

Aplicação da Técnica de Inclínometria para Medições de Deslocamentos Horizontais em Cortina de Estacas Atirantada

Alex Micael Dantas de Sousa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, alexmichael@hotmail.com

Yuri Daniel Jatobá da Costa

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

Luiz Augusto da Silva Florêncio

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, luiz.engh@gmail.com

RESUMO: O estudo trata da aplicação de técnica de inclínometria para medição de deslocamentos horizontais em um cortina de estacas espaçadas, atirantada em areia. Foram empregados na pesquisa tubos inclinômetros plásticos e de alumínio, sobre os quais incorreram diferentes procedimentos de instalação no canteiro de obras de acordo com as limitações dos materiais. Procedeu-se a uma avaliação dos erros inerentes às leituras dos deslocamentos. Os resultados obtidos mostram que a margem de erro das medidas com tubos de alumínio são maiores que as verificadas nos tubos plásticos, sendo da ordem de 0,4 mm no topo das estacas.

PALAVRAS-CHAVE: CONTENÇÃO, Inclínometria, Estacas.

1 INTRODUÇÃO

A inclínometria consagra-se na prática de medições de deslocamentos horizontais através de medições precisas subsuperficiais de deformações do solo que resultam em variação da inclinação de um tubo inserido em furos de sondagem (Wilson e Mikkelsen, 1978).

O sistema é composto por quatro componentes principais, sendo eles o tubo guia instalado permanentemente no furo, um torpedo portátil contendo um transdutor sensível à vertical, uma unidade de leitura portátil e um cabo elétrico graduado que conecta o torpedo à unidade de leitura (Pinheiro, 2000).

O método de medidas de deslocamentos horizontais através de inclínometria já está consolidado no meio científico e em campo quando tratam-se de obras rodoviárias (Machan e Bennett, 2008), principalmente em trechos de aterros (Cardoso *et al.*, 2010), pois que a sobrecarga gerada pela presença de aterros pode

provocar grandes deformações nos solos adjacentes. Em barragens, a instrumentação com inclinômetros se expande um pouco, sendo recorrente o seu uso para aferição de deslocamentos através de tubos instalados na horizontal, mas contendo ainda atenção especial para os deslocamentos horizontais (Fonseca, 2003).

Alguns trabalhos obtiveram destaque na literatura internacional quando trata-se da medição de deslocamentos horizontais, como o de St John *et al.* (1992) referente a avaliação de deslocamentos em solos argilosos de Londres, e o de Moormann (2004), no qual estudaram-se cerca de 530 casos de deslocamentos horizontais em contenções devido à escavações na frente das mesmas. No Brasil, entretanto, são poucos os registros de obras instrumentadas em termos de deslocamentos horizontais. Podem-se citar os trabalhos de Correia *et al.* (1996), Oliveira *et al.* (2009), Santos (2013) e Oliveira *et al.* (2014) como referências nacionais em termos de instrumentação

geotécnica por inclinometria, sendo o primeiro responsável por contribuir ainda com simulações numéricas para comparação com os resultados obtidos em campo.

Muito pouco se sabe sobre o comportamento dessas estruturas com relação aos deslocamentos durante as fases construtivas e após a conclusão da obra. Entretanto, faz-se necessário a maior difusão dos métodos empregados na execução da inclinometria, bem como estudos acerca da distribuição de erros inerentes ao ensaio levando-se em consideração aspectos como operador, materiais e métodos empregados. Rocha e Costa (2013) analisaram a interferência da rotação dos tubos inclinômetros nos resultados através do tratamento dos dados obtidos pelo Spiral Sensor. Este tipo de pesquisa reforça a necessidade de estudos mais detalhados sobre os resultados obtidos de ensaios de inclinometria.

Nesta vertente, apresenta-se neste trabalho uma contribuição no que concerne à instrumentação por inclinometria através da explanação de experiências adquiridas com a instalação e leitura de deslocamentos horizontais em diferentes tubos guia.

Foram utilizados na pesquisa dois materiais distintos para os tubos, um de PVC especial e outro de alumínio, obedecendo os mesmos princípios de ranhuras internas pelas quais a sonda (inclinômetro), percorre toda a profundidade, acumulando deflexões e criando uma curva de dados acumulativos de deslocamentos horizontais, fornecendo a posição em relação a uma referência fixa na base das medições.

2 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO

As estacas utilizadas na estrutura de contenção são do tipo escavadas à seco, em trado mecanizado de 300 mm de diâmetro, e foram executadas até uma profundidade de 15,5 m de comprimento sem auxílio de fluido estabilizante, com espaçamento de 40 cm entre eixos. O paramento de estacas contém uma viga de coroamento com dimensões 0,40 x 0,65 cm acima destas. O concreto utilizado nas estacas

foi de 25 MPa e 220 mm de abatimento no ensaio de consistência.

A armadura longitudinal das estacas se estende por um comprimento de 12 m a partir do topo, possuindo 11 barras de 10 mm igualmente espaçadas. A armadura transversal consiste de estribos de 5 mm de diâmetro com distribuição helicoidal ao longo da estaca e espaçamento médio de 10 cm. A Figura 1 apresenta a vista frontal do trecho analisado, enquanto que a Figura 2 apresenta a vista lateral do trecho da contenção estudado, com detalhe para a posição das linhas de tirantes e lajes de escoramento.

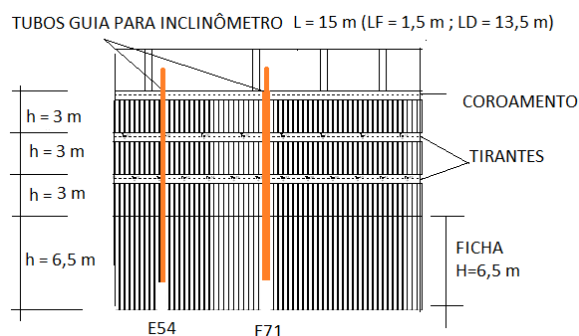


Figura 1. Esquema da Estrutura de Contenção Estudada

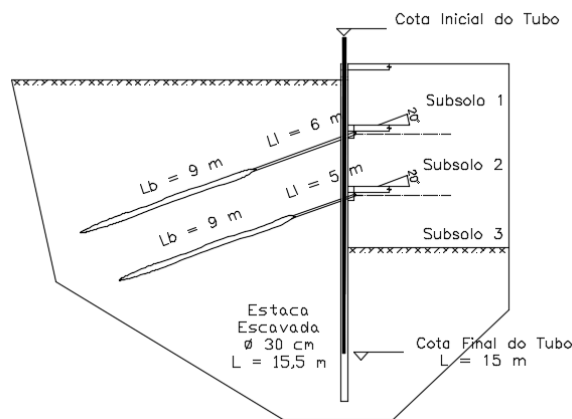


Figura 2. Seção da Cortina Instrumentada.

3 INCLINOMETRIA

3.1 Instalação dos tubos para inclinômetros

A avaliação de deslocamentos horizontais foi realizada através de tubos para inclinômetro instalados no interior de duas estacas da cortina.

As estacas escolhidas foram as de número 54 e 71 do paramento (Figura 1). Estas estacas foram escolhidas uma vez que estavam dispostas nos pontos mais centrais da cortina, onde se espera na contenção que os deslocamentos sejam maiores, visto que é menor neste local a influência de efeito de canto.

A estaca 54 recebeu um tubo guia de PVC. O tubo foi instalado juntamente com a armadura da estaca içada logo depois de finalizado o furo.

A possibilidade de içar a armadura com o tubo já instalado foi avaliada, no entanto foi descartada em virtude das grandes deformações da armadura quando levantada, o que poderia resultar na danificação e consequente perda do tubo. Além do que, o tubo era de comprimento maior que a armadura, podendo romper na região livre quando do içamento.



Figura 3. Instalação do Tubo Guia na Armadura.

A possibilidade de inserir o tubo no interior da armadura com esta já instalada no furo foi avaliada, mas exigia que o tubo passasse por diversos espaçadores ao longo da estaca para evitar perda de retineidade, seja durante a colocação, seja devido ao posterior impacto do concreto nas laterais do tubo, que poderia deslocá-lo. Como o tubo era longo, seria muito difícil passá-lo por todos os espaçadores, que deveriam estar perfeitamente alinhados para evitar a interrupção da instalação. Assim, esta hipótese também foi descartada.

Optou-se então por içar a armadura e inserir o tubo pela parte de baixo desta, fazendo-o passar pelos espaçadores distribuídos ao longo da armadura. Como espaçadores foram utilizadas barras de 5 mm ficadas na armadura em formato triangular a cada 2 m. Os

segmentos do tubo eram soldados à frio através de adesivo específico (cola para tubos).

Como o tubo inclinômetro apresenta ranhuras internas que devem estar perfeitamente alinhadas para que a sonda percorra seu interior, se fez necessário muita atenção no emprego de adesivo para colagem dos tubos, uma vez que só existe uma posição de encaixe correto para os tubos.

No trecho final do tubo foi inserido um cap reforçado, soldado, para garantir a integridade da ponta e impedir a entrada de material e água no tubo. Os trechos de tubo de 1,5 m foram sendo inseridos por baixo da armadura até completar os 12 m, uma vez que o tubo tinha de ser amarrado na parte inferior já com os 2 m livre em relação à armadura.

Após posicionado o tubo guia no interior da armadura e feita sua fixação com arame recozido nº 18 nos espaçadores pré-instalados, a armadura foi inserida no furo. Os últimos 3 m do tubo foram instalados posteriormente desde a superfície, atentando-se para que as ranhuras horizontais do tubo coincidisse o máximo possível com os eixos principais da cortina. A Figura 3 mostra o tubo guia fixado à armadura.

Uma melhoria que pode ser adotada nesse sistema, não adotada no presente trabalho em virtude de dificuldades in loco, é de instalar na ponta dos tubos cones que funcionem como guia durante a inserção destes ao longo da armadura, possibilitando talvez a instalação do tubo no interior da armadura com esta disposta em seu furo.

Como o tubo de alumínio não poderia ser soldado como o tubo de PVC, foi procedido a sua instalação após inserção da armadura no furo. Para garantir o alinhamento do tubo foram colocados suportes dentro da armadura, no formato retangular, com pequena folga além do diâmetro do furo. Estes suportes se assemelham aos utilizados na instalação do tubo de PVC.

A estaca nº 71 recebeu um tubo de alumínio. O mesmo foi fornecido em segmentos de 3m, com luvas de 30 cm e diâmetro interno 75 mm (3"). O alinhamento das ranhuras no tubo se dava pelo encaixe das ranhuras externas do tubo nas ranhuras internas da luva.

Durante a preparação dos tubos para encaixe, as superfícies foram lixadas com lixa

Nº 100 até que as mesmas perdessem o brilho característico, indicando aumento da rugosidade superficial. Após esta etapa, foram feitos dois furos em cada ponta das luvas e dos tubos.

Para a conexão dos tubos, primeiramente foi colocado adesivo epóxi de alta aderência SIKA (o mesmo utilizado para colagem de barras de aço e aderência de peças de aço no concreto) nas superfícies externas dos tubos e internas da luva, e após isto foi passado arame recozido Nº 18 nos furos feitos para fixar os tubos às luvas. O arame serviu como um reforço da ligação.

Na ponta inferior do tubo foi colocado um CAP de PVC para garantir que não entrasse material e água no tubo. Foi utilizada a mesma resina anteriormente mencionada.

Para inserção no furo, o tubo foi erguido em dois pontos ao longo do seu comprimento, com vistas a garantir que não apresentasse ruptura nas ligações. Após a inserção, o tubo ficou cerca de 1,5 m acima da superfície do terreno antes da escavação.

Ao fim da inserção do tubo, cuidado especial foi tomado para garantir o alinhamento do tubo com as direções principais do paramento de estacas, antes e durante a concretagem. O concreto utilizada nesta estaca possui brita cascalho como agregado graúdo e índice de consistência no ensaio de abatimento do tronco de cone no valor de $200 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. Estas características são importantes para evitar o acúmulo de material nas zonas de amarração do tubo na armadura, o que pode ocasionar na perda do tubo pelo rompimento dos fixadores do tubo na armadura.

3.2 Procedimento dos ensaios

Para medição do perfil vertical das estacas foi utilizado um inclinômetro, modelo 6000 M, fabricado pela GEOKON, com resolução de 0,025 mm a cada 0,50 m. Os dados obtidos pelo inclinômetro são transferidos do carretel do cabo para um computador portátil, utilizado em campo, através da tecnologia *bluetooth*. Os dados armazenados no computador de campo foram lidos no programa GTILT PLUS 32, permitindo-se conhecer os deslocamentos medidos em campo.

Os tubos guia, independente do material, possuem quatro ranhuras ou sulcos ortogonais para encaixe das rodas da sonda de inclinômetro durante as medições e definição das direções principais do levantamento.

Estes sulcos correspondem às direções principais (A+, A-, B+ e B-) para as quais se deseja aferir os deslocamentos. A sonda do inclinômetro possui dois conjuntos de rodas separados por uma distância de 0,50 m, que representam o intervalo entre os quais são feitas as medidas ao longo da profundidade.

O ensaio inicia-se alinhando a direção A+ do inclinômetro com a referente a ranhura ortogonal a cortina e na direção dos deslocamentos principais. A sonda é abaixada até a final do tubo inclinômetro, a partir do qual são coletadas leituras de inclinação e subindo-se o inclinômetro a cada 0,50 m, sendo repetido o procedimento até chegar-se à superfície, na qual o torpedo é girado de 180° e repetido o procedimento de coleta das leituras para obter-se as medições em relação à direção A-. Este procedimento é importante para eliminar erros decorrentes de desaprumos residuais do acelerômetro. Ao mesmo tempo que são coletadas as leituras de inclinação em relação a direção A também são coletados os dados em relação à direção B.

Os tubos utilizados, já descritos anteriormente, possuíam 75 mm de diâmetro externo, sendo fornecidos em comprimentos de 1,5 m para o tubo plástico e 3 m para o tubo metálico. Ambos os tubos possuíam tampas de vedação inferior e superior específicas. Os tubos plásticos eram unidos por encaixe e colados com adesivo específico. Os tubos metálicos foram unidos por luvas específicas e colados com resina epóxi de alta resistência.

4 AVALIAÇÃO DE ERROS NA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS

O método de deslocamentos acumulados (CD) é o mais comumente usado tipo de plotagem para medir e localizar deslocamentos horizontais que ocorreram desde um conjunto inicial de leituras. Acredita-se que este seja o mais usual tipo de

plotagem, embora seja sensível a pequenos erros, inevitáveis ao longo do tempo em sistemas de medidas. Em particular, esta apresentação se torna sensível para precisar alinhamentos do acelerômetro se o tubo guia tem um significativo desvio da vertical. Para gráficos CD, o desvio gradual da linha central é usualmente considerado menos significante que os desvios que ocorrem ao longo de um conjunto de medidas.

Outra apresentação amplamente utilizado é o método de deslocamento incremental (ID), que mostra o deslocamento sobre cada comprimento da sonda durante um período desde a leitura inicial. Isso equivale ao primeiro diferencial da trama CD com respeito à profundidade. Esta apresentação tem a vantagem de ser relativamente insensível a problemas de instrumentos e de operador, uma vez que os erros não são acumulados nas medidas. Parte da sua utilidade é que ela tende a realçar as posições em que as leituras correspondem a deslocamentos reais. No entanto, o verdadeiro magnitude do deslocamento é melhor apreciada com o método de deslocamentos acumulados (CD).

O método de apresentação através da Posição Absoluta (AP) mostra a atual forma do tubo guia. A forma do gráfico é determinada principalmente por como o furo foi executado. Geralmente não é utilizado para coletar deslocamentos mas pode auxiliar na identificação de erros que foram agravados pela significativa não verticalidade do tubo guia. Raramente gráficos (AP) são apresentados como parte de um relatório normal de resultados de inclinometria.

De acordo com a Figura 4 observa-se que o método de obtenção dos deslocamento horizontais pouco influi na distribuição de erros de medidas, uma vez que as curvas representativas dos três métodos se sobrepõem no gráfico. O mesmo comportamento foi identificado para diferentes materiais e operadores.

O comportamento observado foi compatível com o esperado, uma vez que os resultados finais não devem sofrer influência da método de análise. Entretanto, cabe destacar a maior facilidade de tratamento dos dados através do

método CD, não excluindo a necessidade de análise por outros métodos, como o AP, com vistas à analisar outros aspectos como a retilineidade do tubo guia anterior à medição dos deslocamentos horizontais da cortina instrumentada.

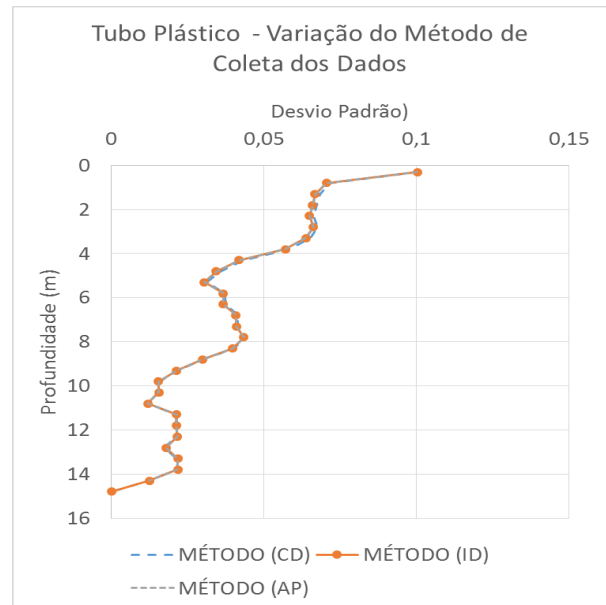


Figura 4. Influência do Método de Obtenção de Deslocamentos Horizontais.

Sobre a acurácia das medições, pode-se afirmar através da Figura 5 que o tubo de PVC apresenta menor desvio padrão global nas medições quando comparado ao de alumínio (TA), sendo o máximo medido no tubo de PVC da ordem de 0,10mm, enquanto que o desvio padrão máximo no tubo de alumínio atingiu valor de 0,42 mm, valores estes bem maiores que a resolução do equipamento, 0,025 mm, indicando que erros inerentes aos materiais tendem a ser maiores que os inerentes ao equipamento, e sempre máximos no topo, uma vez que são erros acumulados durante as medições a cada 50 cm.

Entretanto, vale ressaltar que este comportamento foi identificado em uma das fases de estudo da cortina instrumentada, sendo necessários mais estudos de caso para avaliar a interferência do tipo de material nas medidas.

Neste estudo observou-se que durante as medições no tubo de alumínio, as leituras de deslocamento horizontal necessitavam de um tempo de estabilização maior.

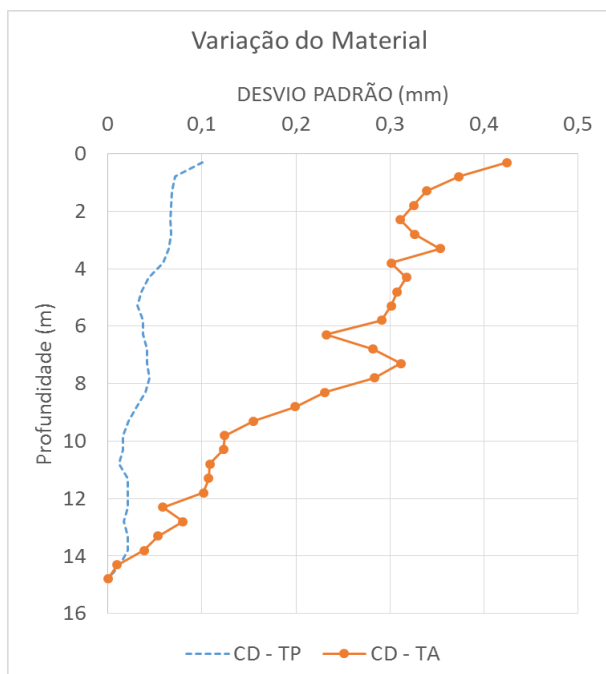


Figura 5. Influência do Material do Tubo Guia.

De acordo com a Figura 6, pode-se observar que diferentes operadores podem influenciar significativamente nos resultados de deslocamentos horizontais, sendo a provável causa desta diferença causada pela velocidade de ensaio, na qual o tempo de estabilização das medidas pode ser negligenciado e ocasionar tais diferenças. O mesmo comportamento se observou para diferentes tubos guia.

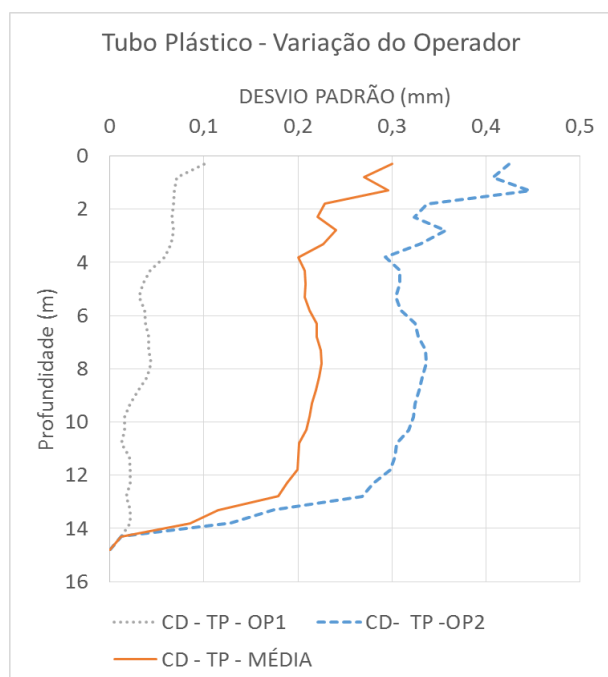


Figura 6. Influência da velocidade de ensaio (operador)

A Figura 7 apresenta o resultado da variação do erro nas medidas de deslocamento em virtude do desaprumo vertical do tubo guia, sendo maior na direção de maior desaprumo. O mesmo comportamento se verificou para os diferentes tubos guia.

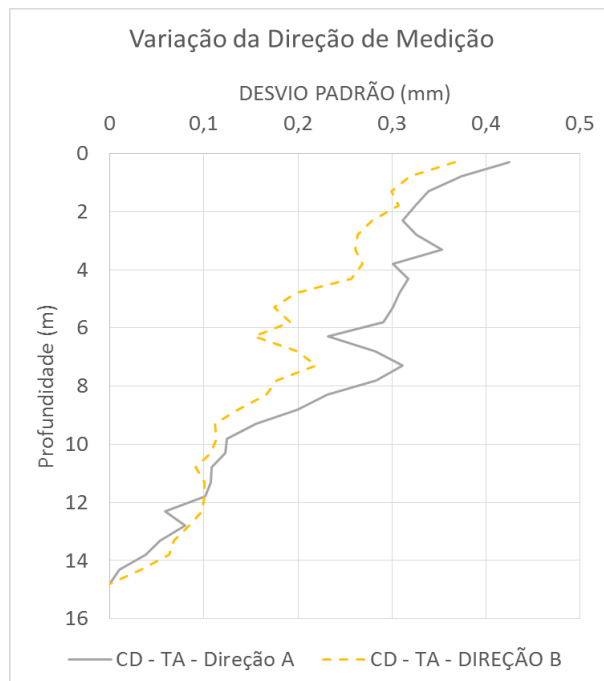


Figura 7. Influência do Desaprumo Vertical em Diferentes Direções.

4 CONCLUSÕES

Na fase em que foram realizadas as medições da cortina, os tubos plásticos apresentaram menor desvio padrão global das medidas quando comparados aos tubos de alumínio.

Considerando que, até a fase de escavação do terceiro nível da cortina, a ordem de grandeza dos deslocamentos totais da cortina foram de 0,02% da profundidade escavada, pode-se inferir que o desvio padrão pode ter interferência na avaliação de tendências de estabilização da cortina em razão dos pequenos deslocamentos medidos em cada fase.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro do CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- Cardoso, R., Neves, E.M., Lopes, P., Coelho, A.L., Tavares, R. (2010). *Utilização de inclinômetros do tipo increx para medição de deslocamentos durante a construção de aterros*, 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Portugal, 10 p.
- Correia, A. G.; Guerra, N.C.; Pinto, A. (1996). *Comportamento de três estruturas de contenção tipo Berlim*. *Geotecnia – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, nº 81, p. 65-78, Lisboa.
- Fonseca, A. R. (2003). *Ascultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica: Estudo de caso da barragem da UHE São Simão*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, 158 p.
- Machan, G.; Bennett, V.G. (2008). *Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects. State of the Practice*. Transportation Research Circular. Number E-C129, Whashington DC, USA, 92 p.
- Moormann, C. (2004). *Analysis of wall and ground movement due to deep excavation in soft soil based on a new worldwide database*. *Soils and Foundations*, Vol 44, No. 1, p. 87-98.
- Oliveira, J.R.M.S.; Marques, M.E.S.; Cabral, D.A.; Silva, M.R.L.; Carneiro, L.A.V. (2009) *Deslocamentos Horizontais em uma Parede Diafragma*. In: Conferência Brasileira De Estabilidade de Encostas, 5, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS, v. 1, p. 245-250, São Paulo.
- Oliveira, L. H. B.; Costa, Y. D. J.; Santos, F. A.; Costa, C. M. L. (2014). Acompanhamento de deslocamentos horizontais de uma cortina de estacas espaçadas atirantada. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia/GO, Brasil, 8 p.
- Pinheiro, R. J. B. (2000). *Estudo de alguns casos de instabilidade de encosta da serra geral no estado do Rio Grande so Sul*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, 342 p.
- Rocha, R., Costa, B.R. (2013). *Medidas de Rotações em Tubos de Inclinômetros para Correção de Deslocamentos Horizontais*. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 7 p.
- Santos, F. A. (2013). *Avaliação do desempenho de uma cortina de estacas espaçadas, atirantada em areia*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, 167p.
- St John, H. D.; Potts, D. M.; Jardine, R. J.; Higgins, K. G. (1992). Prediction and performance of ground response due to construction of a deep basement at 60 Victoria Embankment. In: *Wroth Memorial Symposium on Predictive Soil Mechanics*, pp. 581-608. Oxford.
- Wilson, S. D.; Mikkelsen, P. E. (1978). *Field instrumentation*, Transportation Research Board Special Report, n. 176.