

Determinação da adesão em solo grampeado a partir de correlações com ensaios SPT

Determination of adhesion in soil nailing from correlations with SPT test

Determinación de la adhesión en suelo grapado a partir de correlaciones con ensayos SPT

Détermination de l'adhésion dans sol fixé à partir de corrélations avec des essais SPT

**Rodrigo Rogério
Cerqueira da Silva**
([OrcID](#))
rodrigorogério@uni9.pro.br
Universidade Nove de
Julho (Uninove)

Resumo

A técnica de estabilização de encostas por meio do solo grampeado vem tornando-se usual no meio geotécnico pelo seu baixo custo, versatilidade de adaptação a geometrias variadas e alta velocidade de execução, principalmente em situações de risco de escorregamentos em taludes naturais. Uma das principais patologias ligadas ao solo grampeado é a sua ruptura por falta de aderência. Esta técnica é avaliada em seu estado limite através da resistência ao cisalhamento desenvolvida pelo principal parâmetro geotécnico a adesão (q_s) obtida através da interação solo-reforço. O principal objetivo desta pesquisa é estabelecer uma correlação obtida através das análises estatísticas para a estimativa da adesão (q_s) em solos coesivos, a partir de parâmetros obtidos em investigação geotécnica do tipo SPT e ensaios de arrancamento. A pesquisa foi realizada em 20 grampos localizados junto a um talude de uma obra de infraestrutura localizada na região de Guarulhos, município de São Paulo, demonstrando a influência da resistência de adesão em função dos índices físicos e parâmetros mecânico dos solos. Os resultados demonstram que as correlações encontradas entre adesão (q_s) e índice de resistência a penetração (N_{SPT}) apresentam alto coeficiente de correlação (R^2), de 89%, e significância estatística (P -valor < 0,05). A validação da fórmula encontrada foi confrontada com outros métodos consagrados da literatura, como Ortigão (1997), Ortigão e Palmeira (1997) e Springer (2006), a partir de valores de ensaios de arrancamento obtidos em outra obra no mesmo município, demonstrando que o método proposto possui melhor aproximação com os valores reais de adesão entre solo e estrutura, e fornecendo, assim, uma base de dados para comunidade geotécnica, contribuindo na estimativa do dimensionamento de estruturas passivas.

Palavras-chave: Solo grampeado. Ensaio de arrancamento. Solos coesivos. Análises estatísticas.

Abstract

The technique of stabilization of slopes by means of stapled soil has become usual in the geotechnical environment due to its low cost, versatility of adaptation to varied geometries, high speed of execution, especially in situations of landslides in natural slopes. One of the main pathologies related to the stapled soil is its rupture due to lack of adhesion, this technique is evaluated in its limit state through the shear strength developed by the main geotechnical parameter the adhesion (q_s) obtained through the soil-reinforcement interaction. The main objective of this research is to establish a correlation obtained through the statistical analysis for the estimation of adhesion (q_s) in cohesive soils, from parameters obtained in SPT geotechnical investigation and pullout tests. The research was carried out on 20 staples located next to a slope of an infrastructure work located in the region of Guarulhos municipality of São Paulo, demonstrating the influence of the adhesion resistance in function of the physical indexes and mechanical parameters of the soils. The results show that the correlations found between (q_s) and (N_{SPT}) have a high correlation coefficient (R^2) of 88% and statistical significance (P -value < 0.05). The validation of the formulation found was compared with other methods established in the literature, such as Ortigão (1997), Ortigão and Palmeira (1997) and Springer (2006), from values of pullout tests obtained in another work in the same municipality, demonstrating that the proposed method has

a better approximation with the actual values of adhesion between soil and structure, thus providing a database for geotechnical community contributing in the estimation of the passive structure design.

Keywords: Soil Nailing. Pullout test. Cohesive soil. Statistical analyzes.

Resumen

La técnica de estabilización de relieves por medio del suelo grapado es cada día más utilizada en el medio geotécnico por sub ajo coste, versatilidad de adaptación a geometrías variadas, alta velocidad de ejecución, especialmente en situaciones de riesgo de resbalamientos en taludes naturales. Una de las principales patologías relacionadas al suelo grapado es su rotura por falta de adherencia. Esta técnica es evaluada en su estado límite por medio de la resistencia al cizallamiento desarrollada por el principal parámetro geotécnico a la adhesión (q_s) obtenida por medio de la interacción suelo-refuerzo. El principal objetivo de esta investigación es establecer una correlación obtenida por medio de los análisis estadísticos para la estimativa de la adhesión (q_s) en suelos cohesivos, a partir de parámetros obtenidos en investigación geotécnica del tipo SPT y ensayos de arrancamiento. La investigación se realizó en 20 grapas localizadas junto a un talud de una obra de infraestructura ubicada en la región de Guarulhos, municipio de São Paulo, demostrando la influencia de la resistencia adhesión en función de los índices físicos y parámetros mecánicos de los suelos. Los resultados demuestran que las correlaciones encontradas entre (q_s) y (N_{SPT}) presentan alto coeficiente de correlación (R^2) de 88% y significancia estadística (P -valor $<0,05$). La validación de la formulación encontrada con otros métodos consagrados de la literatura como Ortigão (1997), Ortigão y Palmeira (1997) y Springer (2006) a partir de valores de ensayos de arrancamiento obtenido en otra obra en el mismo municipio, demostrando que el método propuesto posee mejor acercamiento con los valores reales de adhesión entre suelo y estructura, ofreciendo así una base de datos para la comunidad geotécnica, ayudando en la estimativa del dimensionamiento de estructuras pasivas.

Palabras-clave: Suelo grapado. Ensayo de arrancamiento. Suelos cohesivos. Análisis estadísticos.

Résumé

La technique de stabilisation de pentes au travers du sol fixé est en train de devenir habituelle dans le milieu de la géotechnique grâce à son petit prix, sa possibilité d'adaptation aux différentes géométries et son exécution rapide, particulièrement dans les situations où il y a du risque de glissements dans des pentes naturelles. L'une des principales pathologies liées au sol fixé est sa rupture à cause de la manque d'adhérence. Cette technique est évaluée dans son état limite par la résistance au cisaillement développée par le principal paramètre géotechnique, c'est-à-dire, l'adhérence (q_s) obtenue au moyen de l'interaction sol-renforcement. L'objectif principal de cette recherche est établir une corrélation obtenue par les analyses statistiques pour l'estimation de l'adhérence (q_s) dans les sols cohésifs, en utilisant les paramètres obtenus dans une recherche géotechnique SPT et des essais déchirement. La recherche a été effectuée sur 20 agrafes situées près d'une pente chez un chantier située dans à Guarulhos, municipalité de São Paulo, cela démontre l'influence de la résistance à l'adhérence en fonction des indices physiques et des paramètres mécaniques des sols. Les résultats montrent que les corrélations observées entre (q_s) et (N_{SPT}) ont un fort coefficient de corrélation (R^2) de 88 % et aussi forte signification statistique (P -value $< 0,05$). La validation de la formulation trouvée a été confrontée à d'autres méthodes établies chez la littérature comme Ortigão (1997), Ortigão et Palmeira (1997) et Springer (2006) au moyen des valeurs d'essais de déchirement obtenues dans une autre chantier à Guarulhos, ce qui démontre que la méthode proposée présente meilleure approche avec les valeurs réelles de l'adhérence entre le sol et la structure. Donc, cette méthode fournit une base de données pour la communauté géotechnique, ce qui contribue à l'évaluation de la mise à l'échelle des structures passives.

Mots-clés: Sol fixé Essai de déchirement Sols cohésifs. Analyse statistique.

1 Introdução

Atualmente, profissionais da área de Engenharia geotécnica se deparam com o fato de que não há uma norma técnica para o uso de solo grampeado que indique boas práticas de projeto e parâmetros a serem ponderados, levando a técnica a superdimensionamentos e distanciamento da técnica desenvolvida por Rabcewicz (1964), através do sistema rápido de contenção para estabilização de encostas com uso de barras de aço inseridas no maciço por perfuração, com posterior injeção de nata de cimento.

Um dos principais mecanismos que contribui para a estabilidade do maciço de solo é a resistência ao cisalhamento desenvolvida na interfacesolo-reforço conhecida como adesão (q_s), contribuindo com o desenvolvimento de tensões de tração nos grampos. Pela natureza e propriedade dos solos, a resistência ao cisalhamento na interface sologrampo pode ser mobilizadaintanto pelo atrito quanto pela adesão superficial no perímetrocom o comprimento ancorado do grampo.A aplicação da técnica em solo grampeado é considerada favorável quando executada na presença de maciços de solos finos e rígidos, granulares densos com coesão aparente e rochas que não apresentam plano de ruptura,

De acordo com Ortigão et al. (1995), Pitta et al. (2003) e Springer (2006), a metodologia de execução somente com barra de aço com injeção de bainha (preenchimento anelar entre furo e aço) permite obter parâmetros de resistência ao cisalhamento através da adesão entre solo-grampo para solos de características argiloso e siltoso na ordem de 70 a 240 kPa. Estudos realizados por Heymann et al. (1992) e Frazen (1998) demonstraram, através de ensaios de arrancamento em grampos, que a adesão é influenciada pela tensão normal do solo atuante na superfície do terreno, pelo ângulo de atrito do solo e pela interação entre solo e chumbador e o seu perímetro. Este tipo de estrutura passiva necessita de deslocamentos para que haja mobilização da resistência ao cisalhamento através da interface sologrampo. Segundo Ortigão (1997) e Silva e Pereira (2016), alguns fatores podem ser essenciais nos valores de adesão, como os parâmetros do solo, as propriedades do grampo, o método de perfuração, a limpeza do furo, as características mecânicas da calda de cimento, além de fatores ambientais, como a temperatura e a umidade. As condições favoráveis para execução do solo grampeado, de acordo com Elias et al. (2003), estão relacionadas ao teor de umidade do solo. As estruturas devem ser executadas acima do lençol freático, sendo as condições favoráveis comprovadas a partir de investigação geológica-geotécnica do tipo sondagem a percussão, sendo o índice de resistência N_{SPT} um dos principais parâmetros para dimensionamento dos grampos.

De acordo com Elias e Juram (1991) e Lazart et al. (2003), os valores obtidos através correlações empíricas baseadas nos números de golpes do ensaio SPT são conservadores e podem ser usados como estimativa preliminar de projeto. Pesquisadores como desenvolveram método de previsão de resistência ao cisalhamento de interface (q_s), a partir de modelos empíricos relacionando com o índice de resistência a penetração (N_{spt}) Ortigão (1997), Ortigão e Palmeira (1997), Springer (2006), obtendo valores de R^2 da ordem de 0,50 á 0,68.

Embora as correlações entre valores de adesão e as características do solo sejam ferramentas importantes, principalmente para concepção inicial de projeto, os ensaios de arrancamento se constituem imprescindíveis para a real avaliação do atrito solo-grampo do comportamento da obra, além de demonstrar qual dos métodos de previsão de resistência ao arrancamento é o mais eficiente e próximo do comportamento obtido *in loco*.

2 Materiais e Métodos

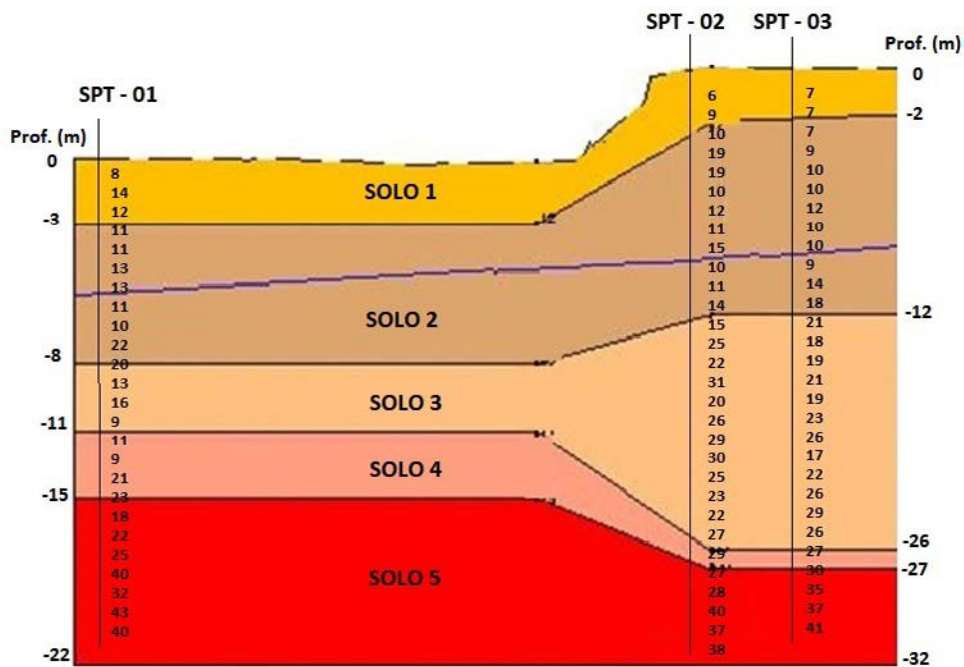
O desempenho da adesão dos grampos foi analisado por meio de parâmetros geotécnicos obtidos através da caracterização dos índices físicos dos solos retirados em cada transição de camada, da investigação geotécnica por interpretação de boletins de sondagens SPT e de parâmetros obtidos dos ensaios de arrancamento realizados *in loco*. Os testes foram realizados em 20 grampos, executados no mesmo talude e alinhamento, porém em cotas distintas, com a finalidade de verificar as diferenças da interação solo e grampo devido à heterogeneidade do subsolo local.

2.1 Características Geológicas Geotécnicas

Segundo Hasui e Carneiro (1980) e Janasi e Ulbrich (1991), a compartimentação no município de Guarulhos pode ser separada em duas amplas unidades geológicas, compostas por granitoides intrusivas de idade neoproterozóica ou rochas sedimentares de idade cenozóica da Bacia de São Paulo, com embasamento composto por gnaisses, migmatitos e rochas metamórficas de baixo a médio grau, de idade arqueana a neoproterozóica. O embasamento cristalino na região de Guarulhos pode ser repartido em duas unidades maiores, afastadas pela faixa de cisalhamento Caucaia-Rio Jaguari, que reparte o município na direção Nordeste. Prevaecem, ao Norte da Falha do Rio Jaguari metassedimentos distintos, de idade proterozóica, deformados ao longo de zonas de cisalhamento e metamorfismo no neoproterozóico. Esses metassedimentos envolvem, essencialmente, filitos e xistos nomeados de Grupo São Roque. Intercalados aos filitos predominam corpos lenticulares de metadolomitos, quartzitos, metamargas, rochas metabásicas, rochas cálcio-silicáticas e metaconglomerados (ALMEIDA et al. 1981). Estudos realizados por Juliani (1993) reparte essas rochas nos grupos Serra do Itaberaba, incluindo as sequências vulcano-sedimentar, clasto-químicas e clásticas, e São Roque, fundamentalmente clástico. Essas rochas do município de Guarulhos se localizam em muitas partes recobertas pelos sedimentos terciários da Bacia de São Paulo,

surgindo no extremo Sul, unido ao perímetro no bairro de São Miguel, na cidade de São Paulo, ou em pequenos altos estruturais, formados por blocos do embasamento aflorantes no meio dos sedimentos. A área da execução dos ensaios foi previamente selecionada após inspeção de fatores geológicos do terreno favoráveis a execução dos ensaios, comprovados a partir de sondagens do tipo SPT. As investigações geotécnicas compostas por sondagem a percussão apresentaram uma homogeneidade das camadas do subsolo, inicialmente caracterizada pela presença de um solo sedimentar composto em argila arenosa média a grossa, com pedregulho fino, de cores marrom, vermelha, variegada, variando sua compactidade ao longo das sondagens em medianamente compacta a compacta. Por fim, determinou-se uma camada argilosa pouco siltosa, com areia fina, de cores cinza, marrom, variegada e com consistência rija a dura. O nível de água foi detectado durante o período de realização das investigações, sendo que sua cota é variável, conforme a topografia do terreno encontrado, em torno de -6 m a -12 m. Com base nas informações contidas dos perfis de horizonte descrito acima, foi desenvolvido o estudo do perfil geológico, conforme a Figura 1, apresentando os valores de NSPT a partir dos resultados obtidos pelas sondagens SPT 01, 02 e 03, realizadas na área de execução dos grampos testes.

Figura 1 – Perfil geológico da área dos ensaios e valores das sondagens NSPT.



Fonte: Autor (2018).

2.2 Parâmetros Físicos dos Solos

Para cada um dos perfis de solos indicados na Figura 1, à medida em que foram realizadas escavações para estabilização de encosta, foram observadas as alterações texturais (tátil-visuais) do solo, retirando amostras deformadas com cerca de 2 kg e 1 bloco de amostra indeformada com dimensões 30x30x30 cm, próximos a execução dos chumbadores, na tentativa de melhor caracterizar as alterações ao longo do perfil geológico e verificar a sua interação solo estrutura. Os parâmetros geotécnicos adotados fundamentaram-se na análise dos resultados das sondagens a percussão através do seu índice de resistência média NSPT (Tabela 2), classificação tátil-visual e determinação dos índices físicos (NBR 6459:84; 7180:84; 6508:95), conforme demonstrado na Tabela 1, através das amostras de solos deformadas recolhidas durante as investigações geotécnicas. Através do bloco de amostra indeformada foi possível obter as características efetivas de cada horizonte de solo, como coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo, pelas envoltórias de ruptura obtidas nos ensaios de cisalhamento direto inundado, conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Índices físicos das camadas da área de execução dos grampos testes.

Camada de solo	<i>e</i>	<i>n</i>	γ_{nat} (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	γ_s (KN/m ³)	<i>Sr</i> (%)	<i>LP</i>	<i>LL</i>	<i>w</i> (%)
1	1,172	53,80	17,0	17,0	27,75	40,30	26,5	35	16,3
2	1,090	51,99	18,0	18,0	27,74	43,78	20,9	31,4	16,8
3	0,956	48,61	18,0	18,0	27,73	53,98	18,6	38	18,9
4	0,976	49,49	19,0	20,5	27,70	49,9	21,9	30	23,3
5	0,639	35,03	20,0	20,5	27,55	47,97	19,4	34,6	19,6

Onde: *e* – índice de vazios; *n* – porosidade; γ_{nat} – peso específico aparente natural; γ_{sat} - peso específico aparente saturado; γ_s – peso específico do solo; *Sr* – grau de saturação; *LP* - limite de plasticidade; *LL* – limite de liquidez; *w* – teor de umidade.

Fonte: Autor (2018).

Tabela 2 - Parâmetros de resistência dos solos investigados.

Camada de solo	<i>NSPT</i> médio na camada	Coesão <i>c'</i> (kPa)	Ângulo de atrito efetivo do solo ϕ' (°)
1	7	15	15
2	13	20	22
3	22	20	25
4	31	25	30
5	40	35	30

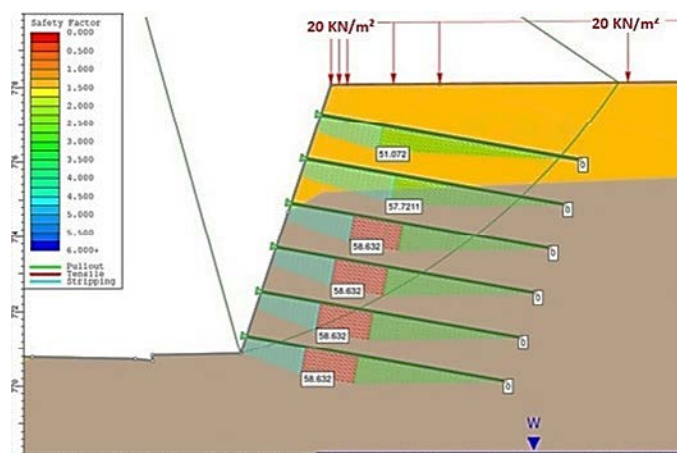
N_{SPT} – Índice de resistência à penetração; *c'* – coesão; ϕ' – ângulo de atrito.

Fonte: Autor (2018).

2.3 Dimensionamento Chumbadores

Para as análises de estabilidade global, dentre os métodos de previsão do coeficiente de segurança, foram adotadas cunhas circulares determinadas pelo método de Bishop simplificado, a partir *software* computacional *Slide*, versão 6.0, elaborado e distribuído pela *Rocscience*, considerando fator de segurança mínimo para a estabilidade global de 1,50. A estabilidade interna do tratamento, representada a partir da Figura 3, ilustra os carregamentos em cada barra do solo grampeado, demonstrando que os grampos atenderão à limitação imposta por norma para cargas de trabalho (*T_{trab}*) de 50 kN e tensão máxima (*T_{máx}*) de 72 kN, sendo que a eficiência da análise de estabilidade por *software* será comprovada após a realização dos ensaios, obtendo-se a força de arrancamento máxima (*T_{max}*) e a real avaliação do atrito solo-grampo (*qs*).

Figura 2 – Dimensionamento de grampos com *T_{trab}*=50 kN e *T_{máx}*=72 kN.



Fonte: Autor (2018).

2.4 Execução Chumbadores testes

Os 20 grampos de teste foram executados nas 5 camadas de solos avaliadas, conforme parâmetros geotécnicos demonstrados na Tabela 1, com profundidades de 10 metros, sendo 7 metros livres e 3 ancorados, conforme recomendação Lazart et al. (2003). As injeções foram realizadas somente com bainha de forma ascendente, até atingir o refluxo caudal, com calda de cimento fator a/c 0,5 com fck de 25 mPa, verificando o consumo de calda durante as injeções, variando para cada camada entre 2 a 4 sacos de cimento por metro de chumbador injetado.

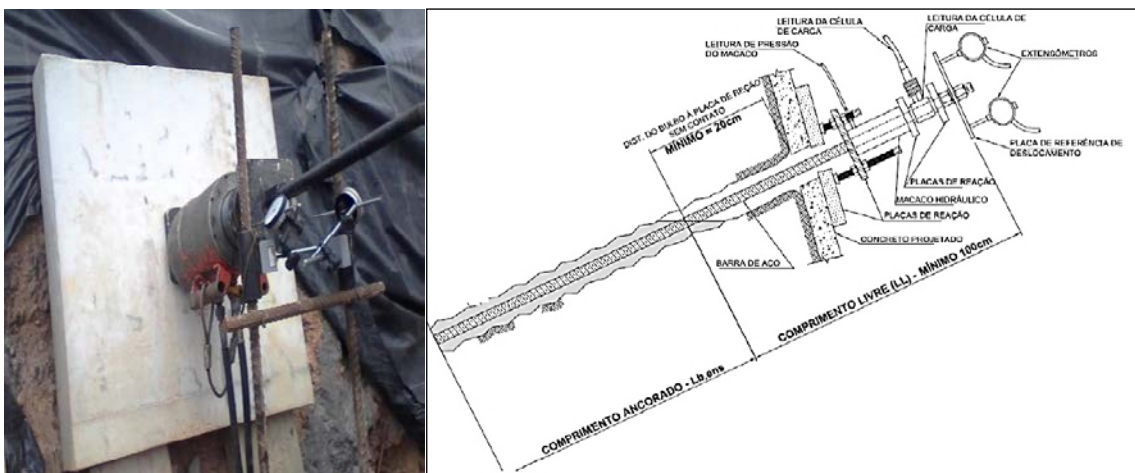
2.5 Ensaio de arrancamento

As correlações entre valores de arrancamento (q_s) e as características do solo são ferramentas importantes, principalmente para concepção inicial de projeto, os ensaios de arrancamento se constituem imprescindíveis para a real avaliação do atrito solo-grampo (q_s) do comportamento da obra. A execução de ensaios de arrancamento em grampos não é regulamentada por nenhuma norma técnica, e a ABNT está em processo de elaboração de norma técnica de muros e taludes em solos reforçados, que compreende a execução de solos grampeados e contempla a realização de ensaios de arrancamento (Comissão ABNT CE-002:152.16). Assim, a presente pesquisa utilizou os procedimentos e recomendações de ensaios, os esquemas de montagem e as interpretações do comportamento do arrancamento baseados no estado da arte e no comportamento adquirido durante os ensaios.

A metodologia utilizada in loco apresenta os procedimentos mínimos necessários dos parâmetros de adesão efetivos do solo grampeado, na interface solo-calda, confirmando os valores de adesão considerados durante a fase de projeto, em que os resultados obtidos dos ensaios deverão ser confrontados com os valores de projeto para confirmação ou para indicação da necessidade de reavaliação do sistema de contenção.

Decorrido um tempo mínimo de sete dias de cura da calda de cimento após a injeção da bainha, realizaram-se os ensaios de arrancamento em vinte grampos de teste, avaliando sua carga limite através de incrementos de cargas (Figura 3(a)). Para realização dos ensaios, foi utilizada como referência a metodologia empregada por Lazart et al. (2003) e Silva e Pereira (2016), adotando o comprimento do trecho ancorado da bainha dos grampos de 3 m, podendo ter uma variação de, mais ou menos, 10% (2.70 m á 3.30 m). A montagem dos ensaios deve garantir um comprimento livre mínimo de 1 metro na extremidade de aplicação da força de ensaio, garantido também um afastamento mínimo da extremidade da bainha à placa de reação de 20 cm (Figura 3b).

Figura 3 – (a) Vista geral do ensaio de arrancamento, (b) Vista geral detalhe de montagem dos ensaios.



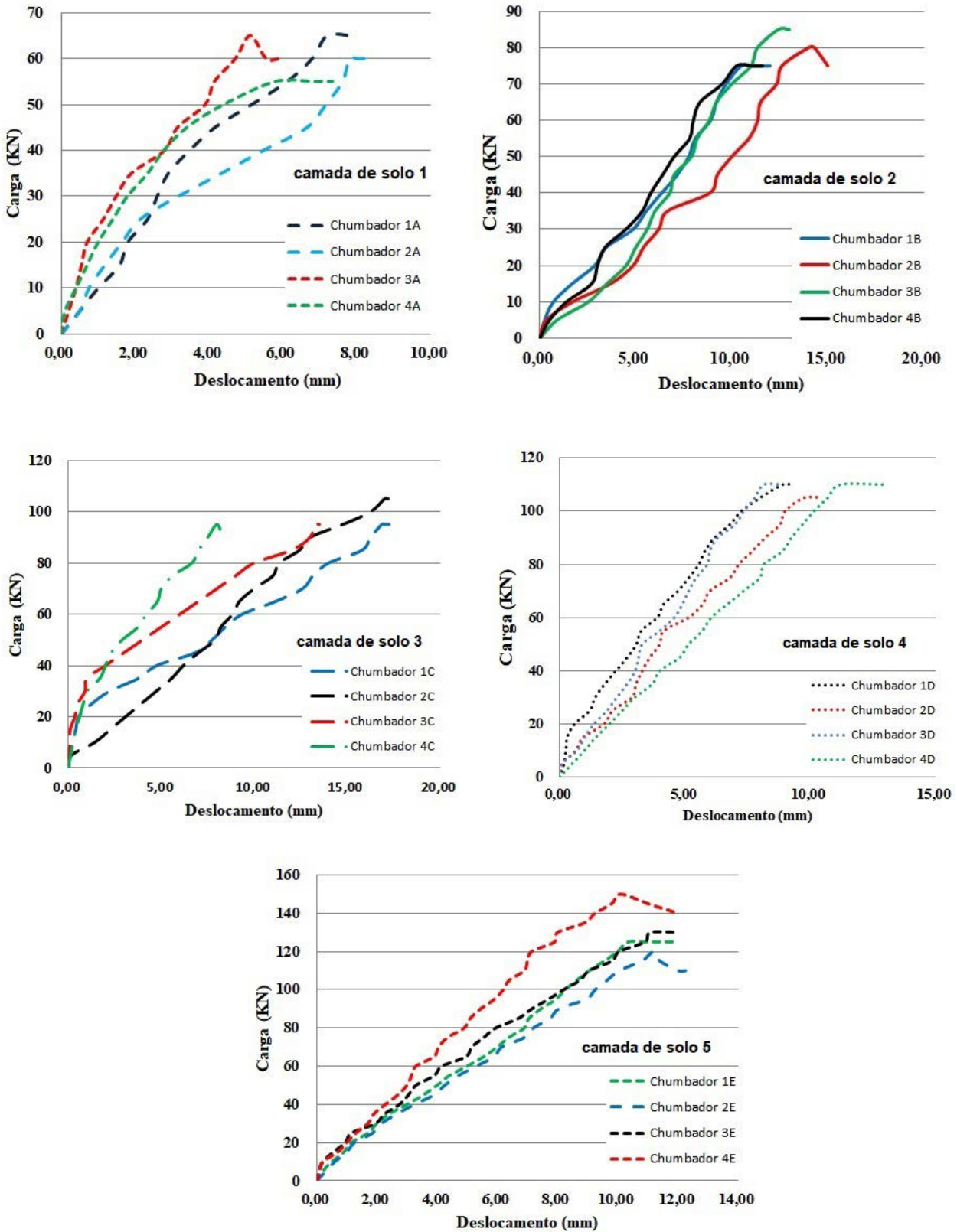
(a)

(b)

Fonte: Autor (2018).

O carregamento dos grampos durante os ensaios foram realizados através da metodologia aplicada por Falconi e Alonso (1996), Springer (2006) e Silva (2012), que recomendam que o incremento de carga deva ser de 5 kN (500 kgf), com 5 minutos em cada estágio de carga até a ruptura, através de valores que permitam um número mínimo de leituras carga x deslocamento. Segundo FHWA (1991), e Lazart et al. (2003), o ensaio deve ser finalizado quando a força de tração atingir um valor máximo (T_{max}) ou estabilizar para deslocamentos crescentes, conforme demonstra a Figura 4.

Figura 4 – Curva carga x deslocamento dos grampos testes executados nas camadas de solos 1,2, 3, 4 e 5.



Fonte: Autor (2018).

3 Análise dos Resultados

3.1 Parâmetros de adesão (qs) das camadas de solos

As condições geotécnicas de estabilidade dos maciços de solo estimadas através de *software* indicam dispersão de resultados com os parâmetros obtidos *in loco*, podendo ser comprovado conforme indicado por Lazart et al. (2003) e Silva e Pereira (2016), em que o valor unitário da adesão (qs) para cada solo é obtido por meio da Equação (1) e apresentado na Tabela 3.

$$q_s: T_{m\acute{a}x} / (\pi \cdot D_b \cdot L_b)$$

(1)

Em que:

qs = adesão solo/bainha (kPa);

Tmáx = Força máxima do ensaio (KN);

Lb = comprimento ancorado da bainha (m);

Db = diâmetro da bainha (m).

Tabela 3 – Adesão solo-grampo (qs) obtido através dos ensaios de arrancamento.

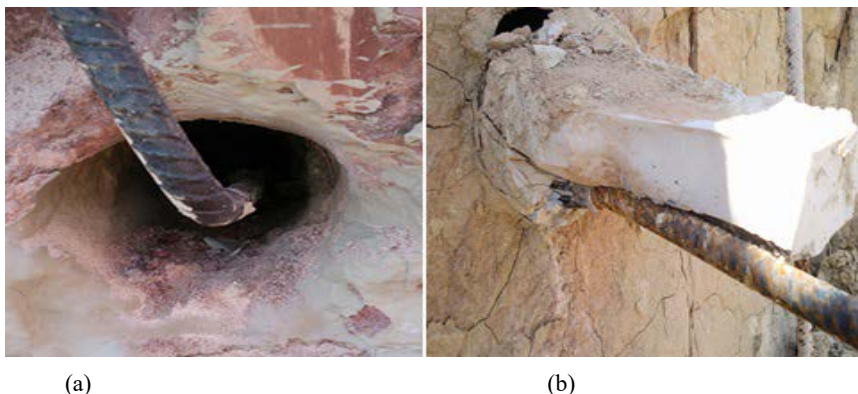
<i>Camada</i>	<i>T máx</i> (KN)	<i>DB</i> (m)	<i>Lb</i> (m)	<i>qs</i> (kPa)
Solo 1	60			64
Solo 2	79			84
Solo 3	96	0,10	3	102
Solo 4	109			115
Solo 5	129			137

Fonte: Autor (2018).

De acordo com estudos realizados por Silva e Pereira (2016), a injeção somente através da bainha é fundamental pra a fixação dos grampos, além de contribuir no tratamento para reduzir as infiltrações através das feições geológicas de baixas permeabilidades, quando executados em solos coesivos.

Diante das classificações para cada horizonte, os parâmetros obtidos durante as investigações geotécnicas demonstraram que as diferentes estruturas dos solos influenciaram nos resultados obtidos *in loco*, sendo a adesão (qs) relacionada ao índice de vazios do solo, comprovada através do volume de calda injetado na camada de solo 2 e 3, comprometendo a adesão através da iteração solobarra, não formando uma bainha íntegra ao longo dos grampos, diminuindo a capacidade de carga a tração com grandes deslocamentos. As Figuras 5 (a e b), demonstram a verificação da integridade da bainha dos grampos executados nas camadas 2 e 3 com diferentes índices físicos.

Figura 5 – Verificação do preenchimento de calda dos grampos, (a) camada 2, (b) camada 3.



Fonte: Autor (2018).

A influência na formação da adesão através da interação solo-barra de aço, em relação ao índice de vazios e à porosidade do solo, é verificada no chumbador executado na camada de solo 3, 4 e 5, com pequenas deformações e maior resistência ao arrancamento. Ao longo do talude a verificação da integridade da injeção da bainha foi analisada através da exumação de trechos de grampos, verificando que a porosidade do maciço compromete a interação dos elementos de tração após o abatimento da calda de cimento.

3.2 Correlação entre (q_s) e N_{SPT}

A presente pesquisa procurou estabelecer correlações através da distribuição de frequência de todos os parâmetros avaliados no ensaio de arrancamento (q_s) e do índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Verificou-se se a normalidade poderia ser aceita para esses parâmetros, validando a utilização da estatística paramétrica através dos limites de assimetria e de curtose, entre -2 e + 2, a fim de obter uma estimativa da resistência ao arrancamento.

Através de *software* estatístico *Statgraphics Centurion XVII* foi possível estabelecer que o melhor modelo é do tipo linear. Entre as variáveis obtidas com os parâmetros geotécnicos (q_s) de cada chumbador em cada perfil de solo e (N_{SPT} médio), conforme Figura 6, por meio do estudo de variância Anova com P valor < 0,05, as relações demonstraram ser estatisticamente significantes no nível de confiança de 95,0%, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Análise por *software* estatístico com parâmetros de (q_s) e (N_{SPT}).

<i>Análise estatística</i>	<i>Parâmetros</i>
R	94
R ²	89
Erro padrão	11,2 %
Erro absoluto	6,87 %
Média	63,6618
Desvio padrão	4,33164
Coefficiente de variação	6,80%
Valor mínimo	58,3567
Valor máximo	68,967
Assimetria	-2,82744E-9
Curtose	0,612372
Modelo	$q_s = 65,80 + 1,68 \times N_{spt}$

Fonte: Autor (2018).

4 Validação da correlação entre ($q_s \times N_{SPT}$) comparados com métodos empíricos

A validação do modelo proposto foi realizada através de uma análise comparativa com metodologias obtidas por correlações empíricas de métodos consagrados da literatura, como Ortigão (1997), Ortigão e Palmeira (1997) e Springer (2006), a partir de valores obtidos de ensaios de arrancamento em 3 chumbadores, resultantes de pesquisa realizada por Silva e Pereira (2016) na mesma região da Guarulhos-SP. Avaliou-se a aplicabilidade dos métodos empíricos para a determinação da adesão através dos valores obtidos dos métodos empíricos com os encontrados nos ensaios de arrancamento (através da razão entre q_s estimado e q_s ensaio), comprovadas através da análise estatística entre os valores estimados. Verificando-se que, embora as expressões sejam baseadas em valores de N_{SPT} , a Tabela 5 demonstra discrepâncias de comportamento baseado nos valores de R² encontrados entre o modelo linear proposto em relação aos modelos lineares e exponenciais verificados na literatura.

Tabela 5 – Equações propostas por diversos autores para a correlação entre (q_s) e (N_{SPT}).

Autor	<i>Equação</i>	<i>Regressão</i>	<i>R² (%)</i>
Ortigão (1997)	$q_s = 50 + 7,5 \cdot N_{SPT}$	Linear	51
Ortigão e Palmeira (1997)	$q_s = 67 + 60 \ln(N_{SPT})$	Exponencial	62
Springer (2006)	$q_s = 45,12 \ln(N_{SPT}) - 14,99$	Exponencial	68
Silva (2018)	$q_s = 65,80 + 1,68 \cdot N_{SPT}$	Linear	89

Fonte: Autor (2018).

A Tabela 6 apresenta os valores dos métodos empíricos utilizados para determinação da adesão solo-grampo considerando as duas camadas de solo que foram executados nos grampos de teste.

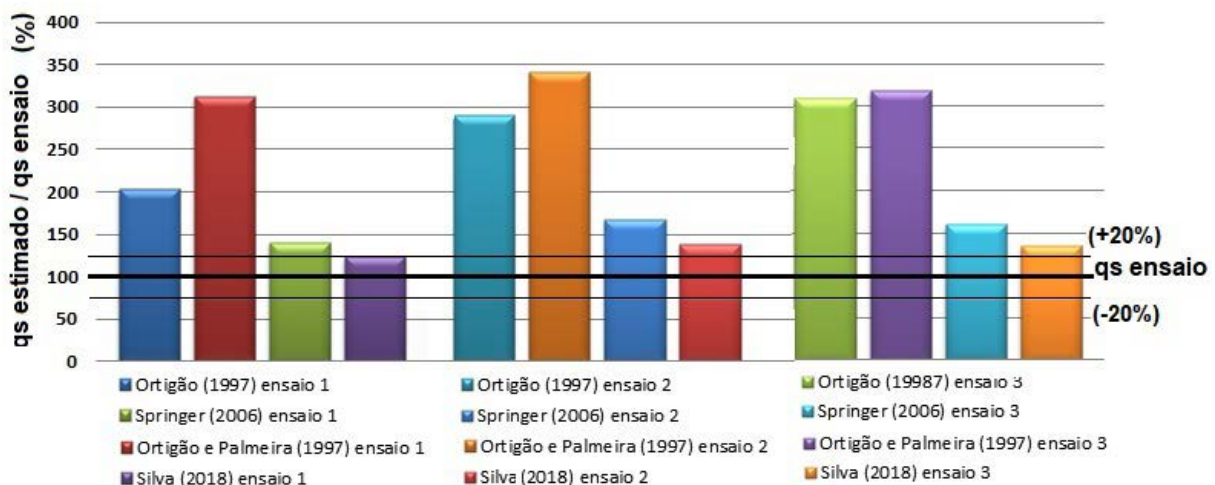
Tabela 6 – Adesão solo-grampo (qs) obtido através de métodos empíricos.

Chumbador	N_{SPT} médio	Silva (2016) qs = ensaio	Ortigão (1997) qs = estimado	Ortigão e Palmeira (1997) qs = estimado	Springer (2006) qs = estimado	Silva (2018) qs = estimado
1	15	69	140	216	97	86
2	22	74	215	252	124	103
3	30	84	260	267	135	113

Fonte: Autor (2018).

A condição esperada para avaliar a aplicabilidade dos métodos para determinação da adesão (qs), é que os valores analisados agrupem-se entre os limites superior e inferior, ou seja, com uma margem de 20% para cima ou para baixo da força máxima obtida durante o ensaio de carregamento; de maneira que, quanto mais próximo de 100% for o valor da relação (qs estimado/qs ensaio), mais exato será considerado o resultado estimado pelos métodos baseados em correlações empíricas, contribuindo, assim, com aspectos técnicos para dimensionamento, diminuindo a grande dispersão dos resultados obtidos através das referidas correlações. Para permitir a comparação dos resultados entre os métodos empíricos de previsão com o ensaio de arrancamento, a Figura 7 apresenta a precisão dos métodos com a realidade obtida *in loco*.

Figura 7 – Análise comparativa entre os valores de (qs) obtidos por meio de métodos empíricos e através dos ensaios de arrancamento.



Fonte: Autor (2018).

Os resultados aplicados na Figura 6 demonstram que a previsão dos métodos que consideram a resistência ao cisalhamento da interface solocalda de cimento, foram discrepantes em virtude da heterogeneidade do solo local, considerando a média dos parâmetros NSPT para cada chumbador ensaiado.

Considerando o valor médio da adesão obtida nos ensaios, os métodos de Ortigão (1997) e Ortigão e Palmeira (1997) superestimaram os valores em 168 e 224% a mais do que os obtidos *in loco*, fugindo da tolerância de estimativa dos métodos. O método de Springer (2006) e Silva (2018) foram os mais conservadores. Apesar de também superestimarem o parâmetro de adesão (qs) em 56 e 33%, foram o que apresentaram melhor previsão dentro dos limites adotado de variação $\pm 20\%$, com ênfase para o método proposto com menor erro de variação.

4 Conclusões

As condições geotécnicas de estabilidade dos maciços de solo estimadas através de *software* ou métodos consagrados de determinação da adesão dos grampos através de sondagens devem ser confirmadas durante a execução da obra.

A exumação parcial dos grampos possibilitou uma análise qualitativa das condições de injeção, relacionando o índice de vazios e porosidade do material na formação de uma bainha íntegra ao longo dos grampos, contribuindo com os índices físicos na formação da adesão através da interação solo-barras de aço.

A formulação encontrada na presente pesquisa, com elevado valor de R^2 , permitiu estimar com confiabilidade o dimensionamento de estruturas de solo grampeado, constatando uma boa significância estatística diante da adesão do aço com parâmetros físicos e mecânicos do solo.

A correlação proposta na presente pesquisa para determinação da adesão (q_s) obtida através da interação solo e grampo, apresenta confiabilidade para os solos coesivos em relação aos parâmetros geotécnicos encontrados *in loco*, com grampos executados somente com bainha. Assim, a aplicação do método para outros perfis de solos necessita de cuidados, pois o método deve ser utilizado em fase preliminar de projeto, para o aumento da confiabilidade dos resultados obtidos pelas correlações propostas, e novos ensaios de arrancamento devem ser executados em vários tipos de solos.

Embora as correlações entre valores de adesão (q_s) e as características do solo sejam ferramentas importantes para concepção inicial de projeto, os ensaios de arrancamento se constituem numa necessidade imprescindível para a real avaliação do atrito solo-grampo e do comportamento da obra. O ensaio de arrancamento em sua condição de ruptura permite a verificação da verdadeira sollicitação de esforços através da interação solo-calda de cimento-barras de aço.

O método empírico apresentado em estudo, baseado na resistência ao cisalhamento da interface solo-calda, foi o que apresentou melhores valores quando comparado com métodos propostos pela literatura em relação aos ensaios de arrancamento obtidos *in loco*.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - determinação do limite de liquidez**: NBR 6459. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - determinação do limite de plasticidade**: NBR 7180. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Solo - determinação da massa específica dos solos**: NBR 650.. Rio de Janeiro. 1995. ELIAS, V.; JURAM, I. Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations. In: **Report FHWA-RD, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration**, Washington, DC, USA, 1991, p. 89-198.
- FALCONI, F.F.; ALONSO, U.R. Considerações sobre o dimensionamento de uma estrutura de contenção em solo grampeado. IN: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, SEFE III, ABMS. **Anais...**, 1996, São Paulo, p. 301-308.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Soil nailing recommendations project national CLOUTERRE**. Recommendations CLOUTERRE 1991. Washington: FHWA, 1991. 301p.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da bacia sedimentar de São Paulo. In: MESA REDONDA ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, **Anais**, 1980, São Paulo, p. 5-13.
- HEYMANN, G. et al. Soil nail pull out resistance in residual soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EARTH REINFORCEMENT PRACTICE, Fukuoka, 11-13 nov. 1992. **Proceedings...** Fukuoka, v. 1. p. 487-492, 1992. FRAZEN, G. **Soil Nailing** – A laboratory and field study of pullout capacity. 1998. Tese (Doutorado) - Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 1998.
- JANASI, V. A.; ULBRICH, H. H. G. J. Late Proterozoic granitoid magmatism in the state of São Paulo, southeastern Brazil. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 51, n. 1-4, p. 351-374, 1991.
- JULIANI, C. **Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP**. 1993. Tese Doutorado em Meteorologia e Petrologia - Universidade de São Paulo, São Paulo, p.419, 1993.

LAZART, C. A. et al. Soil nail walls. In: **Report FHWA0-IF03-017**. Geotechnical Engineering Circular n. 7. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2003. p. 243-257.

ORTIGÃO, J. A. R. Pullot Tests in Soil Nailing Structures. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 20, n. 1, p.39-43, 1997.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M. Solo grampeado: técnica para estabilização de encostas e escavações. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997. p. 57-74.

PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; ZIRLIS, A. C. Solo grampeado, alguns detalhes executivos, ensaios e casos de obras. In: WORKSHOP SOLO GRAMPEADO. PROJETO, EXECUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E COMPORTAMENTO, 1., 2003, São Paulo, **Anais...** São Paulo: 2003. p. 1-20. RABCEWICZ, L. V. The New Austrian Tunnelling Method. **Revista Water Power** p.453-457, Novembro – 1964, p.511515, Dezembro – 1964, p.19-22, Janeiro. 1965. RABCEWICZ, L.V. The New Austrian Tunnelling Method. **Revista Water Power**, p.453-457, Novembro, 1964.

RABCEWICZ, L. V. The New Austrian Tunnelling Method. **Revista Water Power**, Rio de Janeiro. p.453-457 Novembro – 1964, p.511515, Dezembro – 1964, p.19-22, Janeiro. 1965.

SILVA, R.R.; PEREIRA, G. A. Verificação do desempenho de grampos realizados com injeção de bainha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: COBRAMSEG, 2016. p. 1-8.

SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaise**. 2006. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Sobre o autor

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva

Professor de Engenharia Civil da Universidade Nove de julho – Uninove. Ministra as disciplinas de Fundações e obras de Terra, Contenções de encostas, Mecânica dos solos. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em fundações, obras de terra, tratamento de solos e inspeção de materiais e estruturas por meio de ensaios não destrutivos por ultrassom, Coordenador técnico da empresa PS Instrumentação Geotécnica e consultor técnico da empresa Geobase Fundações Especiais.

Recebido em: 04.10.2018

Avaliado em: 29.10.2018

Aceito em: 30.10.2018