

Estudo do método da resistência elétrica para avaliação da integridade de solo grampeado

Study of method of electrical resistance for evaluating the soil nailing integrity

Ana Paula Mikos(1); Sidnei Helder Cardoso Teixeira(2)

1 Universidade Federal do Paraná - UFPR, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0706-5996> | E-mail: anapaulamikos@hotmail.com

2 Universidade Federal do Paraná - UFPR, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3522-1706> | E-mail: s.teixeira@ufpr.br

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 5, n. 1, p. 121-139, Jan.-Jun. 2018 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Janeiro 26, 2018; Aceito: Junho 28, 2018]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2423>

Endereço correspondente / Correspondence address

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Rua XV de Novembro, 1299 - Centro, Curitiba - PR, Brasil
CEP 80060-000

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*
Editora-chefe: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

As obras de melhoria de taludes com solo grampeado são amplamente utilizadas ao longo de rodovias para estabilização de taludes de cortes e aterro. Tal estrutura se diferencia das demais, como muro de gravidade e gabião, por apresentar barras de aço enterradas no solo, envoltas por calda de cimento. O principal problema que ocorre em solo grampeado é a falha no preenchimento com calda de cimento ao longo do furo, o que pode afetar no desempenho da contenção. Como são elementos enterrados, a inspeção é limitada ao campo visual, o que impossibilita definir o comprimento e a integridade dos elementos. Para aprimorar a análise e superar as limitações, os métodos não destrutivos são utilizados para avaliar todos os grampos da contenção sem afetar a estrutura. Dentre eles, o método da resistência elétrica, pode ser utilizado na avaliação da integridade de solo grampeado. A metodologia consiste em comparar a resistência elétrica entre os grampos próximos, e valores diferentes podem indicar falhas executivas ou barras de diferentes tamanhos. O objetivo do presente artigo foi realizar ensaios preliminares em um talude, anterior à construção do solo grampeado, de modo a entender o funcionamento da técnica e avaliar a influência dos parâmetros elétricos do solo. Foi possível perceber que o talude avaliado apresenta variação lateral da resistência elétrica. Portanto, uma futura contenção no local, deve-se atentar à importância da heterogeneidade do solo nos resultados de resistência elétrica.

Palavras-chave: Solo grampeado. Métodos não destrutivos. Resistência elétrica.

Abstract

The slope improvement works with soil nailing are widely used along highways for stabilization of slope and landfill slopes. These structures differ from others, such as gravity walls or gabion meshes, because they have steel bars buried in the soil and surrounded by grouting. The major problem in soil nailing is the incomplete grouting along the hole, which can affect the performance of the structure. Moreover, soil nailing structures are buried, hence the most affordable inspection is visual, which makes more difficult to define the length and integrity of the elements. To improve the analyses and overcome the limitations, non destructive methods are used to evaluate all the elements of the retaining without disturbing the structure. The electrical resistance method can be used in the integrity evaluation of soil nailing. The methodology consists in compare the electric resistance between adjacent bars, which may conduct to different results, indicating executive failures or bar of different sizes. This paper aims to perform preliminary tests on a slope, before the construction of soil nailing, in order to understand the technique's operation and to evaluate the influence of the electrical parameters of the soil. It was possible to notice that the evaluated slope presents lateral variation in electric resistance. Therefore, considering a future soil nailing there, it will be important to take into account the heterogeneity of the soil in results of electrical resistance.

Keywords: Soil nailing. Non-destructive methods. Electrical resistance.

1 Introdução

Estruturas de contenção são amplamente utilizadas em obras de rodovias, principalmente em serras ou em regiões de relevo acidentado, pois é necessária a execução de cortes no terreno para vencer a topografia (LAZARTE *et al.*, 2015). De acordo com Pitta *et al.* (2013) o solo grampeado resulta na melhoria do solo pela utilização de chumbadores e é uma das técnicas de arrimo mais projetadas e executadas no Brasil nos últimos anos. Lazarte *et al.* (2015) afirmam que a utilização desse tipo de contenção ajuda a reduzir os impactos ambientais ao longo do corredor viário, pois são construídas de forma descendente e exigem volumes inferiores de escavação, quando comparados com as demais soluções como muro de arrimo, muro de gabião e solo reforçado com geossintéticos.

Com base na larga experiência adquirida com a construção de cortinas atirantadas, os engenheiros brasileiros começaram a utilizar e adaptar-se ao solo grampeado, devido a sequência executiva semelhante. O solo grampeado foi desenvolvido na década de 1960 para aplicação em túneis convencionais e, no Brasil foi utilizado pela primeira vez em 1970 durante a construção do sistema de abastecimento de água Cantareira em São Paulo (ORTIGÃO *et al.*, 1995).

O solo grampeado é composto por dois elementos principais: os chumbadores e o preenchimento. Os chumbadores são elementos semi-rígidos que promovem a estabilização do maciço devido à resistência à tração, e são mobilizados em resposta ao movimento lateral e deformação do solo. O grampo é inserido em uma perfuração e posteriormente é realizado o preenchimento, normalmente com cimento Portland e água (PITTA *et al.*, 2013). A calda de cimento tem a função de transferir as tensões de cisalhamento da deformação do solo e das barras metálicas e as tensões de tração para o solo envolvente, além de proporcionar certo nível de proteção contra corrosão (LAZARTE *et al.*, 2015). Uma contenção com solo grampeado utilizada adjacente a uma rodovia para conter e estabilizar o talude é demonstrada na Figura 1.

Figura 1. Solo grampeado na rodovia BR-376 (PR)



Fonte: Autores (2018).

Atualmente existe uma preocupação crescente sobre o estado de conservação e condição de segurança das barras enterradas no solo. Pitta *et al.* (2006) salientam que existem muitas estruturas antigas não são vistoriadas, e foram construídas apenas com base em procedimentos internos de empresas, os quais nem sempre refletiam padrões de qualidade aptos a evitar problemas ao longo da vida útil das obras.

Santos (2014) afirma que as falhas e manifestações patológicas em solo grampeado são decorrentes da má execução dos grampos e da interação do aço e do concreto com agentes externos. De acordo com Jayawickrama *et al.* (2007) os principais problemas em solo grampeado ocorrem devido ao preenchimento incompleto do furo com a calda de cimento, que é uma condição essencial na garantia do desempenho da contenção. Tal falhas ocorrem pela falta de centralizadores, ausência de tubo guia, consistência da nata muito rígida ou muito fluída ou execução de perfurações maiores que o comprimento das barras.

Souza *et al.* (2005) também constataram que quando a injeção é realizada somente com bainha, ou seja, somente uma injeção com calda de cimento, a exsudação da calda provoca vazios em grande parte do furo gerando um preenchimento incompleto. Quando é realizada reinjeção dos grampos ocorre um aumento considerável da resistência ao arrancamento dos grampos, pois este interage melhor com o solo, preenche eventuais vazios e promove redução das deformações da contenção.

Cabe salientar ainda que, de modo geral, a utilização de procedimentos que atendam aos padrões de qualidade atuais não se aplica à maior parte das instalações antigas e que, muitas vezes, os grampos eram instalados sem nenhuma proteção anticorrosiva (WITHIAM *et al.*, 2001). Shiu e Cheung (2003) afirmam que a proteção anticorrosiva é um aspecto importante no solo grampeado, de modo que o desempenho e a vida-útil destas contenções dependem de a capacidade do grampo resistir à corrosão. As falhas no preenchimento além de deixar a barra exposta e suscetível à corrosão, podem ocasionar maiores deformações da contenção e reduzir a capacidade de carga do chumbador (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007).

A ruptura de estruturas de contenção pode ocasionar danos em rodovias comprometendo a segurança dos funcionários e usuários, e também pode afetar estruturas próximas à contenção. Na Figura 2 é apresentada uma falha de solo grampeado ocorrida logo após a construção, na Rodovia Raposo Tavares em Cotia-SP, trecho de elevado tráfego próximo ao anel viário da cidade de São Paulo, porém sem informação do motivo (SOUZA *et al.*, 2005).

Figura 2. Falha em solo grampeado na Rodovia Raposo Tavares-SP



Fonte: Souza et al. (2005).

Esses fatos conduzem à necessidade de desenvolver alternativas que permitam, de forma eficaz e confiável, avaliar a qualidade das estruturas de contenção, para garantir a segurança e conforto dos usuários e operadores de rodovias, além de manter a integridade de estruturas adjacentes. Uma vez que elementos enterrados no solo, estão continuamente sujeitos a fatores que degradam sua integridade estrutural. Nesse contexto, a utilização de ensaios não destrutivos se apresenta como uma alternativa interessante no monitoramento e avaliação da integridade dessas estruturas.

Os métodos não destrutivos aplicados em estruturas de contenção são utilizados internacionalmente, com grande ênfase em Hong Kong, em que solo grampeado é utilizado amplamente para melhoria de estabilidade das encostas (CHEUNG, 2003). São baseados em técnicas ultrassônicas, magnéticas, acústicas, reflectométricas e resistivas, e de modo geral funcionam com base no princípio da propagação de ondas mecânicas ou eletromagnéticas através de materiais como concreto, aço e madeira (JAYAWICKRAMA et al., 2007).

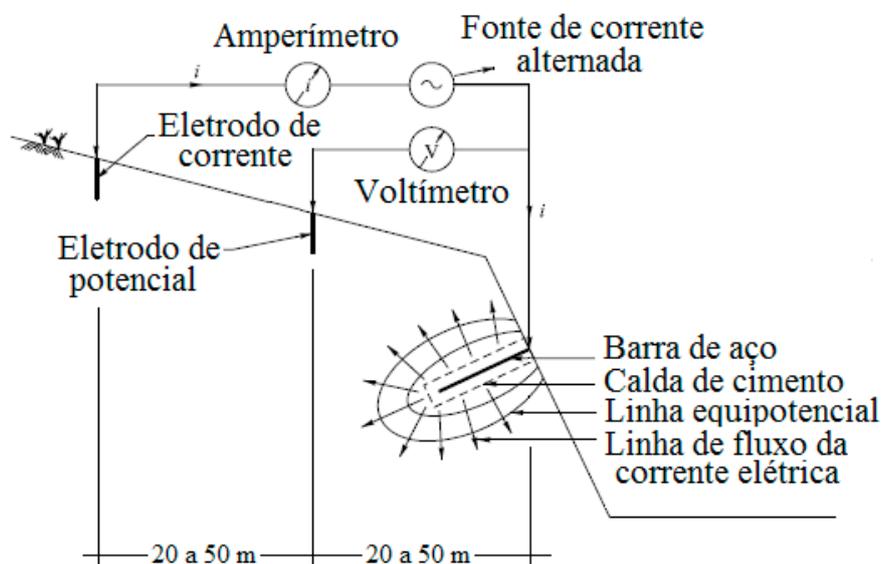
Dentre diversos métodos, optou-se em estudar o método da resistência elétrica, pois de acordo com a literatura apresenta potencial de utilização em estruturas de contenção com solo grampeado (CHEUNG; LO, 2005; LEE; ARUP 2007). O ensaio consiste na medição da resistência elétrica entre o grampo e o solo ao redor, e os dados são comparados entre os grampos próximos. Valores diferentes podem indicar falhas na calda de cimento ou barras de diferentes tamanhos (CHEUNG; LO, 2005).

De modo a entender a metodologia, sua aplicabilidade e limitações, o objetivo do presente artigo é realizar ensaios de resistência elétrica em um talude com as características geotécnicas conhecidas, em que será construído futuramente um reforço com solo grampeado, para avaliar como as propriedades elétricas do solo podem influenciar nos resultados do método.

2 Método da Resistência Elétrica

O método não destrutivo consiste na medição da resistência elétrica entre a barra de aço e todo o solo ao redor do elemento, semelhante à medição de resistência da terra obtida para sistemas de aterramento elétrico, como apresentado no anexo F, da norma NBR 15.749 (ABNT, 2009). Para realização do ensaio devem ser instalados dois eletrodos de aço inoxidável (eletrodo de corrente e eletrodo de potencial) em uma profundidade de 0,5 a 1,0 metro na parte superior do talude em que o solo grampeado foi executado. Deve haver uma distância linear de no mínimo 20,0 metros e no máximo 50,0 metros entre os eletrodos de corrente e potencial e entre o eletrodo de potencial e local do teste (CHEUNG; LO, 2005), como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Esquema ilustrativo do método da resistência elétrica



Fonte: Baseado em Cheung e Lo (2005).

O procedimento de ensaio envolve a aplicação de uma corrente elétrica na barra de aço (grampo), que retorna no eletrodo de corrente e pelo eletrodo de potencial é medida a diferença de potencial elétrico (ddp) entre a barra e o solo ao seu redor. Para tal é necessário a utilização de cabos elétricos que são ligados ao voltímetro e no amperímetro, e garra do tipo “jacaré” para realizar a ligação elétrica com a barra de aço. Para manter o sistema em equilíbrio, o método utiliza corrente alternada evitando polarização dos eletrodos (LEE; ARUP, 2007).

A resistência total é dada pela relação da tensão medida entre o eletrodo de potencial e a cabeça da barra através do voltímetro, e a intensidade da corrente entre a cabeça da barra e o eletrodo de corrente pelo amperímetro. A resistência também pode ser fornecida diretamente pelo equipamento, de acordo com a Equação (1). O R representa a resistência elétrica, em ohms; o V é a diferença de potencial elétrico em Volts; e o i indica a corrente elétrica, em ampères.

$$R = \frac{V}{i} \quad \text{Eq. 1}$$

De acordo com Aurélio e Leon (1980), a resistência elétrica total é composta pela resistência dos eletrodos, cabos, conexões e fiação; resistência de contato entre os eletrodos e resistência do elemento que circunda o eletrodo. No entanto, é o material que circunda o eletrodo que define o valor da resistência total a ser medido, pois os outros dois são desprezíveis por apresentarem um valor muito baixo.

A condução elétrica ocorre por meio de um fluxo de elétrons livres em um meio com íons móveis, assim se a corrente elétrica é aplicada no elemento instalado no solo, é possível medir a resistência elétrica total entre dois pontos. Desse modo, Lee e Arup (2007) descrevem que a resistência total entre o grampo e o solo depende de quatro componentes principais: a resistência da barra de aço, resistência de contato entre a barra e a calda de cimento, resistência radial da calda de cimento, e a resistência do solo ao redor do elemento.

A resistência da barra em situação normal tende a ser desprezível quando comparada com as demais, entretanto deve ser considerada quando apresentar ocorrência de corrosão com acúmulo significativo de ferrugem. A resistência de contato é relativamente pequena e pode ser afetada pela presença de proteção anticorrosiva da barra. A resistência radial depende do raio do furo e da mobilidade iônica no interior da calda de cimento. Com relação ao solo, a resistividade depende de sua homogeneidade, teor de umidade, teor de argila e condutividade iônica da água subterrânea. No entanto, a influência geológica afeta suavemente elementos próximos, afinal a corrente radial atua em todas as direções (LEE; ARUP, 2007).

De acordo com Souza *et al.* (2007) a camada de calda de cimento que envolve a barra proporciona uma maior área de contato entre o grampo e o solo. A resistência elétrica reduz com o aumento do comprimento da barra e com aumento o diâmetro da calda de cimento. Isso ocorre porque a calda de cimento ao redor da barra produz o efeito de uma barra de grande seção transversal, que é inversamente proporcional à resistência elétrica da barra (MAMEDE FILHO, 2007).

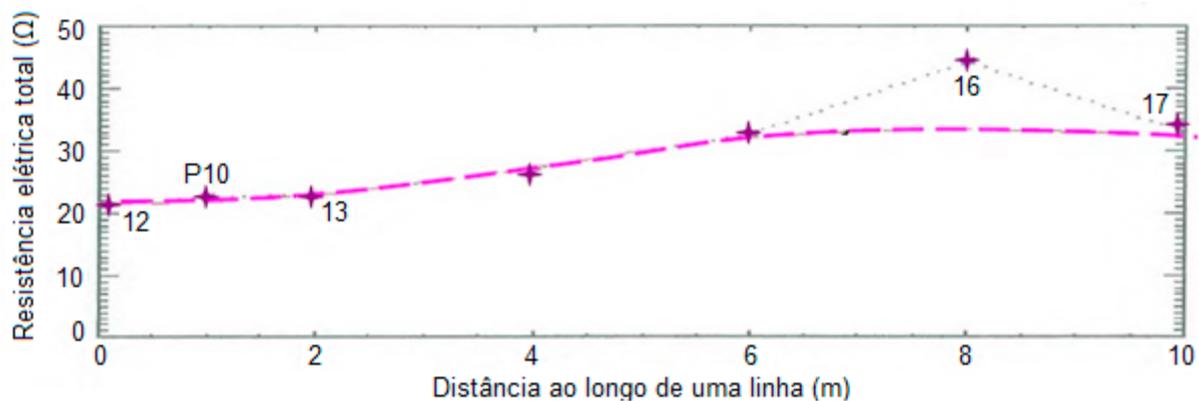
Lee e Arup (2007) afirmam que a teoria é bem compreendida na medida em que as variáveis elétricas do solo e do cimento são facilmente previsíveis. Os compostos de cimento apresentam resistividade elétrica menor comparada com aos solos encontrados no Brasil (LEITE, 1996). Desse modo, a deficiência no preenchimento do furo com a calda de cimento reduz o caminho da corrente elétrica, aumentando consideravelmente a resistência. As variações refletem o comprimento da calda de cimento e não da barra, pois a resistência elétrica do aço é praticamente desprezível. Logo, se a resistência elétrica total de uma barra é significativamente diferente das demais, existe uma alta probabilidade da ocorrência de anomalias, como falhas na calda de cimento.

Normalmente, as medições são realizadas ao longo de linhas horizontais de barras, em no mínimo 10 ensaios com cada elemento para estabelecer valores consistentes e com repetição. Os resultados das medições devem ser agrupados de forma a se estabelecer um mapeamento de resistência elétrica de toda a contenção, baseado em métodos estatísticos (LEE; ARUP, 2007).

Considerando um valor médio de resistência elétrica de todos os grampos da contenção, valores maiores podem ser atribuídos a elementos com falhas ou vazios no preenchimento com calda de cimento ou ainda à presença de uma barra de menor comprimento. A resistência entre o ar e a calda de cimento é maior que entre o solo e a calda, sendo fácil indicar descontinuidades preenchidas por ar. Valores de resistência inferiores à média podem estar associados a excesso de argamassa no furo ou barras mais longas (CHEUNG; LO, 2005).

Na Figura 4 é possível observar resultados obtidos em solo grampeado através do método da resistência elétrica realizados por Lee e Arup (2007) em grampos de 15,0 m, e a resistência elétrica variou entre 22,0 e 33,0 Ω . A linha rosa representa a média dos valores, em que o acréscimo lateral ocorre pela heterogeneidade do solo. O grampo 16, que se apresenta fora da média, apresenta uma falha com 2,0 m na calda de cimento. Em barras de 9,0 m foi possível identificar falhas na calda de cimento com ar em 1 m, e em barras de 15 m, apenas vazios com 2 m foram identificados pela metodologia (LEE; ARUP, 2007).

Figura 4. Exemplo de resultado obtido em solo grampeado



Fonte: Baseado em Lee e Arup (2007).

Cheung e Lo (2005) realizaram testes em grampos com 17,0 metros de comprimento para avaliar a integridade da calda de cimento. Foi possível perceber que os resultados de resistência de elementos da mesma linha variavam gradualmente devido à heterogeneidade do solo. Barras de aço com mesmo comprimento, mas com falhas no preenchimento de calda de cimento apresentaram resultados superiores de resistência elétrica quando comparadas com as barras íntegras, validando a hipótese do método. Também foram avaliados diferentes tipos de vazios, preenchidos com solo e ar,

e os autores concluíram que a identificação dos vazios é facilitada quando estes estão preenchidos com ar.

Os resultados obtidos por Cheung e Lo (2005) para barras com preenchimento completo foram em torno de 20,0 Ω para barras de 15,0 m, 30,0 Ω para barras de 9,0 m, e 40,0 Ω para barras com 7,0 m de comprimento. Porém não existe uma relação direta da resistência elétrica com o comprimento, pois variam de acordo com o solo local.

Em uma segunda fase de testes, Cheung e Lo (2005) também realizaram ensaios em dias de chuva e sol para verificar a influência das condições climáticas nos resultados. Os autores concluíram que para grampos com a calda de cimento intacta, a resistência elétrica total é pouco alterada em dias de chuva. No entanto, se existem falhas na calda de injeção, a variação da resistência elétrica é mais significativa devido ao preenchimento do vazio com água.

Souza *et al.* (2007), de maneira similar ao método da resistência elétrica, realizou ensaios em malha de aterramento e comparou resultados de uma barra de aço e com uma barra com concreto ao redor, e obteve valores bem inferiores de resistência elétrica com a presença de concreto. Também foi comparado os valores obtidos em períodos secos e chuvosos, e como as barras estão totalmente envoltas pelo concreto, a resistência elétrica apresentou pouca variação. Isso se deve ao fato do aumento significativo da área de contato entre as barras e o solo, reduzindo a resistência de contato.

A metodologia consiste em comparar valores entre barras próximas, indicando possíveis falhas na calda de cimento, ou grampos de comprimento diferentes, de maneira qualitativa. Por outro lado, não permite distinguir os defeitos, nem fornece diretamente o comprimento da barra, sendo recomendável, portanto, associá-la a um método complementar, a fim de determinar pelo menos uma dessas variáveis: integridade da calda de cimento ou comprimento da barra. Conhecendo-se o comprimento da barra a partir do projeto, por exemplo, a interpretação dos resultados torna-se muito mais precisa. Para a realização do ensaio é necessário ter acesso à cabeça das barras (CHEUNG; LO 2005, LEE; ARUP; 2007).

2.1 Resistividade elétrica do solo

O valor da resistência elétrica depende do material e da geometria do condutor, enquanto a resistividade é uma propriedade do material e se relaciona com a resistência por um fator geométrico, que é uma relação entre a área (A) em m² e o comprimento do material (L) em m, como apresentado na Equação (2). A resistividade elétrica (ρ) é dada em $\Omega.m$.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

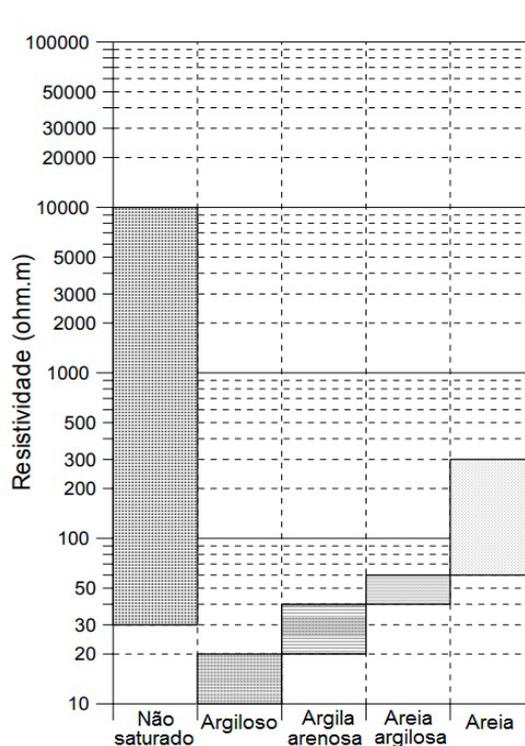
Resistividade elétrica, segundo a definição da ABNT (2009), é a resistência entre faces opostas de um volume de solo correspondente a um cubo homogêneo e isotrópico, cuja aresta mede uma unidade de comprimento, ou seja, independente da dimensão, a resistividade elétrica sempre será igual para mesmas condições.

As características elétricas do solo são estudadas na geotecnia a partir da resistividade elétrica, e para sua obtenção podem ser utilizados métodos geofísicos ou ensaios laboratoriais. Chiossi (1979) afirma que nos solos, a resistividade elétrica depende de vários fatores como: porosidade, permeabilidade, composição mineralógica, grau de saturação, resistividade do fluido que preenche os vazios (sais dissolvidos), grau de cimentação, grau de compactação e tamanho e forma das partículas.

De acordo com Boszczowski (2008), quanto maior o grau de saturação do solo, menor a resistividade elétrica, ou seja, com o aumento da umidade há favorecimento da passagem de corrente elétrica pela água. Mikos (2017) constatou que a resistividade elétrica reduz com o aumento da umidade, e para umidades acima de 25% a resistividade permanece praticamente constante, o que indica que a corrente elétrica passa preferencialmente pela água e é diretamente influenciada pela sua estrutura, principalmente índice de vazios e a granulometria do solo. Solos com maior índice de vazios tendem a apresentar maiores valores de resistividade elétrica (BOSZCZOWSKI 2008, MIKOS 2017).

Campanella e Weemees (1990) também indicam que ocorre a redução da resistividade com o aumento de finos no solo, pois os grãos menores ocupam os vazios formados entre os grãos maiores de areia, diminuindo a porosidade. Abu- Hassanein et al. (1996) também conclui que a presença de argilo-minerais em solos argilos, bem como a alta superfície específica das partículas também geram uma redução da resistividade. Desse modo, as areias normalmente apresentam resistividade maiores que os solos argilosos.

Braga (2006) apresenta faixas de resistividade elétrica para diferentes tipos de solos, apresentadas na Figura 5. É possível perceber que para solos não saturados a faixa de valores é muito grande, que de acordo com Chiossi (1979) é o parâmetro geofísico que apresenta maior intervalo de variação. Quando o solo está saturado é possível obter faixas menores.

Figura 5. Valores de resistividade elétrica do solo

Fonte: Braga (2006).

A condição do solo em que os grampos estão instalados pode influenciar nos resultados de resistência elétrica. De acordo com Guimarães Neto (2008), em obras de contenção sempre deve ser considerado um sistema de drenagem eficiente, uma vez que o custo é muito baixo comparado com aumento da segurança. Os dispositivos de drenagem devem ser instalados antes da execução do paramento, para evitar o fluxo de água dentro do maciço e devem ser consideradas a drenagem profunda, de paramento e superficial. Desse modo, é difícil as barras serem instaladas em um solo saturado, o que faz com que os valores de resistividade elétrica apresentem grande variação de resistividade elétrica. Por isso, Lee e Arup (2007) alertam que valores obtidos em locais distantes não devem ser comparados para o método da resistência elétrica em solo grampeado.

2.2 Resistividade elétrica da calda de cimento

De acordo com Leite (1996) os compostos de cimento, como concreto e calda de cimento, são alcalinos e higroscópicos, e quando são enterrados tendem a absorver umidade. Por esse motivo, apresentam resistividade elétrica baixa, normalmente inferiores aos solos encontrados no Brasil, com resistividade elétrica em torno de 30 $\Omega.m$ a 100 $\Omega.m$ (LEITE, 1996). Lee e Arup (2007) indicam que a resistividade elétrica da calda de cimento é aproximadamente à 10 $\Omega.m$, inferior à do concreto por não apresentar agregados (areia e brita), que dificultam a passagem da corrente elétrica.

Segundo Gowers e Millard (1999) o Método Wenner ou método de quatro pontos é a técnica mais utilizada para medição de resistividade de compostos de cimento e, apesar de ter sido desenvolvido originalmente para medição de resistividade do solo, possui aplicabilidade para concreto.

O tipo de cimento pode interferir nos resultados de resistividade elétrica. De acordo com Medeiros Junior e Lima (2016), corpos de prova de concreto mantidos em câmara úmida e executados com cimento CPII e CPV apresentaram valores próximos e menores quando comparados com o cimento CPIII e CPIV. O cimento CPIII, com adição de 60% de escória de alto forno, apresentou os maiores valores. Em relação ao cimento CPII, que é o cimento mais utilizado para solo grampeado, a variação da relação água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6 pouco influenciou nos resultados de resistividade elétrica. De acordo com Pitta *et al.* (2013), a relação água/cimento utilizada para calda de cimento para injeção deve estar entre 0,5 e 0,7 em peso.

Segundo Medeiros Junior e Lima (2016), o aumento da resistividade da calda de concreto ocorre devido à hidratação do cimento, que reduz a conectividade dos poros e consequentemente a condutividade da pasta de cimento. Os valores de resistividade da calda de cimento para CPII apresentou valores abaixo de 50 Ω .

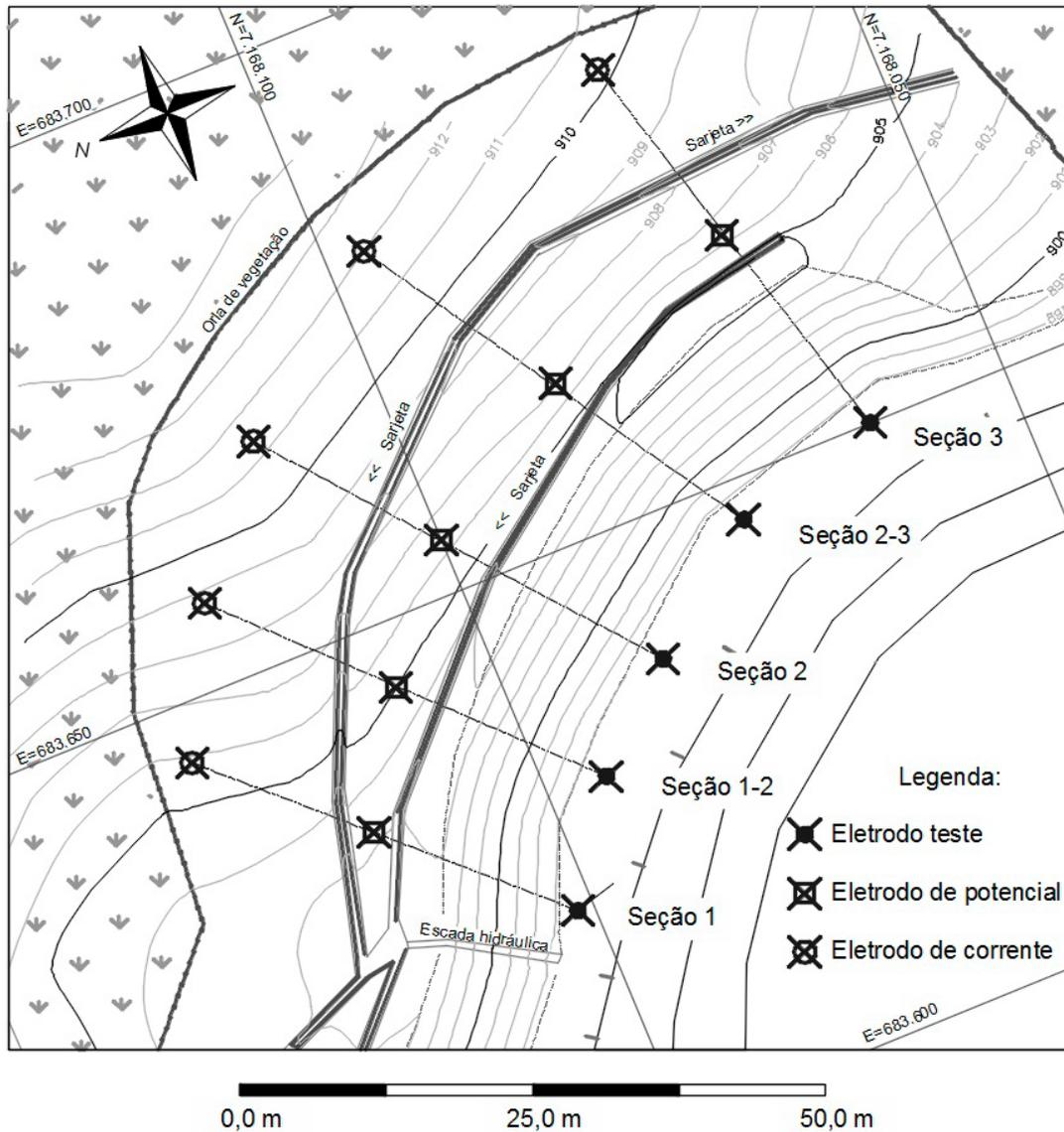
3 Programa Experimental

Para avaliação preliminar do método da resistência elétrica, foram realizados ensaios em um talude, de modo a avaliar como a resistência varia lateralmente. O talude se encontra no município de São José dos Pinhais, no km 617 da BR 376, em uma alça do retorno. O solo local pertence ao complexo Gnáissico-Migmatítico (APIimgm) do período Arqueano, o que indica presença de solo residual de grande heterogeneidade (SIGA Jr., 1995).

O estudo compreendeu medições de resistência elétrica do solo, de modo a obter resultados preliminares, realizados com base nos procedimentos de ensaio apresentado no Apêndice A, da GeoReport 176 (CHEUNG; LO, 2005). Para as medições preliminares no campo experimental foi fixada a distância média de 20,0 m entre eletrodos, e o grampo foi substituído por um terceiro eletrodo, denominado eletrodo teste.

Foram avaliadas 5 seções, sendo que em cada uma foram obtidos valores de tensão para 5 incrementos de corrente elétrica. Os incrementos de corrente são dados de acordo com 5 fases do próprio equipamento, não sendo possível adotar um valor específico. Posteriormente, os valores foram plotados em gráficos com tensão *versus* corrente, com início na origem, desse modo, o coeficiente angular da reta é a própria resistência elétrica, de acordo com a Equação 1. Uma planta com as seções em estudo é apresentada na Figura 6.

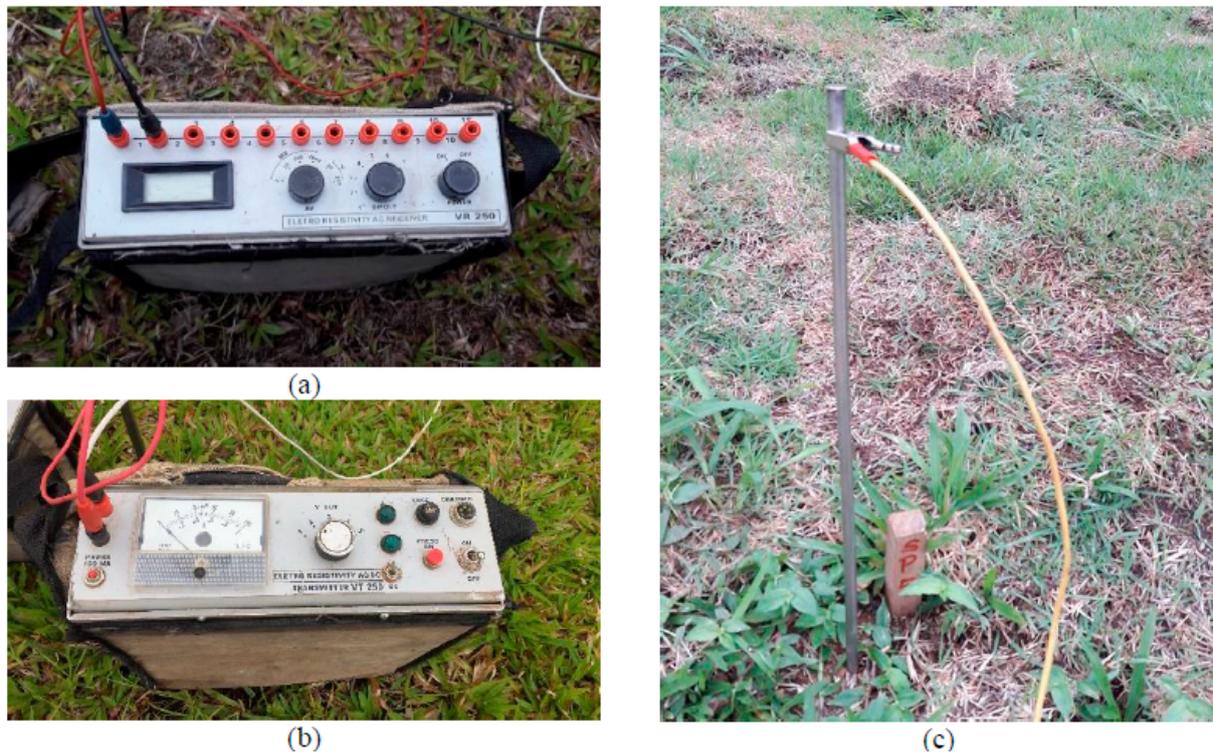
Figura 6. Seções de medição da resistência elétrica em campo



Entre o eletrodo teste e o eletrodo de potencial deve ser gerada uma corrente elétrica alternada, e entre o eletrodo de potencial e o eletrodo deve-se medir a tensão elétrica entre esses dois pontos. O eletrodo de potencial deve estar entre os eletrodos de corrente, conforme procedimento apresentado por Cheung e Lo (2005) e Lee e Arup (2007). O eletrodo teste foi posicionado na base do talude, de modo a obter valores de resistência elétrica do solo próxima à uma futura instalação dos grampos.

Os equipamentos utilizados para as medições de resistência elétrica em campo também são empregados nas medições de eletrorresistividade do solo. Utilizou-se um receptor de eletrorresistividade, que mede a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos (Figura 7a); um transmissor de eletrorresistividade que gera corrente alternada (Figura 7b) e três eletrodos de aço (Figura 7c). O contato entre o equipamento e os eletrodos deu por cabos e garras “jacaré”.

Figura 7. Equipamentos utilizados para medição da resistência elétrica

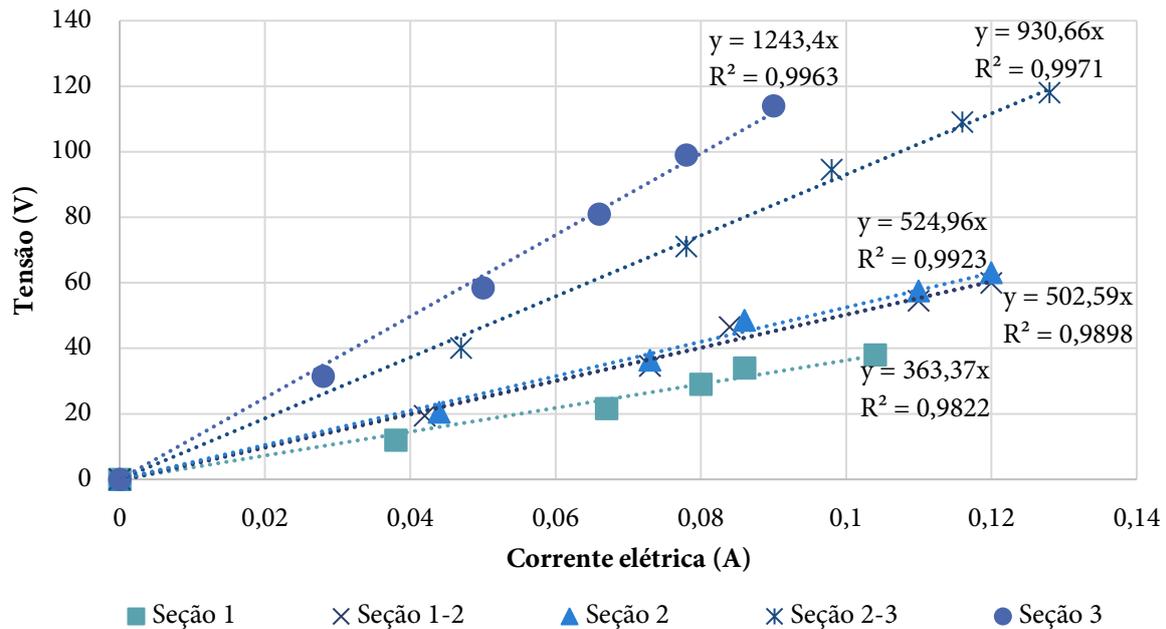


De acordo com Souza *et al.* (2007), hastes sem alguma proteção ao seu redor (concreto ou calda de cimento) apresentaram resultados maiores quando comparadas com hastes concretadas. Além disso, ensaios somente com as hastes apresentam maiores variações em medições realizadas em períodos secos e chuvosos, pois a barra de aço está em contato direto com o solo. Assim, as medições do presente artigo foram realizadas em período seco, de modo a obter os maiores valores de resistência elétrica para o solo local, uma vez que a redução da umidade gera um aumento da resistividade elétrica do solo (BOSZCZOWSKI, 2008).

4 Resultados e Discussões

Para cada seção são apresentadas as 5 medições de tensão e corrente elétrica, que foram plotadas no gráfico com origem no zero. Como as relações entre os parâmetros são constantes, o coeficiente angular da reta é a própria resistência elétrica, obtida com uma linha de tendência dos pontos. Os resultados obtidos em campo para cada seção podem ser observados na Figura 8.

Figura 8. Valores de corrente e tensão obtidos em campo

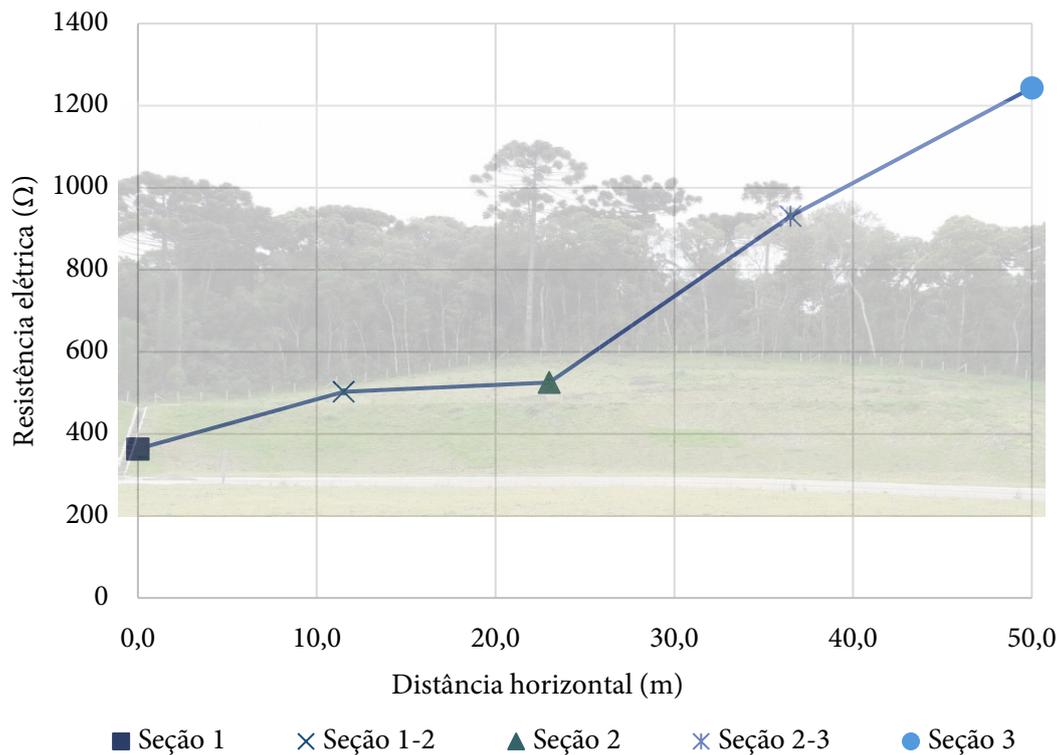


Como apresentado no gráfico, as seções apresentam valores de tensão elétrica diretamente proporcional aos valores de corrente elétrica, de acordo com a primeira Lei de Ohm. As seções 1-2 e 2 apresentaram valores bem próximos de resistência elétrica. A seção 1 apresenta uma reta menos inclinada, o que indica menor resistência elétrica. Por outro lado, a seção 3, por apresentar uma reta mais inclinada, indica um valor maior de resistência elétrica, comparada com as demais.

Considerando a seção 1 como ponto zero, e a distância horizontal como a distâncias entre as seções medidas pelo eletrodo teste, na base do talude, são encontrados os valores de resistência apresentados na Tabela 1 e na Figura 9, com a imagem frontal do talude.

Tabela 1. Valores de resistência elétrica do solo

Seção	Distância horizontal (m)	Resistência elétrica (Ω)
1	0,0	363,4
1-2	11,5	502,6
2	23,0	525,0
2-3	36,5	930,7
3	50,0	1.243,4

Figura 9. Variação lateral da resistência elétrica

Percebe-se que o talude apresenta uma grande variabilidade de resistência elétrica lateral, o que se deve ao solo residual encontrado no local. Entre as seções 1 e 2, a variação da resistência elétrica não é tão significativa quando comparada com a seção 3. Laudos de sondagem, apresentados por Mikos (2017) indicam que apenas na seção 1 existe presença de nível de lençol freático, o que pode justificar os valores inferiores de resistência elétrica. De acordo com Boszczowski (2008), o aumento da umidade, faz com que aumente a passagem de corrente elétrica pelo solo, reduzindo a sua resistência elétrica.

Em uma estrutura com solo grampeado, o procedimento de ensaio é o mesmo, porém, o eletrodo teste é substituído pelo próprio grampo. Os grampos próximos podem ser avaliados com os eletrodos de corrente e tensão fixos na parte superior do talude, porém ao caminhar ao longo do talude, a variação lateral de resistência elétrica do solo deve ser considerada, para evitar interpretações errôneas. Ou seja, para uma estrutura de solo grampeado neste local, com grampos de mesmo tamanho, pode haver a variação de resistência elétrica devido ao solo, e não pela ocorrência de uma falha. E a variação da resistência deve ser crescente na direção da seção 1 para a seção 3, do mesmo modo como apresentado na Figura 9.

Deve haver cuidado para não interpretar o aumento da resistência elétrica como a existência de uma falha na calda de cimento, pois sabe-se que existe a variação lateral da resistência do solo. No entanto, a presença de falhas na calda de cimento deve promover um aumento significativo da resistência elétrica.

Cabe salientar que de acordo com Lee e Arup (2007), em barras de 9,0 m foi possível identificar falhas de 1 m na calda de cimento, e em barras de 15 m, apenas vazios com 2 m. Com isso, seria interessante executar barras com comprimentos e falhas na calda de cimento com tamanhos conhecidos de modo a avaliar a precisão da técnica. Além disso, caso existam falhas com ar, pode-se realizar ensaios em períodos secos e chuvosos para avaliar se o preenchimento do vazio com água afeta nos valores de resistência elétrica.

5 Considerações finais

Os resultados preliminares indicaram que existe uma variação lateral de resistência elétrica no talude em estudo, o que pode ser justificado pela presença de nível de lençol freático, uma vez que o aumento da umidade reduz a resistividade elétrica do solo. Isso também se deve à heterogeneidade do solo encontrado em campo.

A variação encontrada deve ser considerada na realização dos ensaios não destrutivos de resistência elétrica em uma futura contenção com solo grampeado no talude em estudo. Como todas as medições foram realizadas com a mesma distância linear entre os eletrodos, os resultados indicam que para uma estrutura com solo grampeado, com grampos de mesmas características, podem haver valores de resistência crescentes na direção da seção 1 para a seção 3, devido às características do solo e não pela existência de falhas, ou barras de diferentes comprimentos. No entanto, a heterogeneidade do solo produz um aumento gradual da resistência elétrica, uma vez que o que mais afeta nos resultados são as características da calda de cimento. Por isso, falhas no preenchimento da calda de cimento poderão ser identificadas através de uma análise estatística, com valores divergentes em relação à média.

Mesmo com uma boa experiência internacional com métodos não destrutivos, no Brasil o uso dessas técnicas ainda é pouco difundido, uma vez que não existe normativa para a construção de solo grampeado e muitas vezes não é realizado acompanhamento periódico dessas estruturas. O estudo teórico do método da resistência elétrica para aplicação em solo grampeado indica potencial, principalmente como uma técnica comparativa entre os grampos próximos de uma mesma contenção. Os ensaios realizados em campo foram simples, rápidos e de fácil execução. Ensaios em solo grampeado já existentes, com características conhecidas, permitirão maior entendimento da técnica, de modo a criar um banco de dados e procedimentos padronizados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná, à CAPES e a Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

Referências

- ABU-HASSANEIN, Z. S., BENSON, C. H., BLOTZ, L. R. Electrical Resistivity of Compacted Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 5, p. 397-406, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15749*. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009.
- BOSZCZOWSKI, R. B. *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba*, PR. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2008.
- BRAGA, A. C. O. *Métodos da eletroresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2006.
- CAMPANELLA, R. G.; WEEMEES, I. *Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies*. Civil Engineering Department. The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada: 1990.
- CHEUNG, W. M. *Non-destructive tests for determining the lengths of installed steel soil nails*. Geo Report 133. Geotechnical engineering office. Civil engineering department. Hong Kong, 2003.
- CHEUNG, W. M.; LO, D. O. K. *Interim report on non-destructive tests for checking the integrity of cement grout sleeve of installed soil nails*. Geo Report 176. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2005.
- CHIOSSI, N. J. *Geologia Aplicada a Engenharia*. Grêmio Politécnico. São Paulo, 1979.
- GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. *ACI Materials Journal*, n. 96-M66, 1999.
- GUIMARÃES NETO, J.M. *Estudo de Metodologias Adotadas no Cálculo de Estruturas de CONTENÇÃO com Solos Grampeados (Soil Nailing) com a Apresentação de um Estudo de Caso*. Trabalho Final de Curso, Feira de Santana, BA, Bahia: 2008.
- JAYAWICKRAMA, P. W.; TINKEY, Y.; GONG, J.; TURNER, J. *Non-Destructive Evaluation of Installed Soil Nails*. Report No. FHWA/TX 07-258. Texas: 2007.
- LAZARTE, C. A.; ROBINSON, H.; GÓMEZ, J. E.; BAXTER, A.; CADDEN, A.; BERG, R. *Soil Nail Walls Reference Manual*. Report No. FHWA-NHI-14-007. 2015.
- LEE, C. F.; ARUP, O. *Review of Use of Non-Destructive Testing in Quality Control in Soil Nailing Works*. GEO Report 219 Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2007.
- LEITE, C. M. *Técnicas de Aterramentos Elétricos*. 2ª Edição. Oficina de Mydia. São Paulo, 1996.
- MAMEDE FILHO, J. *Instalações Elétricas Industriais*. Editora LTC. 7ª Edição, 2007.

MEDEIROS JR., R. A.; LIMA, M. G. *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. Construction and Building Materials. Novembro, 2016.

MIKOS, A. P. *Caracterização geotécnica de campo experimental para avaliação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; ZIRLIS, A. C.; FERREIRA, J. F. C. Quanto tempo durarão as cortinas atirantadas executadas a partir da década de 70? 30 anos? XIII COBRAMSEG. 2006.

PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; ZIRLIS, A. C. Alguns detalhes da prática de execução de solo grampeado. In: *VI Conferência Brasileira de Encostas-COBRAE*. 2013.

ORTIGÃO, J. A. R., PALMEIRA, E. M., ZIRLIS, A. *Experience with soil nailing in Brazil: 1970-1994*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering. London: 1995.

SANTOS, G.A.F. *Soluções de Pregagem para a Estabilização de Taludes: uma Contribuição para o seu Dimensionamento*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa. 2014.

SIGA Jr, O; BASEI, M. A. S.; REIS NETO, J. M.; MARCHIAVELLI, A.; HARARA, O. M. O Complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico. *Boletim do Instituto de Geociências, Série Científica, USP*, v. 26, p. 69-98, 1995.

SOUZA, G. J. T.; PITTA, C. A.; ZIRLIS, A. C. *Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador*. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador: 2005.

SOUZA, K. T.; MOURA, R. F.; CINTRA, G. Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica. In: *II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*, 2007.