

DESENVOLVIMENTO DE NOVAS TECNOLOGIAS PARA INCLINÔMETROS APLICADOS AO MONITORAMENTO DE OBRAS GEOTÉCNICAS

Development of new technologies for inclinometers applied to monitoring geotechnical structures

Rodrigo Siqueira Penz*

Adriano Luís Toazza**

Maurício Tonello Vargas***

Francisco Dalla Rosa****

RESUMO – Os sistemas de medição e monitoramento em taludes objetivam verificar a existência e a evolução de movimentos horizontais na massa de solo e são indispensáveis em áreas de riscos. Um instrumento bastante conhecido para medições de movimentos em taludes é o inclinômetro, que realiza medições da inclinação de sua sonda em relação a vertical gravitacional, segmentando a profundidade em trechos de reta definidos pela distância entre os rodízios da sonda. O desenvolvimento e implementação realizados no inclinômetro neste trabalho, destacam atributos como: a redução da distância de segmentação da profundidade para 0,15 m, aumentando o número de medições ao longo do trecho medido; a medição automática da profundidade e dos ângulos da sonda com a sonda em movimento; a utilização de um programa de interface que realiza a captura de todas as medições através de uma comunicação Bluetooth, com a gravação destes resultados em um arquivo com extensão “.CSV”, extensão esta reconhecida em todos os programas de planilhas.

SYNOPSIS – The systems for measurement and control of slopes have the main goal of checking the existence and evolution of horizontal movements in the ground and are indispensable in risky areas. A commonly used tool for the measurement of movements in slopes is the inclinometer, which measures the inclination of its probe related to the gravitational vertical, dividing the depth in equal parts defined by the distance between the probe casters. The development and implementation operated in the inclinometer described in this work provide as main features: reduction of the depth segmentation to 0.15m, thus increasing the number of measurements along the measured part; automatic measurement of the probe depth and inclination with the probe in motion; use of an interface program that captures all measurements through Bluetooth communication and records these results in a CSV file recognized by all spreadsheets.

PALAVRAS CHAVE – Inclinômetros, tecnologia MEMS, monitoramento de obras geotécnicas.

1 – INTRODUÇÃO

Os desafios de grandes obras geotécnicas têm imposto cada vez mais a necessidade da instalação de sistemas de monitoramento, como forma de avaliar o seu desempenho pós-construção. Desta forma, a instrumentação e o monitoramento de diferentes tipos de obras geotécnicas tem-se tornado cada vez mais frequente. O uso destas ferramentas colabora principalmente no

* Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: rodrigopenz@upf.br

** Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: toazza@upf.br

*** Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: mautv@ibest.com.br

**** Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: dalla@upf.br

monitoramento (*in situ* ou remoto) do desempenho de tais estruturas quando em operação. Entre os exemplos de sistemas de monitoramento *in situ*, podem-se citar os trabalhos apresentados por Rosi *et al.* (2011), Mishra *et al.* (2011), Stark e Choi (2008), Lin e Tang (2005), Dixon e Spriggs (2007) entre outros, e os sistemas de monitoramento remoto, apresentados por Tofani *et al.* (2013), Yin e Zhu (2008), e outros trabalhos.

Entre os instrumentos clássicos utilizados *in situ* se destaca o inclinômetro por ser uma ferramenta simples, a qual fornece importantes parâmetros relacionados a deslocamentos horizontais e/ou verticais.

Machan e Bennett (2008) estabelecem que inicialmente, os inclinômetros eram utilizados para o monitoramento de escorregamentos e estabilidade de taludes. Contudo, atualmente estes dispositivos são utilizados no monitoramento dos impactos de escavações próximas a obras já existentes, bem como, na avaliação dos recalques de barragens e de estruturas rodoviárias, podendo resumir como obras geotécnicas em geral.

Dunnicliff (1988) apresenta as características básicas encontradas nos inclinômetros, onde os mesmos utilizam sensores que detetam a variação de ângulo de um tubo guia em relação à direção vertical. Os sensores mais comuns utilizados nas sondas são os do tipo corda vibrante (Russo, 2005), extensômetros do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) (Krelling, 2006), *strain gauges* (Krelling, 2006), métodos acústicos (Dixon e Spriggs, 2007), refletometria no domínio do tempo (Lin e Tang, 2005), e sensores de fibra ótica (Yin e Zhu, 2008).

Contudo, recentemente tem sido empregada a tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*). Os sensores com tecnologia MEMS se utilizam de pequenas partes móveis instaladas no interior de pequenos circuitos integrados. Exemplos de inclinômetros que utilizam esta tecnologia são apresentados por Hanto *et al.* (2011), Abdoun (2010), Busslinger (2009), Machan e Bennett (2008), Bennett *et al.* (2011), e outros.

Machan e Bennett (2008) descrevem que sondas com acelerômetro MEMS são de tecnologia mais recente e apresentam condições favoráveis com relação ao baixo consumo de energia e custo, reduzido tamanho e elevada durabilidade. Contudo, esta tecnologia apresenta condições desfavoráveis como sensibilidade à temperatura, ruído no sinal medido e precisão entre $\pm 2,6$ mm a ± 6 mm a cada 30 metros de excursão, alcançando valores superiores em comparação aos sistemas acionados por servo-acelerômetros, que apresentam $\pm 1,2$ mm na mesma distância percorrida. Embora esta informação seja proveniente das especificações dos fabricantes, ainda não existe a comprovação por estudos independentes, uma vez que a sua aplicação em sondas comerciais de inclinômetros foi iniciada em 2005.

Hanto *et al.* (2011) propõem a utilização de um sistema de medição de inclinação em tempo real utilizando o acelerômetro ADXL330. Contudo, estas sondas apresentam ainda dimensões elevadas quando considerados os sensores atualmente disponíveis. Este aspecto muitas vezes pode inviabilizar medições de grandes movimentos de maciços ou estruturas. Aliado a este fato, também os atuais sistemas realizam as medições de forma estática e numa única direção, o que resulta em dificuldades e atrasos nas medições realizadas em campo.

Neste contexto, o presente trabalho busca apresentar um Sistema de Aquisição de Inclinações (SADi), constituído de um inclinômetro de tamanho reduzido, capaz de efetuar medições de inclinação utilizando um acelerômetro com tecnologia MEMS biaxial. Ao mesmo tempo, o SADi realiza a medição de profundidade da sonda com o uso de um *encoder* de forma contínua na medida em que o inclinômetro é excursionado pelo tubo guia. Os dados são enviados automaticamente através de um sistema Bluetooth até a sua interface de leitura, que pode ser acoplada com um microcomputador convencional ou outra plataforma que possua o sistema de comunicação Bluetooth.

Acredita-se que as características de melhoramentos agregados do SADi possam resultar em uma evolução dos sistemas de medições de inclinação, buscando ampliar seu uso e difundi-lo para as mais diversas áreas.

2 – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido buscou manter o tradicional método de medição de inclinação em taludes, ou seja, utilizando-se tubo guia, sonda e um sistema de interface de leitura. Entretanto, o sistema de interface para o SADi é realizado através de um PC ou em um dispositivo móvel genérico, onde previamente deve estar instalado o programa desenvolvido para operar como interface com o usuário.

O SADi utiliza como transdutor de medição de inclinação um acelerômetro biaxial SCA-100T-D02. A sua estrutura compacta possibilitou a construção de uma sonda de dimensões reduzidas, propiciando uma característica melhorada no que tange a excursão da mesma internamente ao tubo guia. Além deste aspeto, este sensor é capaz de realizar a medição do ângulo com a vertical nas direções 0° - 180° e 90° - 270° .

A sonda desenvolvida para o SADi pode operar dentro de tubos guias de 45 mm a 90 mm. A sonda possui seu corpo construído em aço inox 316, com dimensões externas de 25,4 mm de diâmetro, 450 mm de comprimento (menos da metade das sondas tradicionais, que possuem 1000 mm). A distância entre os eixos dos rodízios é de 150 mm, massa de 1,15 kg e diâmetro dos rodízios de 24 mm. O principal ganho com a redução da distância entre os rodízios está relacionado com a maior precisão na identificação de interfaces de movimento de massa, as quais são comuns onde existem materiais com diferentes características geotécnicas.

As vedações dos circuitos elétricos e das conexões elétricas possuem índice de proteção IP-68, o que possibilita a imersão da sonda em líquidos de forma permanente. Na Fig. 1 é apresentada a forma final da sonda do sistema SADi.

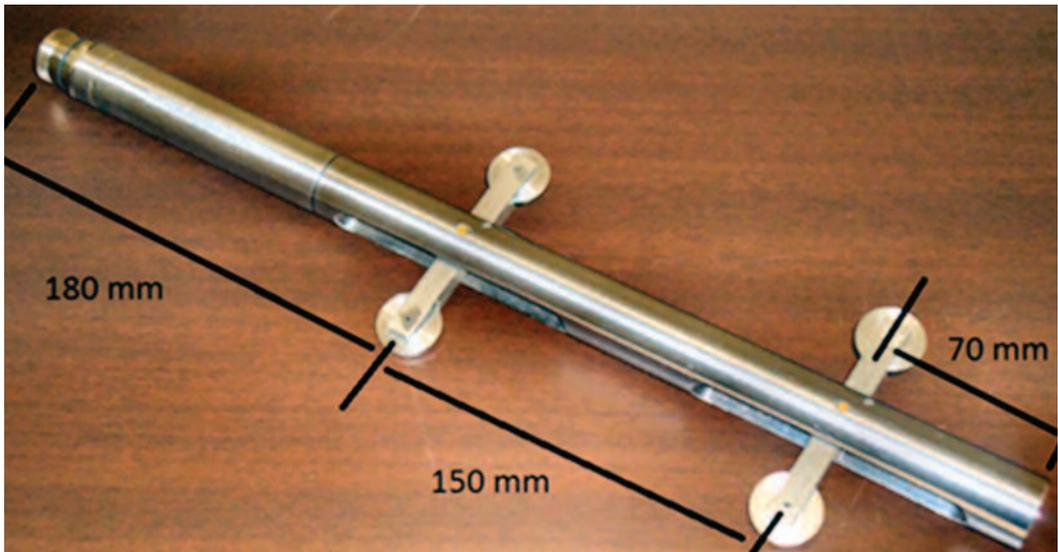


Fig. 1 – Sonda do SADi.

Com estas dimensões, a sonda do SADi propicia excursões em curvas com raios de 0,7 m, onde comparativamente uma sonda com distância entre rodízio igual a 500 mm, somente possibilita excursões em raios mínimos de 0,9 m. Esta comparação refere-se a excursões em tubos guias de 90 mm de diâmetro. A Fig. 2 apresenta a comparação da sonda convencional com a que foi desenvolvida neste estudo.

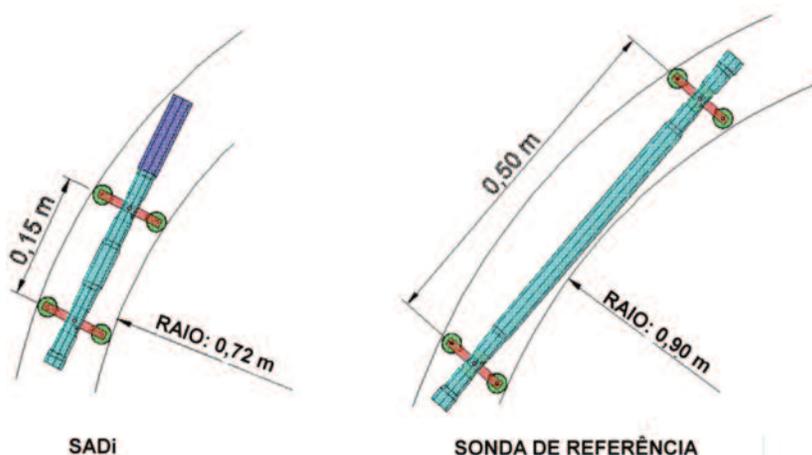


Fig. 2 – Comparação das sondas na excursão por curvas.

A redução do tamanho da sonda além de propiciar a excursão da mesma em curvas com raios reduzidos propicia também a redução dos intervalos em que ocorrem as medições das inclinações. Desta forma, tem-se um incremento do número de medições de inclinações realizadas no trecho amostrado.

Seguindo as técnicas de medições de inclinação que utilizam sondas móveis em invólucros, os intervalos de aquisição ao longo do trecho amostrado ocorrem na mesma distância do espaçamento dos eixos dos rodízios (Fig. 3), mantendo-se desta forma, um ponto comum de referência entre a medição atual e a medição antecessora. A Fig. 3 ilustra para um trecho do invólucro a sonda do SADI realizando duas medições em um intervalo de 450 mm, sendo estas medições os ângulos α_1 e α_2 em comparação as sondas tradicionais, as quais efetuam apenas uma medição num intervalo de 500 mm, sendo este ângulo β_1 .

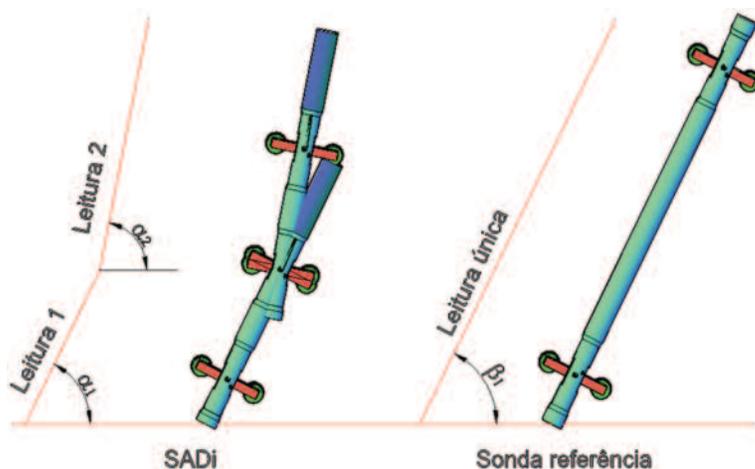


Fig. 3 – Comparação das medições entre a sonda do SADI e uma sonda convencional.

Ainda, está incorporado ao sensor SCA100T-D02 um canal de comunicação serial SPI “Serial Peripheral Interface”, por onde as informações das medições dos eixos são enviadas em resolução de 11 bits através do cabo elétrico para a interface de leitura.

Os dados coletados pelo sensor são enviados através de um cabo blindado multipolar, acrescido de uma malha externa de blindagem e seis condutores de seção quadrada com 1 mm² de área encordoados em classe 5, indicando um cabo flexível. A sua especificação é complementada pela capacidade de isolamento de 500 V.

Além da transmissão de dados e alimentação do acelerômetro, o cabo elétrico também apresenta a função de sustentação da sonda, bem como é utilizado para movimentar o sistema de referência e medição da posição da sonda.

A posição da sonda é registrada através da passagem do cabo elétrico por entre um mecanismo contendo três roldanas. Em uma destas roldanas, está acoplado um *encoder* incremental, que envia sinais elétricos conforme a sonda se movimenta. Estes sinais elétricos são levados à placa eletrônica responsável por realizar a aquisição dos sinais da profundidade da sonda, sejam estes deslocamentos ascendentes ou descendentes. O sistema de medição da posição da sonda é apresentado na Fig. 4.

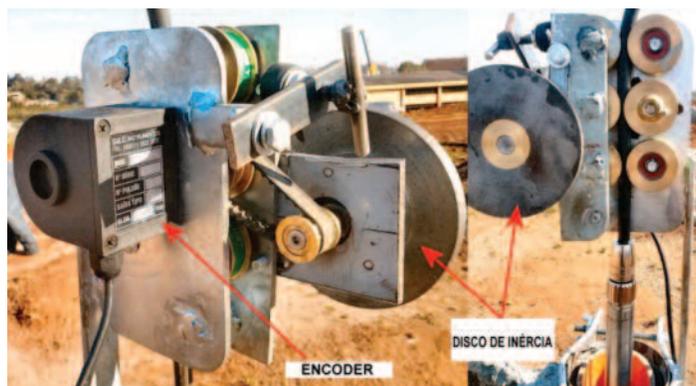


Fig. 4 – Sistema de medição de deslocamento do SADi.

O processo de realização das leituras durante o ensaio em campo é esquematizado na Fig. 5. No fluxograma, é indicado que o sistema SADi realiza a aquisição do ângulo da sonda no instante quando a profundidade requerida é alcançada, passando a transmitir o valor da inclinação para o dispositivo de gravação (PC ou *tablet*) por meio de comunicação Bluetooth.

A utilização de um sistema automático de medição da inclinação da sonda propicia menores riscos de aquisição de dados errados. Machan e Benett (2008) afirmam que um dos principais problemas relacionados com o uso de inclinômetro está relacionado a medições erradas da profundidade durante o monitoramento.

Desta forma, o sistema aqui proposto é capaz de realizar as medições de deslocamento do tubo guia a cada 15 cm.

O sistema controlador do SADi é composto por uma placa eletrônica que apresenta o microcontrolador PIC16F876A (PIC), responsável por várias ações do sistema. Uma das ações do PIC é receber e condicionar os sinais da medição da profundidade da sonda provindos do *encoder*. Outra função do PIC é realizar o recebimento e condicionamento dos dados das inclinações enviadas pelo canal SPI do inclinômetro SCA100T-D02, além de realizar o envio dos dados das medições das inclinações para a interface de leitura. Também é função do controlador disponibilizar as tensões reguladas para alimentação dos dispositivos elétricos. O SADi está projetado para operar em locais onde não há fornecimento de energia elétrica, desta forma um sistema de bateria está dimensionado para cumprir com as necessidades das solicitações de corrente instantânea e com as condições de capacidade de carga para regimes de longas durações.

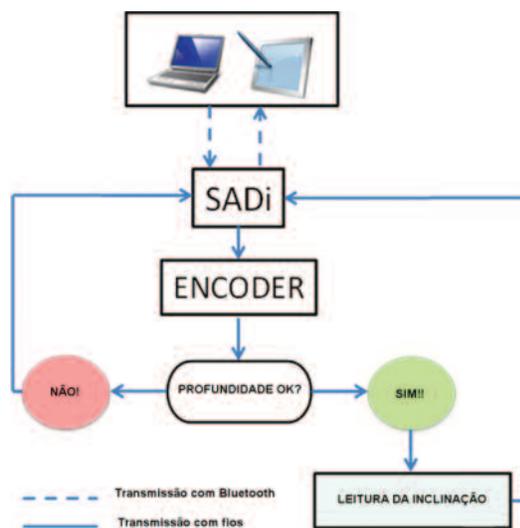


Fig. 5 – Fluxograma do funcionamento do SADi.

O SADi realiza também a comunicação com a interface de leitura através da transmissão por Bluetooth (Fig. 5). A escolha do sistema Bluetooth se deve ao baixo consumo que este tipo de dispositivo apresenta, permitindo então que sejam alcançados longos períodos de utilização com uma bateria. Além do menor consumo de energia do sistema, o uso da transmissão via Bluetooth fornece uma adaptabilidade maior aos diferentes sistemas de armazenamento de dados para operar em conjunto com o SADi.

Desta forma, o sistema proposto é capaz de se comunicar com um PC, *tablet*, ou ainda um *smartphone*. O único requisito para tais dispositivos é possuir um canal de comunicação Bluetooth. Junto a estes requisitos é também necessária a utilização do programa desenvolvido especificamente para utilização com o SADi. Este programa possui uma interface de usuário conforme apresentado na Fig. 6. As indicações de profundidade da sonda, dos ângulos das medições em eixo direto e em eixo transversal aos rodízios, bem como, a velocidade de excursão da sonda são apresentados de forma instantânea pela interface.

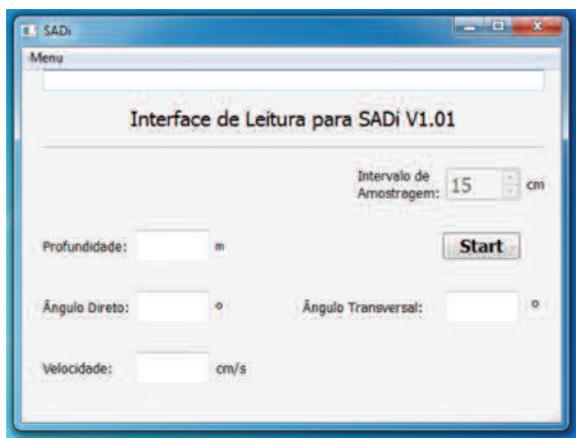


Fig. 6 – Interface com o usuário do SADi em ambiente Windows.

Os dados das medições realizadas pelo SADi são disponibilizados em um arquivo “.CSV”, que contém as informações de profundidade, inclinação, deslocamento vertical e horizontal (direto e transversal) de cada trecho medido.

3 – AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A calibração da sonda foi efetuada ajustando o ângulo do corpo da sonda ao ângulo zero gravitacional. Na sequência, o valor medido pelo SADi foi ajustado via programa de forma a medir zero graus. Para promover este ajuste foi construído um suporte articulado, contendo um segmento de tubo guia onde a sonda apoia-se naturalmente por seus rodízios. O ajuste da sonda com o ângulo vertical foi realizado com o auxílio de uma mesa tridimensional de alta precisão modelo Prismo Navigator fabricada pela Carl Zeiss, assumidos aqui como os valores reais de inclinação.

Através da medição do ângulo paralelo com o eixo vertical pela mesa tridimensional na parede externa do tubo guia, foi possível verificar a diferença existente entre a medição provinda da mesa tridimensional (tomada como real) e a medição provinda do inclinômetro. Assim, foi possível efetuar a compensação da diferença de medidas através de ajuste no programa do microcontrolador responsável pelo condicionamento do sinal enviado pelo inclinômetro.

Ainda com relação a verificações das medições realizadas pelo inclinômetro foi possível utilizar o mesmo suporte citado anteriormente para a verificação do comportamento linear das medições. Foram realizadas várias excursões da sonda para os quatro sentidos (D+: eixo direto positivo; D-: direto negativo; I+: eixo transversal positivo; I-: transversal negativo), fixando a sonda em posições aleatórias e realizando medições pelo SADi e pela mesa tridimensional.

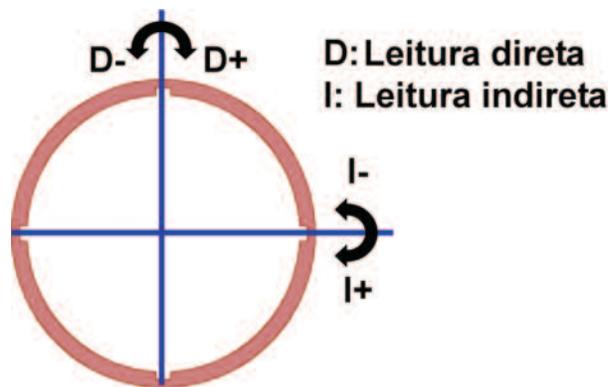


Fig. 7 – Esquema das medições que a sonda é capaz de realizar ao mesmo tempo.

O sistema desenvolvido é capaz de realizar medidas de ângulos de $\pm 50^\circ$ com relação ao eixo gravitacional. Contudo, durante este processo de aferição foi observado uma pequena não linearidade entre o valor real e o valor indicado pelo SADi. O erro de linearidade foi transformado em uma equação de segunda ordem, confirmado pelo comportamento típico do erro como é demonstrado na Fig. 8, que apresenta o comportamento gráfico do erro de linearidade e a equação do erro baseada na linha de tendência do polinômio.

Segundo as especificações do fabricante do sensor, o inclinômetro pode apresentar uma não linearidade durante as medições de diferentes ângulos, onde esta pode variar de $-0,57^\circ$ a $0,57^\circ$. Esta não linearidade também foi identificada durante o processo de aferição do SADi, tendo esta não linearidade comportamentos diferentes em função da inclinação da sonda.

Desta forma, os erros de linearidade foram separados em duas equações para cada sentido de medições. Para os ângulos entre 0° e 5,0° foi aplicada uma equação sem membro constante e para ângulos entre 5,01° e 50° é aplicada uma equação de segunda ordem como apresentada na Fig. 8. As equações encontradas dos erros, que no total são 8 equações, foram implementadas no programa do microcontrolador corrigindo a não linearidade das medições do inclinômetro.

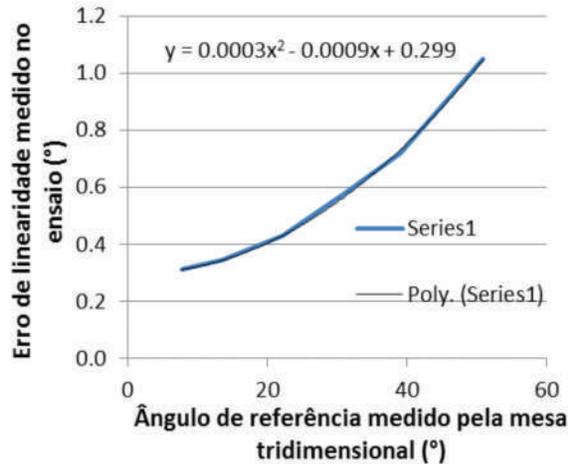


Fig. 8 – Comportamento do erro de linearidade do inclinômetro e a equação comportamental do erro.

Após a implementação das equações dos erros no programa do microcontrolador, foi realizada nova aferição para os quatro sentidos, a fim de verificar a correta linearidade das medições do SADi. Na Fig. 9 é apresentado o resultado final do ajuste realizado na mesa tridimensional no sentido positivo de eixo direto da sonda do SADi, onde se observa o baixo erro medido entre o ângulo real e aquele obtido pelo SADi.

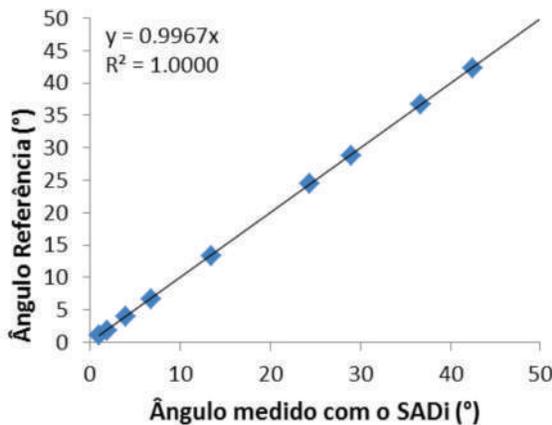


Fig. 9 – Ensaio de verificação da calibração do SADi no sentido positivo de eixo direto da sonda.

Dentre as propostas do SADi, a realização das medições de inclinação com a sonda em movimento acaba por possibilitar a ocorrência de erros nas medições, devido as variações de velocidades durante a excursão da sonda, situações características de acelerações e desacelerações. As variações de velocidade na sonda acabam por interferir no valor medido, pois o circuito MEMS

utilizado na sonda do SADi é um acelerômetro. Conforme seu fabricante o SCA100T-D02 é influenciado na ordem de $57,33^\circ/g$. A fim de minimizar a ocorrência das variações de velocidades durante o deslocamento da sonda, é acionado mecanicamente através do movimento do cabo elétrico da sonda, um disco de inércia que reduz a ocorrência de grandes acelerações e desacelerações. O disco de inércia que acaba por ser tracionado por um dos rolos guia do sistema de medição de profundidade, através da passagem do cabo da sonda é apresentado na Fig. 4.

Na segunda ação para minimizar as influências das acelerações sobre o resultado das medições do SADi é utilizado um sistema de filtro digital no programa do microcontrolador. O sistema de filtro escolhido é o filtro passa baixa, que pela teoria de filtros permite a passagem de sinais de baixa frequência. Assim aplicando ao SADi a análise do filtro, não serão atenuados pelo filtro os valores das medições sucessivas providas de pequenas variações de medições angulares, logo atenuando os valores das medições sucessivas que apresentam grandes variações de medições angulares. A fundamentação desta condição é baseada no comportamento da medição angular numa distância entre rodízios igual a 15 cm. É afirmativo então que grandes variações de valores medidos na distância de 0,15 m são influências de acelerações da sonda e neste caso o valor da medição será atenuado. A Equação 1 é a equação do filtro “passa baixa” escolhido e a Fig. 10 mostra o gráfico da resposta do filtro implementado.

$$Id = 1 / \{ [(10 * (Ii - Ia)) / Ia]^2 + 1 \} \quad (1)$$

Na Equação 1 a parcela “Id” representa o fator assumido para atenuação do valor lido no ponto. A parcela “Ii” é o valor enviado pela sonda do SADi, e pode conter influências das variações das acelerações e a parcela “Ia” é a média aritmética das últimas quatro leituras, ou seja, é a tendência do comportamento da inclinação da sonda, definido pelas últimas quatro medições. Assim, verificando-se os valores da Fig. 10 para o comportamento da resposta da medição através da Equação 1, identifica-se no eixo das abscissas a inscrição “relação da medição”, que é definida pela parcela “(Ii-Ia)/Ia” na Equação 1 e no eixo das ordenadas identifica-se a inscrição “valor assumido da medição”, que é definido pela parcela “Id” na Equação 1.

Observando a Fig. 10, identifica-se a janela “calcular”, que está referenciada ao cruzamento das linhas pontilhadas sugestivamente escolhido. Neste cruzamento a atenuação do sinal medido definido pelo valor da ordenada “f(x)” será de 0,5043, ou seja, haverá uma atenuação de 50% da

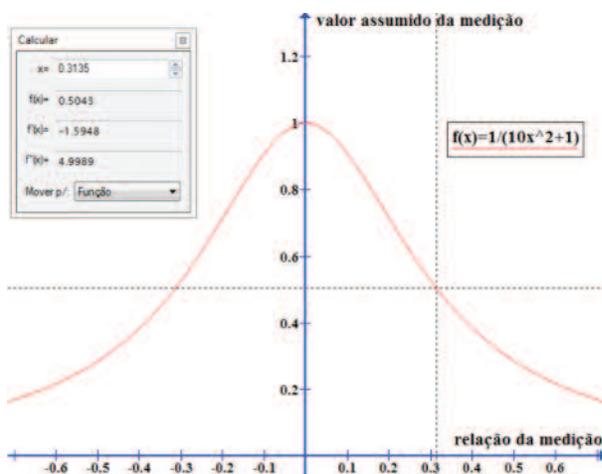


Fig. 10 – Resposta do filtro “passa baixa” implementado no programa.

variação da medição do ponto em relação a média. Atenta-se que a atenuação de 50% ocorrerá no ponto 0,313 das abscissas, assim uma variação angular de 31,3% em relação à média das últimas quatro medições atenua a variação em 50%.

A atenuação do filtro implementado definido pela Equação 1 afetará a diferença entre o valor “Ii” e o valor “Ia”, ou seja, sobre a diferença entre as medições consecutivas, como definido pela Equação 2.

$$I_f = [I_d * (I_i - I_a)] + I_a \quad (2)$$

Na Equação 2 a parcela “I_f” representa o valor real de inclinação que o SADi irá assumir para o ponto, com característica tendenciosa, pois atenua a diferença entre as medidas consecutivas, somando-a a média anterior, logo pode-se afirmar que o sistema opera sobre uma tendência. Embora o valor de “I_f” seja assumido como real pelo SADi, este valor não é utilizado para o cálculo da média das últimas quatro medições “I_a”. É assumido para realizar o cálculo da média o valor da medição “I_i”, que desta forma promove uma agilidade no acompanhamento das variações das medições angulares provindas da sonda do SADi. Esta condição é necessária, pois, todo o sistema de filtragem acaba por atrasar o acompanhamento do sinal real, e se caso as variações de medições sucessivas de proporção elevada forem verdadeiras e não estiverem influenciadas por acelerações, seus valores serão mantidos e em um ciclo de quatro leituras a média já estará modificada e produzirá menor atenuação para o comportamento da nova tendência.

4 – VALIDAÇÃO DO SADi

Com o intuito de validar os resultados apresentados pelo SADi, foi proposta a comparação da sua eficiência frente aos equipamentos disponíveis comercialmente. Neste caso, a validação do sistema foi realizada através da medição dos deslocamentos horizontais de diferentes estacas de concreto armado com comprimento de 8,5 m, solicitadas a um carregamento horizontal como apresentado na Fig. 11a. A sonda de referência utilizada neste estudo é produzida pela *Slope Indicator*, a qual possui um aspeto similar ao apresentado na Fig. 2b.

O campo experimental utilizado neste estudo já possui uma ampla caracterização geotécnica, onde foram realizados ensaios de placa, SPT (*Standard Penetration Test*) e sondagem a trado, entre outros. Resultados de ensaios triaxiais indicaram que os parâmetros c' e ϕ' são respetivamente 8 kPa e 28°.

Primeiramente foi lançada a sonda de referência e realizadas as medições do trecho. Logo em seguida foi lançada a sonda do SADi e realizadas quatro excursões com medições pelo tubo guia, desta forma possibilitando realizar em conjunto o ensaio de repetição. Os comportamentos das medições das sondas para o ensaio comparativo estão demonstrados na Fig. 11b.

Para o ensaio comparativo entre o SADi e o inclinômetro de referência no trecho de 8,0 m, foi encontrada a maior diferença no deslocamento horizontal de 24,83 mm, medido a menor pelo SADi, o que resulta um desvio máximo da medição de 17,12%. Ainda, com relação ao ensaio comparativo a menor diferença de medição efetivada pelo SADi foi de 7 mm a menor que a referência, resultando em um desvio mínimo da medição de 4,82% e para a média das quatro medições o SADi apresentou uma média de 15,85 mm a menor que o valor de referência, efetivando um desvio médio de medição de 10,93%.

Utilizando os resultados experimentais, foi analisado o desvio entre as medições realizadas pelo SADi, resultando em um desvio médio de 6,92 mm, representando 5,34%.

Também, foi necessário para a validação do SADi a verificação do funcionamento do sistema de medição de profundidade da sonda, constituído pelo mecanismo composto pelas três roldanas,

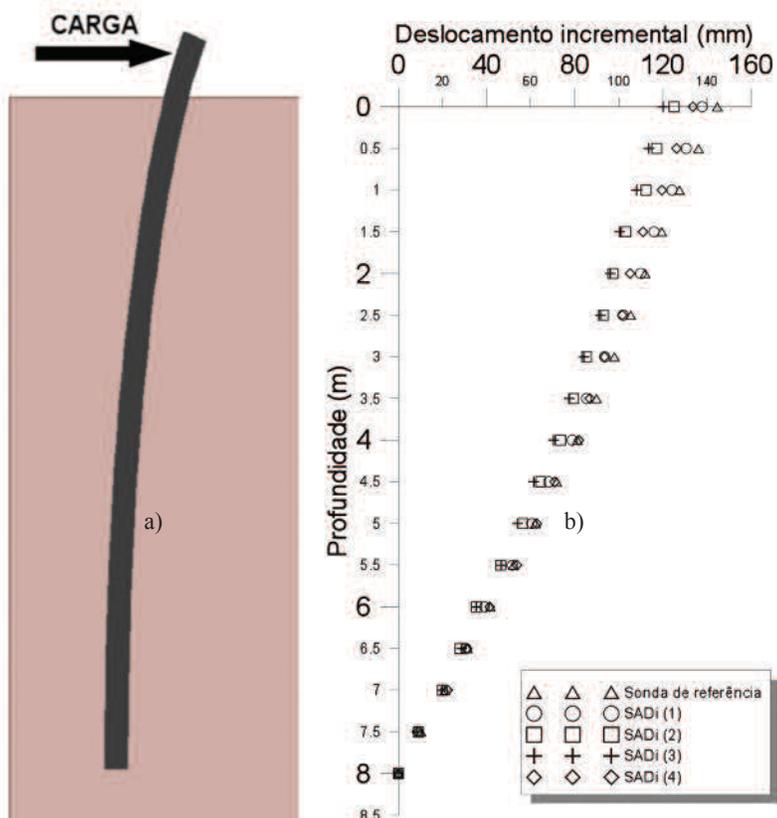


Fig. 11 – Avaliação da reprodutibilidade das medições realizadas com o SADi em comparação aos resultados de um sistema comercialmente vendido (Slope Indicator):
a) Localização; b) Deslocamento horizontal acumulado.

o *encoder* e a placa de aquisição. O *encoder* dimensionado para efetuar a verificação do movimento da sonda possui 100 pulsos por volta e a roldana tracionadora do *encoder* possui um diâmetro de 31,8 mm, resultando num comprimento periférico de 99,9 mm. Assim, com relação aos pontos de profundidade em que serão efetuadas as medições de inclinação, estes ocorrerão afastados de 150 mm entre si, visto que a distância entre os rodízios do SADi é de 150 mm. Com isto, o SADi realiza a contagem de 150 pulsos em seu *encoder*, promovendo o deslocamento de 149,85 mm da sonda, resultando em um erro de 0,1%.

Para a verificação prática do funcionamento do sistema de medição de profundidade da sonda, utilizou-se uma trena métrica. Foi medida uma distância no cabo elétrico de sustentação da sonda igual a 8 m, a sonda foi lançada dentro do tubo guia, para reproduzir uma ação real de medição, ocorrendo a tração no cabo elétrico. Ao final do trecho de 8 m ocorreu a antecipação da leitura da distância por parte do SADi em 5 mm, efetivando um erro ensaiado para a situação definida de 0,062%. O erro encontrado no ensaio acabou sendo menor do que o esperado (0,1%). Este fato deve-se muito as características elásticas do cabo elétrico que estando em suspensão e tração acabou se alongando, compensando a medição de profundidade realizada pelo SADi.

5 – CONCLUSÕES

Após as realizações dos ensaios com o SADi, verificou-se a possibilidade de efetuar a medição de inclinação utilizando um acelerômetro em movimento. Os resultados dos ensaios apontam a valores percentuais de erros relativamente pequenos junto com a manutenção da tendência comportamental da referência. Esta condição alcançada pelo SADi é decorrente das implementações realizadas, que promoveram uma maior estabilidade da velocidade no deslocamento do cabo elétrico através do disco de inércia, assim surtindo em uma menor possibilidade de ocorrência de acelerações, e uma condizente atenuação de ruídos nos valores das medições, realizadas pelo filtro digital, sendo que ambas as ações ainda são passíveis de melhorias.

Nas condições em que são apresentados os resultados das medições do SADi, o profissional que utilizará os resultados possui liberdade de manipulação dos valores medidos, já que estes estão apresentados em uma planilha. Incluído ao processo de medição o SADi efetiva a impossibilidade de ocorrência de equívocos na medição de profundidade, incidindo de uma maneira automática todas as medições necessárias para a montagem da tabela de resultados e salvando estes dados em disco rígido do PC ou em uma memória móvel (*pen drive*, cartão SD, ...).

Ao final dos ensaios chegou-se à conclusão que o tempo para realizar a medição de todo o trecho com o SADi, precisando de realizar várias medições a mais no trecho, devido à distância menor dos rodízios, chegou a ser a metade do tempo com o modelo comparado.

Melhoria, ajustes e mais testes estão sendo efetuados com o sistema SADi, a fim de produzir um produto acabado de excelente qualidade, buscando facilitar a instalação do sistema no local a ser medido, ter excelente confiabilidade e fornecer ao usuário informações palpáveis e úteis para uma adequada análise.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdoun, T. (2010). *MEMS Based Real-Time Monitoring System For Geotechnical Structures*. Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz. IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.
- Bennett, V.; Abdoun, T.; Zeghal, M.; Koelewijn, A.; Barendse, M.; Dobry, R. (2011). *Real-time Monitoring System and Advanced Characterization Technique for Civil Infrastructure Health Monitoring*. Advances in Civil Engineering, Vol. 2011, Article ID 870383. Hindawi Publishing Corporation.
- Busslinger, M. (2009). *Landslide time-forecast methods*. HSR University of Applied Sciences Institut für Bau und Umwelt. Disponível em <http://bau.hsr.ch>. Acesso em 13. Jan. 2012.
- Dixon, N.; Spriggs, M. (2007). *Quantification of Slope Displacement Rates Using Acoustic Emission Monitoring*. Canadian Geotechnical Journal 44, 6, 966-976.
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Lexington, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc.
- Hanto, D.; Widiyatmoko, B.; Hermanto, B.; Puranto, P.; Handoko, L.T. (2011). *Real-time inclinometer using accelerometer MEMS*. Research Center for Physics, Indonesian Institute of Sciences.
- Krelling, P.C.L. (2006). *Concepção de um Inclinômetro Foto-Mecânico para Controle Geodésico de Estruturas*. Tese Doutorado. UFPR, Curitiba.
- Lin, C.P.; Tang, S.H. (2005). *Development and Calibration of a TDR Extensometer for Geotechnical Monitoring*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, nº 5.

- Machan, G.; Bennett, V.G. (2008). *Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects: State of the Practice*. Transportation Research Board, Soils and Rock Instrumentation Committee, Engineering Geology Committee.
- Mishra, P.K.; Shukla, S.K.; Dutta, S.; Chaulya, S.K.; Prasad, G.M. (2011). *Detection of Landslide Using Wireless Sensor Network*. Central Institute of Mining and Fuel Research. IEEE.
- Rosi, A.; Bicocchi, N.; Castelli, G.; Mamei, M.; Zambonelli, F.; Berti, M.; Corsini, A. (2011). *Landslide Monitoring With Sensor Networks: Experiences and Lessons Learnt from a Real-World Deployment*. Int. Journal Signal and Imaging Systems Engineering.
- Russo, L.N. (2005). *Interpretação de Deformação e Recalque na Fase de Montagem de Estrutura de Concreto com Fundação em Estaca Cravada*. Tese Doutorado. USP-Escola de Engenharia de São Carlos.
- Stark, T.D.; Choi, H. (2008). *Slope Inclinometers for Landslides*. Technical Development: Landslide.
- Tofani, V.; Segoni, S.; Agostini, A.; Catani, F.; Casagli, N. (2013). Technical Note: *Use of Remote Sensing for Landslide Studies in Europe*. Natural Hazards and Earth System Sciences.
- Yin, J., Zhu, H. (2008). *Monitoring of soil nailed slopes and dams using innovative technologies*. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.