

Modelagem Física em Centrífuga Geotécnica: Análise Experimental de Túnel Raso em Solos não Coesivos

Cleiton Cabral Martins

Discente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, cleitoncabralmartins@gmail.com

André Luiz Marques Júnior

Discente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, andrelmjunior.8@gmail.com

Aldo Durand Farfan

Professor Associado, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, aldo@uenf.br

RESUMO: Com o aumento da expansão urbana, as áreas apropriadas para construções tem sofrido impacto significativo, acarretando na extinção desses territórios. À vista disso, as redes de transportes e serviços necessitam ser inseridas no subsolo. Pensando em facilitar o acesso, em boa parte dos casos, túneis são construídos em profundidade mais curtas, não causando transtornos em infraestrutura existente, como, por exemplo, as fundações. Uma modelagem física em centrífuga geotécnica foi testada em escala reduzida com a aceleração de até 50g, simulando o método de escavação em TBM (Tunnel Boring Machine) para túneis rasos em solos não coesivos, com a finalidade de mensurar as possíveis influências deste método sobre esse tipo de solo. Sendo assim, é possível encontrar concordâncias entre as curvas de tensão e alívio, em paralelo com Idinger et al (2011).

PALAVRAS-CHAVE: TBM, Centrífuga, Solos não coesivos.

ABSTRACT: With the increase in urban expansion, areas suitable for construction have suffered a significant impact, resulting in the extinction of these territories. In view of this, transport and service networks need to be inserted underground. In order to facilitate access, in most cases, tunnels are built at shorter depths, not causing disruption to existing infrastructure, such as foundations. A physical modeling in a geotechnical centrifuge was tested on a reduced scale with an acceleration of up to 50g, simulating the excavation method in a TBM (Tunnel Boring Machine) for shallow tunnels in non-cohesive soils, with the purpose of measuring the possible influences of this method on this soil type. Therefore, it is possible to find agreements between the stress and relief curves, in parallel with Idinger et al (2011). **KEYWORDS:** TBM, Centrifuge, Non-cohesive soils.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano demanda a construção de redes de serviços e transportes instaladas no subsolo. Para atender à crescente demanda populacional, são construídos túneis rasos, como túneis rodoviários, ferroviários, além de obras que contribuem para o serviço público, como túneis de esgoto, água, gás e, em alguns casos, de pedestres.

Desse modo, os túneis em regiões urbanas são frequentemente construídos em terrenos macios, e implantados geralmente próximos à superfície.

A partir da percepção da importância das contribuições da modelagem física em centrífuga geotécnica para a engenharia, é possível reconhecê-la como um método experimental eficaz, especialmente quando se trata de problemas geotécnicos de difícil resolução. Segundo NG (2014), nos últimos cinquenta anos, a modelagem centrífuga conquistou o quinto lugar no índice dos desenvolvimentos mais relevantes em geotecnia.

Grandes pesquisas foram realizadas utilizando centrífugas geotécnicas em diversos países, como China, Japão, Colômbia e aqui no Brasil.

O presente trabalho apresenta uma simulação experimental em escala reduzida realizada em uma centrífuga geotécnica. A simulação trata da avaliação da frente de escavação em túnel raso em solos não coesivos, com uma relação entre cobertura e diâmetro (C/D) de $1/2D$, na perspectiva de estabelecer um paralelo com o trabalho de Idinger et al (2011).

2 METODOLOGIA

2.1 A Centrífuga Geotécnica

Para realizar a modelagem física, foi utilizada a Centrífuga Geotécnica do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). A centrífuga tem uma velocidade máxima de 227 rotações por minuto, possibilitando a geração de um campo gravitacional de até 100 vezes o valor da gravidade terrestre. Na Figura 1 encontra-se uma fotografia da centrífuga mencionada preparada para realização do ensaio.

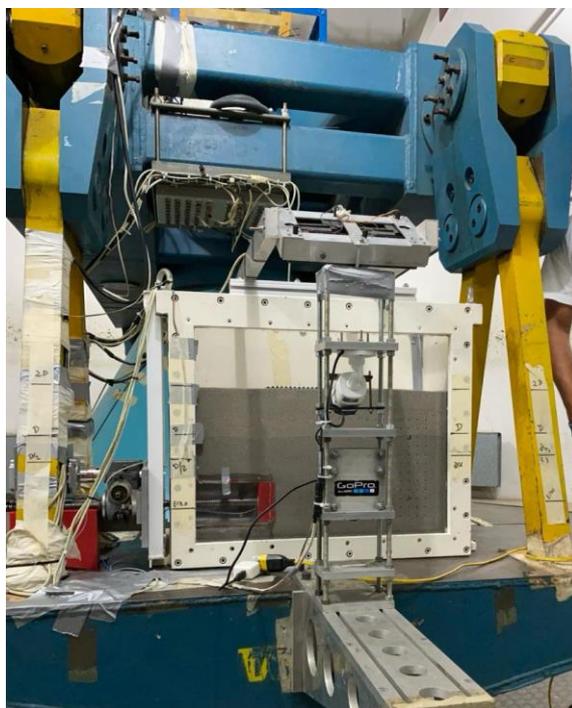


Figura 1. Centrífuga Geotécnica da UENF com o modelo do túnel.

É preciso observar cuidadosamente as leis de escala e os efeitos do tamanho ao utilizar modelos em pequena escala. O entendimento da simulação a pequena escala requer a atenção às leis de semelhança física com o protótipo, ou seja, a proporcionalidade geométrica, cinemática e dinâmica.

O modelo em escala reduzida em centrífuga está sujeito a um campo de aceleração n vezes maior que a aceleração gravitacional “ g ”. Como resultado, o nível de tensão do material dentro do modelo em escala reduzida será semelhante ao protótipo, garantindo a semelhança da tensão em profundidades correspondentes no modelo e no protótipo. Isso implica que um modelo em escala de $1/n$ se comportará semelhante ao protótipo na escala real se for submetido a uma aceleração de centrífuga n vezes g . Portanto, os procedimentos dependentes da gravidade são replicados corretamente. A tensão e a deformação na massa de solo do protótipo são preservadas, e a curva deformação-tensão do modelo é correspondente ao protótipo (Indinger et al, 2011).

2.2 Material Utilizado

A Figura 2 mostra o túnel à pequena escala do modelo, que foi inserido em uma caixa de teste de aço (A36) com espessura de 19,05 mm, tendo dimensões internas de 581 mm x 700 mm x 300 mm, representando profundidade, comprimento e largura, respectivamente. Uma placa acrílica de 30 mm de espessura foi fixada na parede frontal da caixa de teste.

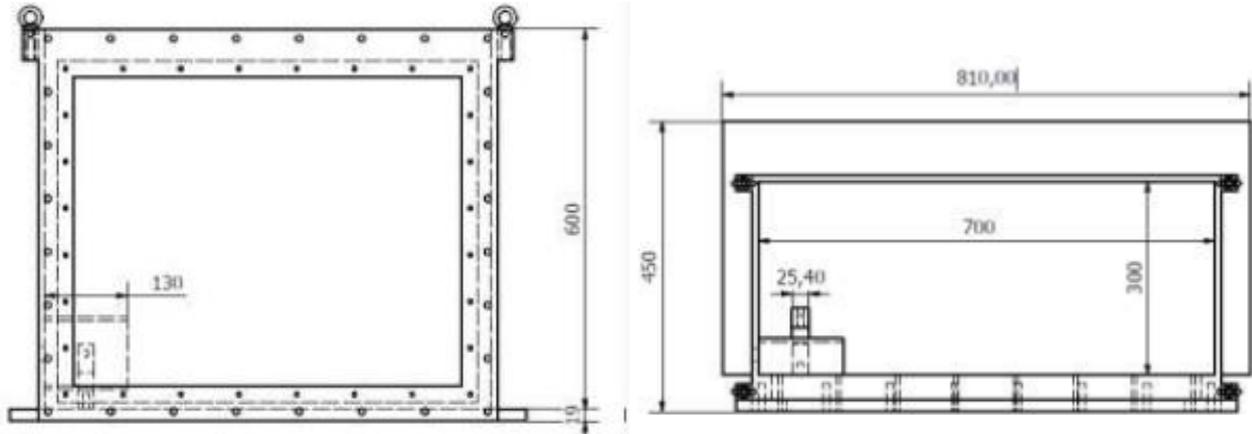


Figura 2. Vista frontal e vista superior da caixa teste.

Posteriormente, a caixa de teste foi preenchida com areia normatizada do IPT (NBR 7214), com diâmetro médio aproximado de $d_{50} = 0,52$ mm, conforme indicado na Figura 3. A densidade foi controlada por meio de altura de queda controlada. Os índices de vazios máximo e mínimo da areia utilizada no modelo foram de 92% e 67%, respectivamente. Para a interação solo-estrutura na face do túnel, a comissão TC2 da ISSMGE recomenda uma relação dimensional de $(D/d_{50}) > 175$ (Indiger et al, 2011). Assim, o modelo alcançou um valor (D/d_{50}) de aproximadamente 211.

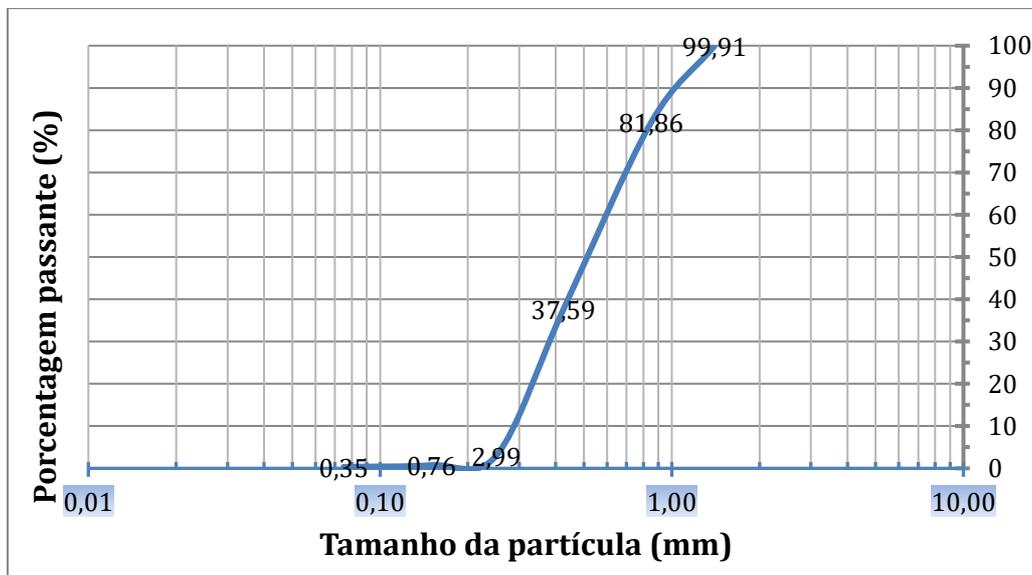


Figura 3. Diâmetro médio dos grãos.

2.3 Modelo Físico de Túnel Raso e Instrumentação

O modelo do túnel raso apresentava uma seção transversal semi-circular (figura 4), considerando apenas metade da seção transversal do túnel. Em seguida, o modelo do túnel foi inserido na parte interna da caixa de teste, na parede de acrílico. O modelo do túnel possuía um revestimento constituído pela metade de um cilindro de aço, com diâmetro de 110 mm.

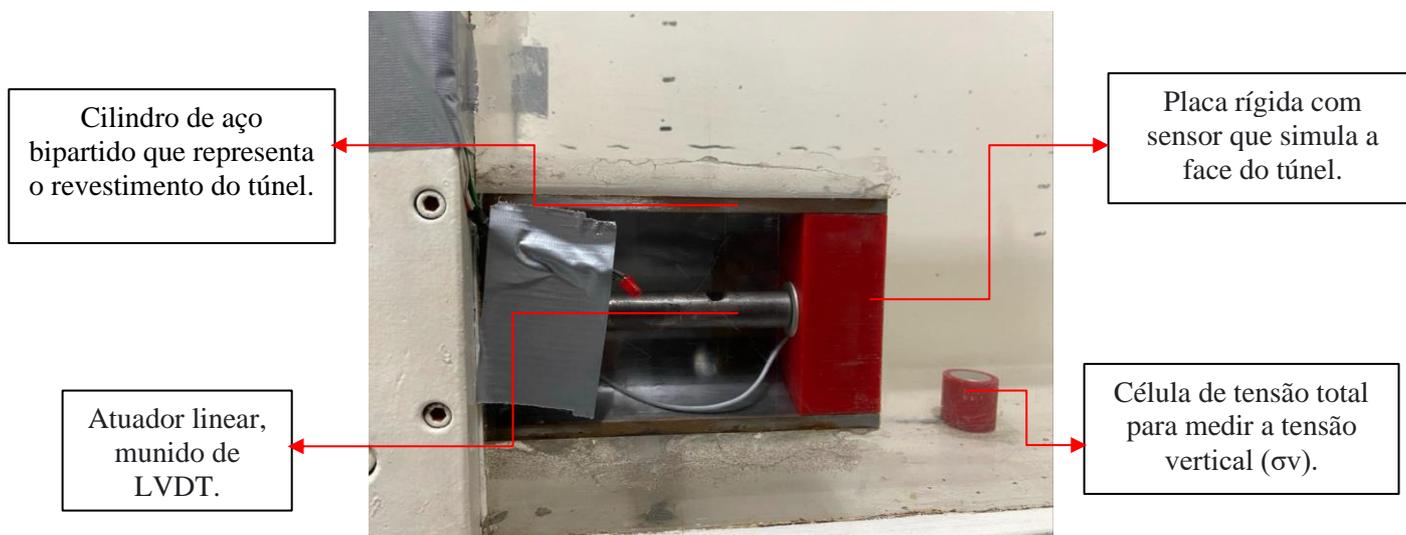


Figura 4. Túnel modelo inserido na caixa teste.

A face do túnel foi simulada por um suporte semicircular, que podia ser movido para frente ou para trás por meio de um atuador linear a deslocamento controlado, esses movimentos provocam no solo na frente de escavação pressão e alívio, respectivamente. Células de carga foram utilizadas para medir as tensões nos sentidos horizontal e vertical. Ademais, um transdutor indutivo LVDT foi utilizado para medir o deslocamento na placa rígida com uma velocidade de 0,008mm/s.

3 RESULTADOS

Os resultados experimentais sobre o comportamento da face do túnel podem ser avaliados junto aos resultados de Idinger e colaboradores. A simulação de Idinger et al (2011) considera também uma haste munida de um medidor de deslocamento com LVDT, para medir o deslocamento controlado da placa rígida. A medição da pressão na frente de escavação é obtida de maneira indireta, e para isso, é utilizada a leitura da célula de carga instalada entre a placa rígida e a haste dentro do cilindro que representa o revestimento do túnel. Este sistema assim instalado, apresenta leituras de carga transformadas em pressão e que devem ser corrigidas pelo atrito entre a placa rígida e o revestimento. Para o modelo proposto neste trabalho, é instalado um sensor de pressão total na parede frontal da placa rígida em contato com o solo, fazendo assim a leitura de pressão no solo de forma direta.

O teste em centrífuga geotécnica foi realizado em relação ao comprimento e diâmetro (C/D), sendo $1/2D$. O modelo do túnel foi acelerado até 50g, correspondente a um protótipo de túnel com 5,5 m de diâmetro. Portanto, a cobertura do protótipo acima do túnel ficou em aproximadamente 2,75 m. Diferente de Idinger et al (2011), o sensor do modelo do túnel foi instalado na parte frontal (face do túnel), o que foi possível encontrar uma tensão maior, pois foi medido in loco.

A Figura 5 demonstra as medições da célula de pressão (p) no atuador, onde p foi dividida pelo peso específico e pelo diâmetro do túnel [$p/(\gamma * D)$].

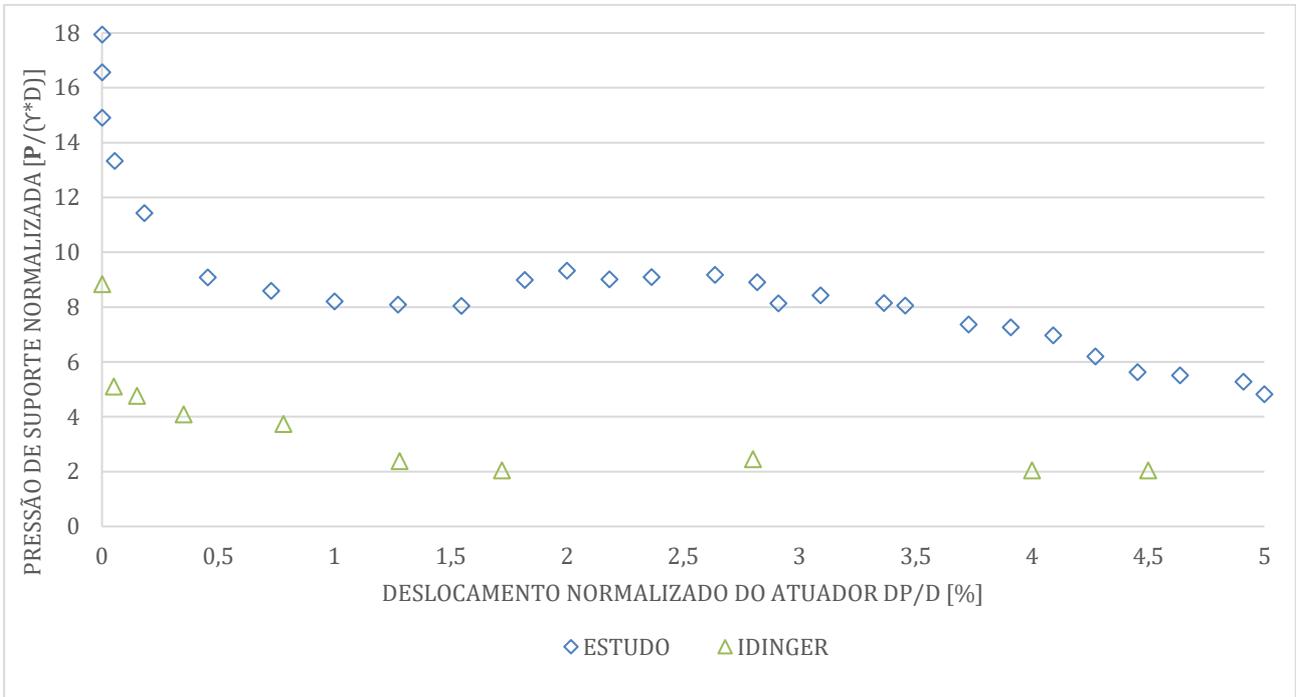


Figura 5. Pressão de suporte normalizado.

Com as diferenças supracitadas, percentualmente, os dois modelos apresentados, tem uma grande semelhança, conforme é denotado na Figura 6.

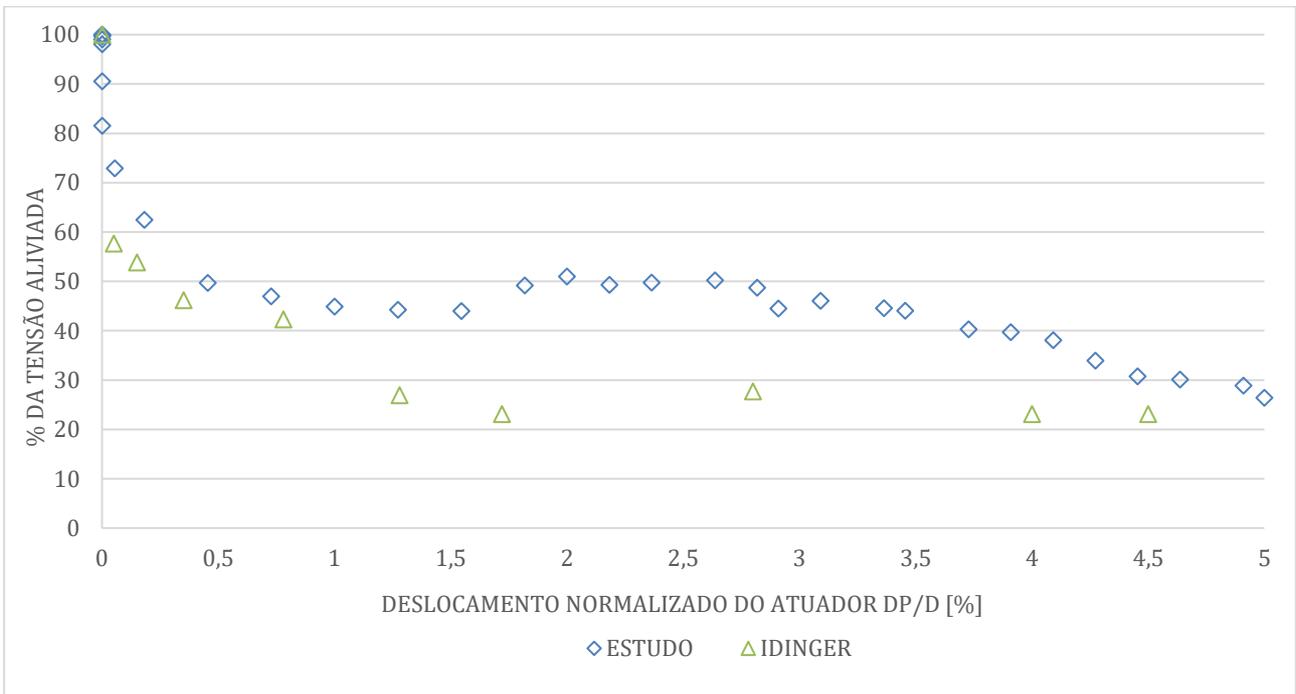


Figura 6. Tensão aliviada (%).

4 CONCLUSÃO

Considerando o cenário do solo não coesivo neste artigo, em paralelo com Idinger et al (2011) foi percebido o alívio de pressão na face da escavação, conforme observado na figura 5, no modelo de túnel proposto. É possível observar que as curvas de tensão de alívio têm uma semelhança entre si. Vale ressaltar que as curvas de Idinger et al (2011) são menos acentuadas devido às razões explicadas anteriormente. As interpretações analíticas da literatura foram relacionadas aos resultados experimentais e experimentos como os de Kirsch (2010) e Indiger (2014) apresentaram concordância com os resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

Os colaboradores gostariam de agradecer à agência financiadora FAPERJ pelo fomento via Projeto APQ1-2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis, A. P. (2002a). *Mecânica das rochas: obras subterrâneas*. Brasília, DF: Departamento de Engenharia Civil, UnB
- Craig, W.H., 1995. Geotechnical centrifuge: past, present and future. *Geotechnical Centrifuge Technology*.
- Bucky BP (1931) *The use of models for the study of mining problems*, Technical publication No.425, American institute of mining and metallurgical engineers, pp 3–28.
- Garrides M., Souza P., Campos Neto L. *Transporte público em Belo Horizonte: um estudo comparativo entre metrô e monotrilho*. Petra, 2016.
- Idinger, Gregor; AKLIK, Pelin; WU, Wei; BORJA, Ronaldo I.. *Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel*. *Acta Geotechnica*, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 105-117, jun. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-011-0139-2>.
- Kim, S., Tonon, F. (2010). *Face stability and required support pressure for TBM driven 96 tunnels with ideal face membrane – Drained case*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5), 526–542. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.03.002>.
- KIRSCH, Ansgar. *Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand*. *Acta Geotechnica*, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 43-62, 6 mar. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-010-0110-7>.
- Ng, Charles W. W. *The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST*. *Journal Of Zhejiang University Science A*, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-21, jan. 2014. Zhejiang University Press. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.a1300217>.