

Técnica A-DInSAR aplicada aos deslocamentos superficiais do setor GW da mina de Brucutu – Quadrilátero Ferrífero

A-DInSAR technique applied to the surface displacements of the GW sector of the Brucutu mine – Quadrilátero Ferrífero

Gabrieli Santos Boulhosa¹ , Marcos Eduardo Hartwig² , Adam Barros Fernandes³ 

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Avenida 24-A, 1515, CEP: 13506-900, Bela Vista, Rio Claro, SP, BR (gabrieli.boulhosa@gmail.com)

²Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Guararema, Alegre, ES, BR (marcoshartwig@gmail.com)

³Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Campinas, SP, BR (adambarrosgeo@gmail.com)

Recebido em 31 de dezembro de 2022; aceito em 14 de junho de 2023.

Resumo

A mina de Brucutu encontra-se na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, a aproximadamente 120 km a leste de Belo Horizonte, Minas Gerais. Nesse local, a empresa Vale S.A. opera uma das maiores minas de ferro do Brasil. O minério de ferro encontra-se alojado nos itabiritos e em corpos de hematita da Formação Cauê. Essas rochas têm diferentes comportamentos geomecânicos, visto que elas ocorrem em contatos com rochas intrusivas e encontram-se brechadas, intensamente foliadas e fortemente intemperizadas. Os taludes das cotas 1.030 a 1.000 m, do setor GW da cava de Brucutu, vem registrando instabilidades nos últimos anos. O presente estudo visou analisar os deslocamentos superficiais e discutir os prováveis fatores controladores. Utilizou-se a técnica Advanced Differential Radar Interferometry (A-DInSAR) a partir de imagens do sensor COSMO-SkyMed em modo StripMap para monitorar os deslocamentos. Os períodos abrangidos para o desenvolvimento do presente trabalho foram de junho de 2018 a agosto de 2019 e de junho de 2019 a novembro de 2020. As imagens utilizadas foram fornecidas e processadas pela empresa Telespazio Brasil. Foram utilizadas também ortoimagens provenientes de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), dados geológicos-geotécnicos de campo e dados pluviométricos. Os resultados obtidos por meio do monitoramento A-DInSAR mostram que foram identificadas taxas de deslocamento consideráveis (até -76,3 mm/ano) no período chuvoso. As instabilidades presentes na área de estudo são condicionadas pelos seguintes fatores: contato entre rochas intrusivas (IN) e itabirito friável (IF); atitude desfavorável da foliação; e índices pluviométricos elevados que produzem o desmantelamento (erosão) da face dos taludes.

Palavras-chave: Precipitação; Instabilidades; Taludes de escavação.

Abstract

The Brucutu mine is in the northeast portion of the *Quadrilátero Ferrífero*, in the municipality of São Gonçalo do Rio Abaixo, approximately 120 km east of Belo Horizonte, Minas Gerais. In this place, Vale S.A. operates one of the largest iron ore mines in Brazil. Iron ore is housed in itabirite and hematite bodies of the Cauê Formation. These rocks have different geomechanical behaviors, since they occur in contact with intrusive rocks and are breached, intensely foliated and strongly weathered. The slopes of the quotas 1,030 to 1,000, of the GW sector of the Brucutu pit, have been registering instabilities in recent years. The present study aimed to analyze the superficial displacements and discuss the probable controlling factors. The Advanced Differential Radar Interferometry (A-DInSAR) technique was used from images of the COSMO-SkyMed sensor in StripMap mode to monitor the displacements. The periods covered for the development of this work were from June 2018 to August 2019 and from June 2019 to November 2020. The images used were provided and processed by the company Telespazio Brasil. Orthoimages from Remotely Piloted Aircraft (RPA), field geological-geotechnical data, and rainfall data were also used. The results obtained through A-DInSAR monitoring show that considerable displacement rates (up to -76.3 mm/year) were identified in the rainy season. The instabilities present in the study area are conditioned by the following factors: contact between intrusive rocks (IN) and friable itabirite (FI); unfavorable attitude of foliation; and high rainfall rates that produce the dismantling (erosion) of the slope face.

Keywords: Rainfall; Slope instabilities; Mine slopes.

INTRODUÇÃO

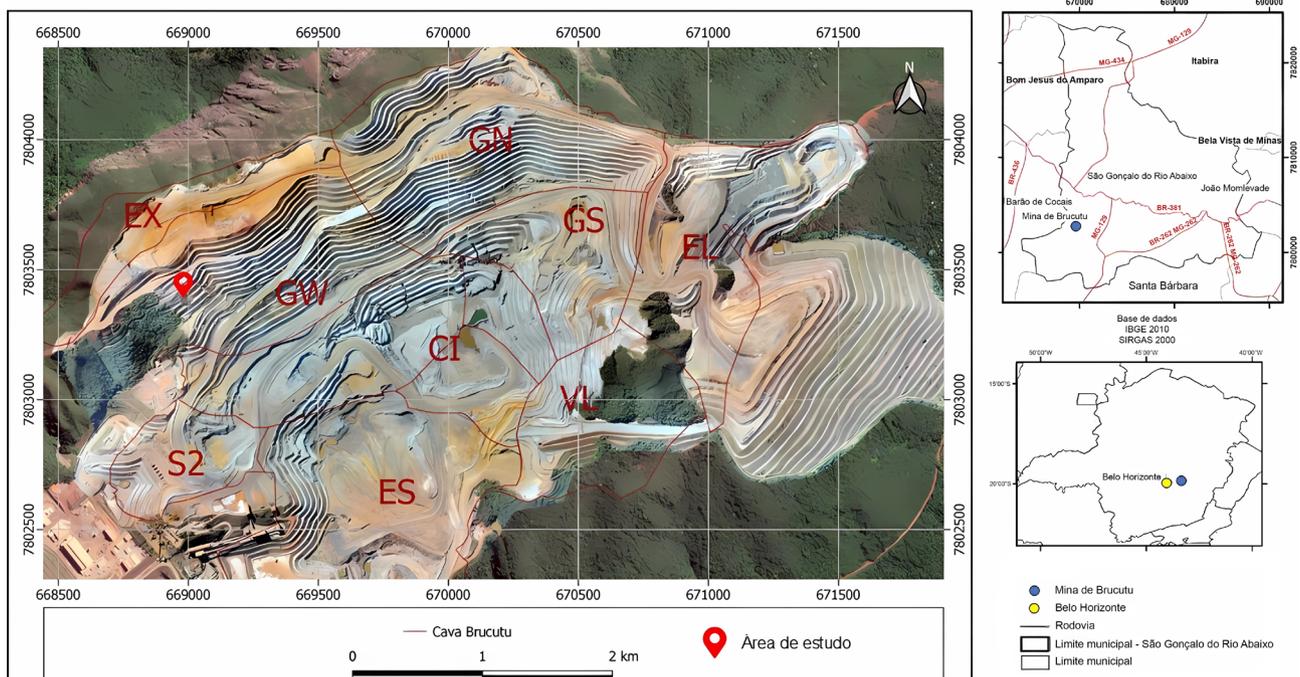
A indústria da mineração ocupa uma posição de destaque na economia brasileira. Em 2019, as substâncias minerais da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira, com destaque para o minério de ferro, com 72,8% de participação, cuja produção está concentrada nos estados de Minas Gerais e Pará, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2020), o país tem cerca de 19,8% das reservas mundiais de minério de ferro, com produção de aproximadamente 342 milhões de toneladas no ano de 2020, que correspondeu a R\$ 138,7 bilhões de faturamento para a economia brasileira. Desse montante, a mineradora Vale S.A. foi responsável por cerca de 72% da produção total de minério de ferro no país, sendo considerada a maior produtora de minério de ferro do Brasil e a terceira maior do mundo.

Em uma mina a céu aberto, um dos componentes essenciais para o desenvolvimento da lavra são os taludes. A geologia da jazida define a geometria, a extensão e a profundidade da lavra. O ganho econômico se aplica quando a extração do minério é eficiente, ou seja, quando o volume de estéril é o menor possível. Isso significa que deve haver uma boa gestão da geometria dos taludes da cava durante a vida útil da mina. Contudo, os materiais escavados em uma mina a céu aberto têm grande heterogeneidade mecânica e estrutural, e isso, conseqüentemente, afeta a estabilidade dos taludes.

Nesse contexto, a instrumentação de taludes de mineração é importante para se verificar o comportamento do maciço dentro dos limites previstos. Além disso, ela permite monitorar a evolução dos movimentos superficiais. Finalmente, os dados de instrumentação possibilitam estabelecer bases para reavaliações dos critérios adotados no planejamento de mina e formular diretrizes para eventuais intervenções nos taludes potencialmente instáveis nas diferentes frentes de lavra.

ÁREA DE ESTUDO

A mina de Brucutu está localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, a aproximadamente 120 km a leste de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. O acesso, partindo de Belo Horizonte, é feito pela BR-262/BR-381 sentido Vitória. Após percorrer aproximadamente 75 km, toma-se a MG-436 em direção à cidade de Barão de Cocais. Em seguida, após cerca de 20 km, acessa-se uma estrada vicinal entre Barão de Cocais e São Gonçalo do Rio Abaixo. A área da cava da mina de Brucutu compreende um polígono de aproximadamente 2,57 km de largura por 4,45 km de comprimento. A cava foi setorizada em regiões para facilitar a localização das áreas, conforme indicado na Figura 1. A área de estudo encontra-se na região do GW, nas cotas 1.030 a 1.000 m.



EX: Extremo Oeste; GN: Gralhos Norte; GW: Gralhos West; GS: Gralhos Sul; EL: Extremo Leste; CI: Centro Interno; VL: Vargem da Lua; ES: Extremo Sul; S2: Sul.
Fonte: Vale S.A. (2019a).

Figura 1. Mapa dos setores da mina de Brucutu, com indicação da área de estudo (vermelho).

Na mina de Brucutu são lavrados corpos de minério de ferro de alto teor, compactos, semi-friáveis e friáveis, além de itabiritos enriquecidos, todos hospedados na Formação Cauê do Supergrupo Minas (Renger et al., 1994). Atualmente, a mina de ferro de Brucutu tem profundidade de 260 m, situada entre as cotas 790 e 1.050 m. Os taludes têm 10 m de altura e inclinação que varia de 27 a 40°. Esses taludes estão projetados em porções de solos saprolíticos e rochas intensamente intemperizadas e fraturadas. Segundo Lume Estratégia Ambiental LTDA (2012), os principais condicionantes de instabilidades nos taludes na mina de Brucutu são a presença de estruturas geológicas, litotipos de baixa qualidade geomecânica, além de surgências do lençol freático.

Na década de 1970, a mina de Brucutu teve sua exploração iniciada pelo consórcio entre a Mineração Santa Mônica e a Mineração Caemi. Nessa época, o único produto gerado era o *sinter feed* natural (fino comum) oriundo de um *Run Of Mine* (ROM) majoritariamente composto de hematitos. Em 1985, a Mineração Santa Mônica e a Mineração Caemi arrendaram a mina de Brucutu para a empresa Socoimex, que manteve as atividades no local até 1994. Em 1995, a Vale S.A. obteve a detenção das operações em Brucutu (Vale S.A., 2017).

A motivação do presente estudo se baseia no fato de dar maior previsibilidade às instabilidades geotécnicas nos taludes de mina. O setor GW da mina de Brucutu registra instabilizações recorrentes, podendo impactar o plano de lavra, levando a um aumento nos custos operacionais.

A mineradora Vale S.A. tem na mina de Brucutu um sistema de monitoramento geotécnico que inclui diversos instrumentos. Embora as técnicas tradicionais de monitoramento geotécnico de taludes tenham elevada precisão, muitas vezes elas não são capazes de cobrir grandes áreas com densidades de medidas adequadas, tampouco identificar previamente áreas com comportamento anômalo. Nesse sentido, a tecnologia de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR), que utiliza a informação de fase, proporcional à distância sensor-alvo de imagens de radar orbital adquiridas em diferentes épocas sobre uma mesma área, propicia uma visão sinóptica da distribuição e do estado de atividade de deslocamentos sobre vastas áreas (Burgmann et al., 2000; Rosen et al., 2000; Raucoules et al., 2003; Dehls, 2006).

Nas últimas décadas, as tecnologias de detecção remota de deslocamentos da superfície terrestre tiveram um avanço significativo, e têm sido utilizadas para o monitoramento de taludes de mineração no mundo todo (Jung et al., 2007; Perski et al., 2009; Ng et al., 2010, 2012; Yang et al., 2010, 2020; Hartwig et al., 2013; Mura et al., 2014; Paradella et al., 2015; Pinto et al., 2015; Hartwig, 2016; Qi et al., 2019; Macciotta e Hendry, 2021).

CONTEXTO GEOLÓGICO

O depósito de ferro da mina de Brucutu está hospedado na Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas e repousa no contato tectônico com a sequência vulcanossedimentar do Grupo Nova Lima, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas. Ao norte, as falhas das Cambotas empurram as rochas supracrustais sobre o Complexo Granito-Gnáissico Santa Bárbara, que representam os Complexos Metamórficos (Dorr, 1969; Almeida et al., 2003; Endo et al., 2004, 2005, 2019) (Figura 2).

Segundo Endo et al. (2004, 2008), a área da mina de Brucutu caracteriza-se pela presença de rochas pertencentes às seguintes unidades litoestratigráficas.

Embasamento

O Gnaiss Santa Bárbara e o Gnaiss Cocais compreendem gnaisses de composição tonalítica-granodiorítica, em geral migmatizados em diferentes graus. O bandamento gnáissico é caracterizado por bandas leucocráticas centimétricas, descontínuas, sendo constituídas predominantemente de quartzo e feldspato e de lâminas mesocráticas ricas em minerais máficos, especialmente biotita. Tem direção NE-SW e mergulhos moderados para SE. Essas unidades constituem o embasamento para as sequências dos supergrupos Rio das Velhas e Minas (Endo et al., 2008).

Supergrupo Rio das Velhas

O Grupo Nova Lima, nas proximidades da mina de Brucutu, compreende clorita xistos e intercalações de xistos e filitos ferruginosos e, raramente, quartzitos sericiticos.

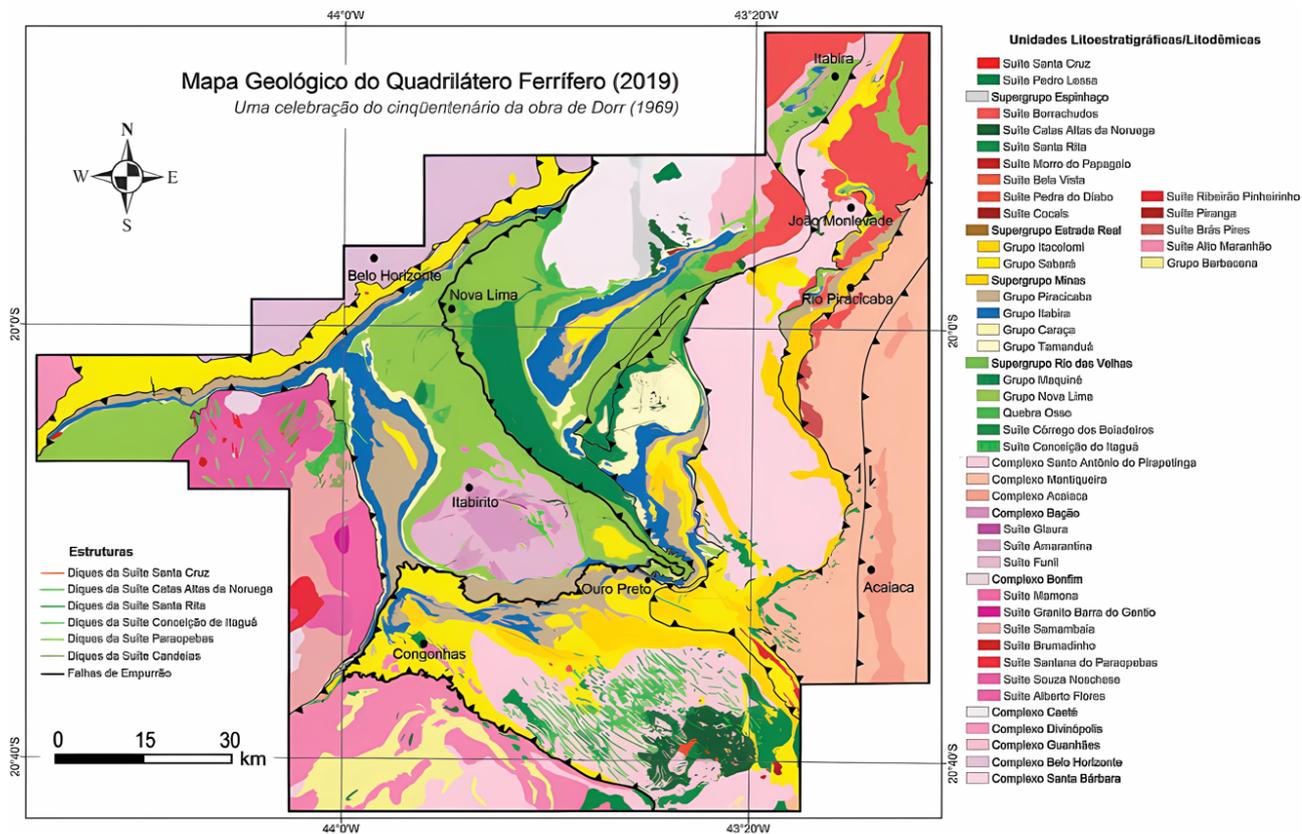
Supergrupo Minas

Compreende o Grupo Tamanduá, o Grupo Itabira e o Grupo Piracicaba. O Grupo Tamanduá compreende os quartzitos e a clorita quartzo xisto, subjacentes à Formação Cauê, à Formação Cambotas e à Formação Morro Grande.

A Formação Cambotas é formada essencialmente de quartzitos, quartzo-sericita xistos, metaconglomerados e quartzitos com bandas ferruginosas que afloram junto ao contato inferior da Formação Cauê.

A Formação Morro Grande é constituída essencialmente de clorita-quartzo xisto e sericita-quartzo xisto, em proporções variadas, apresentando coloração variegada em tons róseos e arroxeados, cinza e, por vezes, esbranquiçados. Filitos de coloração cinza ocorrem raramente. Na região da mina de Brucutu, os sericita quartzo xistos e os filitos encontram-se em contato abrupto, não tectônico, com os itabiritos da Formação Cauê.

No Grupo Itabira encontra-se a Formação Cauê, hospedeira do minério de ferro da mina de Brucutu, com teor



Fonte: modificado de Endo et al. (2019).

Figura 2. Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero e indicação da mina de Brucutu (preto e vermelho).

de ferro variando de 30 a 60%, especialmente nos itabiritos friáveis que predominam em Brucutu. O Grupo Itabira é composto essencialmente de 1.100 m de rochas metasedimentares marinhas (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969; Alkmim e Marshak, 1998). É constituído de itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, de filitos, quartzitos e mármore da Formação Cauê. Sendo essa formação sobreposta por mármore dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, filitos e itabiritos da Formação Gandarela (Dorr, 1958; Spier et al., 2007).

A Formação Cauê constitui-se essencialmente de itabiritos e corpos de hematita compacta. As hematitas podem ser classificadas em: compactas, friáveis, aluminosas, goethíticas, anfíbolíticas ou manganêsíferas. Os itabiritos são classificados em: friáveis, compactos, aluminosos, goethíticos, anfíbolíticos e dolomíticos.

O Grupo Piracicaba constitui-se basicamente de quartzitos ferruginosos, xistos e filitos carbonosos, talco xistos e sericita xisto. Distribuem-se ao longo de uma faixa de direção NE-SW com espessura diminuindo de SW para NE (Endo et al., 2008).

Rochas intrusivas pós-Minas

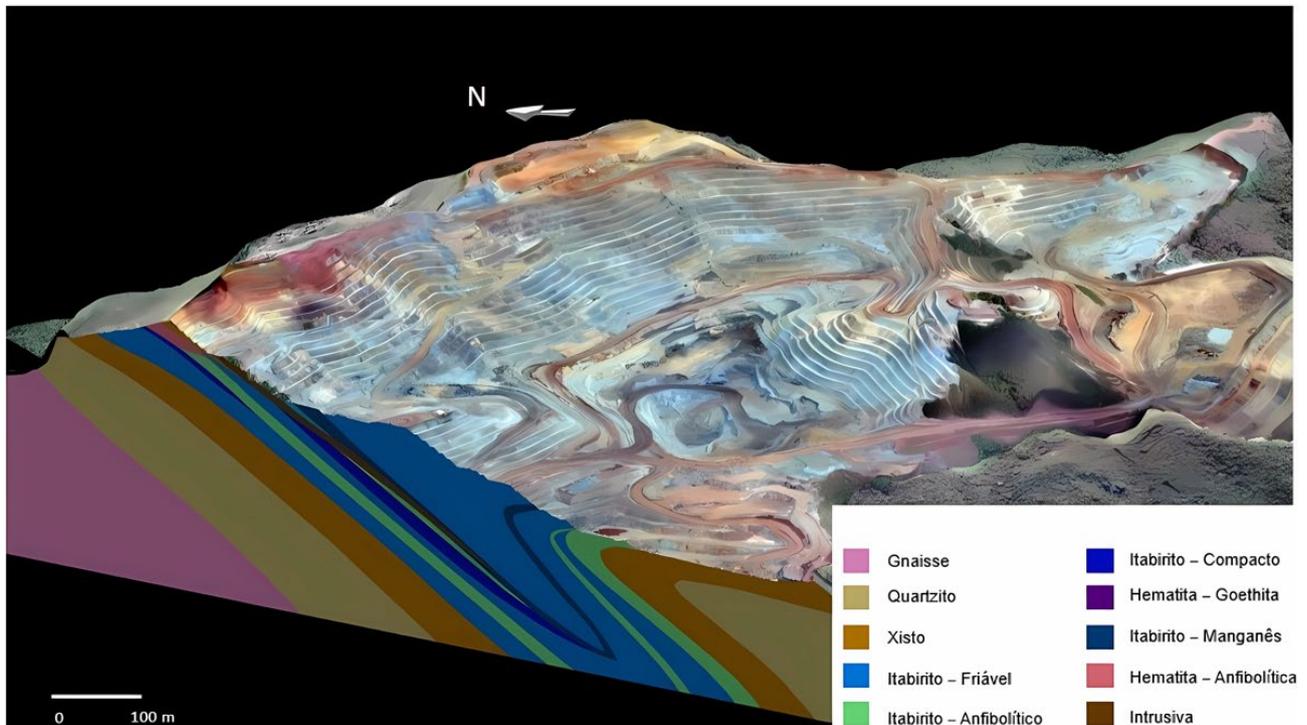
As litologias dessa unidade têm composição ultramáfica formada por piroxenitos intemperizados, talco xistos, por vezes com porções anfíbolíticas. O Granito Peti são granitos foliados contendo quartzo, plagioclásio e biotita.

Cenozoico

A Formação Cata Preta representa sedimentos argilosos de coloração avermelhada, contendo rochas ferruginosas (e.g. canga). A unidade registra duas gerações distintas de sedimentação de sedimentos argilosos e desenvolvimento de cobertura de canga entre elas.

ASPECTOS ESTRUTURAIS

Na Figura 3 é possível observar que a mina está instalada em um sinclinal assimétrico com vergência para norte, que contém expressivos depósitos de minério de ferro associados às unidades de itabirito friável, anfíbolítico, compacto e manganêsífero.



Fonte: Angeli (2011).

Figura 3. Seção geológica N-S da mina de Brucutu.

O acervo estrutural na cava da mina de Brucutu mostra a superposição de quatro fases de dobramento (F1, F2, F3 e F4). Esse processo representa a distribuição quase uniaxial dos polos dos planos dos acamamentos dos itabiritos na cava de Brucutu. Os polos de S0 da Figura 4A apresentam uma dispersão cônica em vez de uma distribuição em guirlanda. O eixo do cone tem atitude quase subvertical reforçando o caráter multidirecional do encurtamento tectônico, que, no caso, seriam as seguintes direções: ENE-WSW (F2), NW-SE (F3) e NE-SW (F4). Esse comportamento pode ser verificado também na baixa dispersão dos polos da xistosidade S2 (Figura 4B) (Endo et al., 2008).

Na maior parte da cava da mina de Brucutu, o *trend* geral do acamamento dos itabiritos é na direção preferencial ESE-WNW (Figura 4A) e com inflexão para direção submeridiana na porção oriental da cava (Endo et al., 2008).

As falhas normais de direção EW mais expressivas e com rejeito maior formam um sistema de *grábens* e *horts* na porção norte da cava de Brucutu preenchido por sedimentos avermelhados com características de fluxo de detritos (Endo et al., 2008).

Em relação ao acervo estrutural externo à cava de Brucutu, os elementos lineares sofreram rotação anti-horária de pelo menos 30°, resultado do efeito da fase de dobramento F4 ou da superposição de F3 + F4. As lineações

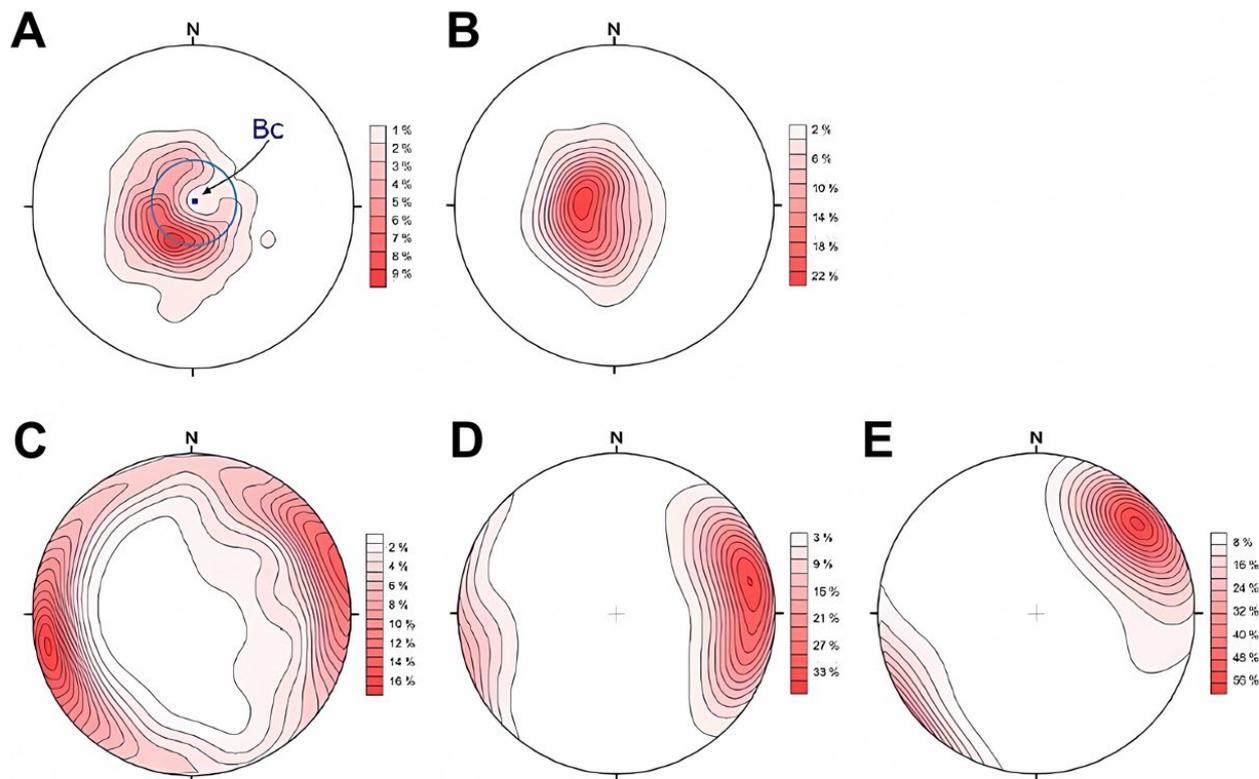
minerais, de intersecção e eixos de dobras apresentam caimentos para ENE a NE (Figuras 4C, 4D e 4E) (Endo et al., 2008).

As feições estruturais de maior destaque na cava Brucutu e presente nos vários litotipos são:

- (i) Acamamento representado por alternância na composição e constituição mineralógica ou texturas conformando as bandas do litotipo. Esse aspecto é notado principalmente nos itabiritos que constituem a cava;
- (ii) Foliação dada pela disposição planar de componentes minerais com formas placóides, achatadas ou prismáticas. Notado principalmente nos xistos, nos quartzitos e nas rochas metabásicas, por vezes nota-se a presença de foliação em hematititos;
- (iii) Lineação de estiramento e mineral, lineação de crenulação e lineação de eixo de dobra presentes em praticamente todos os litotipos citados anteriormente;
- (iv) Descontinuidades, juntas, fraturas e clivagens permeiam todos os litotipos encontrados na mina, com maior expressão nas rochas mais resistentes.

A foliação e o bandamento (Figura 5) são pervasivos nos vários litotipos:

- (i) bandamento dado por bandas de constituição e texturas diferentes, de espessuras milimétricas a centimétricas;



Fonte: Endo et al. (2008).

Figura 4. Estereogramas de tectonitos “S” e “L” na cava da mina de Brucutu: (A) acamamento, N = 617, Máx. 030/20 (9,41%), Bc = 010/83 (eixo do cone); (B) xistosidade S2, N = 202, Máx. 091/26 (23,07%); (C) eixos de dobra B2, N = 121, Máx. 257/09 (16,80%); (D) lineação de intersecção L2, N = 87, Máx. 076/15 (35,76%); (E) lineação mineral, N = 64, Máx. 0050/17 (56,75%).



Fonte: Walm Engenharia (2021).

Figura 5. Exemplos de foliação observados na cava da mina de Brucutu: (A) xistosidade na intrusiva, formada por minerais micáceos; (B) lente de quartzo no itabirito friável; (C) foliação milonítica na brecha friável; (D) xistosidade no quartzo-muscovita xisto.

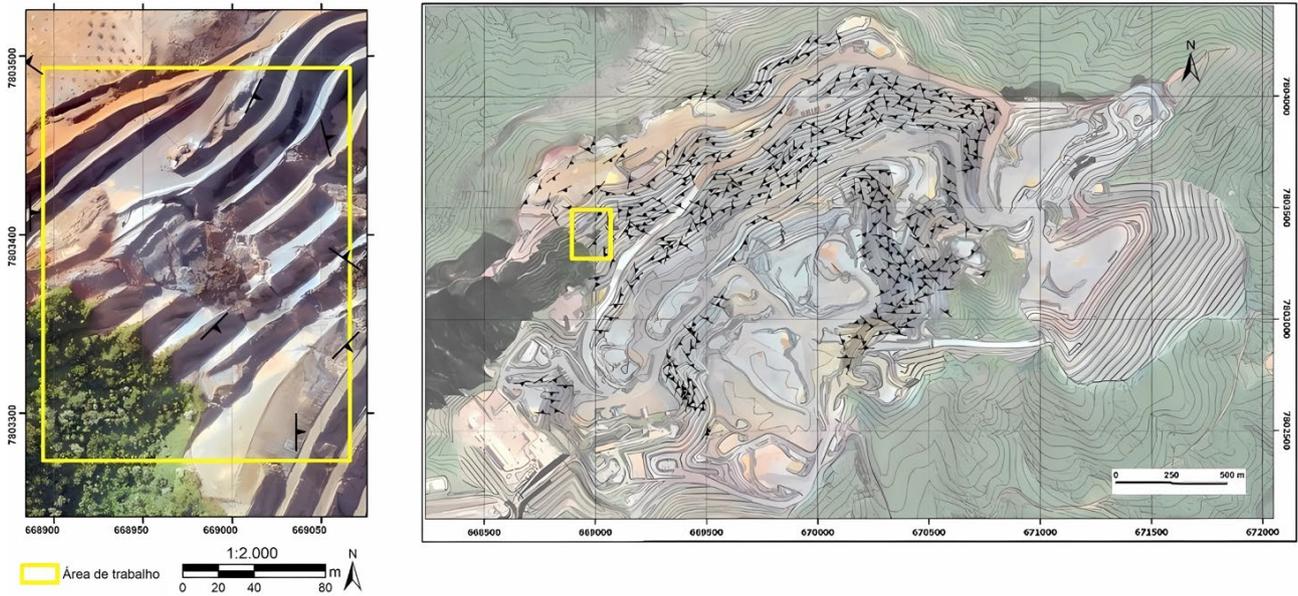
(ii) xistosidade, demarcada pela disposição planar de componentes minerais de forma placóide, achatados ou prismáticos. No geral, essas feições foram paralelizadas pelos processos tectônicos e são referidas conjuntamente como foliação (Sn).

As foliações levantadas na área de estudo na região do GW na cava da mina de Brucutu apresentam plano preferencial dado pela maior concentração em torno de 137/32, podendo ser correlacionada com a fase de deformação tectônica F4 (Figura 6).

ASPECTOS GEOMECÂNICOS

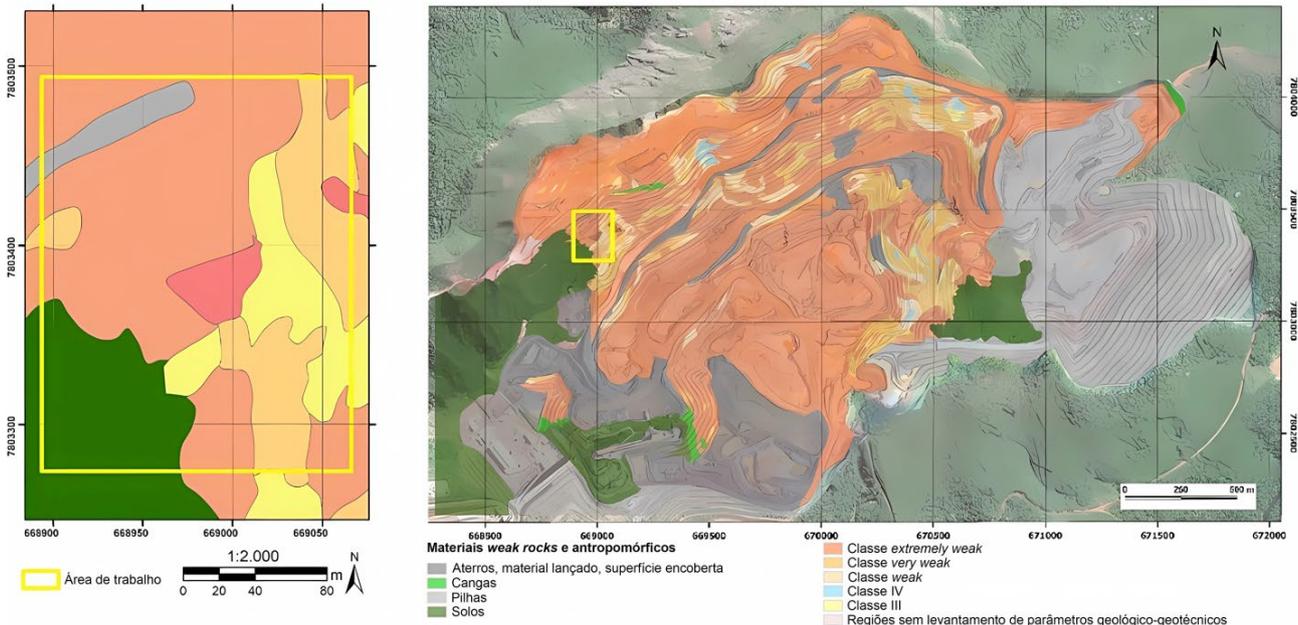
A Figura 7 retrata o mapa de classes geomecânicas da cava atual da mina de Brucutu (Walm Engenharia, 2021). Na área de estudo, predominam materiais de baixa resistência mecânica (*weak rock*), o que configura maciços compostos de saprolito e litotipos friáveis e/ou intemperizados. Essa classe de maciço ocorre em todos os litotipos friáveis, com maior relevância aos itabiritos friáveis (IF), aos itabiritos anfíbolíticos friáveis (IANF) e às intrusivas friáveis (INF) (Walm Engenharia, 2021). Além disso, essa classe de maciço comporta lentes de rochas:

- Extremamente brandas (*extremely weak*): correspondem aos materiais extremamente brandos, ou R0, cuja faixa de resistência varia de 0,25 a 1 MPa;



Fonte: adaptada de Walm Engenharia (2021).

Figura 6. Mapa de medidas de foliação na área da cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo.



Fonte: adaptada de Walm Engenharia (2021).

Figura 7. Mapa de classes geomecânicas para a cava da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo.

- Muito brandas (*very weak*): correspondem aos materiais classificados como muito branda inferior, ou R1-, cuja faixa de resistência varia de 1 a 3 MPa;
- Classe III: maciços geotécnicamente regulares. Consistem em maciços rochosos moderadamente fraturados (F3) a fragmentados (F6), com predominância de graus de alteração de intensamente alterados (W4) a levemente alterados (W2), medianamente resistentes (R3) a muito resistentes (R5);
- Classe IV: solos lateríticos, contendo, por vezes, vegetação. Apresentam-se muito alterados, com resistência R0 e grau de intemperismo W6.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Nuvem de pontos (PS) gerado a partir de 85 imagens de radar complexas do satélite COSMO-SkyMed (CSK) em modo *StripMap*, órbita ascendente, banda X e polarização HH, para o período de junho de 2018 a novembro de 2020. Os dados foram processados por meio de uma variante da técnica PSI, pela empresa Telespazio Brasil, por meio do contrato com a Vale S.A. Para informações sobre as características da constelação de satélites CSK e modos de aquisição, consultar ESA (2021);
- *Software* QGIS (versão 3.4 Madeira) para integração dos dados em ambiente SIG, geração de mapas e gráficos. O sistema de coordenadas adotado foi o UTM (Zona 23) e o *Datum* horizontal SIRGAS 2000;
- Relatórios técnicos internos sobre os aspectos geotécnicos e hidrogeológicos da mina;
- Dados de pluviometria da estação pluviométrica da mina de Brucutu;
- Dados derivados de inspeções de campo e geologia de curto prazo (mapeamento geológico). Os dados de mapeamento geológico-geotécnico da cava Brucutu foram realizados pelos geólogos da empresa WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental a partir de março de 2020 com interrupção de 7 meses devido à pandemia de Covid-19 e retorno em outubro, com encerramento em dezembro de 2020. Ao total, foram levantados 1.466 pontos em uma área de aproximadamente 3,25 km². Também foram realizadas inspeções de campo em setembro de 2020 pela equipe de Geotecnia da Vale S.A. com o intuito de verificar o comportamento geotécnico da área de estudo;
- Ortoimagens geradas a partir de imagens de ARP. Utilizou-se o equipamento modelo DJI Phantom 4 Pro. As imagens foram processadas no *software* Pix4Dmapper. Os sobrevoos e o processamento das imagens foram realizados pela equipe de Geociências da Vale S.A. O intuito da utilização dessas imagens foi verificar as mudanças na geometria dos taludes.

A tecnologia InSAR compreende duas abordagens principais:

- (i) Interferometria SAR Diferencial (DInSAR — *Differential SAR Interferometry*) (Massonnet e Feigl, 1998);
- (ii) A-DInSAR (*Advanced-Differential Interferometric SAR*) ou *InSAR Time Series*, que compreende dois métodos principais: PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) (Ferretti et al., 2001) e SBAS (*Small Baseline Subset*) (Berardino et al., 2003). No presente estudo foi utilizada a tecnologia PSI.

Os deslocamentos superficiais foram analisados a partir da plataforma WebGIS AWARE. As medidas com

valores negativos representam afastamento na distância sensor-alvo, e os valores positivos, o oposto. Além disso, as taxas de deformação foram classificadas de acordo com a escala definida pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS — *International Union of Geological Sciences*). Conforme método proposto pela IUGS (1995), os escorregamentos de solo, quanto as classes de velocidade dos movimentos de massa, podem ser divididos da seguinte forma:

- Extremamente rápido (*Extremely rapid*): corresponde à velocidade de escorregamento maior que $1,6 \times 10^{11}$ mm/ano;
- Muito rápido (*Very rapid*): corresponde à velocidade de escorregamento no intervalo de $1,6 \times 10^9$ a $1,6 \times 10^{11}$ mm/ano;
- Rápido (*Rapid*): corresponde à velocidade de escorregamento no intervalo de $1,6 \times 10^7$ a $1,6 \times 10^9$ mm/ano;
- Moderado (*Moderat*): corresponde à velocidade de escorregamento no intervalo de $1,6 \times 10^5$ a $1,6 \times 10^7$ mm/ano;
- Lento (*Slow*): corresponde à velocidade de escorregamento no intervalo de 1.600 a $1,6 \times 10^5$ mm/ano;
- Muito lento (*Very slow*): corresponde à velocidade de escorregamento no intervalo de 16 a 1.600 mm/ano;
- Extremamente lento (*Extremely slow*): corresponde à velocidade de escorregamento menor que 16 mm/ano.

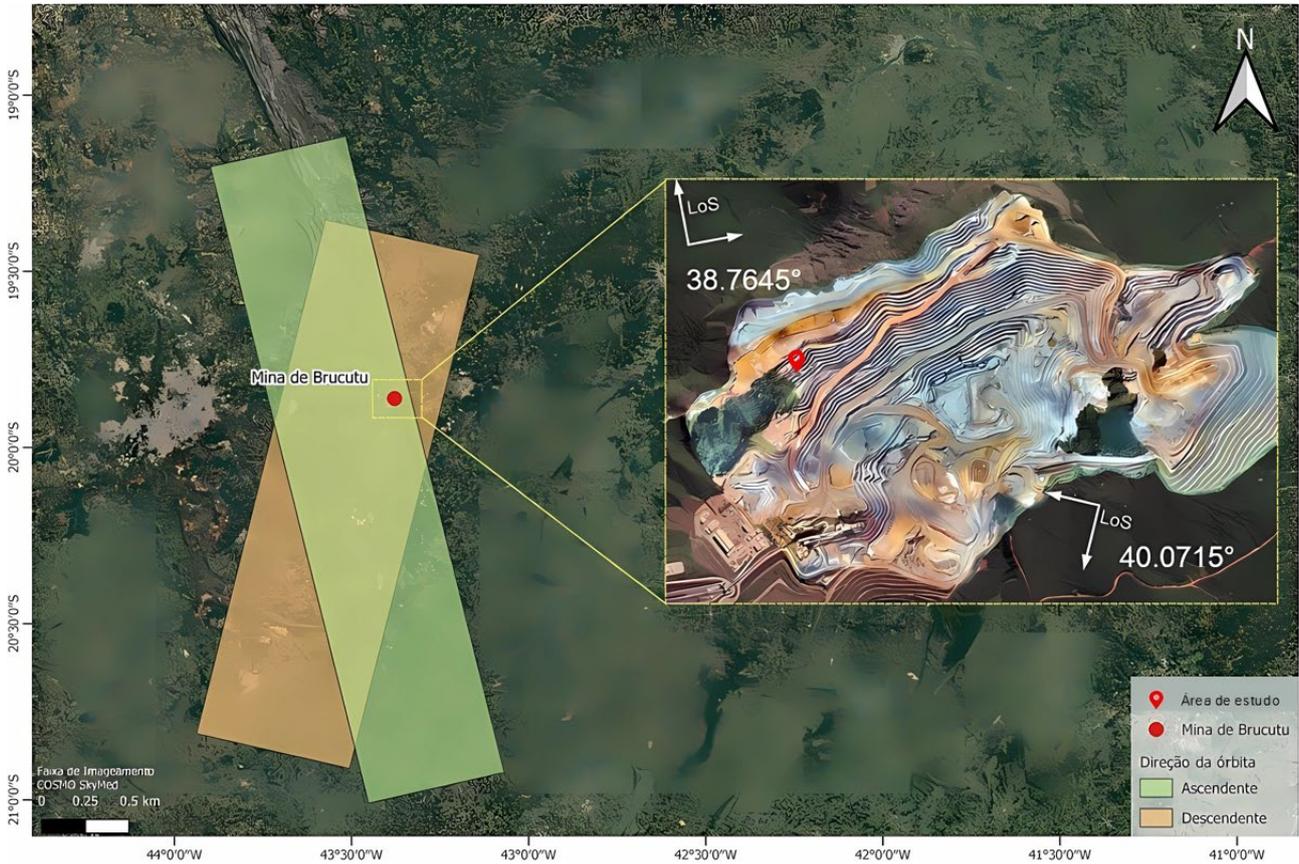
A Figura 8 mostra o *footprint* das imagens CSK em modo *StripMap* em órbitas ascendente e descendente para a mina de Brucutu. Foram utilizados apenas produtos gerados pela órbita ascendente (retângulo em verde).

As classes geomecânicas indicadas nos mapas geotécnicos foram definidas conforme Vale (2019), que é uma adaptação da classificação RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (2011) para as condições encontradas na mina (maciços brandos). O significado das classes está ilustrado na Figura 9.

A aplicabilidade pouco eficiente do sistema RMR de Bieniawski (1989) em maciços brandos está relacionada à ampla variedade de comportamento geomecânico e à dificuldade de classificar as descontinuidades presentes em maciços da classe V do sistema RMR. Dessa forma, para as rochas brandas (*weak rocks*), muito brandas e extremamente brandas foram utilizados os critérios propostos por Martin e Stacey (2018).

As rochas brandas correspondem às faixas de resistência de extremamente branda (R0), muito branda (R1) e branda (R2-), e são subdivididas em três classes:

- Extremamente brandas (*extremely weak*): correspondem aos materiais extremamente brandos, ou R0, cuja faixa de resistência varia de 0,25 a 1 MPa;
- Muito brandas (*very weak*): correspondem aos materiais classificados como muito brandos inferiores, ou R1-, cuja faixa de resistência varia de 1 a 3 MPa;



Fonte: Vale S.A. (2019b).

Figura 8. Footprint das imagens *stripmap* em órbitas ascendente e descendente para a mina de Brucutu, com indicação dos ângulos de incidência.



Fonte: Vale S.A. (2019a).

Figura 9. Sistema de classificação geomecânica utilizada na mina de Brucutu.

- Brandas (*weak*): correspondem aos materiais classificados como muito brando superior e brando, ou R1+ a R2-, cuja faixa de resistência varia de 3 a 10 MPa.

A classificação de rochas brandas é realizada somente pelo índice de resistência, que pode ser aferido em campo pelas características tátil-visuais, tais como golpe do martelo, risco e raspagem do canivete, risco a unha e pressão

manual. A Figura 9 mostra a correlação entre o universo das rochas brandas e rochas coesas em função da resistência à compressão uniaxial.

Para a descrição e a classificação do grau de intemperismo dos maciços rochosos foi utilizado o sistema de classificação proposto pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978). Esse sistema consiste na descrição qualitativa do maciço rochoso utilizando como base a

análise tátil-visual para inspeção de descoloração das descontinuidades, sinais de oxidação, a alteração dos minerais, a razão rocha/solo, a presença de núcleos de rocha menos alterada envoltos por material terroso ou muito decomposto, o estado de preservação da estrutura do maciço e a desintegração da matriz (Tabela 1).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados de deslocamento: A-DInSAR

Os resultados foram agrupados em dois períodos: junho de 2018 a agosto de 2019; e junho de 2019 a novembro de 2020, totalizando dois anos de monitoramento dos taludes da cava da mina de Brucutu.

Os mapas de velocidade de deslocamento LOS (ao longo da linha de visada) estão codificados em cores. Os pontos na cor branca indicam áreas estáveis (valores nulos). Os pontos nas cores avermelhadas indicam subsidência (valores negativos), e os pontos na cor azul, soerguimento (valores positivos).

Período de junho de 2018 a agosto de 2019

Conforme a Tabela 2, no período de junho de 2018 a agosto de 2019, o valor mínimo de deslocamento, afastamento em relação ao SAR, foi de -76,3 mm/ano, e o valor máximo de deslocamento, aproximação ao SAR, foi de 79,1 mm/ano.

Para esse período (junho de 2018 a agosto de 2019) foram identificados 91.143 PS em uma área de 2,957 km². Esse valor corresponde a aproximadamente 30.822,79 PS/km².

As maiores taxas de deslocamento (mm/ano) estão entre as cotas 1.030 a 1.000 (Figura 10). A Figura 11 exibe os gráficos de deslocamento por unidade de tempo de um ponto de

monitoramento na área afetada por instabilidade. Essa área anômala foi definida por fotointerpretação das trincas identificadas via imagem de ARP.

Nesse caso, os valores negativos de deslocamento obtidos na região do talude do GW são indicativos de afastamento em relação ao SAR (subsidência).

Período de junho de 2019 a novembro de 2020

Conforme a Tabela 3, no período de junho de 2019 a novembro de 2020, o valor mínimo de deslocamento, afastamento em relação ao SAR, foi de -65,7 mm/ano, e o valor máximo de deslocamento, aproximação ao SAR, foi de 41,6 mm/ano.

Foram identificados 36.022 PS em uma área de 2,957 km². Esse valor corresponde a aproximadamente 12.181,94 PS/km² (Figura 12). Nesse período, os pontos de monitoramento (PS) foram perdidos na região do GW (cota 1.030 a 1.000) em

Tabela 2. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho de 2018 a agosto de 2019.

Taxa de deslocamento (mm/ano)	
Média	0,343209023
Erro padrão	0,033643178
Mediana	0,6
Desvio padrão	10,15684147
Variância da amostra	103,1614287
Curtose	3,208775626
Assimetria	-0,120567465
Intervalo	155,4
Mínimo	-76,3
Máximo	79,1
Contagem	91143

Tabela 1. Sistema de classificação e descrição do grau de intemperismo de maciços rochosos.

Termo	Descrição	Classe
São	Nenhum sinal visível de alteração do material; pode existir alguma leve descoloração nas paredes da descontinuidade principal.	W1
Levemente intemperizado	Descoloração indica alteração da rocha e das descontinuidades. A rocha pode estar toda descolorida e talvez algo menos resistente externamente que a rocha.	W2
Moderadamente intemperizado	Menos da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha são ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .	W3
Muito intemperizado	Mais da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha são ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .	W4
Completamente intemperizado	Toda a rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada.	W5
Solo residual	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e a fábrica da matriz da rocha estão destruídas. Há grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	W6

Fonte: ISRM (1978).

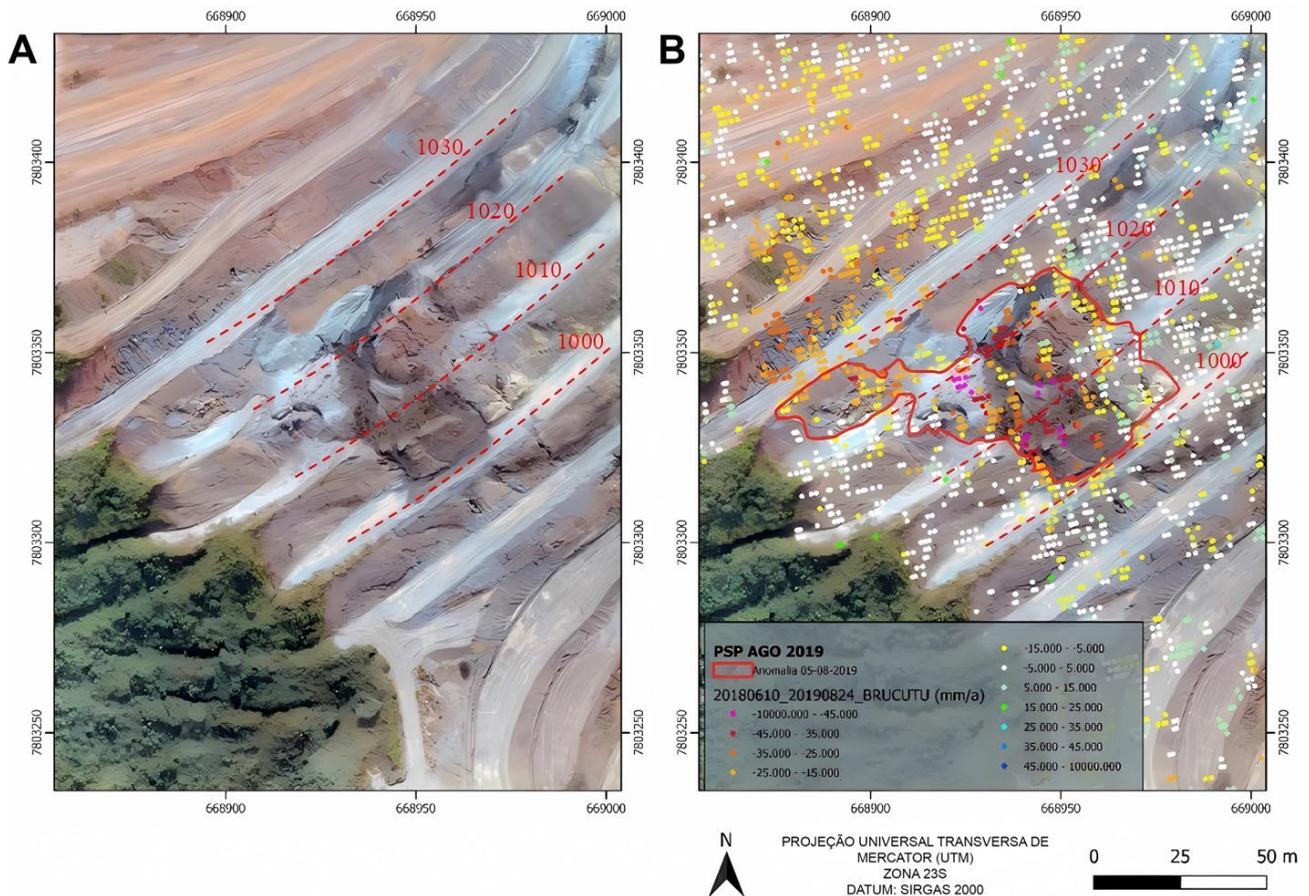


Figura 10. (A) Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1.030 e 1.000 do setor GW) em 05 de agosto de 2019; (B) disposição dos PS, com destaque para área anômala.

decorrência da descorrelação temporal das imagens SAR. A área anômala foi definida a partir da identificação visual das trincas com base em imagens de ARP.

Dados pluviométricos

Foram analisados dados de pluviometria para os períodos de: junho de 2018 a agosto de 2019; e junho de 2019 a novembro de 2020.

A Figura 13 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina de Brucutu (BRUPL001) de junho de 2018 a agosto de 2019. Os dados pluviométricos indicam que, nesse período, o total de chuva acumulada foi de 1.364,4 mm. No período de junho de 2018, o período de seca se estendeu até final de setembro, sendo os meses de junho e julho praticamente secos, com precipitação acumulada de 2,5 mm. Em 2019, o período seco se iniciou em junho e se estendeu até agosto, com precipitação acumulada de 9,8 mm. Os meses mais chuvosos se estenderam do início de outubro de 2018 até o fim de maio de 2019, acumulando um total de 1.281,7 mm.

A Figura 14 mostra os dados mensais de pluviometria da Estação Meteorológica da Mina de Brucutu (BRUPL001) para o período de junho de 2019 a novembro de 2020. Os dados pluviométricos indicam que, nesse período, o total de chuva acumulada foi de 2.154,6 mm.

O período de seca inicia em junho de 2019 e finda ao início de outubro de 2019, sendo os meses de agosto e setembro praticamente secos, com precipitação acumulada em torno de 73,9 mm.

Em 2020, o período seco se estendeu de junho a outubro, porém com precipitação acumulada um pouco maior que no ano anterior, com 240 mm acumulados. Por outro lado, os meses mais chuvosos se iniciaram em novembro de 2019 e finalizaram em junho de 2020, totalizando um acumulado de 1.724,7 mm.

Sobrevoio de aeronave remotamente pilotada e inspeção geotécnica de campo

A Figura 15 retrata o mapa de anomalias geotécnicas da mina de Brucutu, destacando as anomalias de campo de

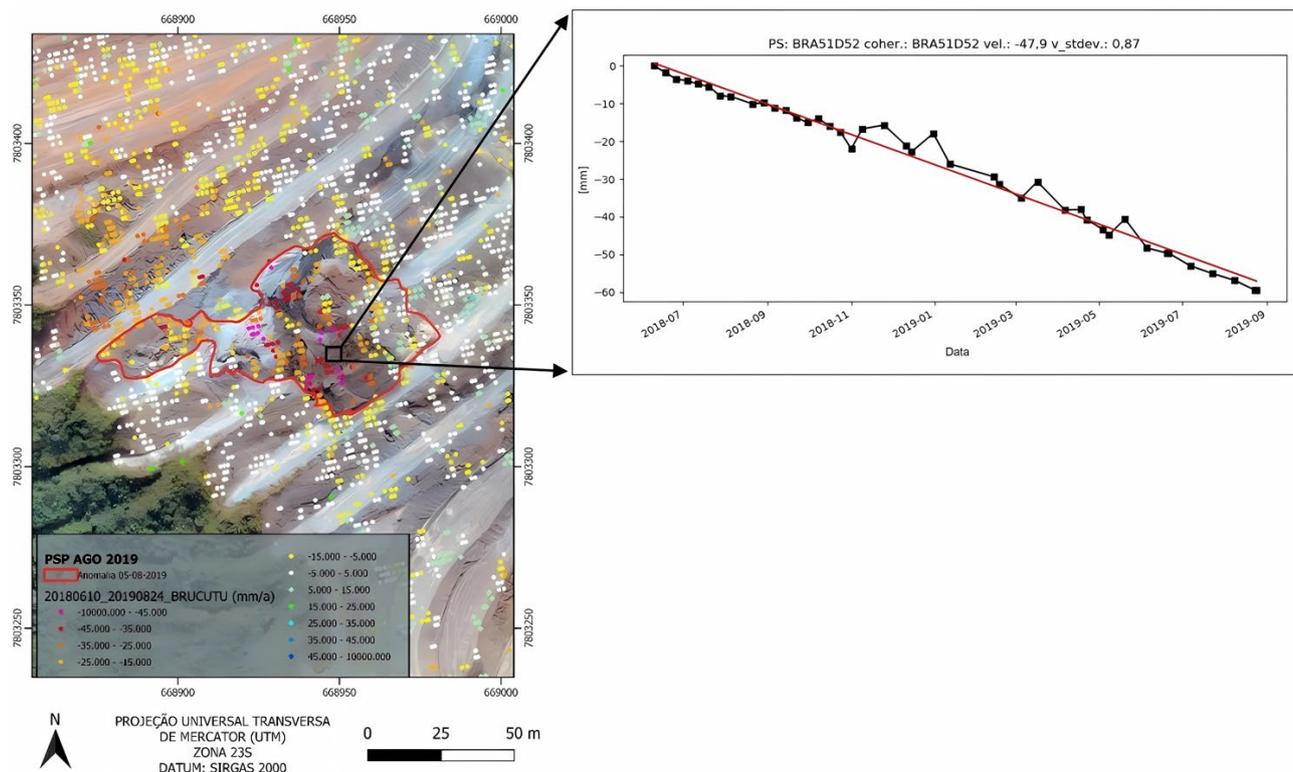


Figura 11. Gráfico de deslocamento (mm) versus tempo para os PS na área de estudo.

Tabela 3. Estatística dos dados de taxa de deslocamento da área de estudo para o período de junho de 2019 a novembro de 2020.

Taxa de deslocamento (mm/ano)	
Média	-0,787316085
Erro padrão	0,045439907
Mediana	-0,2
Desvio padrão	8,624250182
Variância da amostra	74,3776912
Curtose	2,441299782
Assimetria	-0,559328707
Intervalo	107,3
Mínimo	-65,7
Máximo	41,6
Contagem	36022

setembro de 2020, as surgências de água de julho de 2020 e as zonas de instabilidades definidas por meio da interpretação de imagens de ARP para regiões com maior risco geotécnico associado.

Na área foco deste estudo (GW) existem erosões e perda da integridade física de face de talude, instabilidade de bancadas e porções mais saturadas de água entre as cotas 1.000 e 1.030 m.

No período entre abril de 2020 e junho de 2020 foram realizadas obras de retaludamento na região do GW para conformação da face dos taludes e implantação de dispositivos de drenagem. Porém, com o retorno do período chuvoso entre setembro e outubro de 2020, ocorreram novas erosões e perda da integridade física de face, instabilidade de bancadas e áreas com surgências de água (Figura 16).

A evolução das condições estruturais dos taludes da região GW para o período de agosto de 2019 a abril de 2020 pode ser observada na Figura 17. Nesse período, ocorreu o aumento do processo erosivo com o surgimento de trincas e a perda da integridade física da face dos taludes. Em meados de junho de 2020, foi realizada a reconformação dos taludes; nesse período, surgiram trincas e acomodação do material do talude. Com o retorno do período chuvoso no final de setembro avançando até novembro de 2020, ocorreram novas erosões, com a evolução das trincas preexistentes.

Dados geológicos e geomecânicos

Foram identificados nove materiais na cava da mina de Brucutu. São eles: IF e itabiritos compactos (IC), hematitas friáveis (HF) e hematitas compactas (HC), itabiritos goethíticos (IGO) e hematitas goethíticas (HGO), itabiritos

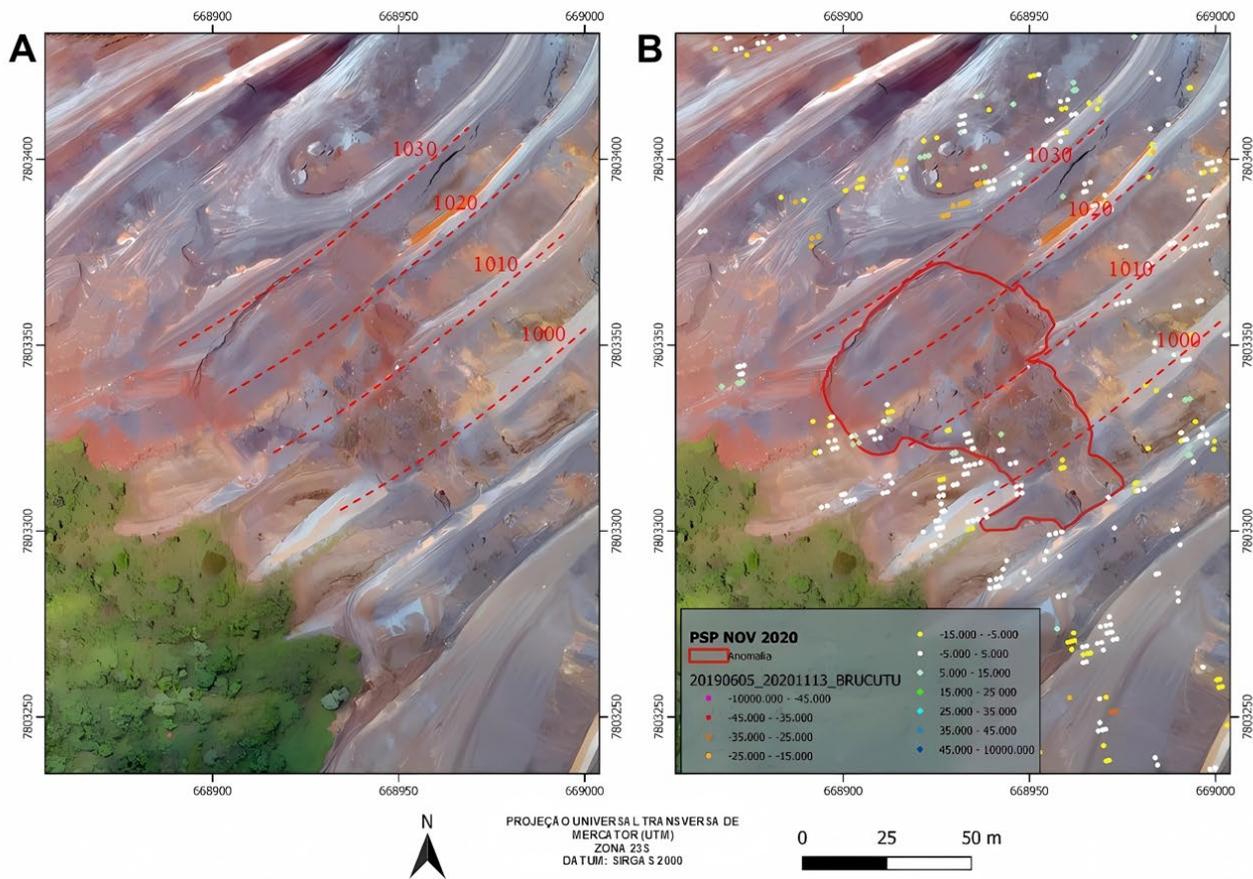


Figura 12. (A) Ortoimagem da área de estudo (taludes entre as cotas 1.030 e 1.000 do setor GW) em novembro de 2020; (B) disposição dos PS, com destaque para área anômala.

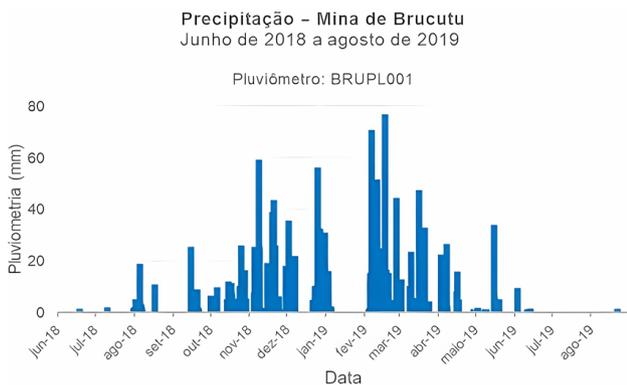


Figura 13. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2018 a agosto de 2019.

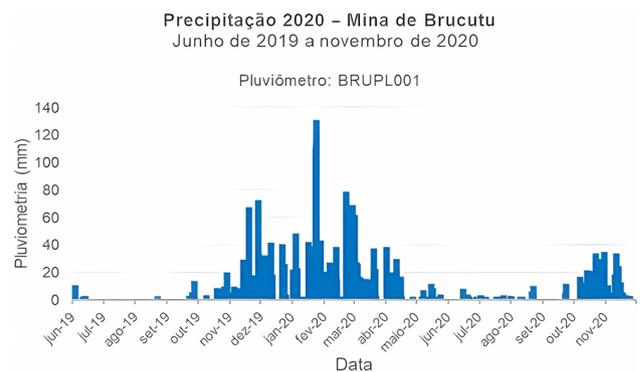


Figura 14. Pluviometria da estação BRUPL001 da mina de Brucutu referente ao período de junho de 2019 a novembro de 2020.

anfíbolíticos (IA) e hematitas anfíbolíticas (HA), e, por fim, itabiritos manganésíferos (IMN). Na área de estudo, predominam três litotipos: o IF, as rochas pós-colisionais intrusivas (IN) e a brecha friável (BF) (Figura 18).

O IF apresenta grande distribuição geográfica na área de estudo, geologicamente tem coloração cinza a prata em face fresca e quando fortemente intemperizada, observa-se uma capa de coloração bege. A rocha é constituída tipicamente

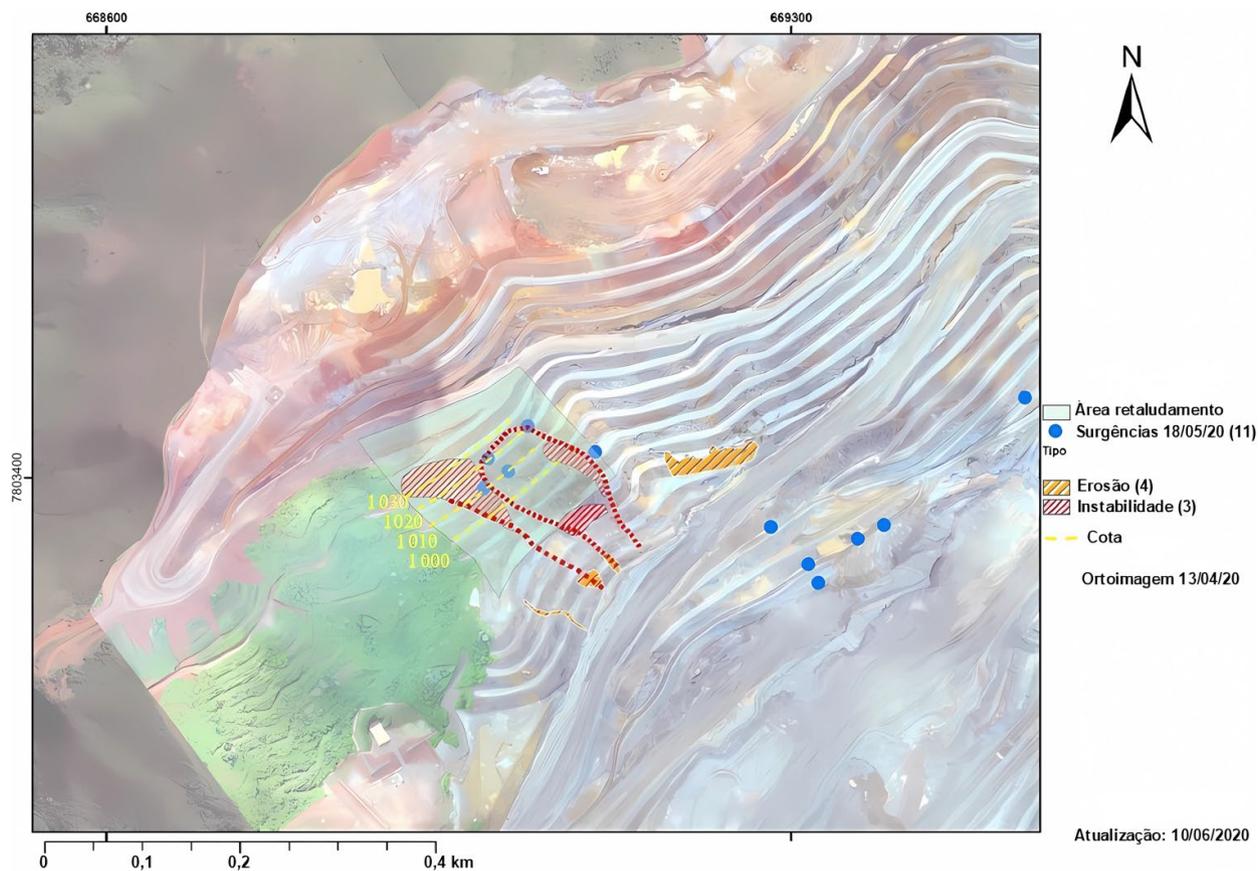


Figura 15. Mapa de anomalias geotécnicas da região do GW da mina de Brucutu.



Figura 16. Condições dos taludes em setembro de 2020, com destaque para a ruptura plano-circular e trincas no topo da berma.

de uma intercalação rítmica de bandas quartzosas de granulação fina a média e espessuras milimétricas a centimétricas e bandas cinza ricas em óxidos de ferro, hematita granular ou specularita de granulação fina a média.

De modo geral, encontra-se muito alterado, com resistências variando de R0 a R2-, sendo predominante a resistência R0 e o grau de intemperismo W5.

Na região do GW foram mapeados corpos ígneos de rochas metabásicas em contato com formação ferrífera. Esses corpos metabásicos encontram-se concentrados principalmente na anomalia erosiva. Trata-se de metagabros e metadiabásios. Tais corpos apresentam direção geral entre NW-SE e NE-SW.

As IN são majoritariamente de coloração bege a alaranjada, por vezes ocre e com tons rosáceos, com aspecto sedoso ao tato e intensamente intemperizadas, o que dificulta a identificação mineralógica, mesmo com o auxílio de lupa. Apresentam textura ígnea completamente obliterada, sendo predominantemente micácea e subordinadamente granular, de granulação média a grossa, com sericita e caulim como mineralogia de intemperismo prontamente observável e manchas de óxidos de coloração ocre associadas. Por fim, magnetita e demais minerais opacos podem ocorrer disseminados pontualmente.

As rochas IN são exclusivamente friáveis em superfície na região do GW. Apresentam resistências variando de extremamente branda (R0) a branda (R2-), com maior ocorrência de resistências brandas inferiores (R1-) e grau

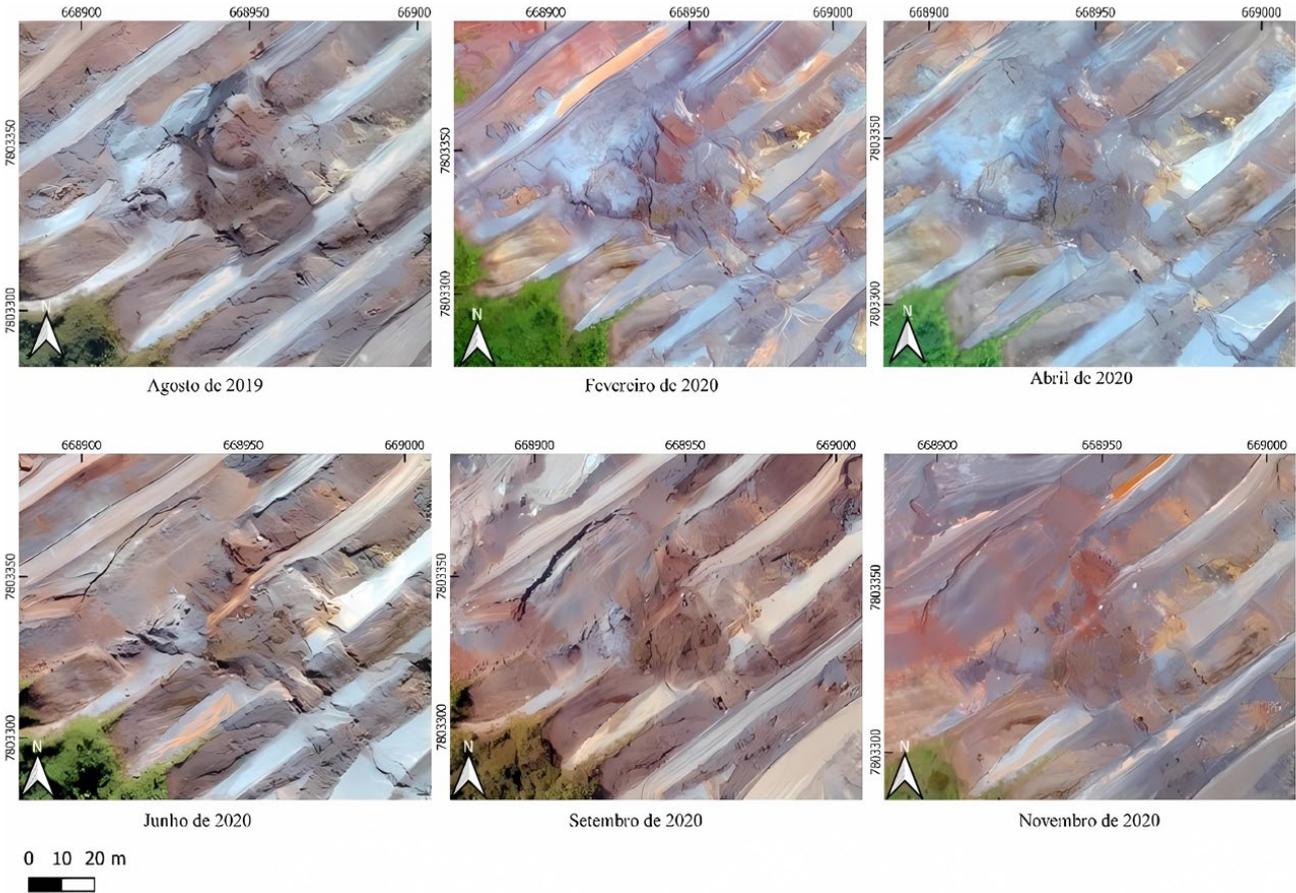


Figura 17. Imagens de drone mostrando a evolução dos taludes de agosto de 2019 a novembro de 2020 na região GW da mina de Brucutu.

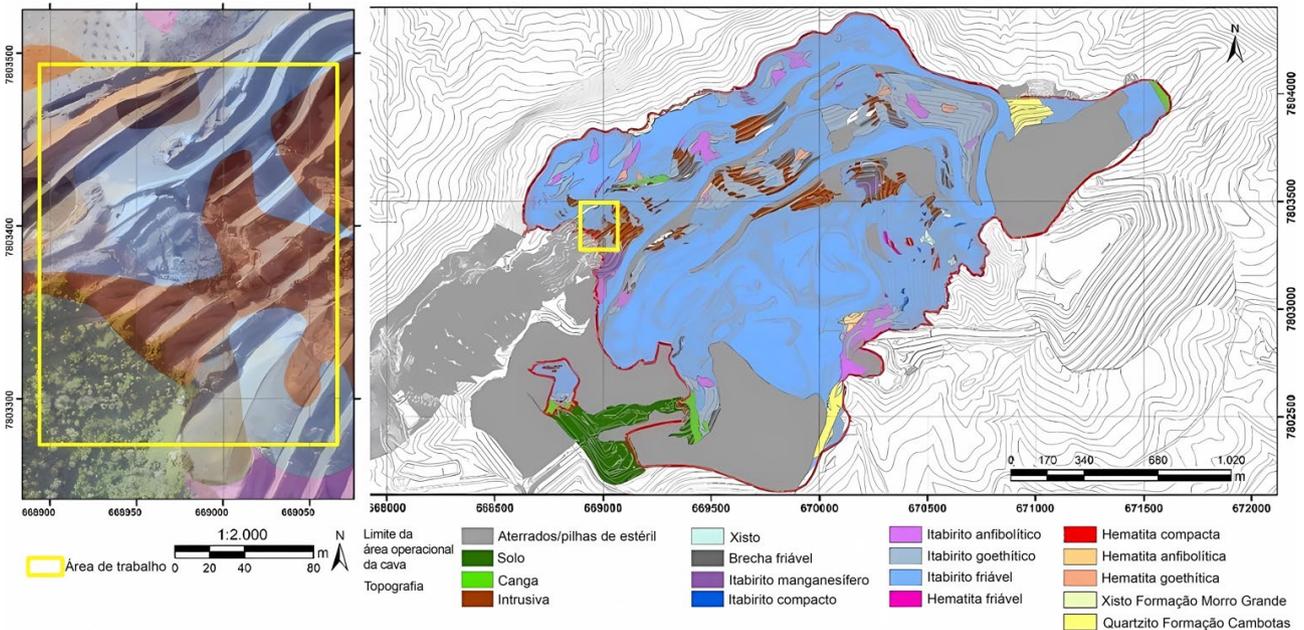


Figura 18. Mapa geológico da mina de Brucutu, com destaque para a área de estudo.

de intemperismo variando de W6 a W4, sendo o grau W5 o de maior ocorrência.

O litotipo BF foi mapeado como lentes que podem atingir desde porte métrico até centenas de metros. Os afloramentos encontram-se de forma pontual na região GW. Os contatos da BF estão diretamente associados à rocha intrusiva metabásica, aos IGO e aos IMN. De forma geral, ocorre como um litotipo transicional entre a IN e as variações de itabiritos supracitadas. A rocha apresenta coloração cinza-escuro com tons avermelhados e amarronzados, e ocorre de forma intensamente alterada. Apresenta composição predominantemente argilosa, com mineralogia de granulação fina a média composta de caulim, argilominerais, sericita e quartzo. Subordinadamente, observam-se variações predominantemente quartzosas e arenosas de granulação grossa.

A trama da rocha é composta essencialmente da foliação milonítica penetrativa, na qual se observam agregados de quartzo recristalizados, de granulação média a grossa, e sigmoidais em meio à matriz argilosa. As BF apresentam resistências variando de extremamente branda (R0) a brandas inferiores (R1-) e grau de intemperismo variando de W6 a W5.

Vale destacar que, assim como na presente pesquisa, Sá et al. (2013) verificaram, na cava da mina N4E, em Carajás, que as rupturas de taludes estavam associadas ao contato de corpos de hematita com rochas máficas.

Dados estruturais

A cava foi dividida em cinco domínios estruturais (Figura 19), porém será dada ênfase ao domínio I, tendo em vista que é onde está situada a área deste estudo.

A região do GW está situada na região do domínio I (N), localizada na porção norte da cava, limitado a norte pela crista da serra do Tamanduá, que contorna a cava Brucutu, e a sul pelo fundo da cava. A orientação média da foliação (Sn) é 137/32. As atitudes das fraturas (FR) estão pulverizadas, havendo maior concentração com atitude média de 334/85 (Figura 20).

Correlação dos resultados e hipóteses sobre as instabilidades

As Figuras 21 e 22 retratam que as principais causas para as instabilidades no setor GW da mina de Brucutu estão relacionadas com componentes geológicos, geotécnicos, estruturais, hidrogeológicos e pluviométricos.

As instabilidades presentes nos bancos 1.000 a 1.030 da região GW estão relacionadas a rochas IN em contato abrupto com IF da Formação Cauê.

A foliação principal tem orientação paralela aos taludes e mergulho inferior ao mergulho dos taludes. Essa condição é desfavorável à estabilidade dos taludes do GW, levando a rupturas do tipo plano-circular.

A Figura 21 mostra pontos de surgência da água no setor do GW, provenientes de aquíferos suspensos, especialmente pelo fato de a direção do fluxo da água subterrânea estar no sentido de oeste (W) para leste (E), contribuindo para a geração de instabilizações nos taludes.

Os dados pluviométricos mostram que a incidência de chuva foi responsável pela erosão do IF, afetando a geometria dos taludes, conforme evidenciado na Figura 21.

A Figura 7 mostra que ocorrem na área de estudo maciços rochosos altamente intemperizados e friáveis de baixa

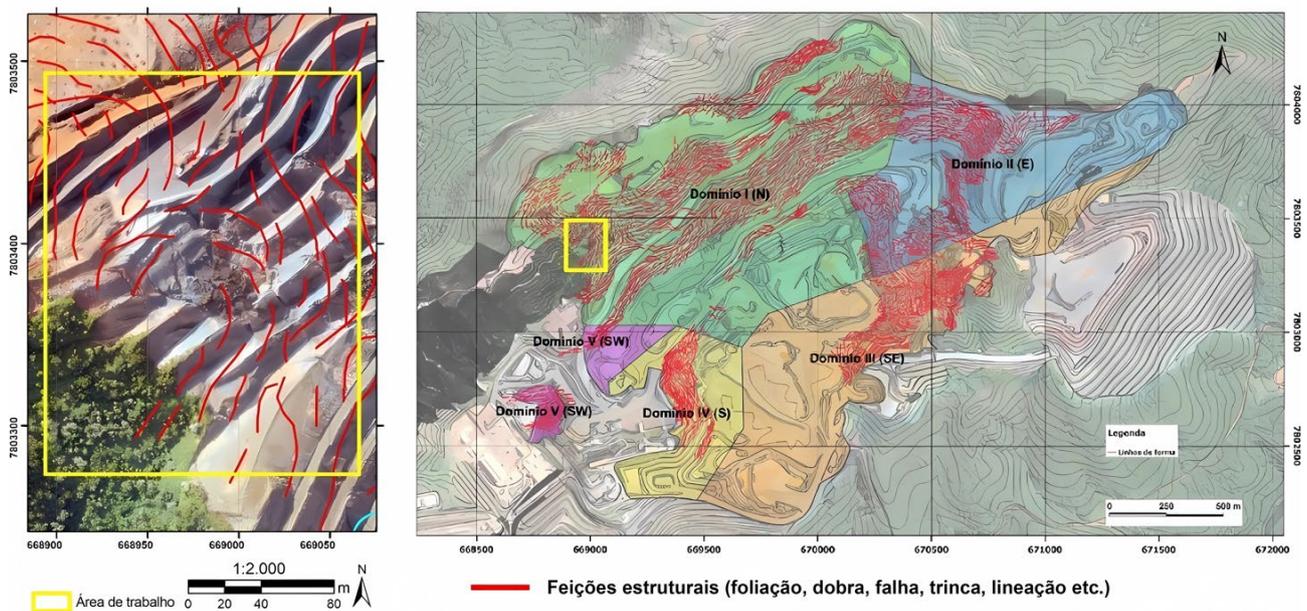


Figura 19. Domínios estruturais para a cava Brucutu, com destaque para a área de estudo.

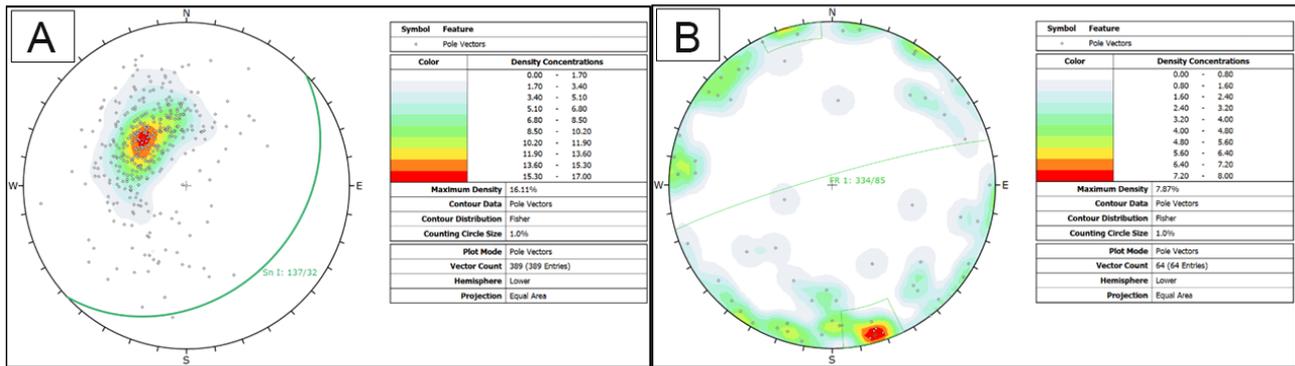


Figura 20. Diagrama estereográfico (*Fisher*). (A) Foliação pertencente ao domínio I; (B) família de fraturas pertencente ao domínio I.

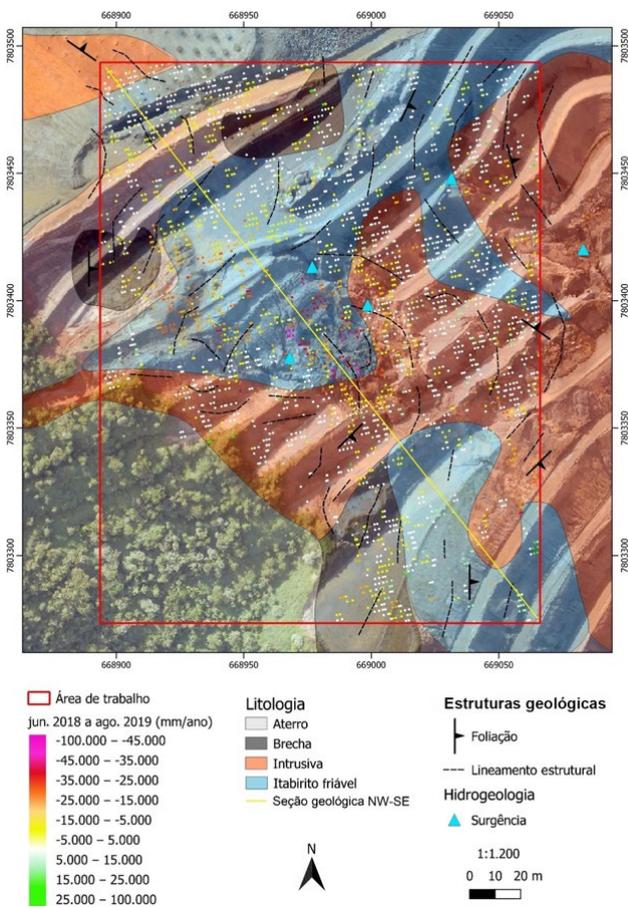


Figura 21. Integração dos dados litológicos, estruturais, de surgências e do radar orbital na área de estudo.

qualidade geomecânica. O contato de rochas intrusivas (pós-orogênico) com IF (Grupo Itabira — Formação Cauê) propicia o dismantelamento das faces do talude. Esse rompimento é condicionado pelo fato de o IF estar situado sobre a rocha intrusiva na área de estudo; como o itabirito é mais denso que a intrusiva, a instabilização do talude é favorecida.

As taxas de deformação superficiais detectadas nos períodos analisados são classificadas como muito lentas para o InSAR, segundo o método de descrição de escorregamentos da IUGS (1995). Além disso, analisando a quantidade de PS, nota-se que o período de junho de 2018 a agosto de 2019 registra maior concentração de PS (91.143) quando comparado ao período de junho de 2019 a novembro de 2020 (36.022). Essa diferença na quantidade de PS (perda dos pontos de monitoramento) está relacionada a dois fatores principais: aumento da taxa pluviométrica no período de junho de 2019 a novembro de 2020 e movimentação de materiais em decorrência da atividade de lavra na cava da mina de Brucutu, levando à decorrelação temporal das imagens de radar.

CONCLUSÕES

As instabilidades do setor GW para os taludes entre as cotas 1.000 e 1.030 m estão condicionadas pelo contato da formação ferrífera friável com rochas intrusivas altamente intemperizadas. Além disso, a presença de surgências de água na face dos taludes, o fato de o fluxo da água subterrânea estar no sentido de oeste (W) para leste (E) e o aumento da taxa pluviométrica no período de junho de 2019 a novembro de 2020, comparado com o período de junho de 2018 a agosto de 2019, contribuem com o aumento da umidade nos materiais geológicos. A direção preferencial das estruturas com mergulho para sudeste, no mesmo sentido da direção de mergulho dos taludes, também induz instabilidades. Dessa forma, os dados discutidos mostram que erosões e escorregamentos atuaram conjuntamente para a instabilização dos taludes, pois as rochas são muito friáveis na região de estudo.

Os resultados obtidos por meio da metodologia PSI foram eficazes para o período seco, com maior grau de recuperação de pontos PS. Já para o período chuvoso, foram inferiores, pois as altas taxas pluviométricas no período de junho de 2020 a novembro de 2020, junto à reconformação nos

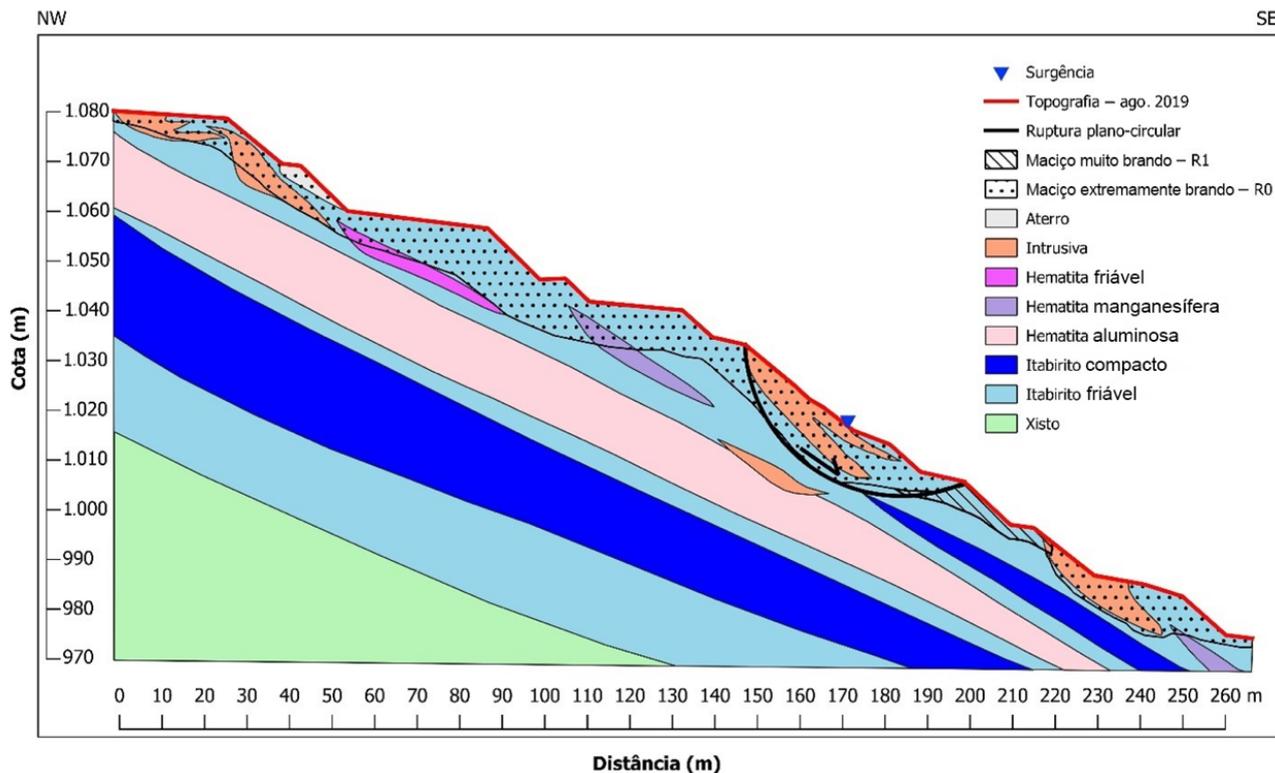


Figura 22. Seção geológica NW-SE, conforme indicado na figura anterior.

taludes do setor GW, culminam na falta de decorrelação temporal e na perda dos PS, sendo essa uma fragilidade na aplicação da tecnologia A-DinSAR.

Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização das visadas descendente e ascendente de modo a permitir a extração dos componentes vertical e horizontal. Além de ser possível comparar de forma mais ampla os resultados obtidos em períodos chuvosos e períodos secos para fins de monitoramento geotécnico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Vale S.A. e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) por tornarem possível a realização desta pesquisa e o investimento em inovação no âmbito do monitoramento de estruturas geotécnicas.

REFERÊNCIAS

Alkmim, F. F., Marshak, S. (1998). Transamazonian orogeny in the in the Southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse

in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90(1-2), 29-58. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00032-1)

Almeida, L. G. (2003). *Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto.

ANM – Agência Nacional de Mineração (2020). *Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2020*. Brasil: ANM. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf. Acesso em: 12 maio 2021.

Angeli, G. (2011). *Mapeamento litoestrutural da mina de Brucutu, escala 1:10.000*. Relatório interno. São Gonçalo do Rio Abaixo: Vale S.A., v. 1.

Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L., Rizzo, V. (2003). Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68(1-2), 31-51. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00197-7)

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification*. Nova York: John Wiley.
- Bieniawski, Z. T. (2011). Misconceptions in the Applications of Rock Mass Classifications and their Corrections. In: *Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design*. Madri: ADIF.
- Burgmann, R., Rosen, P. A., Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 169-209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Dehls, J. (2006). *Permanent Scatterer InSAR Processing*: Forsmark. SKB Rapport R-06-56. Estocolmo: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Disponível em: <https://www.skb.com/publication/1126068/R-06-56.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- Dorr, J. V. N. II. (1958). The Gandarela Formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 7(2), 63-64.
- Dorr, J. V. N. (1969). Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *USGS Professional Paper*. 641-A, 110. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/pp/0641a/report.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- Dorr, J. V. N. II, Gair, J. E., Pomerene, J. B., Rynearson, G. A. (1957). *Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. 81. ed. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM.
- Endo, I., Galbiatti, H. F., Delgado, C. E. R., Oliveira, M. M. F., Zapparoli, A. C., Moura, L. G. B., Peres, G. G., Oliveira, A. H., Zavaglia, G., Danderfer Filho, A., Gomes, C. J. S., Carneiro, M. A., Nalini Jr., H. A., Castro, P. T. A., Suita, M. T. F., Tazava, E., Lana, C. C., Martins-Neto, M. A., Martins, M. S., Ferreira Filho, F. A., Franco, A. P., Almeida, L. G., Rossi, D. Q., Angeli, G., Madeira, T. J. A., Piassa, L. R. A., Mariano, D. F., Carlos, D. U. (2019). *Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <https://qfe2050.ufop.br/mapa-geologico-do-quadrilatero-ferrifero-2019>. Acesso em: 10 abr. 2021.
- Endo, I., Oliveira, A. H., Peres, G. G., Guimarães, M. L. V., Lagoeiro, L. E., Machado, R., Zavaglia, G., Rosas, C. F., Melo, R. J. (2005). Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. *X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV International Symposium on Tectonics*, 279-282. Curitiba: Boletim de Resumos Expandidos.
- Endo, I., Silva, A. G., Mariano, D. F., Espinoza, J. A. A., Lopes, A. P., Angeli, G. (2008). *Estratigrafia e arcabouço estrutural dos distritos ferríferos de Brucutu e Dois Irmãos, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Relatório Interno – Vale S.A. Convênio Vale-Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP e Fundação Gorceix.
- Endo, I., Silva, L. G., Zavaglia, G. (2004). *Projeto Brucutu-Dois Irmãos Mapeamento Geológico, Estratigrafia e Arcabouço Estrutural*. Relatório Interno – Convênio UFOP e Vale S.A. p. 38.
- ESA – European Space Agency (2021). *About COSMO-SkyMed*. Itália: European Space Agency. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/cosmo-skymed>. Acesso em: 31 jun. 2021.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Hartwig, M. E. (2016). Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 605-621. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0832-8>
- Hartwig, M. E., Paradella, W., Mura, J. (2013). Detection and Monitoring of Surface Motions in Active Open Pit Iron Mine in the Amazon Region, Using Persistent Scatterer Interferometry with TerraSAR-X Satellite Data. *Remote Sensing*, 5(9), 4719-4734. <https://doi.org/10.3390/rs5094719>
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 15(6), 319-368.
- IUGS – International Union of Geological Sciences (1995). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 52(1), 75-78.
- Jung, H. C., Kim, S. W., Jung, H. S., Min, K. D., Won, J. S. (2007). Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. *Engineering Geology*, 92(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.02.007>
- Lume Estratégia Ambiental LTDA (2012). *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental*. Projeto Cava da Divisa. Lume Estratégia Ambiental LTDA.

- Macciotta, R., Hendry, M. T. (2021). Remote Sensing Applications for Landslide Monitoring and Investigation in Western Canada. *Remote Sensing*, 13(3), 366. <https://doi.org/10.3390/rs13030366>
- Martin, D., Stacey, P. (2018). *Cemented Sediments. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. Melbourne: CSIRO Publishing.
- Massonnet, D., Feigl, K. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- MME – Ministério de Minas e Energia (2020). *Boletim do Setor Mineral – outubro*. Brasil: MME. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/boletim-do-setor-mineral/boletim-do-setor-mineral-2013-outubro-2020-dados-atualizados-ate-setembro-de-2020.pdf/view>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- Mura, J. C., Paradella, W. R., Gama F. F., Santos, A., Galo, M., Camargo, O. P., Silva, A. Q., Silva, G. G. (2014). *Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: a case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data*. Amsterdam: International Society for Optical Engineering. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280716598_Monitoring_of_surface_deformation_in_open_pit_mine_using_DInSAR_timeseries_A_case_study_in_the_N5W_iron_mine_Carajas_Brazil_using_TerraSAR-X_data. Acesso em: 7 maio 2022.
- Ng, A. H., Ge, L., Yan, Y., Li, X., Chang, H., Zhang, K., Rizos, C. (2010). Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia. *Engineering Geology*, 115(1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.004>
- Ng, A. H., Ge, L., Zhang, K., Li, X., Chang, H., Zhang, K., Rizos, C. (2012). Estimating horizontal and vertical movements due to underground mining using ALOS PALSAR. *Engineering Geology*, 143-144, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.003>
- Paradella, W. R., Mura, J. C., Gama, F. F., Santos, A. R., Camargo, P. O., Galo, M., Silva, A. Q., Silva, G. G. (2015). *Deteção e Monitoramento de estabilidade de taludes e deformações superficiais em mina a céu aberto através de técnicas avançadas de interferometria diferencial de radar: uma avaliação nas minas de ferro de Carajás (N4E, N4W, N5W) utilizando dados do Satélite TerraSAR-X*. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/projetos/deteccao-e-monitoramento-terrasar-x>. Acesso em: 8 maio 2022.
- Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., Wojciechowski. (2009). InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. *Engineering Geology*, 106(1-2), 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.014>
- Pinto, C. A., Paradella, W. R., Mura, J. C., Gama, F. F., Santos, A. R., Silva, G. G., Hartwig, M. E. (2015). Applying persistent scatterer interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit manganese mine (Amazon region) with TerraSAR-X StripMap data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 095978. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095978>
- Qi, Y., Zhang, M., Qui, L., Tan, W., Sun, J., Hugang, P., Xu, W. (2019). *Application of Ground-based Deformation Monitoring Radar in Mine Slope Monitoring-Taking a mine in Inner Mongolia as an example*. International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Chongqing: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9173427>
- Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Movelic, S., King, C., Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert Salt Mine (France): comparison with groundbased measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.005>
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W., Machado, N. (1994). Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v2i1.227>
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodrigues, E., Goldstein, R. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- Sá, G., Figueiredo, R. P., Magalhães, F. (2013). Ruptura do Talude Sudeste da Mina de N4E: Um Estudo de Caso, Carajás, Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 3, 115-129. Disponível em: https://www.abge.org.br/downloads/revistas/RevistaABGE_Ruptura_do_Talude.pdf. Acesso em: 13 jun. 2023.
- Spier, C. A., Oliveira, S. M. B., Sial, A. N., Ríos, F. J. (2007). Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152(3-4), 170-206. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.10.003>

Vale S.A. (2017). *Relatório Anual Formulário 20-F*. Vale S.A. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/investors/information-arket/annualreports/20f/paginas/default.aspx>. Acesso em: 3 abr. 2021.

Vale S.A. (2019a). *Mapeamento Geológico-Geotécnico*. Procedimentos Operacionais Internos – Gerência de Geotecnia e Hidrogeologia. Vale S.A.

Vale S.A. (2019b). *Relatório de Recursos-Modelo BRU_0519*. Gerência de Recursos Minerais Ferrosos Vale. Vale S.A.

Walm Engenharia (2021). *Mina Brucutu Revisão e Atualização do Modelo Geológico-Geomecânico*. Relatório técnico interno. Walm Engenharia.

Yang, C., Zhang, Q., Zhao, C., Ji, L., Zhu, W. (2010). Monitoring mine collapse by DInSAR. *Mining Science and Technology*, 20(5), 696-700. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60265-9](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60265-9)

Yang, Z., Zhiwei, L., Zhu, J., Wang, Y., Wu, L. (2020). Use of SAR/InSAR in Mining Deformation Monitoring, Parameter Inversion, and Forward Predictions: A Review. *Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1), 71-90. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2954824>