**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.3/13**

# Estudo da Rigidez Relativa na Distribuição de Tensões de Fundações, Utilizando Sensores Táteis (*Tactile Pressure Sensor* – TPS)

Diovana Patias Della Flôra
Engenheira Pesquisadora, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, diovana.flora@coc.ufrj.br

Willians Perlley Alexandre da Silva
Doutorando / Engenheiro Pesquisador, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, willians.perlley@coc.ufrj.br

José Wellington Santos de Vargas
Engenheiro Pesquisador, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, jwsvargas@coc.ufrj.br

Gustavo Santos Domingos
Professor Assistente, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, gustavodom@coc.ufrj.br

RESUMO: Modelos teóricos baseados na Teoria da Elasticidade mostram que a distribuição de tensões de contato sob sapatas depende da rigidez relativa solo-fundação. Todavia, a literatura técnica carece de resultados experimentais, provavelmente pela dificuldade de se ter instrumentos capazes de medir as tensões de contato com acurácia, sem causar interferências na interação solo-elemento estrutural de fundação, e em dimensões compatíveis com os modelos utilizados em laboratório ou em escala real de projeto. Sensores táteis, também conhecidos como *tactiles* (*Tactile Pressure Sensor* - TPS), se mostram uma excelente e poderosa ferramenta para demonstrar experimentalmente, e de maneira didática, o efeito da distribuição das tensões de contato, uma vez que a reduzida espessura desses sensores, da ordem de uma folha de cartolina, os tornam flexíveis o bastante para não interferir nos resultados. O presente trabalho apresenta resultados experimentais da distribuição de tensões de contato sob sapatas utilizando sensores TPS em modelos de escala reduzida em laboratório, explorando diferentes rigidezes relativas. Esses experimentos permitem demonstrar como a distribuição de tensões de contato é função da rigidez relativa entre o elemento estrutural e o elemento que representa o terreno de fundação. O trabalho também tem como objetivo apresentar os TPS como ferramenta pedagógica para a realização de experimentos de demonstração sobre o comportamento de fundações e estruturas geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Tensões de Contato, Sensores Táteis, Ensino de Engenharia.

ABSTRACT: Theoretical models based on the Theory of Elasticity show that the contact stress distribution under footings depends on the soil-foundation relative stiffness. However, the literature lacks experimental results, likely due to the difficulty of employing instruments capable of accurately measuring contact stress, without interfering in the measurements, while maintaining dimensions compatible with laboratory models or real-scale projects. *Tactile Pressure Sensors* (TPS) emerge as an excellent and powerful tool to experimentally and didactically demonstrate the effect of contact stress distribution since their small thickness, comparable to a sheet of card stock, provides sufficient flexibility to avoid affecting the results. This study presents experimental results of contact stress under foundations using TPS in small-scale laboratory models, exploring different relative stiffnesses. The experiments illustrate how the stress distribution is a function of the relative stiffness between the structural element and the medium representing the foundation ground. Furthermore, this work aims to present the TPS as a pedagogical tool for experimental classes and demonstrations regarding the behaviour of foundations and geotechnical structures.

KEYWORDS: Foundations, Contact Stress, Tactile Sensors, Engineering Teaching.

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de rigidez relativa é fundamental para o estudo da interação solo-fundação, visto que é determinante nas tensões transmitidas pelo elemento de fundação ao solo, também denominadas tensões ou pressões de contato (Velloso e Lopes, 2010). Embora intuitivamente seja possível supor a forma geral das pressões de contato nos casos extremos de rigidez relativa infinita ou nula, ao menos qualitativamente, a resposta real do sistema fundação-solo precisa ser avaliada quantitativamente.

Diversas propostas para essa avaliação estão presentes na literatura, sendo que cada uma delas está associada a um ou mais tipos específicos de fundação, ou sistemas fundação-solo, ou ainda a hipóteses matemáticas e técnicas numéricas (descritas, por exemplo, em Selvadurai, 1979). Entre essas propostas, Borowicka (1936) propôs a Equação 1 para a determinação da rigidez relativa, $k$, de uma sapata circular, baseando-se nas hipóteses de que o solo é um meio semi-infinito, elástico, e isotrópico. De acordo com Selvadurai (1979), as hipóteses adotadas por Borowicka (1936) admitem que a flexão da sapata segue a teoria clássica de placas delgadas.

$$k = \frac{1}{6}\frac{\nu_f^2}{\nu_s^2}\frac{\nu_s^2-1}{\nu_f^2-1}\frac{E_f}{E_s}\left(\frac{h}{r_f}\right)^3 \quad (1)$$

onde $E$ (Módulo de Elasticidade) e $\nu$ (Coeficiente de Poisson) são os parâmetros elásticos do elemento estrutural de fundação (subscrito $f$) e do solo (subscrito $s$), $h$ e $r_f$ são a espessura e o raio da sapata, e $k$ é parâmetro de entrada de formulações que equacionam a distribuição das tensões de contato, oriundas de diversos tipos de carregamento, como no caso de cargas centradas sobre placas circulares assentes sobre meio elástico (Borowicka, 1939), como será abordado neste estudo.

Atualmente, o acesso a ferramentas numéricas poderosas facilitou o estudo da interação solo-fundação nos projetos correntes. Essas ferramentas não apenas permitem considerar carregamentos mais complexos que aqueles para os quais se dispõe de solução analítica, mas também permitem introduzir uma modelagem mais sofisticada do comportamento do solo (e.g. Yamin *et al*., 2017; Oliveira e Garcia, 2025). Não obstante, a investigação experimental da interação solo-fundação continua sendo importante, e com poucos estudos publicados (e.g. Ho e Lopes, 1969; Liang *et al*., 2019).

Nesse contexto, a utilização de sensores táteis de pressão (*Tactile Pressure Pensors*, TPS) apresenta-se como uma via promissora para a investigação experimental de problemas que envolvem transmissão de tensões em interfaces (Palmer *et al*., 2009; Domingos *et al*., 2023), como é o caso da interação solo-fundação, principalmente por ter as vantagens de cobrir áreas maiores que os sensores usuais, como células de tensão, e por ter rigidez essencialmente nula, o que causa menor interferência no fenômeno em estudo (Domingos *et al*, 2023).

Além de ferramenta de pesquisa, os experimentos têm grande valor como técnica pedagógica no ensino de engenharia (e.g. Ramos e Vertchenko, 2011), e em particular do comportamento de estruturas geotécnicas (e.g. Gutiérrez-Ch *et al*., 2024). Nesse contexto, o TPS torna-se uma poderosa ferramenta para o ensino didático, pois permite a execução de experimentos simples em sala de aula, ou em laboratório, para a medição de tensões de contato.

Este trabalho descreve experimentos com o uso de TPS, visando medir as tensões de contato na interface solo-fundação, explorando a influência da rigidez relativa, com modelos reduzidos de sapatas circulares.

## 2 SENSORES TÁTEIS DE PRESSÃO

Sensores TPS, comumente denominados "*tactiles*", consistem em uma matriz de linhas e colunas de larguras RW e CW, respectivamente, impressas com uma tinta piezoresistiva e condutora em folhas de poliéster (PET), de pequeníssima espessura (0,1 mm) (Figura 1). A interseção ortogonal de linhas e colunas de duas folhas, forma um ponto de medição denominado "*Sensel*", semelhante a uma célula de carga miniaturizada. Cada "*Sensel*" é capaz de fornecer a variação da força normal aplicada (e pressão, ou tensão, se dividir a força normal pela área equivalente), através da calibração numa câmara pressurizada (Figura 2b), utilizando um software e aquisitor de dados ("*Handle*") de propriedade intelectual do fabricante dos TPS (Tekscan, Inc., 2018).

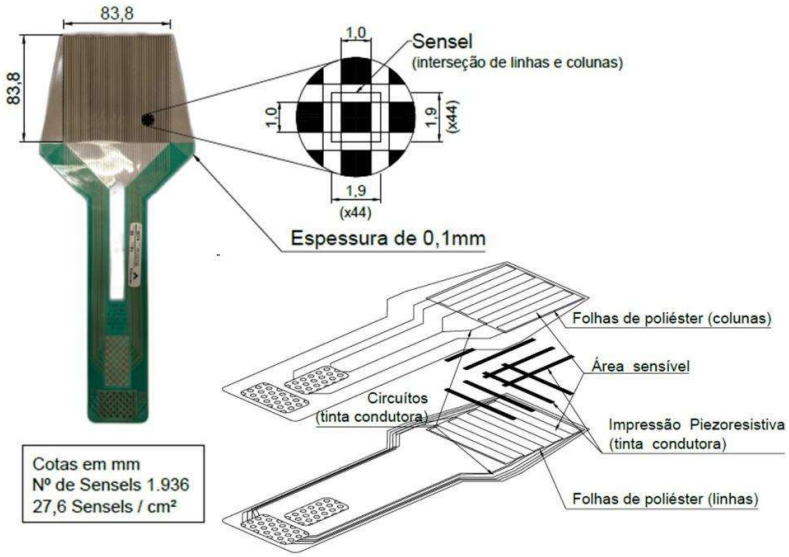
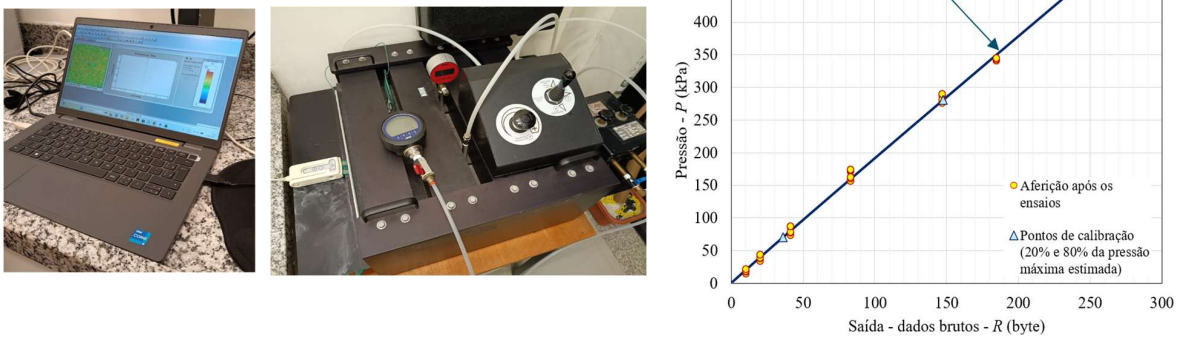



Figura 1. Sensores táteis de pressão (*Tactile Pressure Sensor* – TPS) – Tekscan – Modelo 5076.

Segundo Paikowsky e Hajduk (1997), os TPS surgiram no início da década dos anos 1980, no Laboratório de Inteligência Artificial do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para aplicação em ortodontia. Recentemente, esses sensores têm sido utilizados para várias aplicações da engenharia geotécnica, tais como tubulações enterradas (Palmer *et al*., 2009), fundações em estacas (Zhang e Wang, 2019), muros de contenção (Nicks *et al*., 2019), pavimentos (Neupane *et al*., 2019), e ensaios CPT em câmara de calibração de pequenas dimensões (Ghali *et al*., 2020), e de grandes dimensões (Domingos *et al*., 2023).

Para avaliação da distribuição das tensões de contato solo-fundação deste trabalho, foi utilizado um TPS do modelo 5076, de capacidade nominal de 345 kPa (50 psi), cujas características geométricas estão resumidamente apresentadas na Figura 1.

As Figuras 2a e 2b apresentam o *set-up* utilizado na calibração do sensor, cuja equação apresentada no gráfico da Figura 2c correlaciona os dados brutos (valores R: 255 posições ≈ 256 bytes ↔ sistema de aquisição de 8 bits) coma a grandeza de engenharia desejada (pressão ou tensão – *P*). O TPS foi calibrado conforme procedimento recomendado pelo fabricante (Tekscan, Inc., 2016), que é utilizar dois pontos de calibração, com 20% e 80% da tensão máxima estimada para os testes (triângulos azuis). Após a realização dos ensaios, foi realizada a checagem do TPS (círculos amarelos), uma vez que o uso sistemático pode danificar o TPS, o que não se mostrou, pelo menos para o *range* de tensões dos ensaios realizados (valores médios até 50 kPa).




(a) (b) (c)

Figura 2. (a) Sistema Tekscan; (b) câmara de pressão de ar para calibração do TPS; (c) curva de calibração do TPS Modelo 5076.

## 3 METODOLOGIA E MATERIAIS

A Figura 3 apresenta a metodologia adotada nos testes. O estudo buscou monitorar as tensões de contato solo-fundação, utilizando na interface o TPS – Tekscan – Modelo 5076 (Figura 1). Para simular o meio elástico que representa o terreno de fundação (*TF*), foram utilizadas uma espuma de baixa densidade e uma areia no estado compacto. O elemento estrutural de fundação (*EF*) foi representado por sapatas circulares (Ø = 70 mm), de inércias e materiais com parâmetros elásticos distintos (alumínio e borracha).

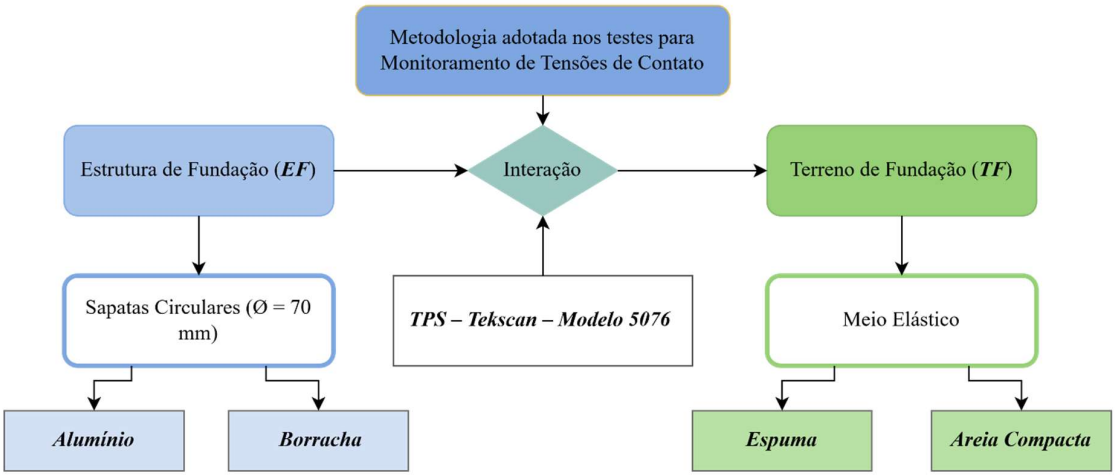



Figura 3. Metodologia adotada no estudo.

A areia utilizada no estudo foi a Areia da Praia de São Francisco em Niterói-RJ, cuja caracterização e parâmetros geotécnicos foram estudados por Oliveira Filho (1987), e mais recentemente por Domingos *et al.* (2023). Trata-se de uma areia quartzosa, de granulometria fina e uniforme ($D_{50}$ = 0,18 mm; CU = 2,1; CC = 1,2). Os CPs foram preparados através do método de pluviação sobre peneiras de Miura e Toki (1982) (Figura 4), com objetivo de atingir a condição compacta da areia. O índice de vazios médio obtido foi 0,648, equivalente a uma compacidade relativa ($D_r$) média de 88%.

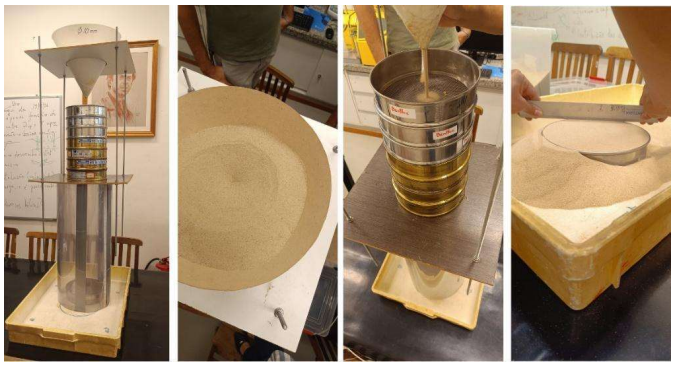


Figura 4. Método de pluviação da areia para atingir a compacidade desejada.

Para a areia compacta foi utilizado o módulo de elasticidade (módulo de Young) de 20 MPa, e um coeficiente de Poisson de 0,35. Este valor de módulo está em consonância com os valores experimentais obtidos por Domingos (2022) e Oliveira Filho (1987), visto que a areia praticamente não possui nenhum confinamento nos ensaios aqui descritos (carregamento na superfície).

De forma similar, para o outro material utilizado como representativo do *TF*, a Espuma D13, o módulo de elasticidade foi estimado pela equação proposta por Gibson e Ashby (1988), que relaciona as propriedades da espuma com as propriedades (peso específico e módulo de Young) do material que a constitui (poliuretano). Essa estimativa forneceu um valor de módulo de 5,3 kPa para a Espuma D13. O coeficiente de Poisson adotado para a espuma foi de 0,33 (Gibson e Ashby, 1988).

Para a sapata de alumínio, empregaram-se os valores de 69 GPa para o módulo de elasticidade, e de 0,33 para o coeficiente de Poisson. No caso das sapatas de borracha, foram adotados o módulo de 5,5 MPa, oriundo da proposição de Gent (1958), em função da dureza shore, cujo valor foi adotado como 70. Adotou-se como coeficiente de Poisson da borracha o valor de 0,49, indicando um material muito próximo de incompressível.

Tabela 1. Matriz de ensaios e propriedades dos materiais utilizados no estudo.

| Ensaio | Sapata (*EF*) | Características | Base – Meio Elástico (*TF*) | Características | Rigidez relativa $k$ (*EF–TF*) |
|---|---|---|---|---|---|
| I | Alumínio (*Std*) | $E$ = 69.000 MPa<br>$\nu$ = 0,33<br>$h$ = 2 cm<br>$r_f$ = 3,5 cm | Areia compacta | $E$ = 20 MPa<br>$\nu$ = 0,35 | 9,4 x $10^{1}$ |
| II | | | Espuma D13 | $E$ = 0,0053 MPa<br>$\nu$ = 0,33 | 4,0 x $10^{5}$ |
| III | Borracha (*Std*) | $E$: 5,5 MPa<br>$\nu$ = 0,49<br>$h$ = 2 cm<br>$r_f$ = 3,5 cm | Areia compacta | $E$ = 20 MPa<br>$\nu$ = 0,35 | 1,9 x $10^{-2}$ |
| IV | | | Espuma D13 | $E$ = 0,0053 MPa<br>$\nu$ = 0,33 | 8,3 x $10^{1}$ |
| V | Borracha (*Low*) | $E$: 5,5 MPa<br>$\nu$ = 0,49<br>$h$ = 0,55 cm<br>$r_f$ = 3,5 cm | Areia compacta | $E$: 20 MPa<br>$\nu$ = 0,35 | 4,0 x $10^{-4}$ |
| VI | | | Espuma D13 | $E$ = 0,0053 MPa<br>$\nu$ = 0,33 | 1,7 x $10^{0}$ |

*Std* – rigidez padrão; *Low* – rigidez reduzida.

A matriz de testes realizados, com as características e parâmetros elásticos dos materiais, está apresentada na Tabela 1. Os valores de rigidez relativa (*EF–TF*) foram calculados a partir da Equação 1 (Borowicka, 1936).

Os carregamentos foram aplicados em estágios, através da colocação de pesos num pendural, que transferia as cargas para o topo das sapatas com o uso de uma esfera (carga pontual centrada na sapata), seguidos de estágios de descarregamento em sequência oposta. Para cada ensaio (I a VI), somente o estágio de carregamento de maior peso aplicado será analisado nos resultados (Figura 5).



Figura 5. Aplicação do carregamento na sapata modelo por meio de pendural e pesos (esquerda) e detalhe do TPS entre a sapata e a areia (direita).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta as tensões de contato para cada um dos casos (I a VI) descritos na Tabela 1, bem como fotos de cada um desses ensaios. Nesta figura, os losangos de hachura cinza e branco representam o centro de carga do carregamento, enquanto que o quadrado representa a região onde ocorreu a tensão máxima de toda a área mobilizada. As tensões de contato em todos os casos em que o material de base foi a espuma

(II, IV e VI) concentraram-se na borda da sapata. Essa distribuição é típica dos casos em que a rigidez relativa da fundação é elevada, isto é, nos casos de sapata muito rígida e/ou solo muito deformável. Os ensaios II, IV e VI representam, respectivamente, casos em que a rigidez relativa decresce à medida que a rigidez da sapata diminui.

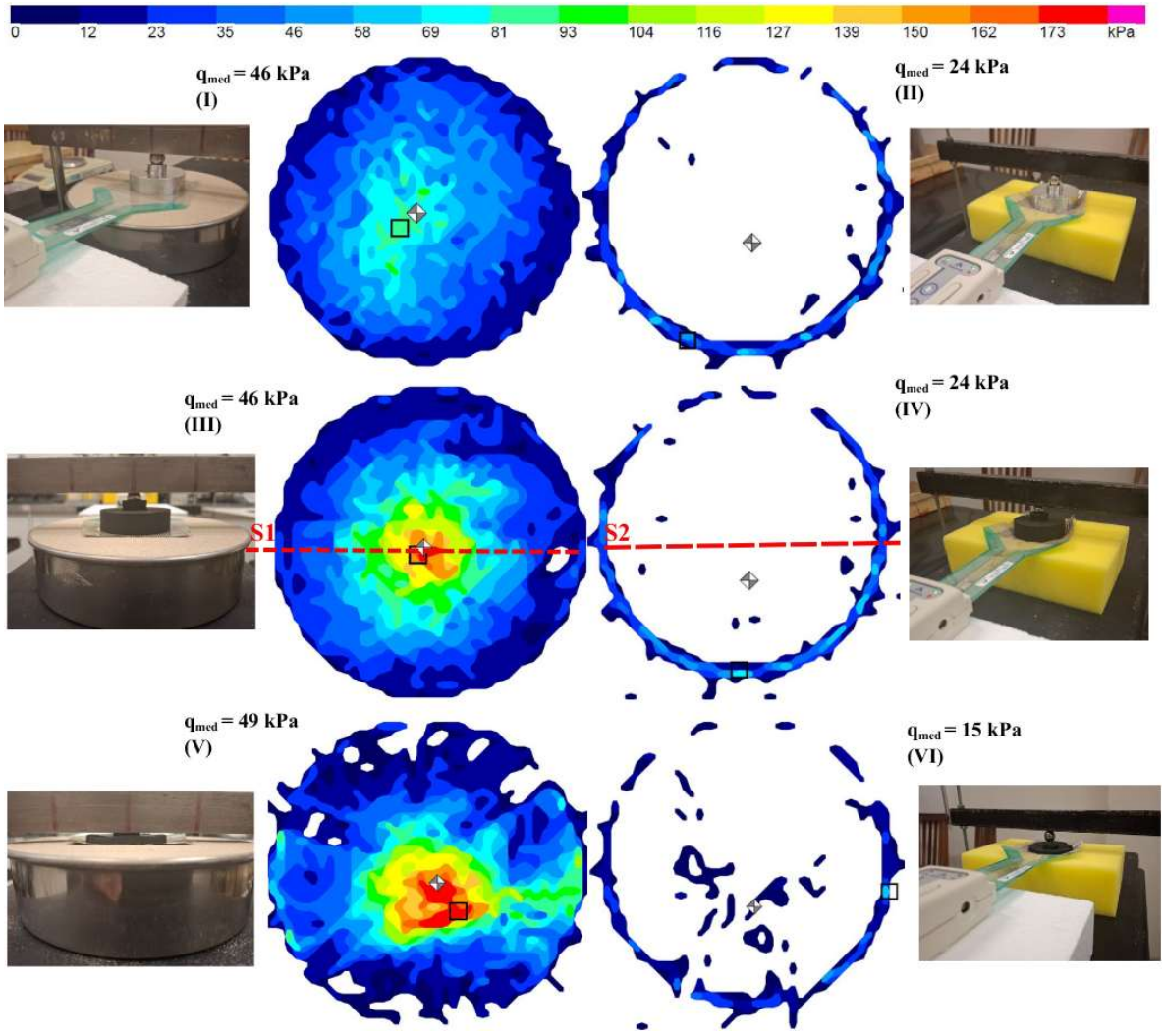



Figura 6. Tensões de contato e fotos dos ensaios I a VI.

Por outro lado, nos ensaios realizados sobre a areia compacta (ensaios I, III, e V), é possível verificar que as tensões de contato distribuem-se por toda a área da sapata, com a tendência de concentrar tensão na região central, com maior concentração de carga à medida que a rigidez relativa da sapata diminui. No entanto, parece haver no caso I uma discrepância fundamental, visto que a rigidez relativa da sapata tende a ser infinita, portanto, deveria se aproximar de um comportamento semelhante ao observado nos ensaios II, IV e VI. Todavia, vale ressaltar que a Figura 7 (Borowicka, 1939) apresenta tensões de contato considerando o *TF* no regime elástico, o que não reflete necessariamente as condições do ensaio, uma vez que, após atingido certo estado de tensões, há ocorrência de plastificação em partes do meio. Uma estimativa da capacidade de carga para a sapata na areia, revelou que a tensão média medida no TPS está na condição próxima da ruptura (FS = 1, considerando $\phi' = 45°$). Dessa forma, tornam-se importantes os efeitos de plastificação do solo e as tensões de contato que se redistribuem e se distanciam das condições elásticas, como demonstrou Schultze (1961).

A Figura 7 apresenta uma comparação das tensões de contato nas seções transversais S1 e S2, indicadas na Figura 6, onde são comparados à previsão teórica de Borowicka (1939) com os ensaios III e IV. Esses casos representam situações em que a mesma sapata se comporta como flexível ($k = 0{,}019$) quando sobre um terreno de fundação rígido (areia compacta), e como rígida ($k = 83$) quando sobre um terreno de fundação deformável (espuma).

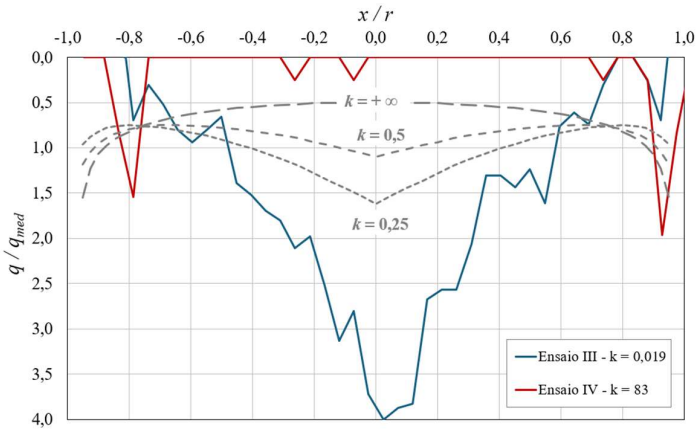



Figura 7. Perfis de tensão de contato obtidos experimentalmente nos ensaios III e IV comparados aos perfis teóricos de Borowicka (1939) para diferentes rigidezes relativas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante destacar o caráter didático dos experimentos apresentados, especialmente da comparação entre os ensaios III e IV, por meio dos quais se pode demonstrar os efeitos da rigidez relativa solo-fundação. Exceto pelo processo de pluviação da areia, que é mais dispendioso, os experimentos com as sapatas modelo puderam ser realizados em tempo relativamente curto, sem grandes dificuldades de ordem técnica, podendo ser perfeitamente realizados em sala de aula, enriquecendo, assim, o aprendizado sobre interação solo-fundação.

Sob a ótica do entendimento da distribuição de tensões sob fundações superficiais, os resultados evidenciam a necessidade de um estudo mais amplo, com uma combinação de elementos representativos dos elementos de fundação (*EF*) e terrenos de fundação (*TF*) de diferentes rigidezes e tensões limite de plastificação, que podem confirmar, experimentalmente, as distribuições teóricas apresentadas por autores como Borowicka (1936, 1939) e Schultze (1961). Este estudo mais aprofundado está em curso e será objeto de publicação futura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Francisco de Rezende Lopes pela revisão do texto e pelos comentários que enriqueceram o trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borowicka, H. (1936) Influence of rigidity of a circular foundation slab on the distribution of pressures over the contact surface. In: Proceedings of the 1st International Conference of Soil Mechanics, Cambridge. Vol 2, p. 144-149.

Borovicka, H. (1939) Distribuição de pressões sob placas elásticas (em alemão). *Ingenieur-Archiv*, 10 (2), p. 113-125.

Domingos, G. S. (2022) *Estudo do creep não drenado da areia da praia de Ipanema sob condição hidrostática*, Tese de Doutorado, Coppe, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 423 p.

Domingos, G. S., Pereira Pinto, C., Danziger, F. A. B., Pinheiro, A.V. S., Lunne, T. (2023) Use of tactile sensors for horizontal stress measurements on a large calibration chamber. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. 23 (6), p. 308–328. https://doi.org/10.1680/jphmg.21.00084

Gent, A. N. (1958) On the relation between indentation hardness and Young's modulus. *Rubber Chemistry and Technology*, 31 (4), p. 896-906.

Ghali, M., Chekired, M., Karray, M. (2020) Laboratory simulator for geotechnical penetration tests. *Geotechnical Testing Journal*, 43 (1), p. 211–234.

Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1988) Cellular solids: structure and properties, 1st ed., Pergamon Press, New York, USA, 357 p.

Gutiérrez-Ch, J. G., Galindo, J. G., Antequera, J. P., Mateos, E. E., Graterol, E. P., Domínguez, S. S., Bordehore, L. J., Ramos, M. R., Aires, R. G., Rodriguez, R. J. (2024) Small-scale testing for teaching the behavior of geotechnical structures. In Proceedings of the 17th Annual International Conference of Education, Research and Innovation, Sevilla, Spain, p. 2950-2956.

Ho, M. M. K., Lopes, R. (1969) Contact pressure of a rigid circular foundation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95 (3), p. 791-802. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001284

Liang, F., Liang, X., Wang, C., Wang, J., Li, Y. (2019) Influence of Rigidity and Load Condition on the Contact Stress and Settlement Deformation of a Spread Foundation. *Journal of Testing and Evaluation*, 47 (2), p. 1105–1128. https://doi.org/10.1520/JTE20180290

Miura, S., Toki, S. (1982) A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand. *Soils and Foundations*, 22 (1), p. 61–77.

Neupane, M., Han, J., Parsons, R. L., Horton, M. (2019) Assessment of tactile pressure sensor for measuring interface pressure in mechanically-stabilized layers. In: Proceedings of Geo-Congress 2019: Geotechnical Materials, Modeling, and Testing (Meehan CL, Kumar S, Pando MA and Coe JT (eds)), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA. Geotechnical Special Publication 310, p. 402–410.

Nicks, J. E., Adams, M. T., Li, J. (2019) Use of tactile pressure sensor to measure lateral pressures at the face of geosynthetic reinforced soil piers. In: Proceedings of Geo-Congress 2019: Earth Retaining Structures and Geosynthetics (Meehan CL, Kumar S, Pando MA and Coe JT (eds)), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA. Geotechnical Special Publication 306, p. 212–221.

Oliveira, E. A. S., Garcia, J. R. (2025) Numerical and experimental analysis of shallow foundations on tropical climate soil using Mohr-Coulomb cap model. *Soils and Rocks*, 48, p. e2025004724. https://doi.org/10.28927/SR.2025.004724

Oliveira Filho, W. L. (1987) *Considerações sobre ensaios triaxiais em areias*, Dissertação de Mestrado, Coppe, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 266 p.

Paikowsky, S. G., Hajduk, E. L. (1997) Calibration and use of grid-based tactile pressure sensors in granular material. *Geotechnical Testing Journal*, 20 (2), p. 218–241.

Palmer, M. C., O'Rourke, T. D., Olson, N. A., Abdoun, T., Ha, D., O'Rourke, M. J. (2009) Tactile pressure sensors for soil-structure interaction assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, p. 1638-1645. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000143

Ramos, T. C., Vertchenko, L. (2011) Uma abordagem experimental das propriedades dos corpos deformáveis no ensino de Física Geral para os cursos de engenharia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33 (1), p. 1502.

Schultze, E. (1961) Distribution of stress beneath a rigid foundation. In: Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. Vol. 6, p. 807-813.

Selvadurai, A. P. S. (1979) Elastic analysis of soil-foundation interaction. Elsevier, Amsterdam, 1979.

Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010) Fundações: Critérios de projeto, Investigação do subsolo, Fundações superficiais, Fundações profundas. Volume completo. Oficina de Textos, São Paulo, 568 p.

Tekscan, Inc. (2016) I-Scan Equilibration & Calibration – Practical Suggestions, Rev. B. Tekscan, Inc., South Boston, MA, USA.

Tekscan, Inc. (2018) I-Scan & High-Speed I-Scan – User Manual, Version 7.7x, Rev. Z. Tekscan, Inc., South Boston, MA, USA

Yamin, M. M., Ashteyat, M. A., Al-Mohd, I., Mahmoud, E. (2017) Numerical study of contact stresses under foundations resting on cohesionless soil: Effects of foundation rigidity and applied stress level. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (4), p. 1107-1114, 2017. https://doi.org/10.1007/s12205-016-1770-0

Zhang, Z., Wang, Y. H. (2019) An innovative experimental setup for characterizing friction fatigue during cyclic jacking of piles in dense sand. *Geotechnical Testing Journal*, 42 (3), p. 573–596.