

Aplicação prática da técnica do inverso da velocidade na previsão de ruptura global de talude

Eduardo Jose Diniz

Gerente Técnico, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, eduardo.diniz@hexagon.com

Otávio Pataro Sales

Supervisor de Monitoramento, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, otavio.sales@hexagon.com

Gustavo Gomes Rocha

Analista de Monitoramento, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, gustavo.rocha@hexagon.com

Marcus Vinicius dos Santos

Analista de Monitoramento, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, marcus.santos@hexagon.com

RESUMO: Os radares interferométricos terrestres são poderosas ferramentas no monitoramento para mitigação e gerenciamento de risco em estruturas geotécnicas com danos potenciais associados. Os dados de deslocamentos coletados em tempo real apontam áreas e tendências de movimentação que seriam impossíveis de serem detectadas e acompanhadas somente por inspeção visual. As aquisições realizadas por essa instrumentação podem ser manipuladas para se obter outros parâmetros que irão auxiliar na interpretação do comportamento de uma área em análise, como velocidade, aceleração e o inverso da velocidade. Esse último conceito se torna crucial em determinados casos, onde é possível prever o tempo de falha de uma região com uma precisão confortável para a tomada de decisão. A utilização do recurso estatístico de média móvel assim como o tamanho da área a ser considerada, auxilia na visualização dos dados e impacta diretamente no resultado da regressão, atrasando ou adiantando o tempo previsto (ToF) de ruptura. Esse estudo busca realizar uma análise quantitativa entre os diferentes valores de médias móveis de velocidade aplicadas ao parâmetro do inverso da velocidade e suas eficácias na previsão do tempo de falha ocorrido.

PALAVRAS-CHAVE: Radar, interferometria, monitoramento, previsão, ruptura

ABSTRACT: Ground-based interferometric radars are powerful monitoring tools for risk mitigation and management in geotechnical structures with associated potential damages. The displacement data collected in real time points out areas and movement trends that would be impossible to detect and monitor only through visual inspection. The acquisitions made by this instrumentation can be manipulated to obtain other parameters that will assist in interpreting the behavior of an area under analysis, such as velocity, acceleration, and the inverse velocity. This last concept becomes crucial in certain cases, where it is possible to predict the time of failure for a region with comfortable accuracy for decision making. The use of statistical resource such as moving average as well as the size of the area to be considered assists in data visualization and directly impacts the regression result, delaying or advancing the predicted time of failure (ToF). This study seeks to carry out a quantitative analysis between the different values of moving average velocity windows applied to the inverse velocity parameter and their effectiveness in predicting the time of failure.

KEYWORDS: Radar, interferometry, monitoring, prediction, failure

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de obras geotécnicas é de suma importância para o gerenciamento da segurança dessas construções, pois, através dele, é que se pode obter as informações relevantes, como posições de nível d'água, poropressões, deslocamentos, recalques, condição física-estrutural e outros dados essenciais para avaliar a estabilidade do empreendimento. Este acompanhamento, não apenas proporciona um entendimento das condições atuais, mas também antecipa possíveis problemas, permitindo a implementação de medidas preventivas. Além disso, valida as premissas utilizadas nos projetos, fornece dados para ajustes nas operações e projetos existentes, e orienta o desenvolvimento de novos empreendimentos similares.

Dentro do contexto do monitoramento de deslocamentos superficiais em cavas de mineração, um dos principais equipamentos utilizados são os radares terrestres. O Radar Terrestre SAR (*Sinthetic Aperture Radar*) mapeia a evolução dos deslocamentos, para obter um melhor conhecimento do comportamento do maciço monitorado, é utilizado para o monitoramento dos deslocamentos superficiais. É um equipamento composto por uma antena emissora e uma antena receptora que deslizam por um trilho de 2 a 3 metros de comprimento (**IBIS-FM**), ou, rotacionando através de um único eixo 360 graus (**ArcSAR**). Comumente, os dados do radar são processados usando uma técnica interferométrica, que fornece um mapa de deslocamento distribuído espacialmente (Monserrat et al., 2014). O princípio da interferometria é a medição da diferença de fase, $\Delta\phi$, entre duas medidas consecutivas. $\Delta\phi$ é proporcional ao deslocamento de acordo com a equação 1 abaixo:

$$\Delta R = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi} \quad (1)$$

onde ΔR é o componente de deslocamento paralelo à linha de visada (LOS) e λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda mais comumente adotado varia entre 10 e 20 mm, assim o equipamento pode detectar deslocamentos milimétricos. No entanto, como a fase é periódica entre 0 e 2π , $\Delta\phi$ é afetada por ambiguidade de fase e, portanto, um Radar Terrestre SAR só pode medir deslocamentos menores que $\lambda/2$ entre duas medidas sucessivas.

No presente artigo o radar SAR utilizado foi o **ArcSAR Lite** ($\lambda=17,2$ mm), e o processamento de dados foi realizado no Software *Guardian*®. Este tipo de radar é bastante utilizado para detectar deslocamentos em estruturas geotécnicas, conseguindo assim mapear de modo mais preciso as áreas estáveis e as áreas não estáveis. Uma vez que este radar está configurado para realizar aproximadamente 30 aquisições a cada 1 hora (um ciclo de leitura, aproximado, a cada 2 minutos), e apresenta alguns parâmetros pré-definidos como o deslocamento máximo detectável entre duas aquisições (4,38 mm) e a acurácia do equipamento (0,01 mm), que é o deslocamento mínimo detectável pelo radar entre duas aquisições, as velocidades máximas e mínimas mensuráveis podem ser encontradas através das equações (2 e 3) onde NA equivale ao número de aquisições em 1 hora:

$$V_{min} = 0,1 \times NA \cong 0,3mm/h \quad (2)$$

$$V_{max} = 4,38 \times NA \cong 131,40mm/h \quad (3)$$

Com aplicação do SAR, é possível realizar a previsão de rupturas de taludes, sejam globais ou de bancadas. Sharon e Eberhardt (2020) já destacam em sua revisão que a previsão de comportamentos futuros depende de diversos fatores, tais como a atividade de mineração e fatores climáticos. Ambos os elementos podem resultar em acelerações adicionais, com vibrações sísmicas induzidas, alteração de poropressões ou até mesmo iniciar condições de congelamento que podem retardar o movimento. Existem alguns métodos na literatura utilizados para prever estes comportamentos, o método convencional é o do “Inverso da Velocidade” (IV), proposto por Fukuzono (1985), baseado na análise de dados de monitoramento de deslocamento, tornou-se um método eficaz para resolver este problema porque é fácil de executar e os resultados de previsão são geralmente aceitáveis. Praticamente, algumas limitações como ruído instrumental aleatório, ruído ambiental e o erro de medição são fatores onipresentes que dificultam a confiabilidade da previsão.

A aplicação do conceito do “Inverso da Velocidade” na previsão de rupturas de taludes foi inicialmente apresentada por Fukuzono (1985), a partir de estudos realizados no Centro Nacional de Pesquisa para

Prevenção de Desastres no Japão, utilizando-se de dados obtidos por ensaios e instrumentação de laboratório em simulações de deslizamentos de terra induzidos por precipitação.

Por meio da plotagem de curvas do inverso da velocidade das simulações, Fukuzono observou que os valores sempre se aproximavam de zero no momento da ruptura e identificou três tipos de curvas características, apresentadas na Figura 1, e orientadas pela equação (4):

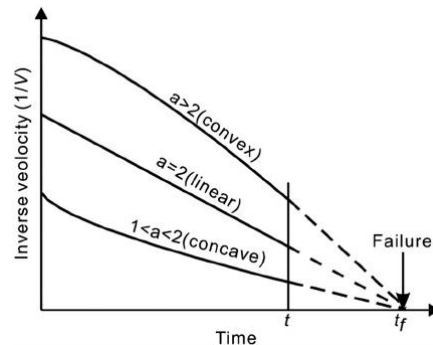


Figura 1. Inverso da velocidade em função do tempo, Fukuzono (1985).

$$\frac{1}{V} = [A(a - 1)]^{1/a-1} (t_f - t)^{1/a-1} \quad (4)$$

Nos cenários lineares onde $a=2$, tem-se que o momento da ruptura ocorre no ponto onde a extensão da reta toca o eixo da abscissa, já nos casos em que $a \neq 2$, o ponto t_f é obtido a partir de reta tangente às curvas.

O parâmetro da velocidade é sabidamente definido em função do deslocamento e de um dado período, de acordo com a equação (5):

$$V = \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

Sendo classificada como velocidade instantânea, aquela onde o dt é igual ao intervalo entre duas aquisições consecutivas ou velocidade mediada, quando o dt é dado pelas janelas de médias móveis, que podem variar de 00:00 a 23:59.

Consequentemente, a mediação da velocidade resultará também na mediação do inverso da velocidade na mesma janela aplicada, uma vez que é dado pela equação 6:

$$IV = \frac{1}{V} \quad (6)$$

É importante destacar que o inverso da velocidade nunca será de fato igual a zero, pois teoricamente seria necessária uma velocidade infinita para tal ($V \rightarrow \infty$), e em um projeto real de monitoramento há diretrizes e configurações que devem ser atendidas e que terão impacto direto na velocidade máxima mensurável pelo radar, além das próprias limitações do equipamento. No caso em estudo, a velocidade máxima que pode ser medida pelo radar é de 86,36mm/h, logo, o valor mínimo possível para o inverso da velocidade será dado por:

$$IV = \frac{1}{86,36} = 0,01 \text{ h/mm} \quad (7)$$

O método de proposto por Fukuzono (1985) foi originalmente desenvolvido para avaliação e previsão de tendências a curto prazo. No entanto, Rose e Hungr (2007) ao analisarem dados de monitoramento de taludes de algumas falhas, sugeriram que o método do “inverso da velocidade” também poderia ser aplicado a tendências de longo prazo, por meio de regressão linear. Em seu estudo Rose e Hungr (2007) utilizaram um coeficiente de determinação de ajuste R^2 de 99% para realizarem a regressão.

Nos projetos atuais de monitoramento que se utilizam de Radares Terrestres há disponibilidade de dados com baixo intervalo de tempo entre si (no caso em estudo, tem-se um novo dado adquirido e processado a cada 3 minutos), tornando processo de plotagem e regressão das curvas de tendência altamente dinâmicos e mutáveis.

A técnica do “Inverso da velocidade” conforme utilizada no estudo de Fukuzono (1985), apresenta limitações devido a sua dependência de um único ponto ou uma série de pontos para prever o comportamento de uma determinada área. Como resultado, a análise pode sofrer incerteza e ambiguidade nas estimativas de tempo até a falha (ToF), devido a heterogeneidade das encostas, e a possibilidade de interpretação equivocada dos modos de falha. Nesse contexto, Newcomen e Dick (2016) desenvolveu uma metodologia de análise que envolve a seleção criteriosa de uma área de estudo combinada com a aplicação do método do “Inverso da Velocidade” para determinar o ToF.

O procedimento proposto por Newcomen e Dick (2016) consiste em identificar o pixel com a maior deformação acumulada e, em seguida, selecionar uma área que contenha os pixels com 50% ou mais deste valor de deformação pré-estabelecido. Após a seleção dessa área, o método do “Inverso da Velocidade” é aplicado para determinar o tempo até a falha (ToF). Essa abordagem visa mitigar as limitações da técnica tradicional, permitindo uma análise mais precisa e confiável do comportamento da área em questão.

Toda modelagem numérica deste estudo foi realizada diretamente a partir do software *Guardian*® por meio de suas funções nativas, que ao ser imputado com os dados de deslocamentos obtidos pelo Radar *ArcSAR*® em campo, disponibiliza graficamente e numericamente os parâmetros da velocidade, inverso da velocidade, aceleração, além de amplitude de sinal e do próprio deslocamento em si.

Neste trabalho, o método do “Inverso da Velocidade” proposto por Newcomen e Dick (2016) é aplicado em séries temporais de velocidade de um evento de ruptura global em uma operação mineira com o propósito de discutir retrospectivamente as previsões de falhas. Para tanto este trabalho se fundamentou na revisão detalhada das literaturas existentes, buscando discutir se a metodologia existente se adequa ao estudo deste caso específico, além disso, buscou-se identificar se a inclusão de possíveis variáveis a esta metodologia acarretaria benefícios significativos. Essa abordagem visa discutir a compreensão e a capacidade de previsão dos eventos de deslizamento, contribuindo para a segurança e a eficiência das operações mineiras. Além disso, os modelos de filtro de suavização podem fornecer mais precisão e informações úteis sobre o provável tempo de falha.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo envolveu o uso do Software *Guardian*® para processamento dos dados do radar *ArcSAR* Lite. As análises foram realizadas em uma janela temporal de um dia, iniciando em 31/10/2022 às 23:00h e encerrando em 01/11/2022 às 23:00h, próximo ao evento de ruptura, visando identificar uma região com acúmulo de deslocamento.

Seguindo a abordagem estabelecida por Dick et al. (2015), foi identificado o pixel com a maior taxa de deslocamento, aproximadamente 710mm. Em seguida, foram delimitadas áreas que apresentavam 50% desse valor de deslocamento, além de áreas com 30%, 40%, 60%, 70% e 80% do valor absoluto máximo de deslocamento encontrado na janela temporal selecionada, para fins de comparação.

Posteriormente, o método do "Inverso da Velocidade" foi aplicado a todas as áreas, com um intervalo de regressão de 06:00h e um coeficiente de $R^2 \geq 0,99$, conforme utilizado por Rose e Hungr (2007). Além disso, foram testados valores de média móvel de velocidades de 03:00h, 04:00h e 05:00h. O objetivo é de comparar os tempos de falha (ToF) encontrados para cada área delimitada, a fim de verificar o impacto das diferentes configurações utilizadas nos resultados das previsões.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características do Projeto e da Estrutura Monitorada

O alvo do estudo se trata de um talude em uma mina de cobre localizada no hemisfério Norte. A estrutura tem em seu ponto mais elevado uma altura de cerca 150 metros, do pé até a crista, escalonada por 8 taludes nesse ponto, com inclinações variando de 40 a 55°.

O projeto foi iniciado no dia 12 de setembro de 2022, com monitoramento realizado por radar interferométrico terrestre de abertura sintética *ArcSAR*® instalado a uma distância média aproximada de 500 metros do maciço e acompanhado em regime 24/7 por equipe especializada através do software *Guardian*®.

O evento de ruptura em estudo ocorreu no dia 01/11/2022 às 23:22, estendendo-se por uma área aproximada de 10.233m² e movimentando um volume da ordem de centenas de metros cúbicos de material, englobando todas as bancadas da estrutura em uma ruptura do tipo rotacional.

3.2 Resultados

Durante o monitoramento da estrutura, foi observado um acúmulo de pixel em áreas inicialmente criadas, de maneira não criteriosa, as quais demonstram um comportamento progressivo. Notavelmente, os gráficos do Inverso da Velocidade para essas áreas apresentaram um comportamento linear ($a=2$), conforme referenciado por Fukuzono (1985).

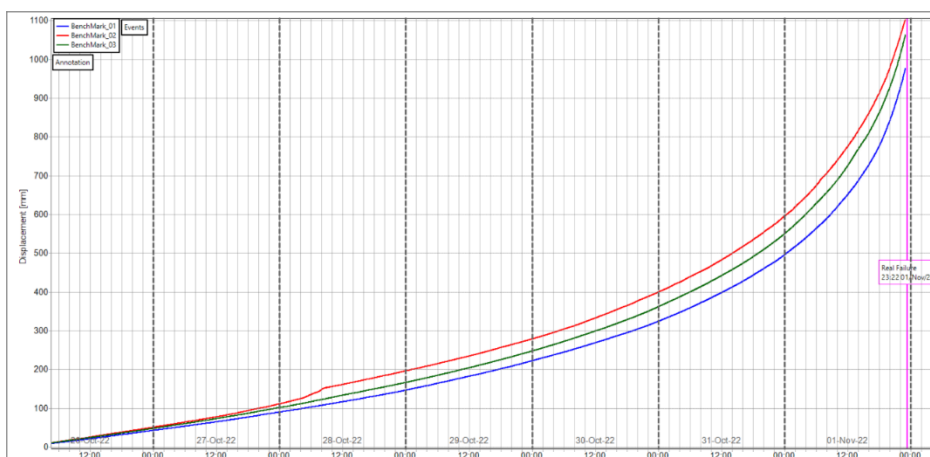


Figura 2. Gráfico de deslocamento das áreas antes do estudo.

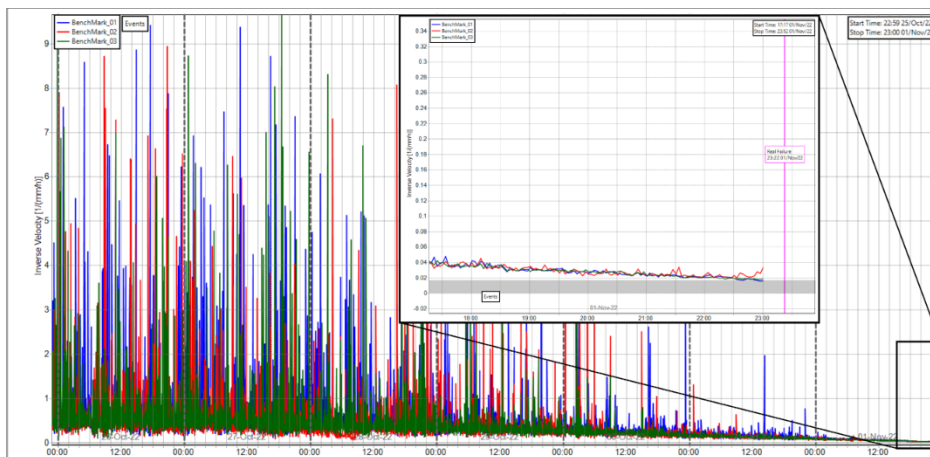


Figura 3. Gráfico do Inverso da velocidade das áreas antes do estudo.

Através do processamento dos dados no Guardian, foi possível verificar o pixel com o maior valor de deslocamento absoluto, o que permitiu a criação de áreas representando 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% do valor máximo de deslocamento absoluto. Abaixo se encontra a Tabela 1 com as áreas utilizadas e suas respectivas nomenclaturas.

Após a criação das áreas, foi realizado o método do “Inverso da Velocidade”, utilizando médias móveis de 03:00h, 04:00h e 05:00h, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 e um intervalo de regressão de 06:00h. Abaixo, as Figura 4 e Figura 5, apresentam exemplos dos gráficos do inverso da velocidade plotados com seus respectivos ToF. A Tabela 2 mostra as previsões (TOF) encontradas para todas as áreas juntamente com seus coeficientes de determinação (R^2). Na tabela, os valores indicados por um “x”, apontam os cenários onde não foi possível realizar uma regressão linear com os parâmetros configurados.

Tabela 1. Tabela com as áreas utilizadas no método do Inverso da Velocidade.


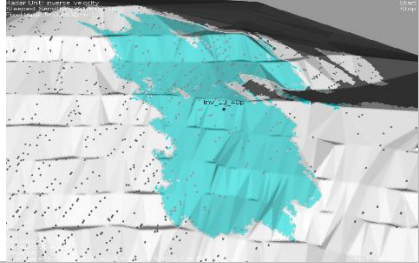
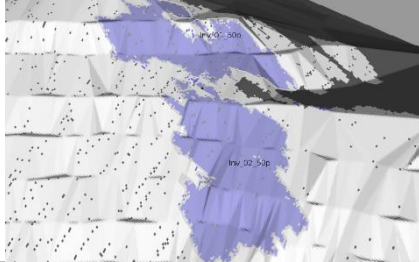
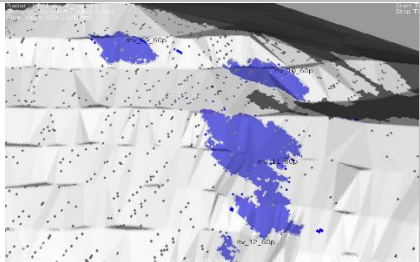
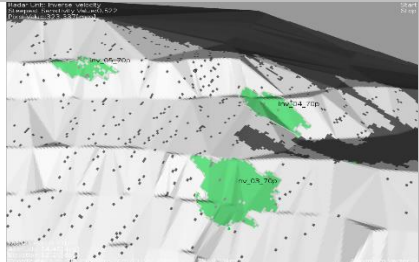
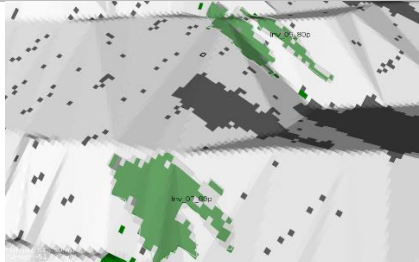
		
30% do valor máx. de Deslocamento (213mm)	40% do valor máx. de Deslocamento (284mm)	50% do valor máx. de Deslocamento (355mm)
		
60% do valor máx. de Deslocamento (426mm)	70% do valor máx. de Deslocamento (497mm)	80% do valor máx. de Deslocamento (568mm)



Figura 4. Gráfico do Inverso da Velocidade para as áreas de 50% com média móvel de 03:00.

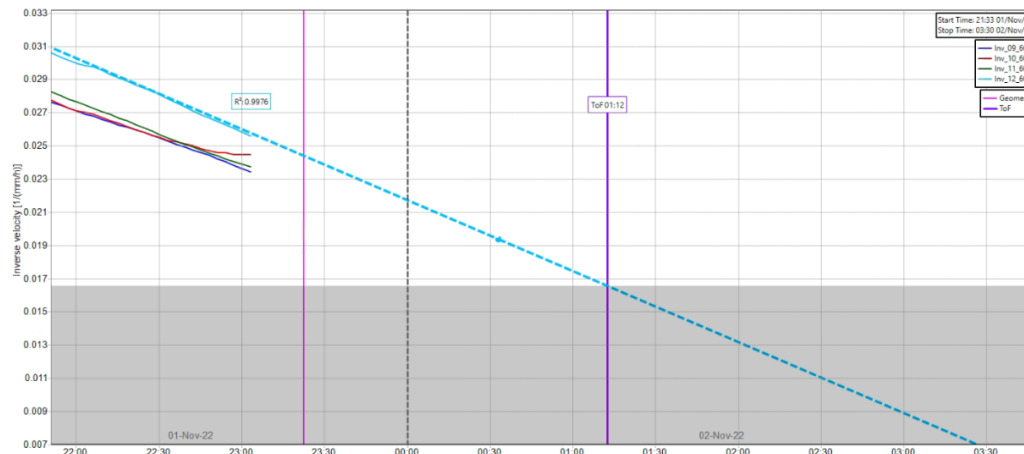


Figura 5. Gráfico do Inverso da Velocidade para as áreas de 60% com média móvel de 03:00.

Tabela 2. ToF das Áreas e suas respectivas Médias Móveis.

Nome da Área	Superfície (m ²)	Média Móvel 03:00		Média Móvel 04:00		Média Móvel 05:00	
		ToF	R ²	ToF	R ²	ToF	R ²
Inv_01_50p	1914,63	02/11/22 01:30	0,9927	02/11/22 01:50	0,9953	02/11/22 02:11	0,9971
Inv_02_50p	2695,72	02/11/22 01:35	0,9907	02/11/22 01:57	0,9942	02/11/22 02:18	0,9955
Inv_03_70p	457,57	X	X	X	X	X	X
Inv_04_70p	239,62	X	X	X	X	X	X
Inv_05_70p	141,06	X	X	X	X	X	X
Inv_06_80p	135,46	X	X	X	X	X	X
Inv_07_80p	152,24	X	X	X	X	X	X
Inv_08_80p	19,90	X	X	X	X	X	X
Inv_09_60p	366,21	X	X	X	X	X	X
Inv_10_60p	479,91	X	X	X	X	X	X
Inv_11_60p	1090,00	X	X	X	X	X	X
Inv_12_60p	51,82	02/11/22 01:12	0,9976	02/11/22 01:12	0,9976	02/11/22 01:52	0,9983
Inv_13_40p	6038,40	02/11/22 01:48	0,9946	02/11/22 02:10	0,9968	02/11/22 02:31	0,9979
Inv_14_30p	8723,38	02/11/22 02:04	0,9967	02/11/22 02:26	0,9982	02/11/22 02:48	0,9989
Inv_15_30p	152,10	02/11/22 02:27	0,9998	02/11/22 02:50	0,9997	02/11/22 03:13	0,9995

3.3 Discussão dos Resultados

Dentre os seis cenários possíveis de acordo com as premissas previamente apresentadas, foram comparados os tempos de ruptura obtidos com as variações das médias móveis de velocidade de 3, 4 e 5 horas. Para todos os casos, foram encontrados ToF após o evento, indicados nas Figura 6 e Figura 7 por “T+” seguidos do intervalo de tempo após a ruptura.

As médias móveis de velocidade de 03:00 apresentaram melhor desempenho na previsão da ruptura, com uma média de ToF de 02:34 além do evento.

Em termos de seleção de áreas, a Figura 7 indica que as áreas com 60% do deslocamento máximo resultaram em uma previsão mais aproximada do horário da ruptura, com uma média de 02:03 após o colapso. É válido destacar que entre as áreas com 60% de deslocamento máximo, somente uma delas atendeu à premissa do $R^2 > 0,99$, sendo a Inv_12_60p, que cobre uma superfície de somente 51,82m² de extensão, retratando 0,51% da área total afetada. Os dados em vermelho indicam os resultados dessa área com as variações das médias móveis de velocidade.

Em termos gerais, observa-se que o intervalo de tempo das previsões após a ruptura são diretamente proporcionais ao valor da média móvel de velocidade aplicada e inversamente proporcional ao valor de referência para seleção das áreas. Consequentemente, uma configuração ideal para previsão do ToF seria a seleção de áreas que contenham pixels com valores de deslocamento iguais ou superiores a 60% do pixel com a maior leitura de deslocamento identificada com aplicação de média móvel de três horas. No entanto, é prudente avaliar se a área utilizada é de fato representativa frente à movimentação observada.

Uma configuração utilizando as premissas de média móvel de velocidade de três horas e seleção de áreas com 50% ou mais do valor máximo do deslocamento ainda apresenta bons resultados de previsão (02:08 após ruptura no melhor cenário) além de melhor correspondência com a movimentação em andamento.

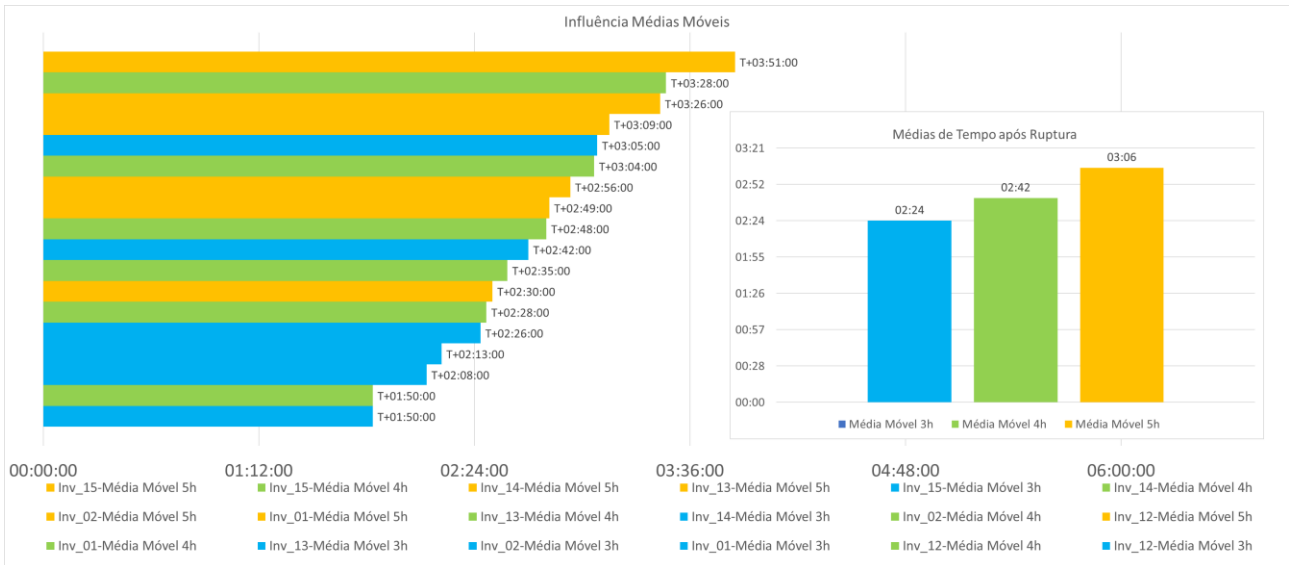


Figura 6. Distribuição dos ToF pela influência das médias móveis.

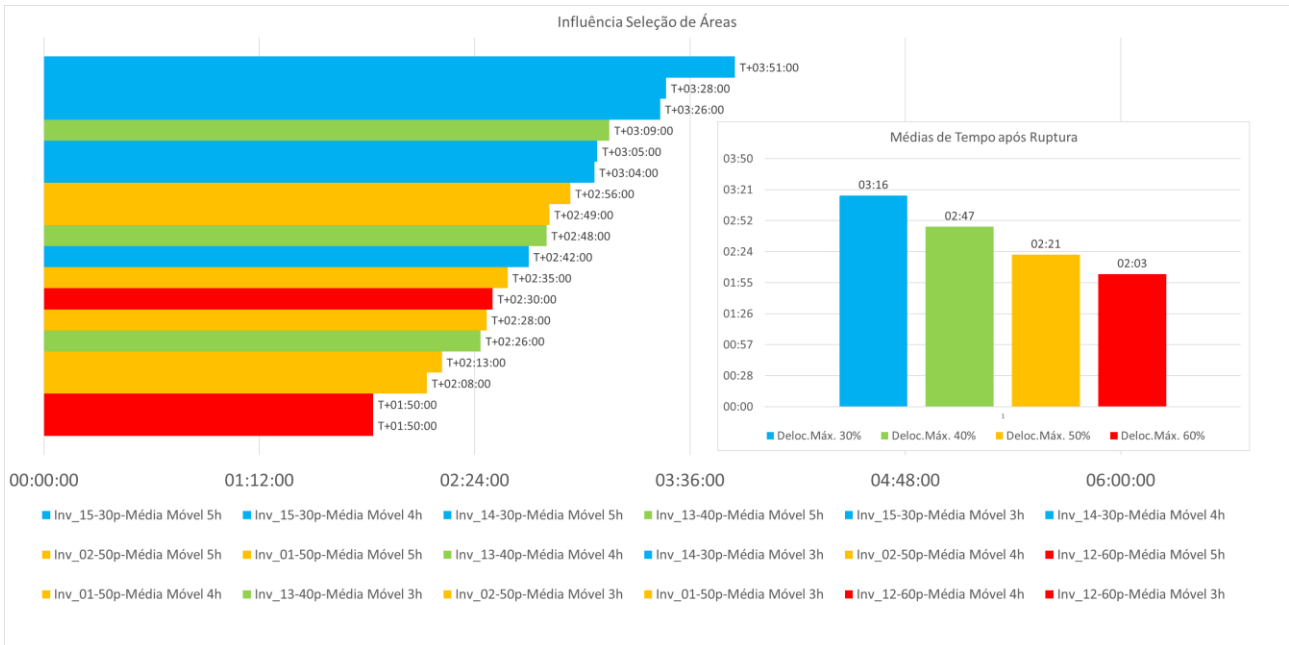


Figura 7. Distribuição dos ToF pela influência de seleção das áreas.

4 CONCLUSÕES

A técnica da aplicação da análise do inverso da velocidade, comumente utilizada para previsão de rupturas de taludes por meio de radares interferométricos, foi adaptada com base nos trabalhos de Newcomen e Dick (2016) e Rose e Hungr (2007), empregando a metodologia da criação da área e alcançando um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,99, respectivamente.

Essas adaptações e avaliações reforçam a eficácia da técnica de inverso da velocidade na previsão de rupturas de taludes, ressaltando a importância de sua aplicação em diferentes contextos de ruptura. De modo geral, os resultados demonstram e validam os estudos anteriormente apresentados, mostrando ser uma técnica prática de ser executada na previsão de taludes. Deve-se ressaltar a importância de checar se a técnica é aplicada em outros modos de rupturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Hexagon e ao time da *Radar & Monitoring Division* pelo apoio na publicação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fukuzono, Teruki. *A new method for predicting the failure time of slope*. In: Proceedings, 4th Int'l. Conference and Field Workshop on Landslides. 1985. p. 145-150.
- Monserat, O.; Crosetto, M.; Luzi, G. *A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 93, p. 40-48, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.001>>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- NEWCOMEN, W.; DICK, G. An update to the strain-based approach to pit wall failure prediction, and a justification for slope monitoring. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 116, n. 5, p. 379-385, 2016.
- Rose, Nick D.; Hungr, Oldrich. *Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 44, n. 2, p. 308-320, 2007.
- Sharon, R; Eberhardt, E (Ed.). *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. Csiro Publishing, 2020.