

COMPUTATIONAL MODELING OF FINE SOILS FOR EPB TUNNEL BORING MACHINES

Alex Nowak La Flor

Fernando Akira Kurokawa

Roberto Cesar de Oliveira Romano

Heitor Montefusco Bernardo

Maria Eugênia Gimenez Boscov

nowak@usp.br

fernando.kurokawa@usp.br

cesar.romano@lme.pcc.usp.br

heitor.bernardo@lme.pcc.usp.br

meboscov@usp.br

Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Avenida Prof. Almeida Prado 271, Prédio da Engenharia Civil, 05508-970, São Paulo, Brasil

Abstract. In tunnels excavated using EPB (Earth Pressure Balance) machines, the excavated soil must have some specific engineering properties for the correct functioning of the excavation system. Therefore, understanding the many characteristics of the excavated material, along with its rheological behavior, is essential for a successful mechanized excavation. These conditions present obstacles that, if not foreseen in design, can result in several problems such as soil loss, instabilities, low excavation performance and damage to TBM components. Aiming at the main goal of creating a procedure of investigation for fine soils excavated with an EPB tunnel boring machine, this paper presents a preliminary step, the calibration of a model using Computational Fluid Dynamics approach making use of a standard soil (bentonite), with a view at investigating tropical soils' behavior once the methodology is established. The experimental procedure was carried out using two rheological methods, Squeeze Flow and an extrusion technique proposed by Benbow and Bridgewater. These results illustrated that those rheological tests allow to obtain relevant parameters such as yield stress, viscosity, rheological behavior, useful for planning EPB excavation. The numerical simulation is important to predict the behavior of different types of mixtures while changing the variables analyzed in this research. This paper, therefore, shows the experimental and numerical procedures that will be used to different soils and may be used to other types of materials, to better understand the flow through the screw conveyor and give parameters to a better soil conditioning system.

Keywords: Tunnel, CFD, Rheology

1 Introdução

O aumento populacional e a criação de grandes megalópoles levam à busca de alternativas para a mobilidade urbana. A aglomeração dificulta o transporte de pessoas e os serviços básicos, como coleta de lixo e esgoto. As obras subterrâneas ganharam importância ao reduzir esses problemas da superfície das cidades, liberando áreas para diferentes usos, como parques e áreas de lazer, que elevam a qualidade de vida na cidade.

A execução de escavações subterrâneas em áreas urbanas traz consigo muitos desafios, tais como espaços pequenos para construção, interferências com outros serviços da cidade e recalques impostos em edifícios. A estabilização da face de escavação e o revestimento são os fatores mais importantes para não ocorrerem grandes recalques na superfície. A utilização de tuneladoras para escavações subterrâneas em áreas urbanas reduz consideravelmente o risco de movimentações do terreno e recalques na superfície, pois diminui o tempo em que a escavação fica não confinada.

Segundo BTS [2], diferentes tipos de tuneladoras são indicados para diferentes tipos de solo escavado. Solos escavados compostos por materiais com comportamentos distintos, por exemplo, uma face que apresente um solo com frações de areia e argila, situação frequente nos solos tropicais, representam um grande desafio em relação à estabilização da face de escavação.

Dentre os tipos de tuneladoras se destaca a EPB (Earth Pressure Balance), que utiliza o próprio solo escavado, eventualmente com algum aditivo adequado para melhorar as suas propriedades, para estabilizar a frente de escavação. Logo atrás do disco de corte da tuneladora há uma câmara pressurizada preenchida com o solo escavado ou com a mistura de solo escavado e aditivo (geralmente denominada solo condicionado), que estabiliza a face de escavação [3]. A pressão na face é controlada pelo fluxo do solo na entrada pelo disco de corte e na saída por um parafuso sem fim.

As propriedades reológicas do solo são, portanto, de extrema importância para o sucesso de uma escavação mecanizada, assim como sua permeabilidade e compressibilidade. Segundo BTS [2], tuneladoras EPB são utilizadas preferencialmente em solos de permeabilidade baixa, porém também em solos com coeficiente de permeabilidade maior que 1×10^{-5} m/s fazendo uso de aditivos condicionantes

Dito isso, observa-se a necessidade de um estudo aprofundado para melhorar a aplicação de escavações mecanizadas em regiões com solos tropicais, identificando a influência da composição granulométrica na reologia desses solos.

O objetivo deste artigo é determinar experimentalmente os parâmetros reológicos de um solo padrão (bentonita) e ajustar os dados experimentais em modelos reológicos através de simulações computacionais de modo a posteriormente prever o seu comportamento sob solicitações similares às encontradas nas escavações por tuneladoras EPB. Esta é uma etapa preliminar necessária para o estabelecimento da metodologia a ser utilizada adiante para os solos tropicais.

2 Materiais e métodos

O material para este estudo inicial foi uma bentonita no seu limite de liquidez. A caracterização geotécnica realizada compreendeu os seguintes ensaios: análise granulométrica [4], peso específico dos grãos [5], limite de liquidez [6] e limite de plasticidade [7]. A composição mineralógica foi obtida por ensaio de difração de raios-X.

Os resultados da caracterização são apresentados na Tabela 1. A bentonita é um solo bastante argiloso e altamente plástico, possuindo um limite de liquidez elevado.

Tabela 1. Caracterização geotécnica

Parâmetro	Bentonita
Argila (%)	74,7
Silte (%)	17,2
Areia fina (%)	7,8
Areia média (%)	0,2
Areia grossa (%)	0,1
LL (%)	482
LP (%)	58
IP (%)	424
Densidade dos grãos (g/cm ³)	2,4
Área superficial específica (m ² /g)	56,4

Os resultados da análise química através de espectrômetro de fluorescência de raios X são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise química através de espectrômetro de fluorescência de raios X

Na2O (%)	MgO (%)	Al2O3 (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	SO3 (%)	Cl (%)	K2O (%)	CaO (%)	TiO2 (%)	V2O5 (%)	Cr2O3 (%)	MnO (%)
1,69	2,01	11,8	60,6	0,06	0,20	0,18	0,92	2,00	1,15	0,03	0,04	0,03

Fe2O3 (%)	NiO (%)	CuO (%)	ZnO (%)	Ga2O3 (%)	Rb2O (%)	SrO (%)	Y2O3 (%)	ZrO2 (%)	Nb2O5 (%)	BaO (%)	Nd2O3 (%)	PbO (%)	PF (%)
12,1	0,01	0,02	0,03	<0,01	0,01	0,02	<0,01	0,03	<0,01	0,04	nd	nd	7,00

Os comportamentos reológicos encontrados são normalmente representados por curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento como apresentado na Figura 1 [8].

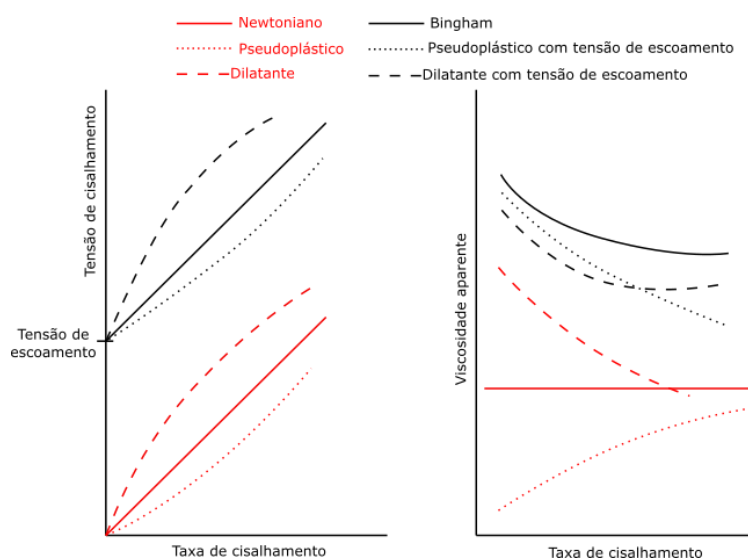


Figura 1. Comportamento dos diferentes modelos reológicos

Para realização da caracterização reológica, foi escolhido o ensaio de extrusão, aplicando-se a

formulação apresentada por Benbow e Bridgewater [1]. A configuração do ensaio consiste em um barril com uma boquilha em sua extremidade inferior e um pistão na sua extremidade superior (Figura 2). À medida em que o pistão é deslocado, o material é extrudado e a força necessária para a extrusão é registrada.

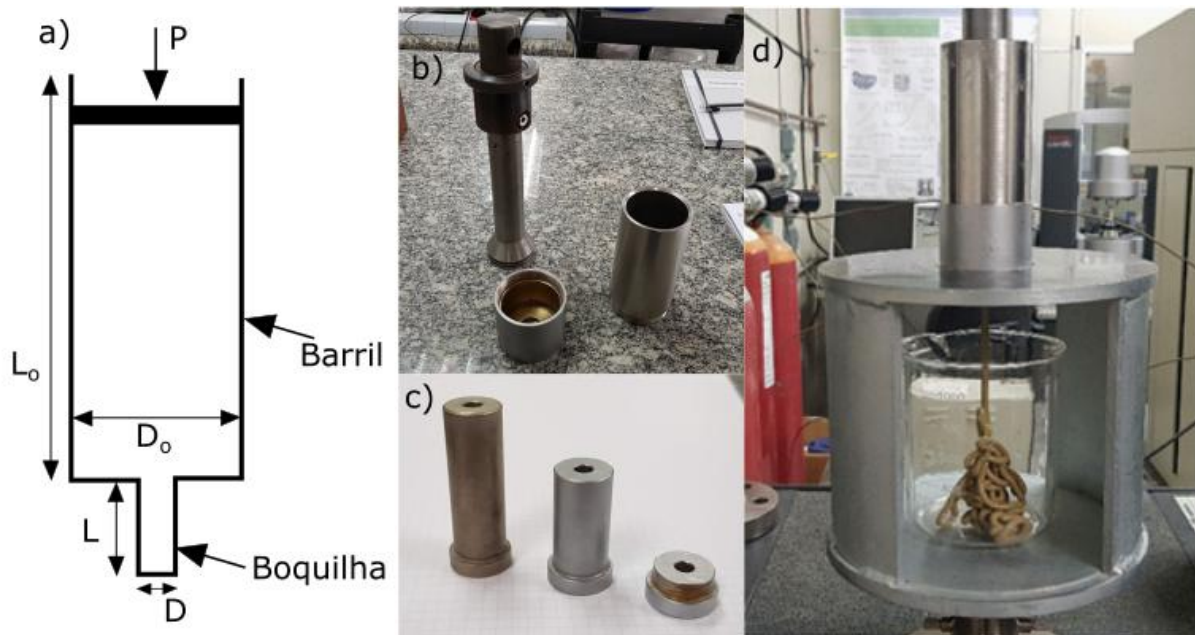


Figura 2. a) esquema do ensaio; b) pistão e barril utilizados; c) três tamanhos de boquilhas utilizados; d) ensaio montado

O material analisado foi extrudado em quatro velocidades diferentes: 0.1, 0.5, 1.0 e 3.0 mm/s. Cada velocidade foi aplicada ao longo de 20 mm, conforme Figura 3.

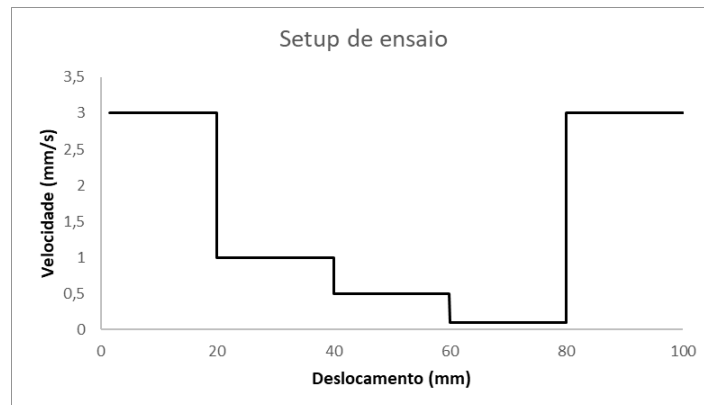


Figura 3. Velocidades usadas durante o ensaio

O ensaio foi então repetido com diferentes comprimentos da boquilha, ou seja, variando a relação L/D nos valores de 2, 7 e 10. A Tabela 3 mostra as três configurações de ensaio utilizadas.

Tabela 3. Dimensões dos elementos do ensaio

Lo (mm)	Do (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D
154	52	10	5	2
154	52	35	5	7
154	52	50	5	10

As definições de L_0 , D_0 , L , D encontram-se na Figura 1.

O modelo de cálculo proposto por Benbow e Bridgwater [1] consiste em calcular a pressão de extrusão em algumas regiões do ensaio, conforme as equações 1 a 3.

$$P = Pde + Pdl, \quad (1)$$

$$Pde = 2(\sigma_0 + \alpha V) \ln(D_0/D), \quad (2)$$

$$Pdl = 4(\tau_0 + \beta V)(L/D), \quad (3)$$

onde, Pde é a pressão na entrada da boquilha, Pdl é a pressão dentro da boquilha, σ_0 é a tensão de escoamento da pasta, α é o fator de velocidade da entrada da boquilha, τ_0 é a tensão de cisalhamento inicial, β é o fator de velocidade da região da boquilha.

3 Simulação numérica

Os parâmetros obtidos no ensaio de extrusão são utilizados como entrada no modelo computacional. Para validação do modelo, é feita a comparação da simulação numérica com resultados medidos nos ensaios.

Para modelar o comportamento do material estudado, é utilizada uma ferramenta de CFD (Computational Fluid Dynamics), Ansys Fluent. Com isso, se buscará a reprodução dos ensaios realizados de modo a simular o comportamento e buscar extrapolações para outros tipos de materiais e misturas.

As equações de conservação para escoamentos incompressíveis são: equações de conservação de massa e de conservação de momentum, apresentada na forma vetorial (equações 4 e 5).

$$\nabla u = 0, \quad (4)$$

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \sigma + g, \quad (5)$$

onde u é o vetor de velocidades, ρ a massa específica do fluido, g aceleração da gravidade e σ é o tensor de tensões definido através da equação 6.

$$\sigma = -pI + T, \quad (6)$$

onde p é a pressão e T é o tensor de tensões, obtido através das equações constitutivas.

Por se tratar de um fluido não newtoniano, foi utilizado o modelo de fluido newtoniano generalizado para obtenção das equações constitutivas. Este modelo consiste em uma extensão da lei de viscosidade de Newton [9], no qual o tensor de tensões é dado por:

$$T = 2n(\dot{\gamma})D = n(\dot{\gamma})\{\nabla u + (\nabla u)^T\}, \quad (7)$$

onde $n(\dot{\gamma})$ é a viscosidade aparente definida pela reação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

O fluido não newtoniano aqui estudado apresenta linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, porém, diferente dos fluidos newtonianos, é necessária uma tensão inicial para o início do escoamento. Portanto, foi utilizado o modelo Bingham para definição do comportamento reológico, obedecendo a equação [8]:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (8)$$

onde τ_0 é a tensão inicial, η é a viscosidade do fluido e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento.

A modelagem no programa Ansys foi realizada utilizando o modelo “*Multiphase (Volume of Fluid)*” para simular o comportamento em superfície livre depois do material ser extrudado. Para simulação dos materiais foi utilizado o modelo de viscosidade de *Herschel-Bulkley*. Também foi utilizada a função “*Dynamic Mesh*” para simulação do movimento do pistão.

4 Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios reológicos e das simulações numéricas.

4.1 Caracterização reológica

As três curvas obtidas através dos ensaios de extrusão são mostradas na Figura 4, onde é possível observar os patamares obtidos em cada velocidade utilizada.

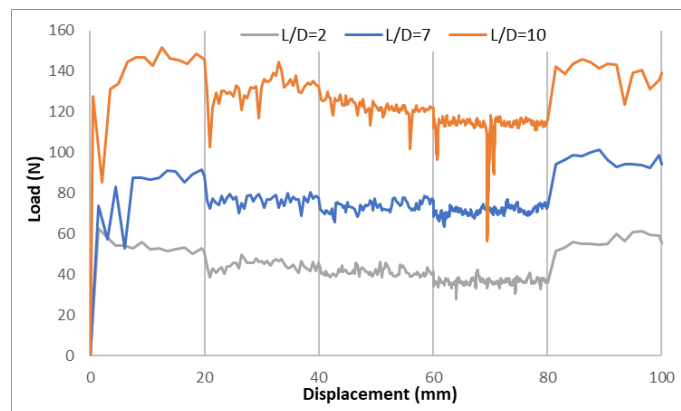


Figura 4. Carga aplicada em função do deslocamento do pistão

Obtendo o valor da força necessária para extrusão em cada velocidade, é possível montar uma curva da evolução da força em função da velocidade para cada configuração de ensaio utilizada, conforme apresentado na Figura 5.

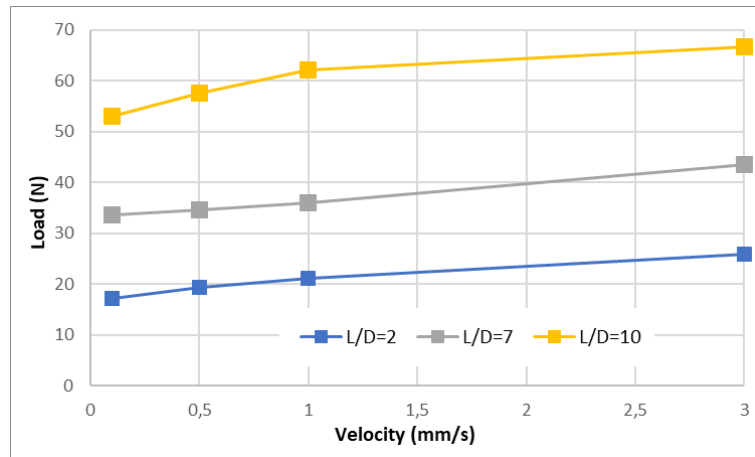


Figura 5. Carga aplicada em função da velocidade do pistão

Esses resultados também podem ser apresentados como pressão de extrusão em função da relação L/D, referente a cada configuração de ensaio diferente, conforme Figura 6.

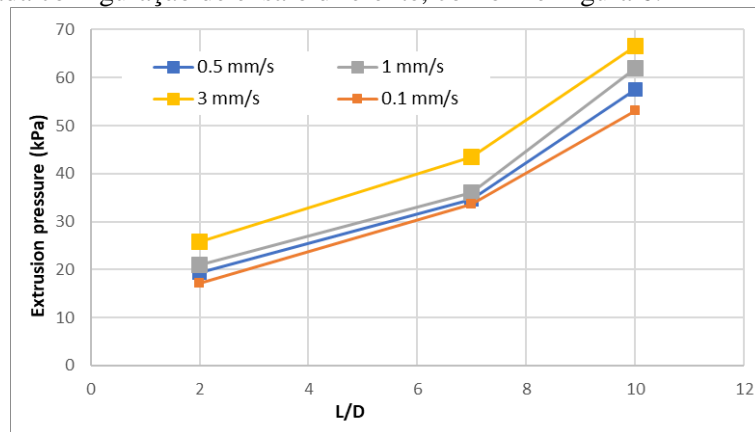


Figura 6. Pressão de extrusão em função de L/D

Extrapolando essas curvas, a pressão encontrada para $L/D=0$ retorna o valor de P_{de} , que é a queda de pressão na região da boquilha. A Figura 7 mostra os resultados das componentes da pressão em função da velocidade de extrusão para as três diferentes configurações de ensaio.

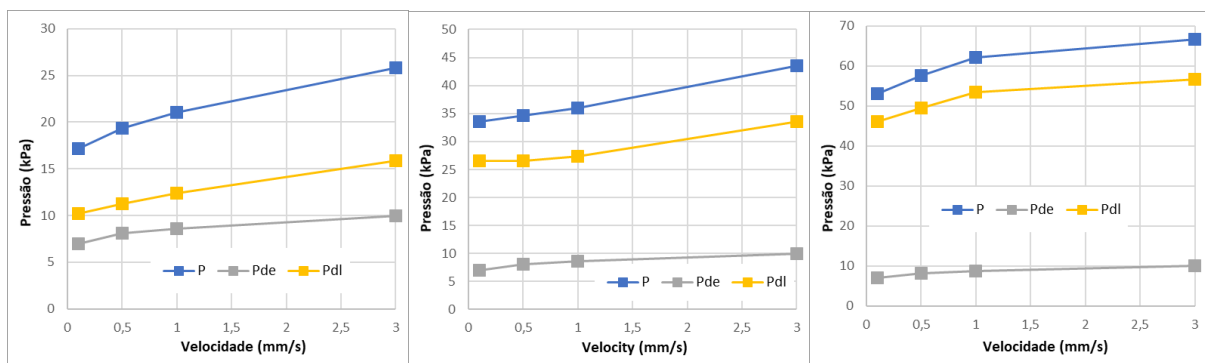


Figura 7. Variação das pressões de extrusão em função da velocidade de extrusão para diferentes configurações de ensaio

4.2 Simulação numérica

Os resultados estão sendo finalizados e serão enviados na versão final do artigo. Algumas análises testes já foram realizadas e apresentaram resultados visualmente bastante interessantes, mostrando o comportamento não newtoniano do fluido. A Figura 8 apresenta a comparação visual da simulação numérica com o ensaio realizado em laboratório.



Figura 8. Comparação da simulação numérica com o ensaio realizado

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro para a pesquisa em andamento, assim como os laboratórios de Mecânica dos Solos e de Microestrutura e Ecoeficiência da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Referências

- [1] J. Benbow and J. Bridgwater. Paste Flow and Extrusion. *Oxford series on advanced manufacturing*, Oxford, 153 pp, 1993.
- [2] BTS - British Tunnelling Society. Closed-Face Tunnelling Machines and Ground Stability: A guideline for best practice. Thomas Telford, London. Institution of Civil Engineers. 2005.
- [3] EFNARC - European Federation of National Associations Representing for Concrete. Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. UK, 45 p. 2005.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. 2016.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2016.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. 2016.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. 2016.

- [8] I. R. de Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, *Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico*, Fazenda Arte Editorial, São Paulo, 2000.
- [9] A. Whittaker. *Theory and Application of Drilling Fluid Hydraulics*. IHRDC, Boston, 198p, 1985.