É essencial que a comunidade técnico-científica promova os necessários ajustes para a caracterização geológico-geotécnica de projetos de infraestrutura utilizando este método. Muitas das investigações e ensaios geológico-geotécnicos que são necessários para projetos com escavação de túneis em NATM nem sempre serão relevantes para as escavações mecanizadas, assim como há diversos procedimentos de caracterização geológico-geotécnica essenciais para escavações com TBMs que não estão sendo, todavia, realizados. Uma caracterização do material a ser escavado, seja este solo ou rocha, assim como o efeito do condicionamento nestes solos, deve ser realizada até mesmo na fase de projeto.

Esta abordagem, de se caracterizar o condicionamento de materiais escavados e condicionados, até mesmo em fases iniciais, como no projeto básico, já está sendo posto em prática em projetos em fase de planejamento na Europa, pois há o entendimento que este procedimento implicará na contenção de custos na obra, otimização do projeto e diminuição de riscos. Quanto mais contarmos apenas com procedimento de tentativa e erro durante a fase de construção, mais chances estaremos dando para que acidentes ocorram, já que erros no condicionamento de solo em tuneladoras EPB podem ser responsáveis para que perdas de solo significativas ocorram, levando à recalques e até mesmo colapso. Sem contar que há custos elevados em se parar a máquina constantemente, justamente porque não foi feita a escolha do correto aditivo a tempo, ou seja, antes da escavação.

Um outro aspecto essencial de ser mencionado é com relação a reutilização do material de escavação, sendo que há muitas pesquisas e desenvolvimentos nessa direção, principalmente devido a tendência mundial de incentivar cada vez mais processos sustentáveis. É necessário que a escolha do produto químico ideal para uma obra não afete as propriedades do material escavado, principalmente não infringindo a legislação am-

biental. Ao se produzir largas quantidades de rejeito, dependendo da classe, haverá um acréscimo significativo no custo da obra. Por um outro lado, se este mesmo material pode ser selecionado e reutilizado, haverá um decréscimo também significativo, ou seja, a caracterização dos materiais condicionados deve levar a possibilidade de reutilização, ou não destes materiais.

Finalmente, se a intenção é automatizar todo o processo, é justamente essa interação material escavado – aditivo químico – máquina que deve ser compreendido e simulado numericamente, para se alcançar a automação do condicionamento em máquinas EPB, com simultânea caracterização e seleção *in situ* deste material, para que possa ser feita a separação entre materiais de bota-fora ou reutilização. Assim a máquina tuneladora se tornaria uma verdadeira fábrica de túneis, incluindo os preceitos da Indústria 4.0.

## REFERÊNCIAS

- ASTM C230/C230M. 2014. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken, PA [www.astm.org](http://www.astm.org). doi: 10.1520/C0230\_C0230M-14
- ASTM C1437. 2015. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org). do: 10.1520/C1437-15
- ASTM D2216. 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org). doi: 10.1520/D2216-10
- ASTM D4318. 2017. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org). doi: 10.1520/D4318-17
- Classen, J. 2016. Challenges and Solutions Related to the Interaction of Soil Conditioning and Main Drive on Large Diameter EPB TBM's. Proc. Of the ITA-AITES WTC 2016, São Francisco.
- EFNARC. 2005. Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tun-

nelling (TBM) in soft ground and hard rock. EF-NARC, UK.

Feinendegen, M., Ziegler M., Weh, M., Spagnoli, G. & Stanjek, H. 2010. A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields. Rock mechanics in civil and environmental engineering. London: Taylor Francis Group.

Feinendegen, M., Ziegler, M., Weh, M. & Spagnoli, G. 2011. Clogging during EPB-tunnelling: occurrence, classification and new manipulation methods. ITA-WTC2011, Helsinki, ITA-AITES.

Galli, M. 2016. Rheological characterisation of Earth-Pressure-Balance (EPB) support medium composed of non-cohesive soils and foam. Doctoral Thesis. Faculty of Civil and Environmental Engineering of the Ruhr-Universität Bochum.

Hanamura, T., 1995. State of the art of the Japanese TBM technology – New Developments. Proc. of the Intern. Lec. Series TBM Tunnelling Trends. Hagenberg, Austria, December 1995, p. 199 – 212.

Herrenknecht, M., Thewes, M. & Budach, C. 2011. The development of earth pressure shields: from the beginning to the present (Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart). Geomechanics and Tunnelling 4 (1), p. 11-35.

Herrenknecht, M. 2019. Innovations in Mechanized Tunnelling since 1970. Muir Wood Lecture 2019 ITA-AITES WTC 2019, Nápoles.

Hollmann, F. & Thewes, M. 2012. Evaluation of the tendency of clogging and separation of fines on shield drives. Geomechanics and Tunnelling 5, p. 574-580.

Hollmann, F. & Thewes, M. 2013. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology 37: 96-106. doi: 10.1016/j.tust.2013.03.010

Langmaack, L. 2000. Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling. Presented at the North American Tunneling, p. 525-542.

Maidl, U. 1995. Erweiterung des Einsatzbereiches von Erddruckschilden durch Konditionierung mit Schaum. Dissertation (1995). Technisch-Wissenschaftliche-Mitteilungen des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U. & Wehrmeyer, G. 2012. Mechanised shield tunneling. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Mooney, M.A., Wu, Y., Mori, L., Bearce, R. & Cha, M. 2016. Earth Pressure Balance TBM soil conditioning: it's about the pressure. Proceedings of the ITA-WTC 2016, San Francisco, p. 22-28.

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M., Diederichs, M.S. & Langmaack, L. 2018a. Consistency index and its correlation with EPB excavation of mixed clay-sand soils. Geotechnical and Geological Engineering Journal, Springer Int. Publ., p. 1-19. doi: 10.1007/s10706-018-0612-x

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M., Diederichs, M.S. & Langmaack, L. 2018b. EPB tunnelling through clay-sand mixed soils – proposed methodology for clogging evaluation. Geomechanics & Tunnelling Journal 11 (4), p. 375-387, doi: 10.1002/geot.201800009

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M. & Diederichs, M.S. 2019a. Clogging and flow assessment of cohesive soils for EPB tunnelling: laboratory methodology and soil characterisation. Tunnelling and Underground Space Technology 94, doi: 10.1016/j.tust.2019.103110

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M. & Diederichs, M.S. 2019b. EPB machine excavation of mixed soils – laboratory characterization. Geomechanics & Tunnelling Journal 12 (4), doi: 10.1002/geot.201900014

Oliveira, D. G. G. 2018. EPB excavation and conditioning of cohesive mixed soils: clogging and flow evaluation. Doctoral thesis, Queen's University, Kingston, 282p. <http://hdl.handle.net/1974/24867>

Peila, D., Picchio, A., Martinelli & D. Dal Negro, E. 2016. Laboratory tests on soil conditioning of

- clayey soil. *Acta Geotechnica* 11, p. 1061-1074. doi: 10.1007/s11440-015-0406-8
- Sass, I & Burbaum, U. 2009. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines. *Bull Eng Geol Environ* 68, p. 27-34.
- Spagnoli G., Fernandez-Steegeer T.M., Azzam R., Feinendegen M., Neher H.P. & Stanjek, H. 2010. Investigation of adherence behaviour and related effects on different scales in mechanical tunnel driving. *Proceedings of Underground Construction Prague 2010, Transport and City Tunnels*, p. 692-699.
- Spagnoli, G., Feinendegen, M., Stanjek, H. & Azzam. R. 2011a. Soil conditioning for clays in EPBMs – part one. *Tunnels & Tunnelling International* 43, p. 56-58.
- Spagnoli, G., Feinendegen, M., Stanjek, H. & Azzam. R. 2011b. Soil conditioning for clays in EPBMs – part two. *Tunnels & Tunnelling International* 43, p. 59-61.
- Thewes, M. 1999. Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Doctoral Thesis. Bericht aus Bodenmechanik und Grundbau, Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen.
- Thewes, M., Budach, C. & Bezuijen, A. 2012. Foam conditioning in EPB tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Viggiani*, p. 127-135.
- Thewes, M. & Burger, W. 2004. Clogging risks for TBM drives in clay. *Tunnels and Tunnelling International* 36, p. 28-31.
- Ye, X., Wang, S., Yang, J., Sheng, D. & Xiao, C. 2016. Soil conditioning for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: case study. *International Journal of Geomechanics*. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000791
- Wehrmeyer, G. & Oliveira, D.G.G. de. Schnecken- und Bandförderung beim maschinellen Tunnelvortrieb. 2020. *Tunnelbau* 2020 (1).
- Zumsteg, R. & Puzrin, A. M. 2012. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes. *Tunnelling Underground Space Technol* 31, p. 86-96. doi: 10.1680/geot.SIP13.P.005