

Aplicação do Método Não Destrutivo *Time Domain Reflectometry* (TDR) em Solo Grampeado

Ana Paula Mikos

Engenheira Civil Geotécnica, UFPR, Curitiba, Brasil, anapaulamikos@hotmail.com

Vítor Pereira Faro

Engenheiro Civil, UFPR, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

RESUMO: Estruturas de reforço como solo grampeado consistem na inserção de barras de aço em perfurações no solo preenchidas com calda de cimento. Os grampos atuam como elementos passivos, onde as cargas são mobilização através de deformações, e com isso geram um reforço do maciço. Após instaladas, as barras ficam somente com uma extremidade da barra para fora do terreno, não sendo possível avaliar a integridade da injeção de calda de cimento e definir seu comprimento. A avaliação do comprimento das barras e da integridade da calda de cimento pode ser realizada com o método não destrutivo *Time Domain Reflectometry* (TDR), que consiste na emissão de uma onda eletromagnética e na avaliação do tempo de retorno e das reflexões. Para isso, é necessário que um cabo coaxial seja pré-instalado paralelamente a barra de aço. O objetivo do artigo é apresentar os resultados de ensaios que foram realizados em um campo experimental com barras de 6 m e 12 m, com e sem reinjeção. As barras foram instaladas com um cabo coaxial preso paralelo a elas e permitiu estimar o comprimento do grampo, que é igual ao do cabo. Não foi possível identificar reflexões que indiquem falhas significativas ao longo das barras.

PALAVRAS-CHAVE: TDR, Grampos, Integridade.

ABSTRACT: Retaining structures like soil nailing consist of inserting steel bars into boreholes on the ground filled with cement grout. The nails are passive elements, where loads are mobilized through deformations, thereby reinforcing the mass. Once installed, the bars have only one end out of the ground, that make impossible to assess the integrity of the cement grout injection and define its length. The evaluation of the length of the bars and the integrity of the cement grout can be performed with the non-destructive method *Time Domain Reflectometry* (TDR), which involves emitting an electromagnetic wave and evaluating the return time and reflections. It is necessary a coaxial cable pre-installed parallel to the steel bar. The paper aims to present the results of tests that were carried out in an experimental field with 6 m and 12 m bars, with and without re-injection. The bars were installed with a coaxial cable attached parallel to them, allowing the estimation of the length of the nail, which is equal to that of the cable. It was not possible to identify reflections indicating significant failures along the bars.

KEYWORDS: TDR, Nails, Integrity.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a primeira aplicação de solo grampeado foi durante a construção do sistema de abastecimento de água Cantareira em São Paulo. Posteriormente, a aplicação da técnica se estendeu para estabilização de taludes e escavações em solo, apresentando um bom custo-benefício quando comparado com os métodos convencionais, como muros de gravidade. Além da grande aplicação em rodovias, para estabilização de taludes naturais ou escavações, esse tipo de obra é bastante aplicado como solução de contenção permanente em áreas urbanas.

Um dos principais elementos das estruturas com solo grampeado são os chumbadores, que normalmente são de aço e inserido em perfurações no solo, e preenchidos com calda de cimento. Em alguns casos, podem ocorrer vazios ao longo do preenchimento que podem reduzir a capacidade de carga dos chumbadores. Uma maneira de avaliar a integridade do preenchimento é a aplicação de métodos não destrutivos, e entre eles se

destaca o método Time Domain Reflectometry (TDR). O TDR é aplicado em países como Hong Kong desde 2001 como medida preventiva para garantir a estabilidade das contenções (Cheung e Lo, 2011). O ensaio é rápido e fácil, e permite avaliar todas as barras da contenção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solo grampeado

Os grampos utilizados em solo grampeado são divididos por dois elementos principais, os chumbadores e o preenchimento. Os chumbadores são elementos semirrígidos, normalmente de aço, que tem a função de reforçar e estabilizar o maciço pela sua resistência à tração que é mobilizada pelo movimento lateral e deformação do solo. O chumbador é instalado em um furo no solo e preenchida com calda de cimento e é ligado ao paramento por meio de uma placa de apoio e rosca, ou somente dobrado (Lazarte et al., 2015).

Segundo Jayawickrama *et al.* (2007), os principais problemas encontrados em solo grampeado são falhas no preenchimento com calda de cimento ao longo da perfuração. As principais falhas são: vazios no final da barra, redução da seção transversal do preenchimento e falhas próximas à cabeça da barra. Falhas na calda de cimento podem causar maiores deformações da contenção, reduzir a capacidade de carga do chumbador e deixar a barra exposta e suscetível à corrosão.

De acordo com Souza *et al.* (2005), muitas obras antigas eram realizadas somente com bainha e com isso as barras apresentavam vazios devido a retração da calda de cimento. A norma da ABNT NBR 16920-2 de 2021, que aborda a execução de solo grampeado, recomenda a execução de reinjeção após a cura do primeiro preenchimento com calda de cimento, denominado “bainha”, com objetivo de reduzir os vazios formados ao longo dos chumbadores (ABNT, 2021). A reinjeção com uma ou duas fases pode aumentar em mais de 50% a resistência ao arrancamento do grampo. A injeção de primeira e segunda fase preenchem eventuais vazios que ocorrem pela exsudação da calda de cimento, contribuindo para o tratamento ao redor do grampo e melhorando as características do maciço (Souza *et al.*, 2005).

2.2 Time Domain Reflectometry

Os métodos não destrutivos permitem avaliar todas os grampos de uma contenção, com a aplicação de técnicas elétricas, acústicas, ultrassônicas, magnéticas, reflectométricas, entre outras. Essas metodologias não interferem na capacidade de carga dos elementos, como nos ensaios de arrancamento, além de possibilitarem a sua aplicação tanto após a execução, como ao longo da vida útil das obras. Dentre os métodos mais aplicados em solo grampeado, o Time Domain Reflectometry foi o que apresentou maior potencial de utilização em estruturas de contenção (Lee e Oap, 2007).

O método TDR consiste na aplicação de uma onda eletromagnética na barra de aço e no cabo coaxial ou fio elétrico, e avaliar o tempo de retorno e os reflexos gerados. O cabo coaxial ou fio elétrico deve ser instalado paralelamente à barra junto com o preenchimento da calda de cimento. A utilização do cabo ou de um fio elétrico tem objetivo de criar um retorno de corrente por um caminho conhecido, melhorando a precisão da técnica (Cheung, 2003).

Chung *et al.* (2015; 2016) e Ng *et al.* (2019) utilizaram um cabo coaxial no lugar do fio elétrico, paralelo a barra, com o propósito de também determinar o tamanho da barra, além da integridade da calda de cimento. É possível realizar o ensaio somente no cabo coaxial, e como a velocidade é fornecida pelo fabricante, a definição do comprimento do cabo (que é igual ao comprimento da barra) é facilitado. Em relação aos resultados obtidos com ensaios TDR, um exemplo é apresentado na Figura 1, onde é gerado um gráfico ao longo do tempo, em que as reflexões podem indicar eventuais falhas no preenchimento da calda de cimento e o final da barra.

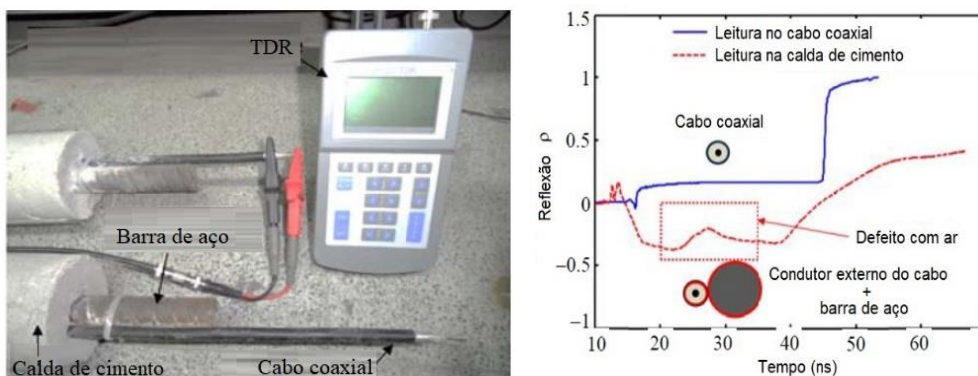


Figura 1. Ensaio TDR com cabo coaxial (Adaptado de Chung *et al.*, 2015).

Tang e Yeung (2006) explicam que a impedância característica da calda de cimento é menor que a do ar, por isso a reflexão do sinal é positiva devido à maior facilidade da passagem de corrente elétrica neste trecho da barra. No entanto, se o vazio for preenchido com solo, cuja impedância é menor que a do cimento, a reflexão será negativa pela maior dificuldade da passagem da corrente.

A velocidade de propagação pode ser determinada pela Equação (1).

$$V_p = \frac{V_c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

Onde:

V_p = Velocidade de propagação do pulso elétrico (m/s)

V_c = Velocidade da luz no vácuo (m/s)

ϵ = Constante dielétrica relativa do material (adimensional)

A velocidade da luz no vácuo é em torno de 3×10^8 m/s (299.792.458 m/s) e a constante dielétrica indica a redução de velocidade da onda eletromagnética quando se propaga pelo material. O valor dessa constante é aproximadamente 1 para o ar, de 3 a 5 para o solo, 10 para a calda de cimento e 80 para a água (Cheung, 2003).

Com a obtenção da velocidade de propagação é possível determinar a distância da cabeça do grampo até a anomalia, ou o fim da barra, a partir da Equação (2).

$$L = \frac{V_p \times t}{2} \quad (2)$$

Onde:

L = Distância da cabeça do ponto até a anomalia ou fim da barra (m)

V_p = Velocidade de propagação do pulso elétrico (m/s)

t = Tempo de propagação do pulso (s)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Campo Experimental

A contenção experimental é localizada na cidade de São José dos Pinhais, bairro Del Rey, no km 617+400 m da BR 376/PR, pista norte. No local, foi realizada a execução de solo grampeado para avaliação de diferentes métodos não destrutivos. A caracterização geológico-geotécnica foi realizada com sondagens SPT, ensaios de caracterização geotécnica e ensaios de resistividade elétrica. Mikos (2017) identificou um solo bastante heterogêneo, característico do complexo Gnáissico-Migmatítico, com nível d'água inexistente no local da contenção.

Neste artigo, é apresentado o resultado do ensaio TDR realizado em 12 grampos com 25 mm de diâmetro, sendo 6 grampos com 6 m de comprimento, e 6 grampos com 12 m de comprimento. Dentre os 6 grampos de cada comprimento, metade foi realizada somente com a bainha, e a outra metade foi realizada uma etapa de reinjeção, conforme apresenta a Tabela 1. Todas as barras foram instaladas com um cabo coaxial pré-instalado paralelamente às barras.

Tabela 1. Variações dos Grampos

Grupo	Comprimento	Descrição
G1	12 m	Grupo sem reinjeção
G2	12 m	Grupo com reinjeção
G3	6 m	Grupo sem reinjeção
G4	6 m	Grupo com reinjeção

3.2 Ensaios TDR

Os ensaios TDR foram com o TRD-200 da marca Campbell Scientific, com a conexão do equipamento à um notebook através de um cabo USB (para alimentação e transferência de dados), com os pulsos são gerados e obtenção dos gráficos com o software PC-TDR.

Inicialmente foram realizados ensaios em laboratório com barras de aço de 2 m utilizadas na obra do campo experimental, com um cabo coaxial paralelo (Figura 2a). Estes ensaios foram utilizados para calibração da velocidade de propagação do pulso no ar.

Os ensaios executados nos grampos do campo experimental (Figura 2b) foram inicialmente medições no cabo coaxial e posteriormente nas barras. Foi utilizado um cabo coaxial com o fio interno soldado em um terminal de engate rápido para conexão com o cabo coaxial pré-instalado na barra. Para o fio externo do cabo coaxial que fica em contato com a barra, foi utilizado um prendedor para auxílio no ensaio (Figura 2c).

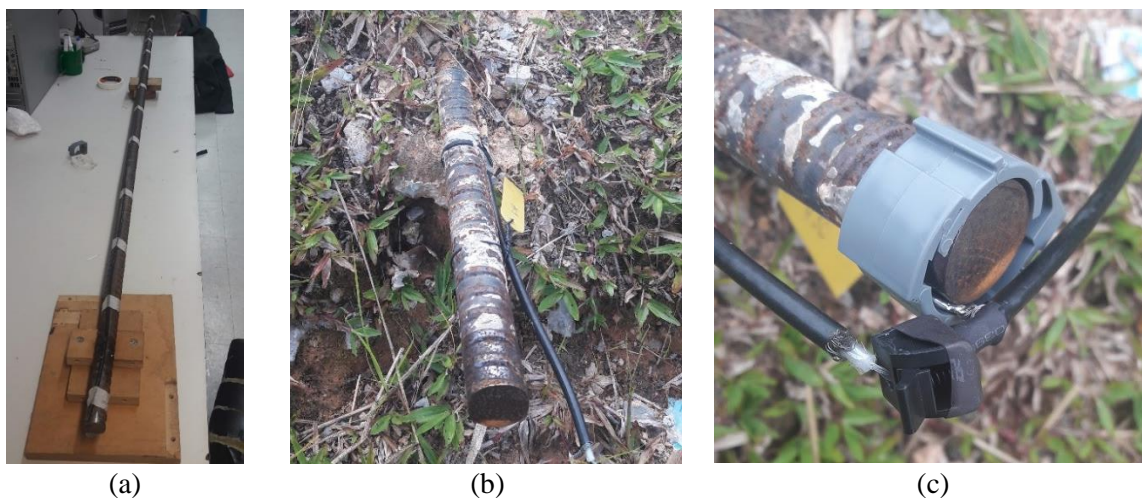


Figura 2. Ensaio TDR nos grampos com o cabo coaxial (Mikos, 2022).

Legenda: (a) Ensaios em laboratório. (b) Grupo com cabo coaxial paralelo. (c) Engate rápido para ensaio nas barras.

3.3 Cálculos do Comprimento e Estimativa da Velocidade de Propagação

A estimativa da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento foi utilizada a Equação (3), que leva em consideração os comprimentos da barra em contato com o ar e com a calda, e a velocidade de propagação da barra a ar.

$$V_{calda} = \frac{L_{calda}}{(t_{total} - \frac{L_{ar}}{V_{ar}})} \quad (3)$$

Onde:

V_{calda} = Velocidade de propagação do pulso na calda de cimento (m/s)

V_{ar} = Velocidade de propagação do pulso no ar (m/s)

L_{calda} = Comprimento da barra em contato com a calda de cimento (m)

L_{ar} = Comprimento da barra em contato com o ar (m)

t_{total} = Tempo total de reflexão do pulso, obtido no ensaio (s)

Cabe salientar que a velocidade de propagação do pulso no ar utilizada na Equação (3) foi obtida em ensaios de laboratório com barras expostas ao ar com um cabo coaxial paralelo a barra, conforme apresentado no item 3.2.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios nos cabos coaxiais

A Figura 3 apresenta os gráficos obtidos para os cabos coaxiais instalados nos grampos de 6 m e 12 m, também foram realizados ensaios em cabos de 18 m para avaliar se as o comprimento era proporcional ao tempo medido. A velocidade de propagação do pulso foi calculada com base no comprimento conhecido do cabo e no tempo de reflexão de início e fim. O início foi coincidente com o reflexo negativo do curto-circuito do cabo auxiliar e o fim foi indicado com a mudança de direção da reta.

A velocidade de propagação do cabo determinada foi de 0,66 vezes a velocidade da luz no vácuo ($\approx 2,0 \times 10^8$ m/s). O valor foi correspondente com a velocidade fornecida pelo fabricante do cabo coaxial RG-58 (RFS). Além disso, observa-se um pico na reflexão inicial, que indica a mudança de cabos na passagem do pulso elétrico, entre o cabo do equipamento e o cabo pré-instalado na barra. Percebe-se que o tempo de propagação do pulso elétrico é proporcional ao comprimento do cabo.

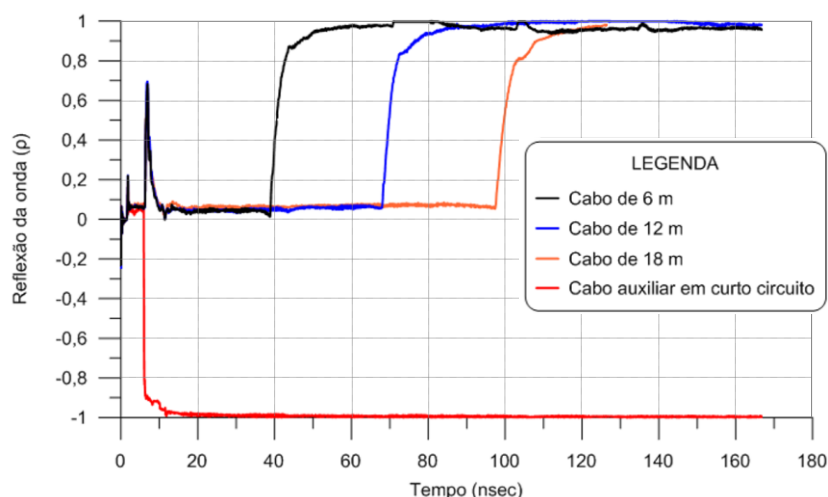


Figura 3. Ensaio TDR nos cabos coaxiais (Mikos, 2022).

4.2 Ensaios nos grampos

Os ensaios com o TDR foram realizados com a geração do contato entre o fio externo do cabo coaxial e a barra avaliada. Os primeiros elementos a serem ensaiados foram os grampos íntegros de 6 m e 12 m. Os grampos G1, G2, G3 e G4 foram executados como elementos de referência para calibração da velocidade de propagação do pulso elétrico na barra em contato com a calda de cimento. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 0.1, onde o símbolo “↑” indica o tempo inicial e o símbolo “↓” representa o tempo final de propagação do pulso na barra.

O comportamento das curvas apresenta reflexões do final da barra menos acentuadas quando comparada com os ensaios com os cabos coaxiais (Figura 3), pois o sinal não se propagou por um meio ideal e isolado como o cabo, e sim na barra de aço envolta por calda de cimento.

Com base nos resultados foi possível observar que os grampos de mesmo comprimento apresentaram comportamento gráfico similar, o que indica que a velocidade de propagação foi semelhante. A reflexão da onda nas barras com comprimento de 6 m ocorre em um tempo menor do que na de 12 m, o que caracteriza os diferentes comprimentos instalados.

Figura 0.1 – Resultados do método TDR nos grampos íntegros

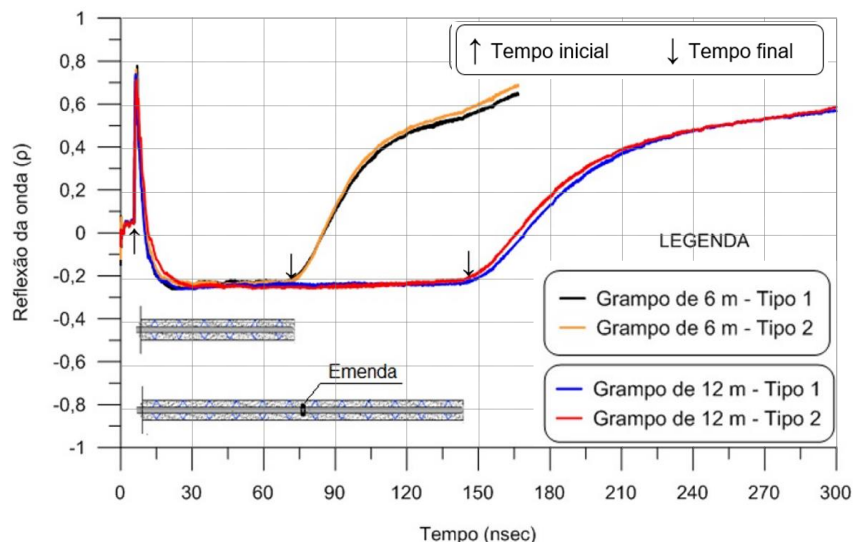


Figura 4. Ensaio TDR nos grampos de 6 m e 12 m (Mikos, 2022).

A Figura 5 apresenta os gráficos das barras de 6 m e 12 m, com e sem reinjeção.

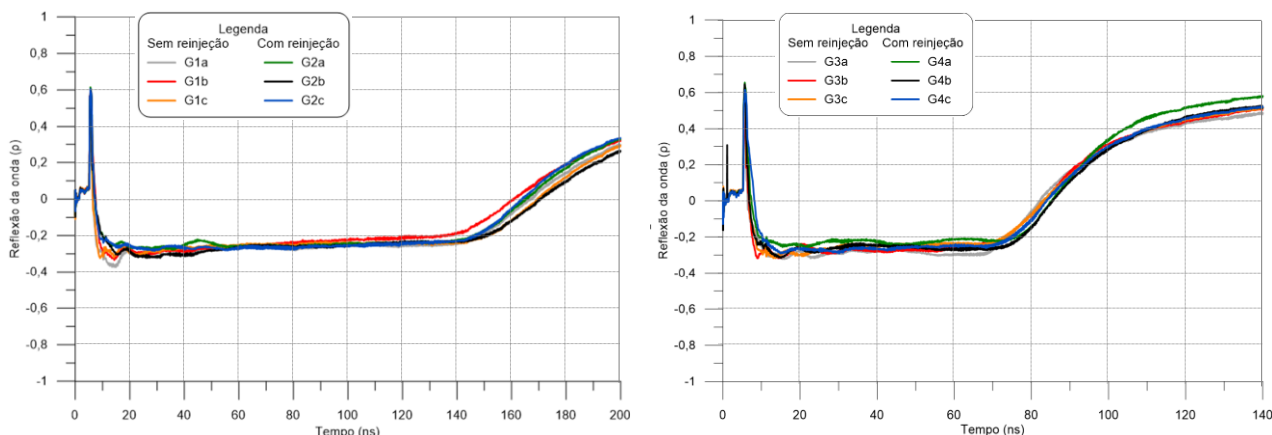


Figura 5. Ensaio TDR nos grampos de 6 m e 12 m (Mikos, 2022).

As barras de 12 m apresentam uma emenda no meio da barra (elementos G1 e G2), e não foi possível identificar alterações gráficas nos resultados, indicando que a emenda não influencia os resultados. É possível perceber que o grampo G1b teve um tempo de propagação inferior quando comparado aos demais, o que resultou em uma velocidade maior que a média dos grampos G1a e G1c. Da mesma maneira, o grampo G1c apresentou o maior tempo entre as três variações. A barra G2a apresentou uma reflexão positiva próxima aos 2 m iniciais (início aos 40 ns), que pode estar associada a uma falha com ar na calda de cimento.

De modo geral, os grampos de 6 m sem reinjeção (G3) apresentaram um tempo de propagação um pouco inferior aos grampos com a fase de reinjeção (G4), o que pode indicar presença de ar ao longo do preenchimento devido à maior velocidade obtida. Como a velocidade de propagação no ar é maior que na calda de cimento, se a velocidade média de uma barra é superior à velocidade das demais, isto pode indicar a presença de ar ao longo da barra.

4.3 Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento

A Tabela 1 apresenta o comparativo entre as velocidades de propagação obtidas nos grampos de 6 m e 12 m, com e sem reinjeção.

Tabela 1. Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento dos grampos (Mikos, 2022).

Grampo	Varição	L_{ar} (m)	L_{calda} (m)	Tempo total (ns)	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia $V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$
G1a	Grampos de 12 m sem reinjeção	0,18	11,82	140,25	$8,47 \times 10^7$	0,283	0,281
G1b		0,21	11,79	137,67	$8,62 \times 10^7$	0,287	
G1c		0,19	11,81	144,73	$8,20 \times 10^7$	0,274	
G2a	Grampos de 12 m com reinjeção	0,24	11,76	141,22	$8,39 \times 10^7$	0,280	0,276
G2b		0,27	11,73	145,95	$8,10 \times 10^7$	0,270	
G2c		0,24	11,77	141,83	$8,35 \times 10^7$	0,279	
G3a	Grampos de 6 m sem reinjeção	0,24	5,76	64,97	$9,00 \times 10^7$	0,300	0,290
G3b		0,27	5,73	68,90	$8,45 \times 10^7$	0,282	
G3c		0,29	5,72	67,35	$8,63 \times 10^7$	0,288	
G4a	Grampos de 6 m com reinjeção	0,25	5,75	71,55	$8,16 \times 10^7$	0,272	0,281
G4b		0,27	5,73	69,73	$8,35 \times 10^7$	0,279	
G4c		0,22	5,78	66,68	$8,79 \times 10^7$	0,293	

\u00c9 poss\u00edvel observar que para ambos os comprimentos das barras, a velocidade de propaga\u00e7\u00e3o nas barras sem reinje\u00e7\u00e3o \u00e9 ligeiramente maior que nas barras com reinje\u00e7\u00e3o. Esta varia\u00e7\u00e3o pode indicar a maior presen\u00e7a de ar nas barras sem reinje\u00e7\u00e3o, resultando em uma velocidade maior, uma vez que a velocidade de propaga\u00e7\u00e3o no ar \u00e9 maior que na calda de cimento. No entanto, n\u00e3o foi observada nenhuma reflex\u00e3o significativa nos gr\u00e1ficos, que possa indicar a presen\u00e7a de um v\u00e1z\u00edo com ar. De modo geral, as velocidades para as barras de 6 m e 12 m foram pr\u00f3ximas, sendo que nas barras mais longas a velocidade foi um pouco inferior \u00e0s barras mais curtas, podendo indicar uma perda de velocidade devido ao comprimento.

5 CONCLUS\u00d5ES

Os ensaios com o m\u00e9todo n\u00e3o destrutivo TDR em grampos permitiram a avalia\u00e7\u00e3o do comprimento das barras de a\u00e7o, que \u00e9 coincidente com o comprimento dos cabos coaxiais. Tamb\u00e9m foi poss\u00edvel avaliar a integridade das barras atrav\u00e9s da an\u00e1lise gr\u00e1fica. A velocidade de propaga\u00e7\u00e3o nas barras sem reinje\u00e7\u00e3o foi maior que dos grampos com reinje\u00e7\u00e3o, indicando que pode haver presen\u00e7a de pequenas falhas e/ou ar ao longo das barras, que afetou as velocidades. Pela an\u00e1lise gr\u00e1fica n\u00e3o foi poss\u00edvel identificar reflex\u00f5es que podem indicar a presen\u00e7a de falhas significativas nos grampos avaliados. O m\u00e9todo se apresentou promissor para aplica\u00e7\u00e3o em obras novas, devido a necessidade de instala\u00e7\u00e3o do cabo coaxial pr\u00e9-instalado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem \u00e0 concession\u00e1ria Autopista Litoral Sul e ao Grupo Arteris pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa e pelo apoio financeiro. Ao Programa de P\u00f3s-Gradua\u00e7\u00e3o em Engenharia Civil (PPGEC), e \u00e0 Funda\u00e7\u00e3o Arauc\u00e1ria pelo aux\u00edlio financeiro.

REFER\u00caNCIAS BIBLIOGR\u00c1FICAS

Associa\u00e7\u00e3o Brasileira de Normas T\u00e9cnicas. (2021). NBR 16920-2. *Muros e taludes em solos refor\u00e7ados. Parte 2: Solos grampeados*. Rio de Janeiro.

- Cheung, W. M. (2003). Non-destructive tests for determining the lengths of installed steel soil nails. Geo Report 133. Geotechnical engineering office. Civil engineering department. Hong Kong.
- Cheung, W. M. Lo, D. O. K. (2011). Use of time-domain reflectometry for quality control of soil-nailing works. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Hong Kong.
- Chung, C. C., Lin, C. P., Wang, K., Lin, C. S., Ngui, Y. J. (2015). Improved TDR Method for Quality Control of Soil-Nailing Works. Technical Note. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Chung, C. C., Lin, C. P., Ngui, Y. J., Wang, K., Lin, C. H. (2016). Laboratory Evaluation of Soil-Nailing Quality Inspection by an Improved TDR Method. Journal of GeoEngineering.
- Jayawickrama, P. W.; Tinkey, Y.; Gong, J.; Turner, J. (2007). Non-Destructive Evaluation of Installed Soil Nails. Report No. FHWA/TX 07-258 p. Texas, EUA.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual (No. FHWA-NHI-14-007).
- Lee, C. F. Oap O. (2007). 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.
- Mikos, A. P. (2017). Caracterização geotécnica de campo experimental para avaliação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Mikos, A. P. (2022). Aplicação de Métodos Não Destrutivos para Avaliação da Integridade de Solo Grampeado e Cortina Atirantada. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Ng, W. K.; Ashaari, Y.; Norshazrul, M. Y. (2019). High resolution time domain reflectometry and coaxial cable for soil nail monitoring. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing.
- Souza, G. J. T.; Pitta, C. A.; Zirlis, A. C. (2005). Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador.
- Tang, T., Yeung, A.T. (2006). Full-Scale Field Testing of Surface Waves – TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles, Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA.