

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Efeito de Padrões de Movimento Lateral de um Encontro de Ponte Semi-Integral nas Pressões Laterais de Terra

Pedro Henrique dos Santos Silva

Mestrando, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, eng.phsilva@outlook.com

Yuri Daniel Jatobá Costa

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, ydjcosta@ct.ufrn.br

Jorge Gabriel Zornberg

Professor, Universidade do Texas em Austin, Austin, Estados Unidos, zornberg@mail.utexas.edu

Carina Maia Lins Costa

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, carina@ct.ufrn.br

RESUMO: O estudo propõe analisar o efeito de padrões diferentes de deslocamento lateral de um encontro de ponte semi-integral nas pressões laterais de terra. Simulações numéricas foram realizadas usando um modelo em elementos finitos proposto para um encontro de ponte semi-integral. Os deslocamentos laterais do encontro foram simulados utilizando deslocamentos horizontais prescritos em três padrões diferentes de movimento: combinado de rotação e translação (caso 1), rotação isolada (caso 2) e translação isolada (caso 3). As pressões laterais de terra previstas nas simulações numéricas foram comparadas com dados experimentais de campo obtidos de uma ponte semi-integral. Os valores de pressão previstas pelas simulações foram obtidos na mesma posição do encontro onde as medições de campo foram realizadas. O caso 1 promoveu as pressões laterais de terra mais próximas daquelas medidas pelas células de pressão em campo. Durante as fases de expansão da superestrutura da ponte, o caso 2 ligeiramente subestimou enquanto o caso 3 superestimou as pressões laterais de terra. Durante as fases de contração, o caso 2 superestimou enquanto o caso 3 subestimou as pressões. Dessa forma, o movimento combinado de rotação e translação mostrou-se mais adequado para representar o movimento lateral do encontro da ponte nas condições de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Ponte integral; Elemento finito; Encontro de ponte; Pressão lateral de terra.

ABSTRACT: This study proposes to analyze the effect of different patterns of lateral movements of a semi-integral bridge abutment on the lateral earth pressures. Numerical simulations were carried out by using a finite element model developed for a semi-integral bridge abutment. Lateral movements of the abutment were simulated by using prescribed horizontal displacements in three different ways: combined rotation and translation (case 1), rotation only (case 2) and translation only (case 3). Predicted lateral earth pressures were compared with experimental field data obtained from a semi-integral bridge. Predicted pressure values were obtained at the same position where the field measurements were collected in the abutment. Case 1 presented the best match between field and numerical lateral earth pressures. During the expansion phases of the bridge superstructure, Case 2 slightly underestimated the lateral earth pressures while Case 3 overestimated them. During the contraction phases, Case 2 overestimated the lateral earth pressures while Case 3 underestimated them. The combined movement of rotation and translation proved to be more suitable to represent the lateral movements of the bridge abutment in field conditions.

KEYWORDS: Integral bridge; Finite element; Bridge abutment; Lateral earth pressure.

1 Introdução

Pontes semi-integrais são sistemas estruturais construídos sem juntas de dilatação térmica e com aparelhos de apoio nos encontros (Husain e Bagnariol, 1999). Nesse tipo de sistema estrutural, o encontro e a superestrutura da ponte são integralmente conectados, formando um sistema contínuo sem conexão com a



infraestrutura da ponte. A ausência de juntas de dilatação térmica reduz problemas na ponte relacionados ao funcionamento inadequado desses elementos em virtude de sua corrosão, o que possibilita a ação de agentes químicos nos outros elementos da ponte (Mistry, 2005). Isto resulta na redução dos custos de construção e manutenção da ponte, uma vez que as juntas de dilatação térmica requerem um adequado e frequente programa de manutenção devido à baixa durabilidade desses dispositivos em comparação aos outros componentes da ponte, o que resulta em uma grande vantagem do uso desse sistema estrutural (Maruri e Petro, 2005).

Em virtude da característica das pontes semi-integrais, os movimentos longitudinais de expansão e contração da superestrutura da ponte, resultantes da variação de temperatura, são integralmente transferidos para o encontro da ponte, provocando movimentos laterais (Ng et al., 1998). De acordo com a ABNT NBR 7187:2003 (ABNT, 2003), as variações de temperatura na ponte devem ser consideradas como indicado na seção 11 da ABNT NBR 6118:2003 (ABNT, 2003). A ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), a qual substituiu a vigência da ABNT NBR 6118:2003 (ABNT, 2003), recomenda considerar a variação de temperatura da estrutura uniforme, o que pode resultar em um movimento isolado de translação do encontro da ponte. Além disso, a ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) também recomenda adotar uma variação de temperatura linear para os casos em que a temperatura possa ter uma distribuição significativamente diferente da uniforme, o que, nesse caso, pode resultar em um movimento isolado de rotação ou em um movimento combinado de rotação e translação do encontro da ponte.

Fartaria (2012) realizou simulações numéricas em elementos finitos de um modelo de encontro de ponte integral submetido a três padrões de movimento do encontro: combinado de rotação e translação, rotação isolada e translação isolada. O encontro, modelado como elemento de placa, possui 4 m de altura e está inserido em um material arenoso modelado utilizando o modelo constitutivo Mohr-Coulomb. Os resultados mostraram que o movimento isolado de translação do encontro da ponte apresentou os maiores valores de pressão lateral de terra enquanto o movimento isolado de rotação do encontro da ponte apresentou os menores valores. O movimento combinado de rotação e translação apresentou valores intermediários de pressões laterais de terra entre os movimentos isolados de rotação e translação.

A escolha do padrão de movimento lateral do encontro da ponte pode resultar em diferentes valores de pressões laterais de terra. Esses padrões dependem da distribuição de temperatura ao longo da altura da superestrutura da ponte, o qual, em alguns casos, pode não ser simplesmente uniforme. Entender a resposta das pressões laterais de terra sob diferentes padrões de movimento lateral do encontro da ponte possibilita compatibilizar adequadamente a modelagem numérica com as condições de movimentação de campo. Dessa forma, o estudo propõe analisar o efeito de padrões diferentes de deslocamento lateral de um encontro de ponte semi-integral nas pressões laterais de terra.

2 Metodologia

Simulações numéricas foram realizadas utilizando um modelo em elementos finitos proposto para um encontro de ponte semi-integral através do programa Plaxis 2D 2016 (Plaxis bv, 2016). Condições de deformações planas foram utilizadas em uma análise de elementos finitos bidimensional. O modelo numérico, com limites de 40 m na horizontal e 20 m na vertical, foi desenvolvido baseado nos dados de campo do encontro oeste de uma ponte semi-integral instrumentada e monitorada por Walter (2018). Essas dimensões escolhidas para os limites do modelo foram consideradas suficientes para excluir os efeitos de borda, conforme Knappett et al. (2016) e Rawat e Gupta (2017).

O subsolo no encontro é composto por uma camada de 6,5 m de areia-siltosa, contendo um reaterro de pedregulho com inclinação de 1 na vertical por 3 na horizontal (1:3) ao lado do encontro, seguido por uma camada de argila-arenosa. O sistema encontro-bloco foi considerado de concreto armado suportado por uma fundação de estacas-prancha metálicas com embutimento de 0,3 m no bloco e cravadas no local, conforme Walter (2018). Uma malha muito fina de elementos finitos triangulares de 15 nós, com refinamento automático nas interfaces de interação solo-estrutura, foi utilizada nas simulações numéricas. A Figura 1 mostra as dimensões adotadas para o sistema encontro-bloco e a malha de elementos finitos usadas nas simulações numéricas.

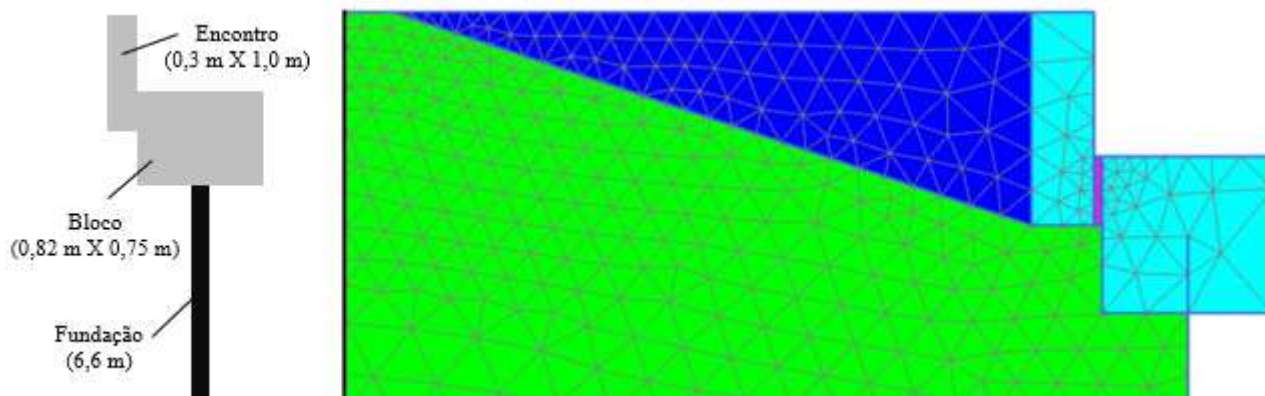


Figura 1. Dimensões do sistema encontro-bloco (esquerda) e malha de elementos finitos (direita).

Os comportamentos tensão-deformação dos materiais de solo e estruturais foram representados pelo modelo constitutivo hiperbólico Hardening Soil, o qual é baseado na teoria da plasticidade e foi desenvolvido para simular solos arenosos e argilosos (Khanal, 2013), e pelo modelo constitutivo linear-elástico, respectivamente. As estacas-prancha foram modeladas utilizando elementos de placa e a interação solo-estrutura foi considerada usando elementos de interface com fator de redução de resistência (R_{inter}) de 0,5 e 0,7 para as interfaces solo-metal e solo-concreto, respectivamente.

Os parâmetros do solo argiloso adotado no modelo numérico foram: peso específico aparente (γ) de 19 kN/m³, peso específico saturado (γ_{sat}) de 22 kN/m³, módulo de deformabilidade secante (E_{50}) de 60 MPa e resistência não-drenada (S_u) de 210 kPa. Os parâmetros do solo arenoso adotado no modelo numérico foram: γ de 17 kN/m³, γ_{sat} de 20 kN/m³, E_{50} de 40 MPa, coesão efetiva (c') de 15 kPa e ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 31,5°. Os parâmetros do pedregulho adotado no modelo numérico foram: γ de 20 kN/m³, γ_{sat} de 23 kN/m³, E_{50} de 32 MPa, c' de 1 kPa e ϕ' de 40°. Todos os parâmetros dos materiais de solo foram estimados baseado em resultados de ensaios de Texas Cone Penetrometer (TCP) e correlações propostas na literatura para solos típicos (Poulos e Davis, 1974; Stroud e Butler, 1975; Mesri, 1975; Kulhawy e Maine, 1982; Tomlinson, 1993).

Os parâmetros do concreto armado adotado no modelo numérico foram: peso específico (γ) de 25 kN/m³, módulo de elasticidade (E) de 30 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,2. Os parâmetros das estacas-prancha metálica adotado no modelo numérico foram: peso (w) de 1,182 kN/m/m, rigidez axial (EA) de $3,163 \times 10^6$ kN/m, rigidez flexional (EI) de $73,27 \times 10^3$ e ν de 0,3. Todos os parâmetros dos materiais estruturais foram estimados baseado em AASHTO (2012) e Gerdau (2019). Os demais parâmetros de solo e estruturais possíveis de alterações foram mantidos conforme dos padrões do programa.

Três padrões diferentes de deslocamento lateral do encontro, proveniente dos movimentos longitudinais de expansão e contração da superestrutura da ponte, foram simulados através de deslocamentos horizontais prescritos no modelo numérico. No primeiro padrão (caso 1), os deslocamentos foram aplicados no topo do encontro promovendo um movimento combinado de translação e rotação do encontro. No segundo padrão (caso 2), os deslocamentos foram aplicados de forma linear ao longo da altura do encontro com um valor nulo na base e máximo no topo do encontro, promovendo um movimento de rotação do encontro. No terceiro e último padrão (caso 3), os deslocamentos foram aplicados de forma uniforme ao longo da altura do encontro, promovendo um movimento de translação do encontro. A Figura 2 mostra os padrões de deslocamento lateral do encontro simulados.

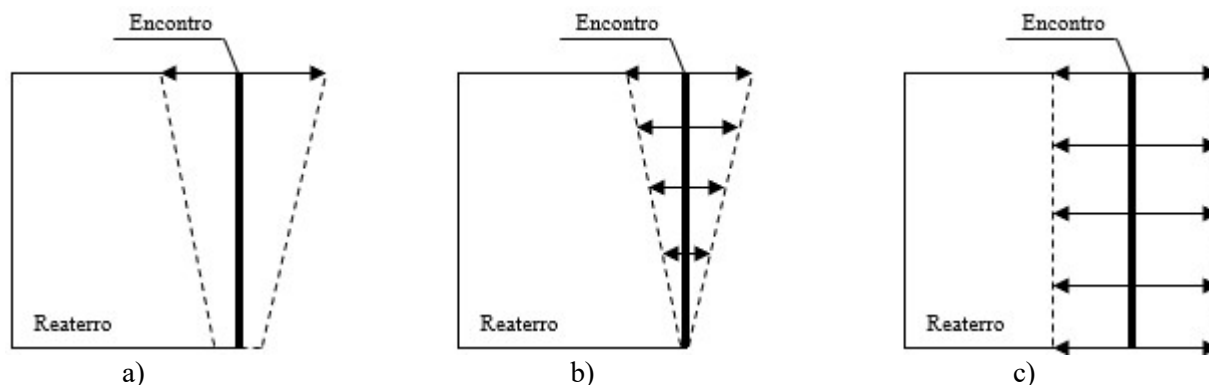


Figura 2. Padrões de deslocamento lateral do encontro simulados: a) caso 1; b) caso 2; c) caso 3.

De acordo com Karalar e Dicleli (2018) e Murphy e Yarnold (2018), os deslocamentos laterais cíclicos do encontro (δ_h) podem ser estimados através da Equação (1):

$$\delta_h = \frac{\alpha * L * \Delta T}{2} \quad (1)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica, L é o comprimento e ΔT é a variação de temperatura. O valor de α adotado para o concreto foi de $10,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ e está dentro do limite recomendado por AASHTO (2012) na ausência de ensaios de laboratório ou dados mais precisos. L e ΔT foram obtidos de Walter (2018).

As previsões das pressões laterais de terra para os três padrões de deslocamentos analisados foram comparadas com os dados de campo (caso 0). Os valores de pressões laterais de terra previstas pelas simulações numéricas foram obtidos na mesma posição do encontro onde as medições de campo foram realizadas.

3 Resultados e discussões

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a comparação entre as pressões laterais de terra ao final dos ciclos diários de expansão e contração da ponte para os casos analisados.

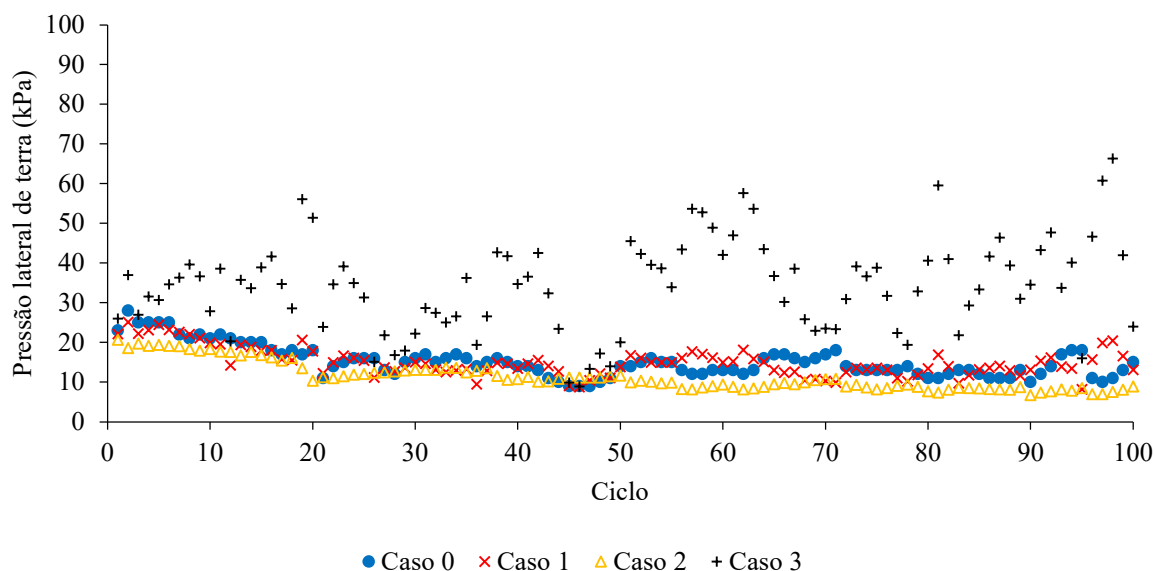


Figura 3. Pressões laterais de terra ao final dos ciclos diários de expansão da ponte.

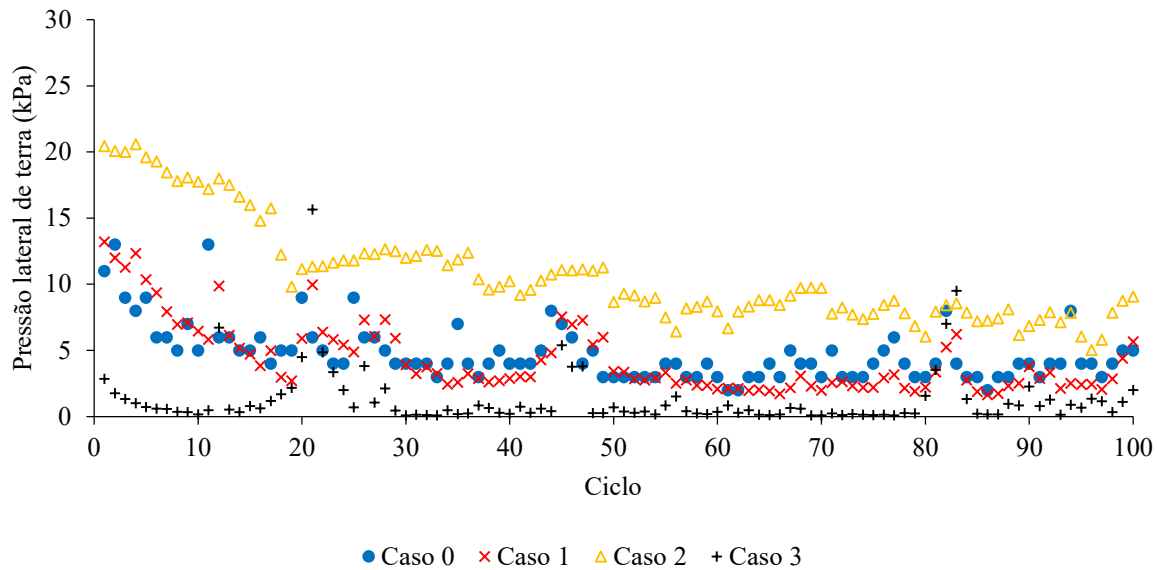


Figura 4. Pressões laterais de terra ao final dos ciclos diários de contração da ponte.

O movimento combinado de translação e rotação do encontro (caso 1) promoveu as pressões laterais de terra mais próximas daquelas medidas pelas células de pressão em campo (caso 0) tanto nos ciclos diários de expansão quanto nos de contração longitudinal da superestrutura da ponte. O movimento isolado de rotação do encontro (caso 2) subestimou, ligeiramente, e superestimou as pressões laterais de terra durante as fases expansão e contração longitudinal da superestrutura da ponte, respectivamente. Além disso, as pressões laterais de terra nas fases de expansão e contração da superestrutura da ponte para o caso 2 foram virtualmente as mesmas. O movimento isolado de translação do encontro superestimou e subestimou as pressões laterais de terra durante as fases de expansão e contração longitudinal da superestrutura da ponte, respectivamente.

Os resultados observados estão, diretamente, relacionados aos padrões de movimento lateral do encontro da ponte. Segundo Lee (1994), a temperatura ao longo da altura da superestrutura da ponte apresenta uma distribuição não linear, o que resulta em um movimento combinado de rotação e translação do encontro da ponte (Ng et al., 1998). Isso explicaria o porquê do caso 1 apresentar o melhor ajuste aos dados de campo do que os demais casos analisados. No caso 2, os valores do deslocamento lateral do encontro da ponte na região onde as células de pressão foram instaladas foram menores que dos demais casos analisados, bem como não existe variação significativa entre as fases de expansão e contração da superestrutura da ponte. Isso explicaria os resultados observados para o caso 2. Finalmente, o caso 3 apresenta os maiores deslocamentos laterais do encontro da ponte na região onde as células de pressão foram instaladas, o que, nesse caso, justificaria os resultados observados.

4 Comentários finais

O estudo analisou o efeito de padrões diferentes de deslocamento lateral de um encontro de ponte semi-integral nas pressões laterais de terra. Simulações numéricas foram realizadas usando um modelo em elementos finitos proposto para um encontro de ponte semi-integral. Três padrões diferentes de deslocamento lateral do encontro de uma ponte semi-integral, proveniente dos movimentos longitudinais de expansão e contração da superestrutura da ponte, foram analisados. O primeiro representou um movimento combinado de rotação e translação do encontro da ponte (caso 1), o segundo representou um movimento isolado de rotação do encontro da ponte (caso 2) e o último representou um movimento isolado de translação do encontro da ponte (caso 3). Os principais achados desse estudo foram os seguintes:

- O movimento combinado de rotação e translação do encontro promoveu as pressões laterais de terra mais próximas daquelas medidas em campo e, portanto, mostrou-se mais adequado para representar o movimento lateral do encontro da ponte nas condições de campo.



- O movimento isolado de rotação do encontro subestimou, ligeiramente, e superestimou as pressões laterais de terra durante as fases de expansão e contração longitudinal da superestrutura da ponte, respectivamente;
- O movimento isolado de translação do encontro superestimou e subestimou as pressões laterais de terra durante as fases de expansão e contração longitudinal da superestrutura da ponte, respectivamente;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications*, AASHTO, New York.
- ABNT (2003). *ABNT NBR 6118:2003: projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, ABNT, Rio de Janeiro.
- ABNT (2003). *ABNT NBR 7187:2003: projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento*, ABNT, Rio de Janeiro.
- ABNT (2014). *ABNT NBR 6118:2014: projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, ABNT, Rio de Janeiro.
- Fartaria, C. I. P. (2012). *A interação estrutura-solo em pontes integrais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 113 p.
- Gerdau (2019). *Steel sheet piling: quick reference guide*, Gerdau, Midlothian.
- Husain, I.; Bagnariol, D. (1999). *Semi-integral abutment bridges*, Ministry of Transportation, Ontario.
- Karalar, M.; Dicleli, M. (2018). Fatigue in jointless bridge H-piles under axial load and thermal movements. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, p. 504-522.
- Khanal, S. (2013). *Backcalculation of plate loading tests using Plaxis 2D and the hardening soil model*. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 139 p.
- Knappett, J. A.; Caucis, K.; Brown, M. J.; Jeffrey, J. R.; Ball, J. D. (2016). CHD pile performance: part II – numerical modelling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 169 (5), p. 436-454.
- Kulhawy, F. H.; Mayne, P. W. (1982). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Final Report. Res. Proj. 1493-6, Cornell University, New York.
- Lee, D. J. (1994). *Bridge bearings and expansion joints*, E & FN Spon, London.
- Maruri, R. F.; Petro, S. H. (2005). Integral abutments and jointless bridges (IAJB) 2004 survey summary. In: The 2005 – FHWA Conference, Baltimore. *Proceedings...* West Virginia University.
- Mesri, G. (1975). Discussion on “New design procedure for stability of soft clays”. *J. Geotech. Eng. Div.*, 101, p. 409-412.
- Mistry, V. C. (2005). Integral abutment and Jointless bridges. In: The 2005 – FHWA Conference, Baltimore. *Proceedings...* West Virginia University.
- Murphy, B.; Yarnold, M. (2018). Temperature-driven structural identification of a steel girder bridge with an integral abutment. *Engineering Structures*, 115, p. 209-221.
- Ng, C. W. W.; Springman, S. M.; Norrish, A. R. M. (1998). Centrifuge modeling of spread-base integral bridge abutments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (5), p. 376-388.
- Plaxis bv (2016). *Plaxis 2D version 2016*, Plaxis bv, Delft, The Netherlands.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, John Wiley & Sons, Sydney, 411 p.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- Rawat, S.; Gupta, A. K. (2017). Numerical modelling of pullout of helical soil nail. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9 (4), p. 648-658.
- Stroud, M. A.; Butler, F. G. (1975). The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials. In: Symp. on Engineering Properties of Glacial Materials, Birmingham. *Proceedings...* Midland Geotech. Society.
- Tomlinson, M. J. (1993). *Pile design and construction practice*, E & FN Spon, London.
- Walter, J. R. (2018). *Experimental and numerical investigation of integral/semi-integral bridge abutments for Texas conditions*. Master's Thesis, The University of Texas at Austin, 210 p.