

MONITORAMENTO DE TALUDE ROCHOSO NA UHE SINOP UTILIZANDO INCLINÔMETROS

Rafael BRANCO
Engenheiro Civil e Agrimensor – Sinop Energia

Edgar Alves RAMOS
Técnico em Edificações – EDF Serviços

Mariana Francisca FERREIRA Silva
Engenheira Civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. – Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda

RESUMO

Durante a fase de construção da UHE Sinop, ocorreu a ruptura parcial do talude da ombreira direita por ocasião das escavações obrigatórias da Casa de Força. Este acidente levou ao retaludamento da ombreira e à instalação de uma cortina atirantada para estabilização local. Para permitir o monitoramento durante a fase de operação da usina, foram instaladas seções de inclinômetros no talude rochoso da ombreira. O presente artigo traz as principais dificuldades encontradas neste monitoramento e os elementos chave empregados nas análises dos dados coletados.

ABSTRACT

During the construction phase of Sinop HPP, a partial failure of the right abutment occurred during the mandatory excavations of the Powerhouse. This accident led to the reshaping of the abutment and the installation of a concrete slab with rock anchors for local stabilization. To allow monitoring during the plant's operational phase, inclinometers were installed on the rock slope of the abutment. This article presents the main difficulties found in this monitoring and the key elements used in the analysis of the collected data.

1. INTRODUÇÃO

A UHE Sinop está localizada no norte do estado do Mato Grosso, no rio Teles Pires e possui potência instalada de 400MW. Do ponto de vista geológico, o empreendimento está inserido em uma das unidades da Formação Dardanelos, composta por uma sequência de arenitos, siltitos, argilitos, folhelhos, dobrados com estratificação inclinada a subvertical e levemente metamorfizados.

Durante a fase de construção, ocorreu a ruptura parcial do talude da ombreira direita por ocasião das escavações obrigatórias da Casa de Força. Esta ombreira foi escavada predominantemente em meta-argilito com algumas intercalações de metafolhelho, com mergulhos dos contatos voltados para montante, com inclinações da ordem de 60°, a montante do eixo, até 30°, na medida que se avança no sentido jusante.

Segundo [1], a ruptura parcial do talude rochoso teve início com o deslocamento de um plano do maciço de dimensão métrica, localizado cerca de 70 m a jusante da Casa de Força e limitado à el. 253 m. Esta ruptura inicial ocasionou um processo de instabilização sucessiva até o contato entre os meta-argilitos e os meta-arenitos que ocorrem aproximadamente na el. 271 m. Neste local, a camada de meta-arenitos aparece sobreposta aos meta-argilitos, com aparentes sinais de dobramentos, sendo que o plano-limite de ruptura não se propaga para os meta-arenitos.

Deve-se ressaltar que o plano subverticalizado exposto ao final do escorregamento prolongava-se por trás da superfície final de escavação e somente se tornou visível após o processo de ruptura. As feições com direção e mergulhos equivalentes, detectadas nos mapeamentos, possuíam invariavelmente persistências muito abaixo daquelas que determinaram a ruptura parcial do talude [1].



FIGURA 1 – Início do processo de ruptura e situação final da área afetada.

Este incidente condicionou a execução de obras adicionais de reconformação e de estabilização dos taludes e à instrumentação da ombreira direita e talude lateral do canal de fuga empregando medidores de nível d'água, marcos topográficos, alvos geodésicos e inclinômetros.

O presente artigo traz as principais dificuldades encontradas no monitoramento do talude da ombreira direita com inclinômetros e os elementos chave empregados nas análises dos dados coletados.

2. MONITORAMENTO DO TALUDE COM INCLINÔMETROS

Para o monitoramento da movimentação dos taludes da ombreira direita e do canal de fuga, foram instalados 8 inclinômetros, fabricados pela Geokon, dispostos como mostrado na figura a seguir.



FIGURA 2 – Posição de implantação dos inclinômetros no talude da ombreira direita da UHE Sinop.

Inclinômetros são instrumentos empregados no monitoramento da magnitude, taxa, direção e profundidade de deslocamentos de taludes, e têm sido bastante utilizados no monitoramento de barragens. Os instrumentos atuais foram desenvolvidos a partir de um aparelho idealizado em 1952 por S. D. Wilson, na Universidade de Harvard, e sua comercialização teve início no final da década de 1950 pela Slope Indicator Company [2].

Consistem de uma sonda (torpedo) cilíndrica a prova d'água provida de 2 pares de rodas laterais (rodas guias), e alojam em seu interior um “sensor de inclinação”. Para aquisição das leituras a sonda é introduzida por meio de um cabo elétrico em um furo revestido com tubos de alumínio ou plástico, com 4 ranhuras perpendiculares para orientar as direções dos deslocamentos (FIGURA 3).

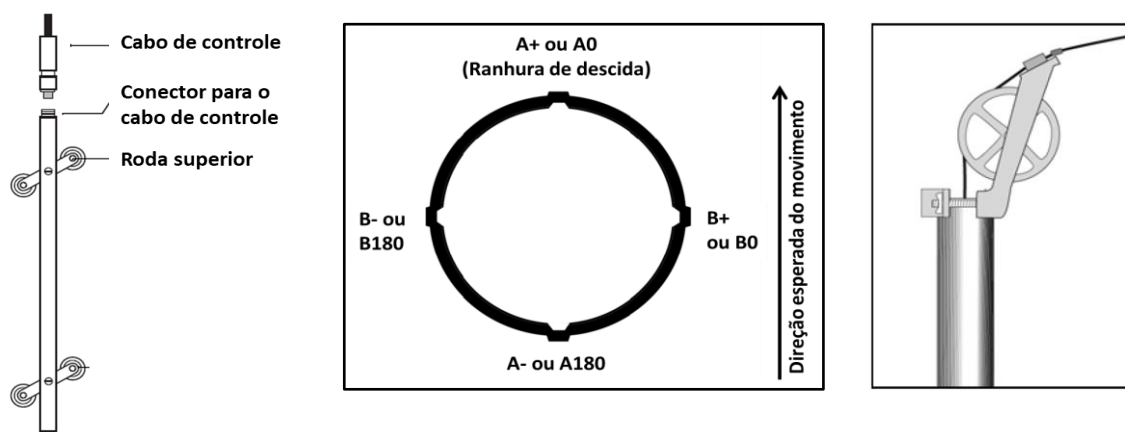


FIGURA 3 – Sonda do inclinômetro (à esquerda), seção do tubo-guia ranhurado e direção das leituras (ao centro) e fixador de cabo (a direita), adaptadas de [3].

Destaca-se que o eixo A, de maior precisão, deve ser instalado paralelo à direção do movimento principal esperado. No caso de barragens espera-se maior movimento na direção montante/jusante, então, primeiro as rodas superiores são inseridas na ranhura de jusante (A0) e depois na direção oposta (A180).

As leituras são obtidas com a descida da sonda no tubo duas vezes. Na primeira descida, as rodas superiores da sonda são posicionadas na ranhura A0 e, na segunda, a sonda é girada 180° na horizontal, de forma que as rodas superiores fiquem posicionadas na posição A180. Um dos acelerômetros ou MEMS do torpedo mede a inclinação no plano do conjunto de rodas, que corresponde ao eixo “A”, e o outro mede a inclinação no plano oposto, eixo “B”. Desta forma, o primeiro conjunto de leituras corresponde a A0 e B0 e o segundo aos valores de A180 e B180. A leitura será positiva quando o tubo estiver inclinado na direção “0”.

3. CONCEITOS APLICADOS PARA A ANÁLISE DOS INCLINÔMETROS

Os fabricantes de inclinômetros empregam terminologias diferentes para definir as movimentações. Tanto os desvios quanto os deslocamentos são por vezes denominados de deflexão ou perfil, exigindo atenção na análise de dados. No presente artigo, será empregada a nomenclatura a seguir:

- **Desvio unitário** – definido como a inclinação de cada trecho do tubo, ou seja, $d_i = L \cdot \sin \theta$;
- **Desvio acumulado** – soma dos desvios unitários, que define a posição absoluta ou perfil do tubo;
- **Deslocamento** – mede as variações no desvio, e indica o quanto o tubo se moveu em relação à sua posição original.

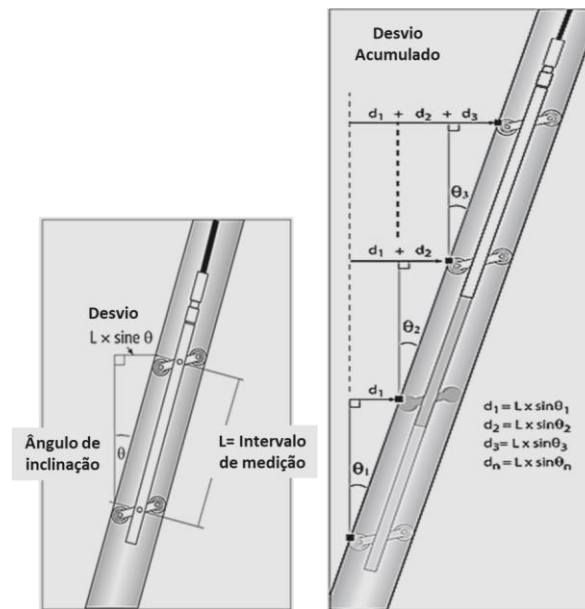


FIGURA 4 – Nomenclatura empregada para as medidas dos inclinômetros [2].

3.1 Fontes de erros em medidas com inclinômetros

Existem diversas fontes de erros nas medidas com inclinômetros, tais como: conexões da sonda (sujeira, água, conexão elétrica ruim), bateria com pouca carga ou conexão ruim, erro no posicionamento da sonda (inversão das ranhuras A+ e A-), falha no posicionamento da sonda no fundo do tubo, leitura sem esperar a estabilização, manuseio pouco cuidadoso da sonda, dentre outras. Cabe lembrar que a troca da sonda e/ou dos cabos também resulta em mudança nas leituras.

As variações de temperatura podem ter impacto nas leituras de inclinação dos sensores MEMS. Estes impactos apresentam histerese, o que significa que se a temperatura variar de 10°C a 20°C ou 30°C a 20°C, a leitura de inclinação medida será diferente, embora a temperatura seja a mesma (20°C). Devido à histerese, mesmo com processos de calibração complexos existe alguma incerteza residual dependente da temperatura.

Estas fontes de erros não invalidam a utilização dos inclinômetros, mas o reconhecimento da precisão é importante na avaliação de pequenas movimentações, que podem estar dentro da precisão de campo do sistema.

A Slope Indicator considera empiricamente a precisão de campo do sistema como de $\pm 7,6\text{mm}/30\text{m}$, sendo a combinação de erros aleatórios ($\pm 1,27\text{mm}/30\text{m}$) e erros sistemáticos ($6,35\text{mm}/30\text{m}$), conforme fórmula empírica a seguir [4]:

Erro total = Erro aleatório + Erro sistemático

Erro total = $(0,007\sqrt{n}) + (0,005 n)$ (em polegadas), sendo $n = \text{n}^\circ$ leituras no tubo

No entanto, para os inclinômetros digitais com Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), a precisão total do sistema é bem maior. O RST Digital MEMS Inclinometer

Probe (Sonda de Inclínômetro Digital), por exemplo, possui acurácia total do sistema de $\pm 2\text{mm} / 25\text{m}$ [5]. Já o Geokon GK-604D Digital System possui acurácia total (total system accuracy) de $\pm 3\text{mm} / 30\text{m}$, para tubos com até 3° de inclinação vertical [5], e o Geokon 6100 MEMS $\pm 4\text{mm} / 30\text{m}$, para tubos com até 5° de inclinação vertical [6]. Estes valores aumentam para tubos com inclinação superior às indicadas.

Cabe destacar que os erros para o Eixo B são superiores aos do Eixo A, devido à folga lateral das rodas da sonda dentro das ranhuras do tubo.

Segundo Mikkelsen, os erros sistemáticos mais comuns são o *bias-shift error* ou *zero offset error* (erro de polarização), erro de rotação, erro de profundidade e erro de sensibilidade [8].

O erro de polarização (corresponde à leitura quando a sonda do inclinômetro está completamente na vertical) é totalmente eliminado fazendo a médias das leituras nas direções A+ e A-, bem como B+ e B-. Idealmente o *offset* deveria ser zero, mas este valor pode alterar durante a vida da sonda do inclinômetro devido à degradação gradual (*drift*) do transdutor, desgaste ou danos às rodas ou, mais comumente, devido à queda ou choque da sonda com o fundo do tubo.

Para os inclinômetros mais modernos, a precisão do sistema é controlada principalmente pelo erro de profundidade. Trata-se da combinação da curvatura do tubo e alterações no posicionamento vertical da sonda. É causado por alterações no comprimento ou nas marcações do cabo, por alterações no comprimento do tubo devido a recalques ou pela curvatura do tubo. Este erro pode ser identificado graficamente quando os deslocamentos são exagerados, “espelhados”, compensados verticalmente, e os gráficos de desvio incremental e deslocamento acumulado são semelhantes [9].

3.2 Gráficos para análise dos dados

Para permitir a análise dos dados dos inclinômetros instalados na UHE Sinop são empregados os gráficos descritos os itens subsequentes.

3.2.1 Checksum (Soma de Verificação)

Para verificar a qualidade das leituras, é traçado o gráfico dos *Checksums* (somas de verificação), que consiste na adição dos dois valores obtidos na mesma direção e sentido oposto (A+ e A- e B+ e B-) numa mesma profundidade. Teoricamente estas somas deveriam ser zero, pois as leituras possuem sinais opostos. Na prática, pequenas variações na soma são impossíveis de eliminar e são causadas pelas condições da ranhura, zero-offset da sonda, precisão no posicionamento da sonda e fatores humanos. Desta forma, a soma gera um valor constante e um pequeno desvio padrão das somas indica a qualidade dos dados.

O gráfico do Checksum deve ser razoavelmente constante (vertical) e de pequena magnitude, indicando que as leituras estão adequadas. Cabe ainda observar que a consistência do Checksum entre campanhas de leitura é mais importante do que o valor real observado e que valores mais elevados podem ser esperados se, por exemplo, um acoplamento de recalque ou alguma imperfeição no tubo forem encontrados pela sonda.

Cada conjunto de tubos tende a ter uma assinatura em termos de Checksum. Picos no gráfico podem indicar inconsistências nas leituras ou podem ser uma característica do tubo. Por isso é interessante plotar esta soma e avaliar mudanças no gráfico com o tempo, como mostrado na FIGURA 5.

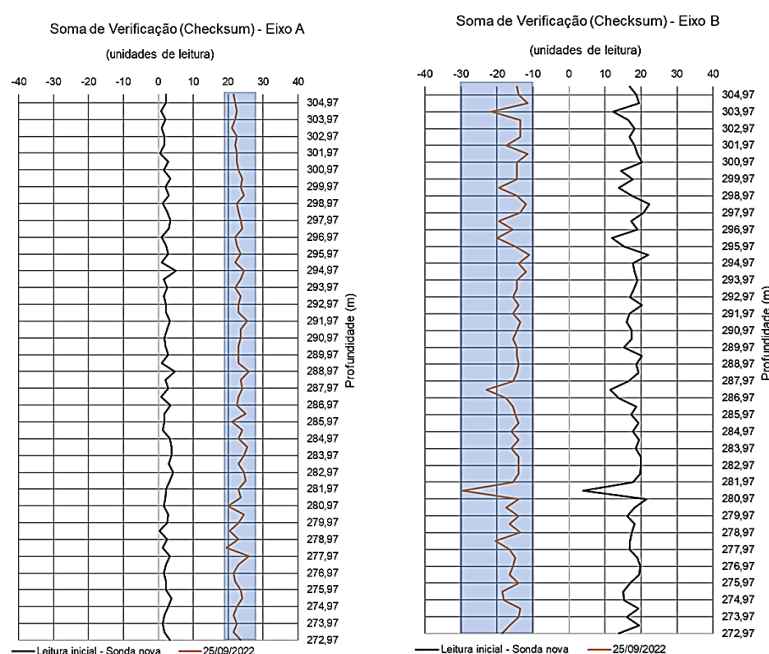


FIGURA 5 – Checksums do IN-03 da UHE Sinop para os eixos A e B em duas datas distintas, demonstrando a boa qualidade das leituras.

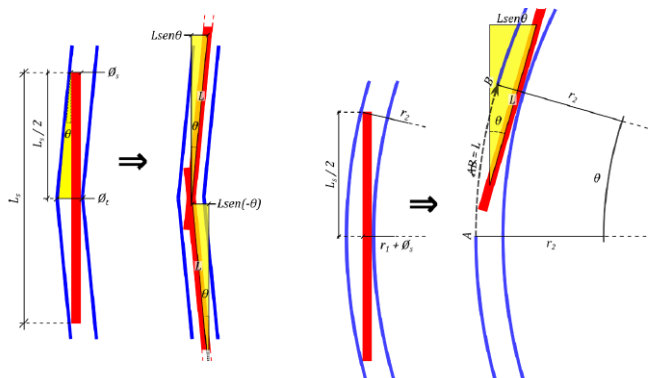
Pode ainda ser traçado um gráfico comparando as somas de verificação para conjuntos de dados subsequentes com as somas iniciais (valores incrementais), com o objetivo de eliminar a assinatura do tubo e revelar apenas as alterações nas somas de verificação [4].

3.2.2 Desvio acumulado (posição absoluta/perfil)

O gráfico do desvio acumulado (também denominado “posição absoluta ou perfil”), permite identificar [9]:

- a inclinação máxima do tubo, informação importante pois o erro nas medidas cresce com a inclinação. O furo para a instalação do inclinômetro deve ser o mais vertical possível, preferencialmente com até 1° de inclinação em relação à vertical [5];

- a inclinação máxima do tubo, uma vez que existe uma inclinação máxima possível de ser lida com a sonda ($\pm 30^\circ$ para as sondas da Geokon); alterações significativas de inclinação, que podem potencializar a ocorrência de erros, como mostrado na FIGURA 6.



1

FIGURA 6 – Variações bruscas na geometria do tubo, que dificultam a leitura e potencializam a ocorrência de erros (extraído de Coimbra [10]).

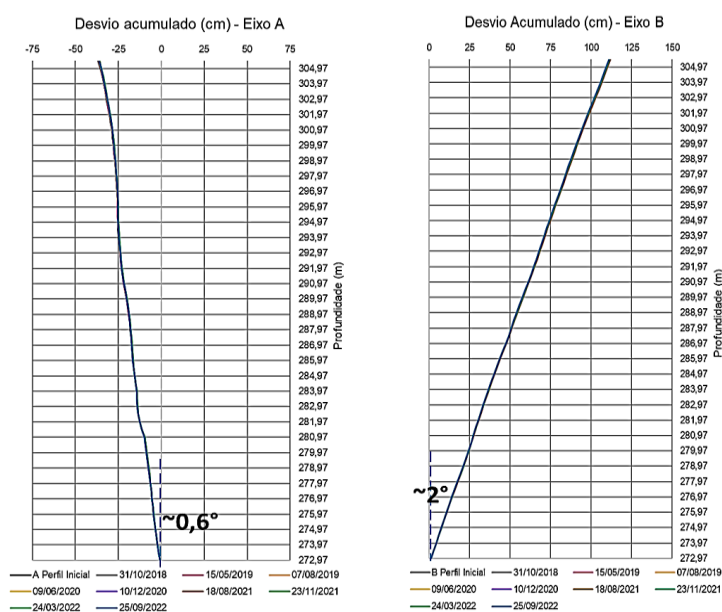


FIGURA 7– Perfil do IN-03 da UHE Sinop, mostrando a inclinação do tubo nas direções A e B.

3.2.3 Deslocamentos

Os deslocamentos medidos consideram a diferença entre a posição atual e a posição inicial do tubo, e são analisados por meio dos gráficos de:

- **Deslocamento Acumulado**, que exibe a deformação lateral acumulada ao longo da profundidade e permite identificar facilmente os deslocamentos de cisalhamento, que aparecem abruptos uma vez que a escala horizontal não é proporcional à escala vertical;

- **Deslocamento Incremental**, que exibe o movimento em cada intervalo de leitura. Um pico indica um movimento significativo e o crescimento no pico indica movimento contínuo;
- **Deslocamento x Tempo**, que explicita a taxa de movimentação. Uma inclinação acentuada mostra movimento de aceleração. Assim que for identificada uma zona de deslocamento, este tipo de gráfico deve começar a ser traçado para definição da taxa de deslocamento.

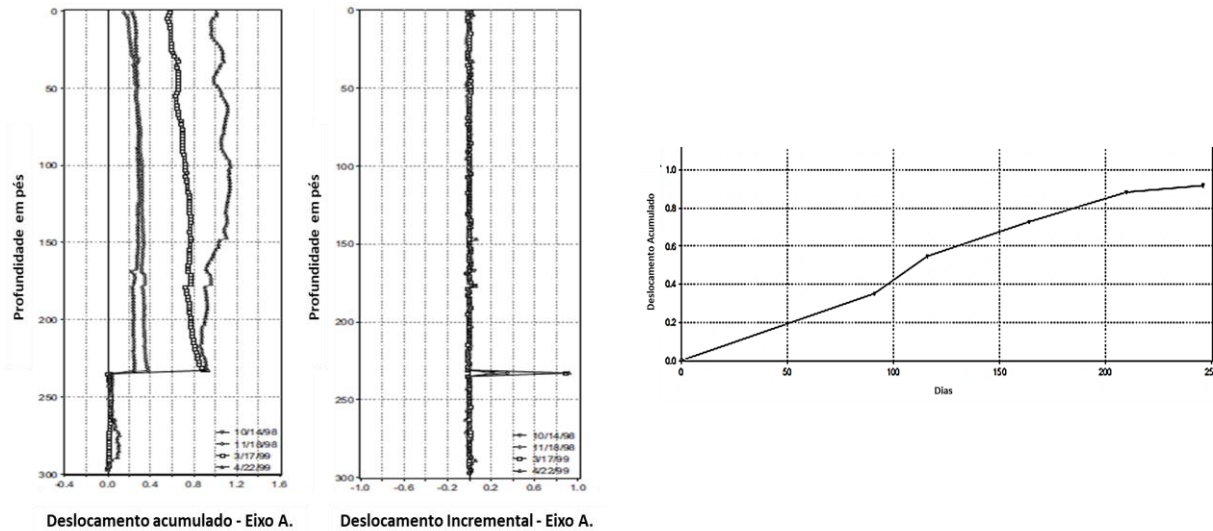


FIGURA 8 - Gráfico de Deslocamento Acumulado, de Deslocamento Incremental e de Deslocamento x Tempo, adaptado de Slope Indicator [11].

4. MONITORAMENTO DA OMBREIRA DIREITA DA CASA DE FORÇA

Este talude é monitorado pelos inclinômetros IN01, 03 e 04, instalados nas posições indicadas na FIGURA 9.



FIGURA 9 – Posição de instalação dos inclinômetros na ombreira direita.

Os três inclinômetros (IN-01, 03 e 04) possuem inclinação máxima aproximada do furo de 3°, ainda dentro da faixa considerada adequada, e primeiro tubo ancorado em

rocha. Os checksums são adequados e mantêm a mesma geometria nas diversas campanhas de leitura, ou seja, a “assinatura do tubo” é mantida ao longo do tempo, confirmando a qualidade das leituras.

O IN-01 apresenta desvio na perfuração do trecho inferior, o que talvez possa ser justificado pela presença do contato meta-argilito/meta-arenito e um extrato de material com baixo RQD. Os deslocamentos medidos no topo do tubo praticamente se encontram dentro da faixa de precisão do instrumento nas direções dos eixos A e B e não trazem preocupação de movimentação. O deslocamento indicado na el. 278,21 m deve se justificar pela mudança brusca na inclinação do furo neste ponto, gerando erro de profundidade, uma vez que não há tendência de deslocamento residual crescente nesta profundidade, como mostrado na FIGURA 10.

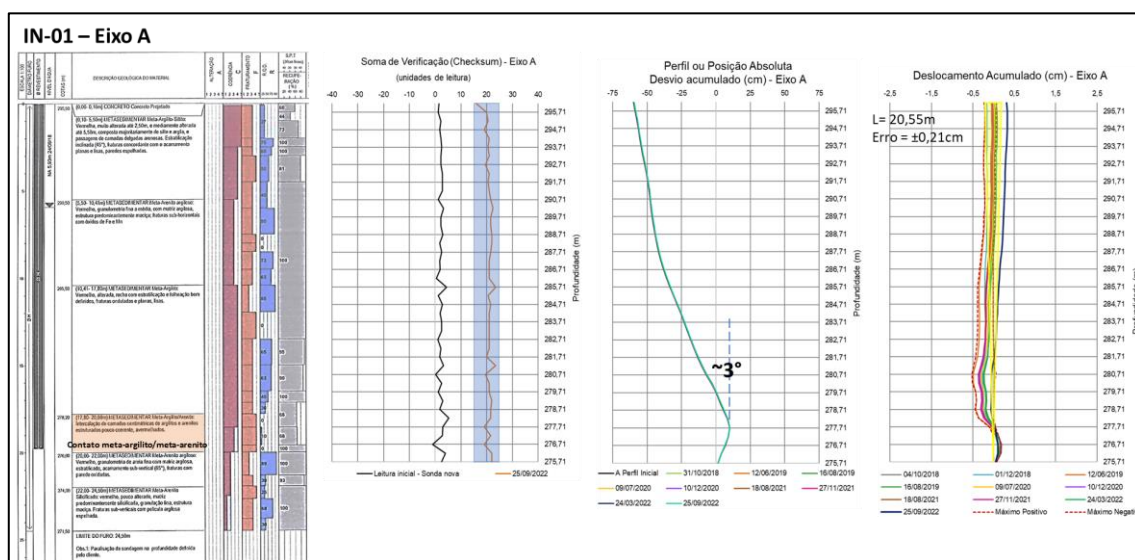


FIGURA 10 – Gráficos de análise dos deslocamentos do Eixo A do IN-01.

Para os INs-03 e 04 é medido um pico de deslocamento unitário nas proximidades da el. 287,00 m para os dois instrumentos, mais nítida para o IN-04, cuja evolução deve ser acompanhada. Nesta elevação, o IN-03 atravessa o meta-arenito silicificado e o IN-04 o meta-siltito com fraturas subverticais e planas, de acordo com os logs de instalação dos instrumentos. Cabe observar que os deslocamentos são muito reduzidos e que o gráfico de Deslocamento x Tempo para o IN-04 indica tendência de estabilização dos deslocamentos a partir de 2022.

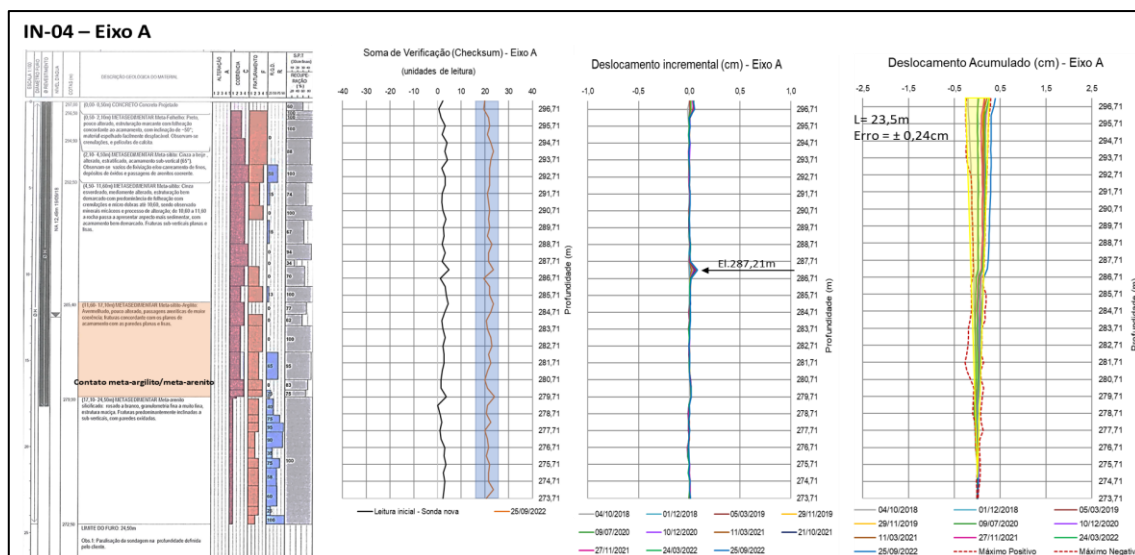


FIGURA 11 – Gráficos do eixo A do IN-04, com destaque para deslocamento incremental na el. 287,21 m.

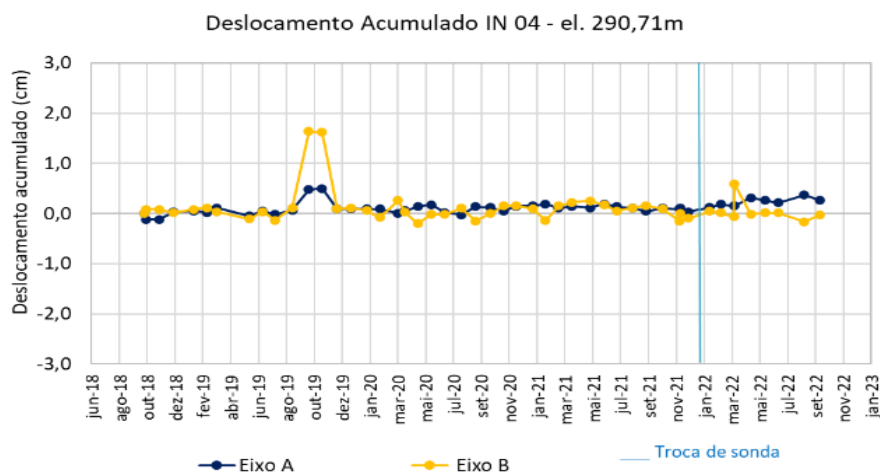


FIGURA 12 – Deslocamento ao longo do tempo na el.290,71m do IN-04, para verificação da existência de deformações residuais crescentes ao longo do tempo.

5. MONITORAMENTO DO TALUDE DO CANAL DE FUGA

O talude direito do canal de fuga é monitorado pelos inclinômetros INs-05, 02, 06 (no trecho do talude com ancoragens), 07 e 08, de montante para jusante respectivamente, como mostrado na FIGURA 13.

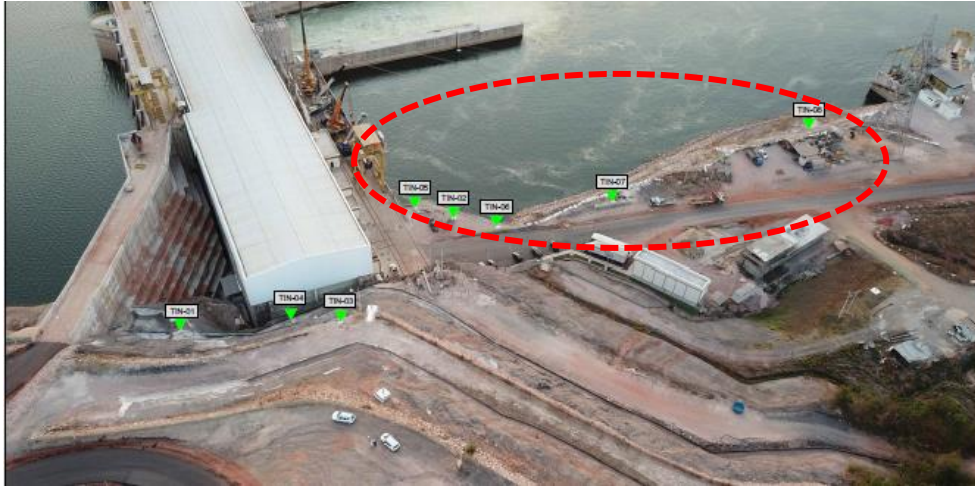


FIGURA 13 – Posição de instalação dos inclinômetros no talude do canal de fuga.

Os inclinômetros instalados no talude direito do canal de fuga mostram deslocamentos estáveis, sem a indicação de formação de superfície de ruptura. Apenas o IN-02 indica deslocamentos na direção do Eixo B com amplitude bem maior do que os demais inclinômetros e será discutido separadamente no item 6 deste artigo.

Para os inclinômetros 05, 06, 07 e 08, os gráficos de Checksum, verticais, sem picos anômalos e semelhantes ao longo do tempo, demonstram a boa qualidade das leituras. Os perfis dos tubos (gráficos de desvio acumulado) mostram inclinações dos tubos inferiores a 2,5° (maior valor para o IN-08). Os deslocamentos acumulados medidos apresentam pequenas variações sazonais, praticamente dentro da faixa de precisão do sistema de medição, como exemplificado para o IN-06 na FIGURA 14.

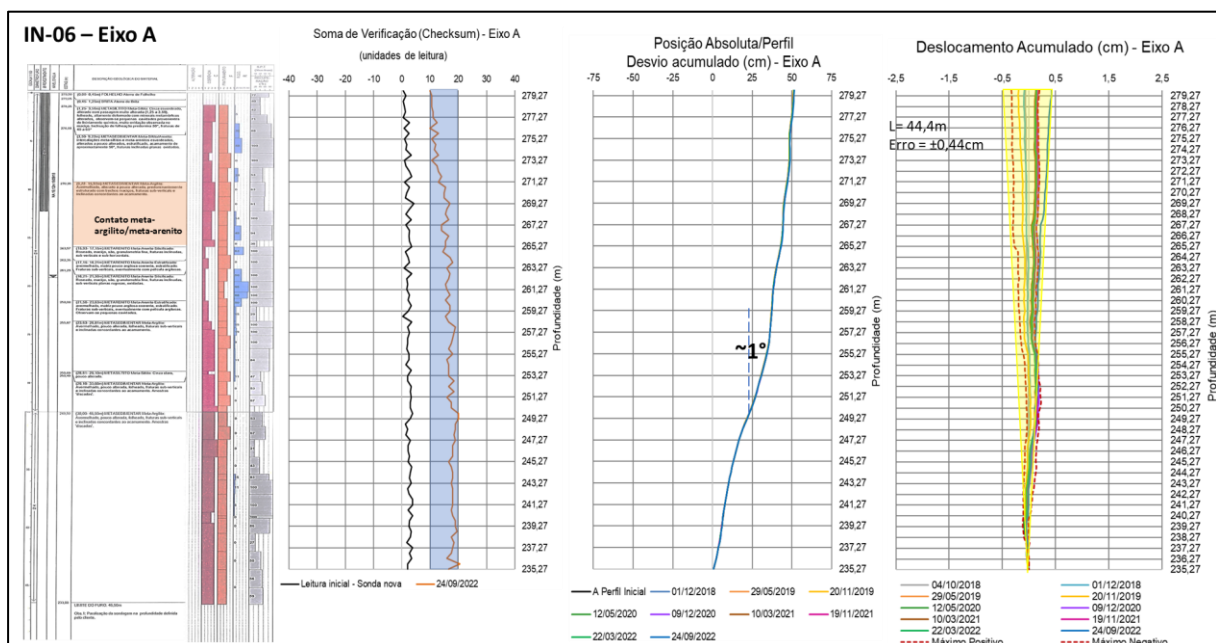


FIGURA 14 – Gráficos de análise dos deslocamentos no Eixos A do IN-06.

6. PROBLEMAS OBSERVADOS

O inclinômetro IN-02 sempre mediu deslocamentos anômalos e muito superiores aos demais inclinômetros instalados na UHE Sinop. Os gráficos de desvio acumulado permitem verificar que este instrumento foi instalado em furo de sondagem com ângulo de inclinação muito superior ao indicado. Abaixo da el. 250,19 m, a inclinação na direção do Eixo A supera a faixa de leitura da sonda, que é de 30°. Isto levou à exclusão das leituras do trecho inferior do IN-02, na época da instalação, traçando o gráfico como se o instrumento estivesse ancorado na el. 250,19 m.

No entanto, como pode ser observado na FIGURA 15, a inclinação ainda é muito acentuada até a el. 269,10 m (25°) e até a el. 266,10 m (15°). Segundo Coimbra [9], o erro do método de cálculo convencional (considerando os desvios isoladamente nas direções A e B) é desprezível apenas para inclinações de até 5°. Os fabricantes de inclinômetros também recomendam inclinações reduzidas, para não comprometer a precisão das medidas.

De fato, pode ser verificada uma melhoria significativa do checksum acima da el. 269,19 m em ambas as direções, ainda melhor acima da el. 266,19 m, a partir da qual a inclinação do tubo é inferior a 10°.

Desta forma, como a inclinação do furo do inclinômetro é muito superior às orientações do fabricante, o erro nas medidas praticamente impede a análise dos dados em termos quantitativos.

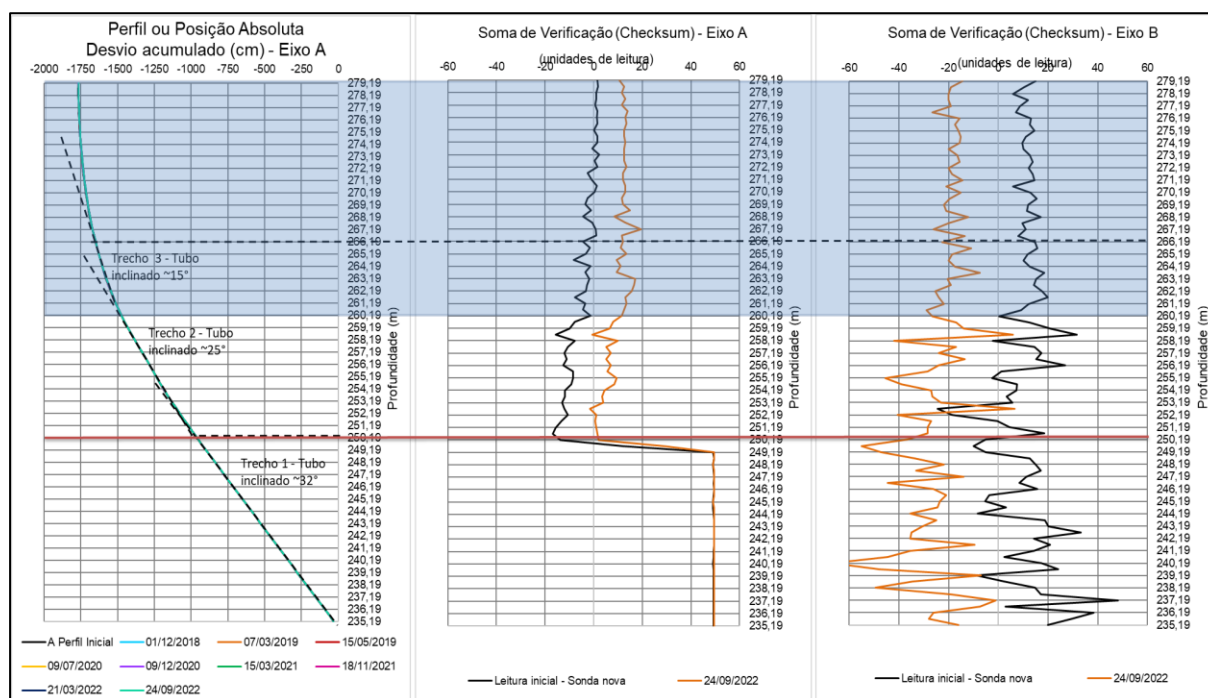


FIGURA 15 – Inclinação da perfuração do furo do IN-02 e Checksums para os eixos A e B.

Soma de Verificação (Checksum) - Eixo A
(unidades de leitura)

Posição Absoluta/Perfil Desvio acumulado (cm) - Eixo A

Deslocamento Acumulado (cm) - Eixo A

$L = 32,5m$
 $Erro = \pm 0,33cm$

$\sim 1,5^\circ$

— Leitura Inicial - Sonda nova — 24/09/2022

— A Perfil Inicial — 31/10/2018 — 01/12/2018 — 24/05/2019 — 31/10/2018 — 01/12/2018 — 29/06/2019 — 20/11/2019 — 09/07/2020 — 09/12/2020 — 15/03/2021 — 20/11/2021 — 09/07/2020 — 22/03/2022 — 24/09/2022 — 24/09/2022

--- Máximo Positivo --- Máximo Negativo

7. CONCLUSÕES

o importantes no mo

8. PALAVRAS-CHAVE

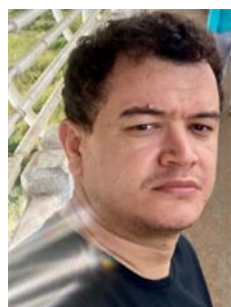
, Instrumentação, Inclinação

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERTECHNE (2015) - “Ruptura Parcial do Talude Direito Hidráulico do Canal de Fuga e da Casa de Força”. Relatório Técnico.
- [2] CARIM, A.L.C. COSTA, D.P.C., SOUZA, N.P., FUSARO. T.C. (2019). “Medição de Deformações com Inclínômetros na (re)Instrumentação de Barragens”. XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB, Salvador.
- [3] GREEN, G.E., MIKKELSEN, P. E. (1988) - “Deformation Measurements with Inclinometers”. Transportation Research Record. 1169, TRB, National Research Council, Washington D.C.
- [4] SLOPE INDICATOR (2001) - “Inclinometer Course Booklet”. Disponível em <<https://durhamgeo.com/services/inclinometer-course-syllabus/coursebooklet/>>. Acesso em 24/02/2019.
- [5] RST (2023) – “Digital MEMS Inclinometer System”. Disponível em: <<https://rstinstruments.com/product/digital-inclinometer-system/>>. Acesso em 30/04/2023.
- [6] GEOKON (2018) – “Instruction Manual. Model GK-604D. Inclinometer Readout Application. Appendix F. Disponível em: <https://www.geokon.com/content/manuals/GK604D_Digital_Inclinometer_System.pdf>. Acesso em 05/05/2023.
- [7] GEOKON (2016) – “6100 MEMS Series Inclinometer Probe”. Disponível em: <https://www.geokon.com/content/manuals/6100_MEMS_Inclinometer_Probe.pdf>. Acesso em 05/05/2023.
- [8] MIKKELSEN, P. E. (2003) – “Advances in Inclinometer Data Analysis”. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway.
- [9] CHOQUET, P. (2022) – “Installation and Analysis of Inclinometers in Dams”. CBDB Short Course, Belo Horizonte, Brazil.
- [10] COIMBRA, L.C.F. (2019). “Uma perspectiva operacional sobre a aplicação de inclinômetros no âmbito da geotecnia”. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.
- [11] SLOPE INDICATOR (2001) - “Inclinometer Course Booklet”. Disponível em <<https://durhamgeo.com/services/inclinometer-course-syllabus/coursebooklet/>>. Acesso em 24/02/2019.

**Rafael BRANCO**

Engenheiro Agrimensor/Civil pelas UNESC/SC e UNIC/MT, com mais de 15 anos de experiência em construções de barragens. Atuou na ALUPAR por 7 anos como engenheiro chefe na implantação das usinas no RS, PE e AP e como Engenheiro Inspetor N2 na implantação da casa de força da Refinaria Abreu e Lima (Petrobras). Atualmente responsável técnico pela Segurança de Barragens e Manutenção Civil da UHE Sinop.

**Edgar Alves RAMOS**

Técnico Edificações pelo IESB/RO com extensão em Geotecnia Ambiental pela Única/MG. Com mais de 10 anos de experiência em implantações de UHEs e UTEs, nas áreas do controle tecnológico dos materiais, manutenção civil e segurança de barragens. Participou dos projetos da UHE Jirau, UHE Santo Antônio, UHE São Manoel e UTE GNA I. Atualmente faz parte da equipe de manutenção da UHE Sinop pela EDF NF, na Civil e Segurança de Barragem.

**Mariana Francisca Ferreira SILVA**

Engenheira Civil pela UFMG (2020) e atua na Enemax tanto na área de Hidrotecnia e Recursos Hídricos, como no time de Segurança de Barragens. Tem experiência na realização de Revisão Periódica de Segurança (RPS), Inspeção de Segurança Regular (ISR), Análises de Instrumentação, Estudos hidrológicos e hidráulicos.

**Teresa Cristina FUSARO**

Engenheira Civil pela UFMG e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP, com mais de 35 anos de experiência na área de segurança e manutenção de barragens. Atuou na Cemig como engenheira (1986 a 2003) e como gerente de Segurança de Barragens e Manutenção Civil (2004 a 2013). Sócia-proprietária da Fusaro Eng^a e Consultoria Ltda, atualmente atua como consultora nas áreas de inspeção, instrumentação e análises de riscos de barragens.