

SEVEN

EDITORIA
2026

TECNOLOGIAS INOVADORAS DA ENGENHARIA DE MINAS: Eficiência, Gestão e Sustentabilidade

Volume 2

Jônatas Franco Campos da Mata, Herbert Souza e Silva,
Gerson Ferreira da Silva e Luana Alves de Lima



EDITORIA CHEFE

Prof^o Me. Isabele de Souza Carvalho

EDITOR EXECUTIVO

Nathan Albano Valente

ORGANIZADORES DO LIVRO

Jônatas Franco Campos da Mata

Herbert Souza e Silva

Gerson Ferreira da Silva

Luana Alves de Lima

2026 by Seven Editora

Copyright © Seven Editora

Copyright do Texto © 2026 Os Autores

Copyright da Edição © 2026 Seven Editora

PRODUÇÃO EDITORIAL

Seven Publicações Ltda

EDIÇÃO DE ARTE

Evellyn Thais de Souza

EDIÇÃO DE TEXTO

Stephanie Caroline Meyer de Quadros

BIBLIOTECÁRIA

Bruna Heller

IMAGENS DE CAPA

Evellyn Thais de Souza

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Seven Publicações Ltda. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Seven Publicações Ltda é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação.

Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.



O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

T255

Tecnologias Inovadoras da Engenharia de Minas :
Eficiência, Gestão e Sustentabilidade – Volume 2 /
Jônatas Franco Campos da Mata ... [et al.]. – São
José dos Pinhais, PR: Seven Editora, 2026.
Dados eletrônicos (1 PDF).

ISBN 978-65-6109-355-2

1. Engenharia de Minas. 2. Tecnologias.
3. Inovação. I. Mata, Jônatas Franco Campos da.
II. Silva, Herbert Souza e. III. Silva, Gerson Ferreira da.
IV. Lima, Luana Alves de. V. Título.

CDU 62

Bruna Heller - Bibliotecária - CRB10/2348

Índices para catálogo sistemático:

1 Engenharias 62

DOI: 10.56238/livrosindi202660

Esta obra contou com o emprego de ferramentas de inteligência artificial exclusivamente para revisão gramatical e ortográfica, sem interferência no conteúdo, na autoria ou nas ideias apresentadas.

Seven Publications Company
CNPJ: 43.789.355/0001-14
editora@sevenevents.com.br
São José dos Pinhais/PR

ORGANIZADORES DO LIVRO

Jônatas Franco Campos da Mata



Jônatas Franco Campos da Mata é natural de Lavras, no estado de Minas Gerais. Possui graduação em Engenharia de Minas (1994) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mestrado em Ciências e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais (2016) pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e doutorado em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas (2022) pela UFMG. Além disso, possui especialização em Gerenciamento de Projetos (2014) pela Fundação Getúlio Vargas.

É professor efetivo do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Campus Janaúba, na região Norte de Minas Gerais, atuando em projetos de ensino, pesquisa e extensão. Tem se dedicado às seguintes linhas de pesquisa: automação de equipamentos de mineração, geoprocessamento, métodos geofísicos de prospecção mineral, geometalurgia, inteligência artificial, ESG, tecnologias aplicadas ao aproveitamento de minérios, fechamento de mina, minerais aplicados à produção de energia limpa, metodologias ativas de aprendizagem, assessoria a minerações e outras questões.

Possui experiência consolidada como Engenheiro de Minas em empresas de mineração. Seu foco dirigiu-se às seguintes especialidades: pesquisa mineral, planejamento de mina, desenvolvimento e lavra, operação de usina de beneficiamento mineral, processos e gerenciamento de projetos mineiros.

Herbert Souza e Silva



Natural de Curvelo/MG, Herbert desenvolveu sua trajetória acadêmica e profissional no Norte de Minas Gerais. Graduiu-se em Ciências Biológicas (2009) pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), na cidade de Montes Claros, região Norte de Minas Gerais. Nesta instituição, também concluiu o mestrado em Biodiversidade e Uso dos Recursos Naturais (2012). Posteriormente, ampliou sua formação ao obter o título de Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras (FIPMoc), em Montes Claros.

Ao longo dos anos, atuou em diversas instituições de ensino, como o IFNMG, UAB/UNIMONTES e UFVJM, consolidando sua experiência em educação a distância e ensino superior presencial. Atualmente, é professor do curso de Engenharia de Computação no Centro Universitário UNIFIPMoc e instrutor técnico do SENAR.

Sua atuação está voltada para temas como geoprocessamento, aerofotogrametria com drones, consultoria ambiental e minerária, além da elaboração de estudos técnicos como planos de fechamento de mina, relatórios espeleológicos e processos de outorga de recursos hídricos. Valoriza a integração entre ensino, pesquisa e extensão, com foco em soluções sustentáveis e tecnológicas aplicadas à engenharia e ao meio ambiente.

Gerson Ferreira da Silva

Gerson Ferreira da Silva tem formação em Engenharia de Minas (2004) pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela mesma instituição e doutor (2023) em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Possui especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho e outras formações complementares nas áreas de geotecnologia, inteligência artificial e ensino a distância.



Atualmente é professor efetivo da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Campus Janaúba, no norte de Minas Gerais. Ministra as disciplinas de Lavra de Mina a Céu Aberto, Lavra Subterrânea, e Perfuração e Desmonte de Rochas. Coordena projetos de pesquisa, ensino e extensão voltados à sustentabilidade na mineração, reaproveitamento de resíduos minerais e educação tecnológica. Também participa ativamente de comissões acadêmicas e colegiados da instituição.

Apresenta experiência consolidada na indústria de mineração, atuou como responsável técnico em empresas mineradoras e como engenheiro de minas em órgãos públicos, com ênfase em licenciamento ambiental. É autor de diversos artigos científicos, capítulos de livros e trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais. Entre seus temas de pesquisa destacam-se o beneficiamento de minerais industriais, a recuperação de áreas degradadas e o uso de tecnologias digitais aplicadas à mineração.

Luana Alves de Lima

Luana Alves de Lima é natural da cidade do Rio de Janeiro, do estado homônimo. É hidrogeóloga e atua como professora no Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia (IECT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), no Campus de Janaúba, situada no Norte de Minas Gerais. Com uma sólida formação em Geologia (2007), construída na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), onde também concluiu seu mestrado (2009), Luana aprofundou seus estudos em Geociências com ênfase em Geoquímica Ambiental no doutorado (2019) realizado na Universidade Federal Fluminense (UFF).



Sua trajetória acadêmica e profissional se destaca pela dedicação à compreensão das dinâmicas hidrogeoquímicas dos aquíferos, especialmente em ambientes costeiros. Durante o doutorado, concentrou suas pesquisas na Bacia de Campos (RJ), uma região estratégica para a exploração de petróleo no Brasil. Nesse contexto, investigou a interação entre águas subterrâneas e águas de formação, abordando questões cruciais como a intrusão salina, a contaminação por águas residuais da indústria petrolífera e os impactos ambientais associados à exploração desses recursos.

Além de sua atuação na área de petróleo, Luana também desenvolve pesquisas e atividades docentes nas áreas de geoprocessamento, geologia ambiental e hidrogeologia de aquíferos fraturados. Suas aulas contemplam disciplinas como Hidrogeologia, Geoprocessamento, Estratigrafia e Educação Ambiental, contribuindo para a formação de engenheiros e cientistas com uma visão crítica e integrada dos desafios ambientais contemporâneos.

Seu trabalho combina excelência científica com um forte compromisso com a sustentabilidade e a gestão responsável dos recursos hídricos, tornando-se referência em sua área de atuação.

APRESENTAÇÃO

A Engenharia de Minas é um campo em constante transformação, impulsionado pelo avanço tecnológico, pela busca contínua por eficiência operacional e, sobretudo, por um compromisso crescente com a sustentabilidade e a responsabilidade socioambiental. Neste cenário desafiador e inspirador, nasce o livro *Tecnologias Inovadoras da Engenharia de Minas: Eficiência, Gestão e Sustentabilidade*, que reúne temas cruciais e atuais da área em uma abordagem didática e comprometida com a formação de profissionais qualificados.

Cada capítulo desta obra reflete o empenho dos autores em abordar, de maneira acessível, tópicos essenciais à Engenharia de Minas, como a gestão de recursos hídricos, preservação ambiental, ventilação em minas subterrâneas, sistemas de despacho e planejamento de curto prazo, além de tecnologias emergentes, como o uso da geofísica de eletrorresistividade, drones e sensoriamento remoto aplicados à mineração e à segurança de barragens.

Os autores deste livro têm se dedicado ao ensino, pesquisa e extensão em instituições de ensino superior situadas na região Norte de Minas Gerais: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – Campus Janaúba e Centro Universitário UNIFIPMoc – Campus Montes Claros. A região norte de Minas é, notadamente, marcada por baixos indicadores sociais e clima semiárido. Tais dificuldades reforçam o papel transformador da educação na vida dos estudantes e da própria sociedade do entorno destas instituições, bem como iniciativas como a publicação do presente livro alinham-se a esta importante missão.

Mais do que um compêndio técnico, este livro é fruto da tradição das instituições envolvidas, que têm formado engenheiros comprometidos com o progresso sustentável do setor mineral. A combinação entre solidez acadêmica, inovação e aplicabilidade prática faz desta obra um material de referência para estudantes e profissionais que atuam ou desejam atuar na Engenharia de Minas contemporânea.

Ao apresentar este livro, destacamos não apenas a relevância dos temas discutidos, mas também o compromisso ético e pedagógico dos autores em contribuir com uma engenharia mais eficiente, inteligente e responsável. Convidamos o leitor a embarcar nesta jornada de conhecimento que alia técnica, visão crítica e sensibilidade para os desafios do presente e as possibilidades do futuro.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....8

 10.56238/livrosindi202660-001

DIAGNÓSTICO TÉCNICO-OPERACIONAL DO SISTEMA DE BRITAGEM DE CROMITA: INDICADORES, CAUSAS-RAIZ E PROPOSTAS DE MELHORIA

Flávia Oliveira Souza, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Herbert Souza e Silva, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 2.....26

 10.56238/livrosindi202660-002

RECONCILIAÇÃO ENTRE O PLANEJAMENTO DE LONGO E CURTO PRAZO DE UMA MINA DE MINÉRIO FOSFÁTICO (P2O5)

Felipe Rodrigues dos Santos, Hugo Leonardo Oliveira Tomaz de Aquino, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Herbert Souza e Silva, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 3.....44

 10.56238/livrosindi202660-003

DESMONTE CONTROLADO E DESEMPENHO GEOMECÂNICO DE TALUDES: ESTUDO DE CASO NA MINA FAZENDA BRASILEIRO (EQUINOX GOLD)

Gustavo da Silva Garcia, Sérgio Eduardo Rodrigues Costa, Vitor Abraão Gonçalves Silva, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Herbert Souza e Silva, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 4.....64

 10.56238/livrosindi202660-004

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA E HIDROGEOLÓGICA SUBSUPERFICIAL APLICADA À AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE BARRAGEM DE REJEITOS DE AREIA

Herbert Souza e Silva, Claydson Ferreira Faria, Danillo Gustavo Silva Azevedo, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 5.....80

 10.56238/livrosindi202660-005

MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA O ESTUDO DE DOLINAS EM AMBIENTE CÁRSTICO NO NORTE DE MINAS GERAIS

Herbert Souza e Silva, Claydson Ferreira Faria, Thatiane Lais Santos Silva, Danillo Gustavo Silva Azevedo, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 6.....100

 10.56238/livrosindi202660-006

AVALIAÇÃO GEOLÓGICO-TECNOLÓGICA E ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE UMA JAZIDA DE AREIA NA REGIÃO DE MONTES CLAROS (MG)

Herbert Souza e Silva, Claydson Ferreira Faria, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 7.....116

  10.56238/livrosindi202660-007

PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Héllen Tatiane Dias Cordeiro, Ângela Maria da Silva, Eliane Alves Souza, Talívia Rodrigues Brito, Silvânia Pereira Monção, Joyce Gabriele Lopes Silva, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata.

CAPÍTULO 8.....140

  10.56238/livrosindi202660-008

AValiação DO DESEMPENHO DE DESMONTES DE ROCHA EM PEDREIRAS SITUADAS NO VALE DO MUCURI EM MINAS GERAIS

André Luiz Alves da Silva, Ricardo Alves de Silva, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata.

CAPÍTULO 9.....159

  10.56238/livrosindi202660-009

PANORAMA DOS PROCESSOS METALÚRGICOS E AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL DOS REJEITOS DA NEXA RESOURCES TRÊS MARIAS

Rômulo Eduardo Miranda, Ricardo Alves de Silva, Luana Alves de Lima, Gerson Ferreira da Silva, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata.

CAPÍTULO 10.....179

  10.56238/livrosindi202660-010

SEGURANÇA HÍDRICA NO NORTE DE MINAS GERAIS: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS NA GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Wagner Cesar da Silva Lossano, Talívia Rodrigues Brito, Cleyton Fernandes de Souza, Joyce Gabriele Lopes Silva, Gerson Ferreira da Silva, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima.

CAPÍTULO 11.....196

  10.56238/livrosindi202660-011

LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS: RELEVÂNCIA NA GESTÃO SUSTENTÁVEL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Victor Almeida Matos, Gerson Ferreira da Silva, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata, Luana Alves de Lima.

DIAGNÓSTICO TÉCNICO-OPERACIONAL DO SISTEMA DE BRITAGEM DE CROMITA: INDICADORES, CAUSAS-RAIZ E PROPOSTAS DE MELHORIA

 10.56238/livrosindi202660-001

Flávia Oliveira Souza

Bacharel (2019) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2024) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: flavia.sousa@ufvjm.edu.br

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG

Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV

Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN

Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES

Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras

Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES

Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros

E-mail: herbert.silva@afya.edu.br

ID Lattes: 3925629376472160

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

Orientador deste trabalho

E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 4556375475161993

RESUMO

A cominuição é uma operação que permite reduzir o tamanho dos grãos de minério através da britagem e moagem. As paradas dos equipamentos do circuito de britagem, influenciam na produção das empresas de mineração, e o correto mapeamento dessas paradas permitem a construção de indicadores assertivos e direcionamentos para atuação nas causas raízes dos problemas. Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma avaliação geral e realizar uma análise do sistema de britagem do mineral de cromita. A partir da análise do circuito de britagem foi possível sugerir melhorias para os equipamentos de britagem e apresentar uma melhor distribuição e qualificação dos operadores do circuito de cominuição. Foi elaborado um plano de ação para sanar os problemas que causavam

eventos de paradas no setor, sugerido a implementação de um projeto de instalações de câmeras no setor para apoiar o monitoramento dos equipamentos. Essas ações irão permitir a redução de operadores para serem realocados na quarta turma e a concretização do Projeto Check List Digital.

Palavras-chave: Equipamentos; Produtividade; Mão de obra.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de caráter exploratória considerada importante, que existe desde a antiguidade segundo Freitas (2009) que é ligada a uma necessidade humana, que ao decorrer do tempo/história tornou-se objeto de avanços tecnológicos, envolvendo questões ligadas aos aspectos sociais e econômicos, que em suma proporcionou a intensificação e a exploração dos recursos naturais. Desse modo Freitas (2009), destaca que após a primeira revolução industrial, o homem passa a explorar a natureza, além do que necessita, com isso houve um crescimento significativo nas atividades de extração mineral.

Vale lembrar que, a mineração no Brasil se tornou um processo de desencadeamento produtivo e que de acordo com Sousa (1849), o desenvolvimento dessas atividades permitiu encontrar os primeiros depósitos minerais de ouro no Brasil no século XVIII, especificamente nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás, levando-se em consideração a importância da mineração, pode-se dizer que o Brasil é atualmente o portador de importantes depósitos minerais, dentre eles, minerais metálicos, não metálicos, energéticos, entre outros.

O aproveitamento dos depósitos minerais ocorre através das etapas de exploração e do processo de beneficiamento. Em relação ao beneficiamento, Trindade e Barbosa Filho (2002), fazem uma importante ressalva, citando como exemplo o ouro que é beneficiado através dos processos de britagem, moagem, classificação, flotação e espessamento, porém, sabe-se que, não necessariamente todos estes processos são encontrados em uma rota de beneficiamento de ouro, ou seja, salientam que isso ocorre devido às diferentes propriedades do minério.

No que se refere a exploração das substâncias minerais, pode-se realizar a extração de minérios através da lavra a céu aberto ou subterrânea. De acordo com Finkel et al. (2001), o desenvolvimento de técnicas de mineração em subsolo nas últimas décadas tem sido direcionado para métodos de produção de larga escala, e associados a equipamentos mecanizados. A mineração subterrânea apresenta diversos métodos, tais como: câmaras e pilares, corte e enchimento e abatimento de blocos. O método de lavra a ser selecionado para aplicação em uma mina, será baseado nos fatores de economia, segurança e preservação ambiental. Para Dominy et al. (1998) a mineração subterrânea de minerais metálicos está sempre associada a diluição. O excesso de diluição é comumente citado como razão de insucessos de diversas minas em todo o

mundo. Para minimizar os riscos deste insucesso, é necessário tomar medidas para controlar a diluição durante as atividades de lavra.

Dentre o processo de beneficiamento tem-se a cominuição, que é uma operação que permite reduzir o tamanho dos grãos de minério através da britagem e moagem. Essa etapa é realizada para liberar os minerais valiosos contidos no minério e torná-los disponíveis ao consumo da sociedade. Portanto, a cominuição é um processo importante na produção de metais, não metais e minerais industriais. Luz; Sampaio; França (2010), fazem uma importante explanação acerca das operações de cominuição, afirmando que estes processos compreendem diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a mina até sua adequação ao processo industrial subsequente. Na etapa de lavra, o desmonte do minério com o auxílio de explosivo pode ser visto como um primeiro estágio de fragmentação, onde são produzidos blocos volumosos, mas de um tamanho que permite alimentar os equipamentos de britagem, que nada mais é do que, a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, podendo ser repetida diversas vezes por diferentes tipos de equipamentos na visão de Luz et al., (2010).

Na realização das operações de beneficiamento são empregados diversos equipamentos, tais como: britadores, moinhos e colunas de flotação industrial. Esses equipamentos são acompanhados de diversos recursos tecnológicos e para seu máximo aproveitamento, é fundamental o conhecimento técnico e operacional por parte dos operadores (colaboradores).

Visando uma melhor eficiência dos equipamentos de beneficiamento é importante obter uma mão de obra qualificada, a partir de profissionais que tenham especialização na área de mineração. Também é essencial por parte das empresas realizarem treinamentos específicos que melhorem o rendimento dos colaboradores e diminua os riscos de acidentes de trabalho.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu uma análise e identificação das causas-raiz que proporcionam uma baixa produtividade no processo de britagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BENEFICIAMENTO MINERAL

O beneficiamento mineral envolve diversas operações unitárias, que podem ser realizadas via úmida ou seca, com o objetivo de modificar a forma, o tamanho ou a concentração relativa do material, sem alterar a identidade química ou física do mineral.

Para Chaves; Arthur, (2002) o Beneficiamento de Minérios ou Tratamento de minérios consiste em operações aplicadas aos bens minerais visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies de minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais. Há, no entanto, autores que defendem um conceito

mais amplo para o beneficiamento, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer até alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor.

Chaves; Arthur, (2003) ainda acrescentam que operações com a aglomeração (sinterização e pelotização) de minérios finos, ustulação e calcinação são consideradas, dentro desse conceito, como beneficiamento de minérios, mas também são consideradas como sendo operações pirometalúrgicas. Os termos tratamento e beneficiamento serão usados, neste texto, indistintamente porque o mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente. Esses minerais valiosos, aproveitáveis como bens úteis, são chamados de minerais-minério.

O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga. As operações de concentração ou separação seletiva de minerais baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se destacam: peso específico (ou densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

Tendo em vista as explanações acima faz sentido analisar o fluxograma do processo de beneficiamento Mina Ipueira do processamento mineral de cromita, para melhor compreensão do propósito de beneficiamento mineral:

1.2 COMINUIÇÃO

A cominuição envolve os processos de redução das dimensões dos grãos minerais presentes no minério. A britagem é o primeiro estágio da cominuição, sendo necessária para iniciar a liberação dos grãos minerais para as etapas subsequentes. Mullar, et al., (2002).

Segundo Chaves (2003), a cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado. Tal objetivo inclui a necessidade de controlar o tamanho necessário dos produtos, evitando a geração de quantidades excessivas de finos.

1.2.1 Britagem

Segundo Luz et al. (2018), a britagem é um processo composto por operações de fragmentação cujo objetivo é reduzir os grãos minerais para determinado tamanho, de forma a

liberar os minerais de interesse e garantir o atendimento à qualidade demandada nas operações subsequentes de beneficiamento mineral. Esse conjunto de técnicas se dá principalmente por ação mecânica, externa ou interna.

Ainda conforme Luz et al. (2018), as etapas de fragmentação de minérios perpassam diversos estágios, indo desde o desmonte de rochas na mina, passando pelas etapas de britagem e podendo chegar até a moagem, que permite a redução em granulometria mais fina. Percorrido todo esse circuito pode se obter o produto adequado/desejado a concentração ou processo industrial específico.

Portanto, seria baldado falar em britagem sem uma breve descrição e ou classificação das etapas da britagem que segundo Luz; Figueira; Almeida (2018) são três: Britagem Primária, Britagem Secundária e Britagem Terciária.

1.2.2 Equipamentos de Britagem

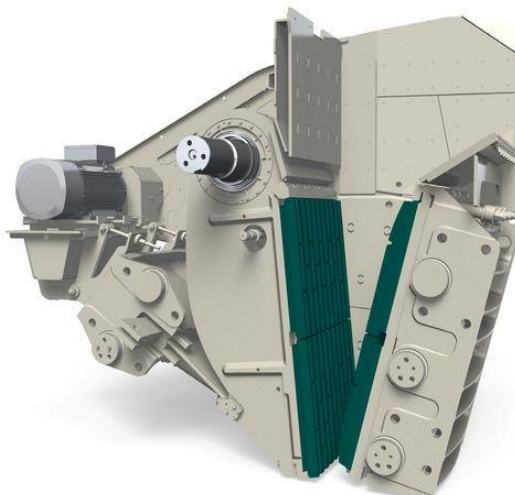
Os equipamentos de britagem são vistos como chave principal para o desenrolar do serviço de mineração, com isso não pode de forma alguma ter falhas, desse modo são usados equipamentos específicos como: britador giratório secundário, britador de mandíbulas secundário, britador de martelos (impacto), britador cônico e britador de rolo Luz et al. (2004). Esta fase do processo pode ser realizada por esses tipos de equipamentos, lembrando que o giratório, o de mandíbulas e o de martelos são semelhantes àqueles utilizados na britagem primária, porém apresentando dimensões diferentes.

1.2.2.1 Britador de Mandíbulas

O britador de mandíbula (Figura 1) é o principal equipamento utilizado na britagem primária e secundária. São classificados em 2 tipos, baseando no mesmo mecanismo de acionamento de mandíbula móvel. Tendo assim: a) o britador de 1 eixo – tipo Dodge b) 2 eixos – tipo Blake. A mandíbula do britador de 2 eixos tem o movimento pendular enquanto a do de 1 eixo tem o movimento elíptico (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

Em termos de custos de capital, britadores de dois eixos são cerca de 50% mais elevados que os de um eixo, sendo indicados para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação. A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões de abertura da alimentação.

Figura 1: Britador de Mandíbulas.



Fonte: Metso (2024).

A granulometria do produto é estabelecida pelo ajuste da descarga, sendo então definida pela razão de redução que deve ser em torno de 5:1. Os britadores de mandíbulas caracterizam-se pela existência de duas superfícies, sendo uma fixa e outra móvel. O material é fragmentado pelas 20 aproximações e pelo afastamento da placa móvel, que atua em uma velocidade entre 100 e 300 rpm, sendo o material escoado por gravidade (VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

2.2.2.2 Britador Cônico

O britador cônico (Figura 2) possui o mesmo princípio de operação do britador giratório. Ao contrário do que ocorre no britador giratório, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nessa região, proporcionando um controle mais preciso da granulometria do produto final (CHAVES; PERES, 2006).

Figura 2: Britador Cônico.



Fonte: Metso (2024).

Com movimento vertical do cone, para cima e para baixo, controla-se a abertura de saída, para tal, utilizam-se dispositivos hidráulicos. A sua configuração construtiva permite um melhor aproveitamento do volume de câmara para realizar o trabalho de britagem Luz et al. (2004).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi realizado inicialmente uma ampla revisão bibliográfica sobre o processo de cominuição, através de trabalhos de dissertação, teses, artigos e relatórios.

O desenvolvimento deste trabalho fundamentou-se nas seguintes etapas, conforme Figura 3.

Figura 3: Metodologia do Trabalho.



Fonte: Autoria própria (2023)

Na etapa de levantamento de dados, as atividades foram direcionadas na busca dos dados preliminares, tais como: informações de paradas operacionais, mecânicas e elétricas, bem como de manutenção do processo de britagem e inspeção em campo das paradas mapeadas (flexibilidade dos operadores e máquinas, manutenções, rotina da operação e outros indicadores).

A etapa seguinte foi a investigação das causas-raiz, através da construção de um Diagrama de Ishikawa. A partir da investigação das causas, seguiu-se o processamento dos dados e a aplicabilidade das ações de todas as informações coletadas na planta de beneficiamento, através da construção de um banco de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Na primeira etapa, foi feito um levantamento de informações diárias em campo. Tal levantamento foi realizado no setor das britagens, tendo como base as atividades realizadas e as paradas no setor (falhas operacionais, mecânicas, elétricas, falta de maquinário).

Além disso, foi realizada uma coleta e análise de dados provenientes dos arquivos da operação. Foram consultados formulários em Excel disponíveis no setor, sistema utilizado para registrar as informações preenchidas turno a turno de todas as paradas de produção. Neste sistema, são inseridas diversas informações, tais como: data, turno, equipamento, horímetro inicial e final, códigos das paradas identificadas no Checklist (Figura 4), tempo de início e término da parada e motivo responsável pela parada (manutenção mecânica, elétrica ou produção).

OBSERVAÇÕES DA CBP-02				
Turno	3 ^a	Data	02-10-23	
CÓDIGOS DE PARADAS				
BR-01	Horímetro Inicial:		1228925	
Horímetro Final:		1229372		
BR-02	Horímetro Inicial:			
Horímetro Final:				
Hora Inicial	Hora Final	Horas Total	Nº do Código	
16:00	16:10	00:10	8	
16:10	16:40	00:30	7	
17:00	17:15	00:15	4	
20:30	21:50	01:20	10	
23:15	23:45	00:30	7	
Parado - 02:45				
AL. Total - 370,1				
Código Motivo				
1	Iniciar / Encerrar			
2	Falta de Material			
3	Falta de Máquina			
4	Engaiolamento			
5	Lubrificação			
6	Manutenção elétrica			
7	Limpeza			
8	DDS			
9	Manutenção no Silo			
10	Operador de equipamento			
11	Manutenção na Calha			
12	Chuva			
13	Manutenção geral			
14	Manutenção Alimentador			
15	Manutenção Britador			
16	Manutenção CT			
17	Manutenção Peneira			
18	Falta de água			

35

classificados em:

- Operacional;
- Mecânica;
- Material;
- Máquina;
- Elétrico;
- Outros.

As consultas aos relatórios do sistema de controle de horas inoperantes permitiram definir os principais eventos que causavam paradas no setor da britagem, os quais são apresentados no quadro da Figura 5. Estes problemas, que impactam as horas de produção efetiva do setor, podendo trazer a diminuição dos ganhos ou prejuízos.

Figura 5: Principais motivos de inoperância dos setores da britagem.

BR200	CBP03	CBP01	CBP02
FALTA DE MATERIAL	FALTA DE MATERIAL	LIMPEZA	MANUTENÇÃO PENEIRA
PROBLEMAS NAS CT'S	MANUTENÇÃO NAS CT'S	OPERADOR DE EQUIPAMENTO	LIMPEZA
FALTA DE MÁQUINA	MANUTENÇÃO BRITADOR	FALTA DE MÁQUINA	OPERADOR DE EQUIPAMENTO
BRITADOR	MANUTENÇÃO PENEIRA	MANUTENÇÃO NAS CT'S	FALTA DE MÁQUINA
DESOBSTRUÇÃO	LIMPEZA	MANUTENÇÃO BRITADOR	ENGAIOLAMENTO
PROBLEMA ALIMENTADOR	ENGAIOLAMENTO	ENGAIOLAMENTO	MANUTENÇÃO BRITADOR
LIMPEZA	MANUTENÇÃO ELÉTRICA	MANUTENÇÃO ELÉTRICA	MANUTENÇÃO NAS CT'S

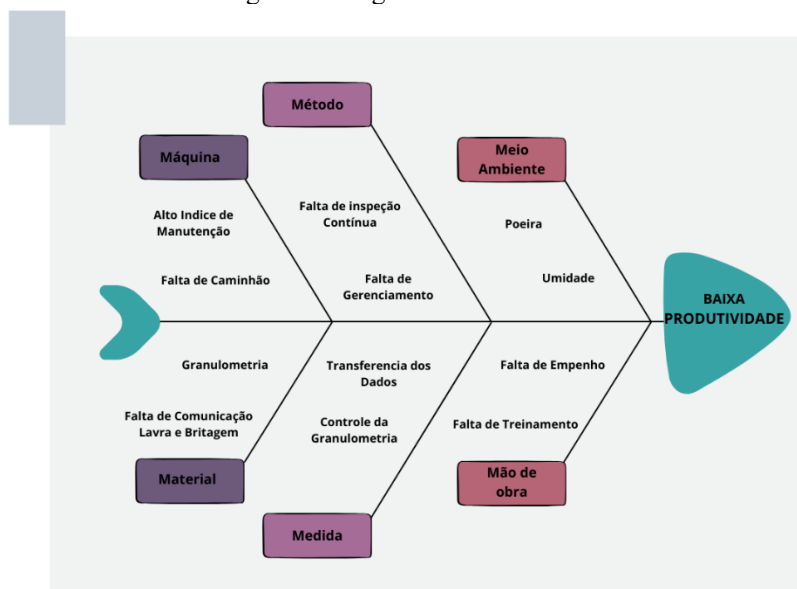
Fonte: Autoria própria (2024)

4.2 2ª ETAPA - INVESTIGAÇÃO DAS CAUSAS

A partir da análise dos dados coletados em campo e a consulta no relatório anual de inoperância dos equipamentos, foram selecionados diversos pontos a serem resolvidos de imediato. Com o motivo de parada selecionado, a próxima etapa foi identificar as causas-raiz do problema, permitindo a implantação das mudanças e, por fim, o processamento dos dados para serem apresentados para a gestão do setor.

Foi possível elaborar o Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 6. A partir da identificação das principais causas de paradas do setor da britagem, identificaram-se as causas-raiz dos problemas. Deste modo, foi possível relacionar os eventos de parada, as causas de forma clara através de categorias, permitindo rastrear a natureza dos problemas encontrados.

Figura 6: Diagrama de Ishikawa.



Fonte: Autoria própria (2023)

No item *Máquina* (Figura 6) foram avaliados os equipamentos, e os que apresentaram maiores causas de paradas foram:

- Alto índice de manutenção nos seguintes equipamentos:
 - Correias transportadoras: devido a carga de material, acúmulo de finos, blocos grandes, falta de raspadores, mancal, rolete e cavalete, rasgos nas correias.
 - Britadores: Desobstrução, desgastes das mandíbulas, regular APF.
 - Peneiras: Troca de telas.
 - Calhas: Desgastes nas calhas e material preso na calha.
- *Falta de caminhão*: levando em consideração a disponibilidade de carregadeira. Ocasionalmente grandes motivos de horas ociosas e gerando baixa produtividade.

Quando se trata de *Material*, as maiores causas são:

- *Granulometria*: Tamanho dos blocos alimentados, o que afeta de forma direta na parada de horas para a desobstrução do material, devido a granulometria elevada, mesmo tendo a disposição um rompedor hidráulico, muitas das vezes não se utiliza devido à falta de operador, manutenção, ou até mesmo por falta de uma orientação do técnico responsável pelo turno devido à falta de comunicação;
- *Falta de comunicação entre Lavra e Britagem*: Sendo o fator principal na baixa produtividade nas britagens primária e secundária, a falta de material. Se tivesse uma melhor comunicação, as horas paradas por material do subsolo, poderia ser programada

outras atividades relacionadas a manutenção, ou até mesmo a alimentação da Magnesita na britagem secundária nos dias que não tivesse o material lavrado disponível.

Os indicadores de medida e método que foram identificados respectivamente:

- *Transferência dos dados*: A divergência em preencher check list, os dados da produção, em informar ao técnico de forma clara os dados obtidos no setor.
- *Controle da granulometria*: A dificuldade dos operadores em manter a granulometria adequada, não utilizar o rompedor quando necessário.
- *Falta de inspeção continua*: A falta de um responsável para fazer a inspeção dos equipamentos para ser feito a manutenção dos mesmos e a possibilidade de acrescentar na Ordem de serviço, uma atividade mesmo depois de ser feita a OS.
- *Falta de Gerenciamento*: Mesmo com os técnicos em área para gerenciar as atividades, os operadores sentem a dificuldade de organizar e direcionar as atividades, principalmente em momentos que a planta está parada.

Em relação a *Meio Ambiente e Mão de Obra* tem-se:

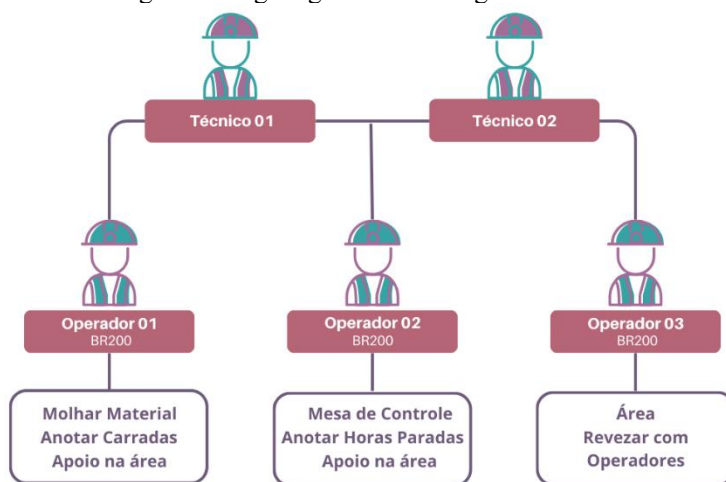
- *Poeira*: Ao alimentar o silo com o material com a carregadeira, a redução da granulometria com o rompedor e a própria britagem gerando finos, causando uma grande quantidade de poeira.
- *Umidade*: Dependendo da umidade, o material pode causar paradas na planta.
- *Falta de Empenho*: Colaborador demora muito tempo na troca de turnos, horário de refeição e não fazem além da sua função.
- *Falta de Treinamento*: Apesar da maioria dos colaboradores já está no serviço a bom tempo, ainda tem aqueles, que não sabem como preencher o check list e o boletim de horas paradas corretamente.

4.3 3ª ETAPA - PROCESSAMENTO DOS DADOS E APLICABILIDADE DAS AÇÕES

O processamento dos dados foi feito utilizando um Organograma (Figura 7) para descrever como os operadores organizam as atividades em cada setor. Utilizou-se o aplicativo Excel para criar gráficos de Pareto, permitindo mapear as principais causas de paradas nos setores de cada britagem durante o ano de 2023.

A etapa seguinte foi a definição das ações de acordo com o levantamento de campo e medidas a serem aplicadas para solucionar o problema, demonstrando ser possível a redução desse tempo de parada aperfeiçoando a gestão das equipes e otimização dos processos.

Figura 7: Organograma da Britagem Primária.



Fonte: Autoria própria (2023)

Foi possível observar, em campo, que no setor da britagem primária trabalham três funcionários por turno, como mostra o Organograma da Figura 7. Tal alocação deve-se à demanda de sempre ficar um funcionário no controle da água (Figura 8) devido a poeira causada ao alimentar o silo, que também é responsável por anotar a quantidade de caminhões que chegam com o material para o pátio e ajudar na limpeza durante o turno. O outro operador na mesa de controle, que também faz as anotações na ficha de horas paradas e quando necessário auxilia o terceiro operador que fica na área, na hora de limpeza e quando a desobstrução do material é de difícil retirada. O terceiro operador de suporte na área, é para fazer limpeza, desobstrução do material nas calhas e revezar com os operadores no horário de almoço.

Logo, uma medida possível para a redução de um funcionário seria a implementação do controle de água automático, que já existe nos outros setores.

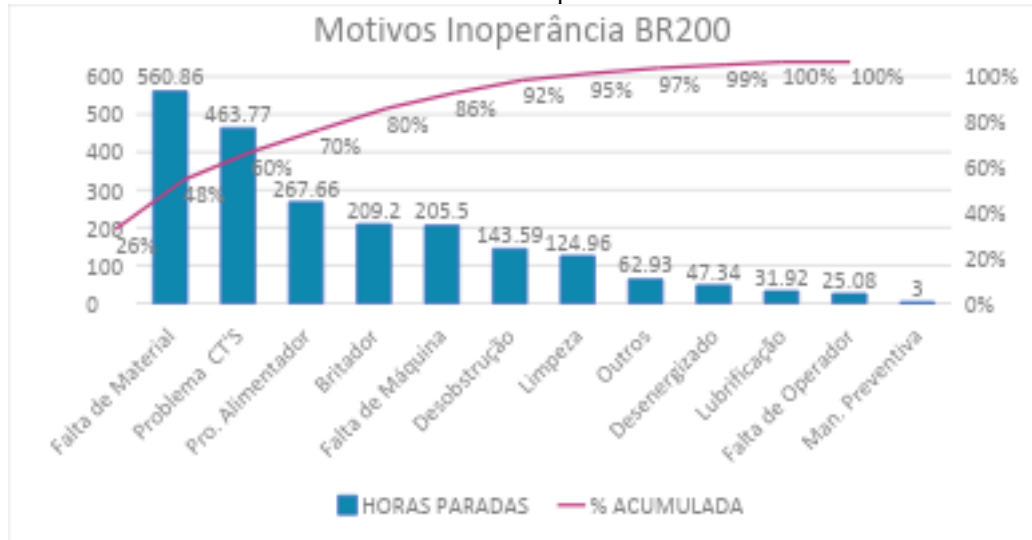
Figura 8: Alimentação da Britagem Primária (BR200).



Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com o Gráfico 1, identificou-se que, na britagem primária e secundária, a falta de material é a maior causa de inoperância dos respectivos setores, correspondendo a aproximadamente 26% do tempo total parado no BR200 e 28% na CBP02. Sabe-se que a produção depende da disponibilidade de minério para alimentar a britagem primária e secundária. Sendo assim, o ideal para essa situação seria manter uma comunicação efetiva entre a operação de mina, através do setor de despacho do material (subsolo) e o setor da britagem (mecanizada), de modo a haver um gerenciamento para o controle da produção e quando não tivesse material suficiente, utilizar a magnesita, que é comprada e também utilizada no processo de beneficiamento.

Gráfico 1: Motivos de Inoperância do BR200.



Fonte: Ferbasa (2023).

Foi elaborado um plano de ação para sanar os problemas que causavam eventos de parada dos setores:

- Utilizar o rompedor hidráulico;
- Solicitar ao operador para observar o material alimentado;
- Verificar a APF do britador;
- Sempre que o britador estiver com a (APF) abertura acima do permitido, solicitar a equipe de execução para realizar o fechamento do mesmo;
- Preencher o formulário de horas paradas corretamente;
- Liberação do operador do caminhão para outra atividade, somente quando chegar um outro operador de caminhão para substituir na operação;
- Informar aos operadores o horário de manutenções e lubrificação;
- Melhorar a iluminação;
- Acrescentar atividades nas OS, quando identificar o problema.

Como forma de otimizar o setor da britagem, o projeto de instalações de câmeras no setor poderá apoiar o monitoramento dos equipamentos, permitindo assim a redução de operadores para serem realocados na quarta turma. Foram analisados os seguintes pontos que precisariam de visualização dos operadores:

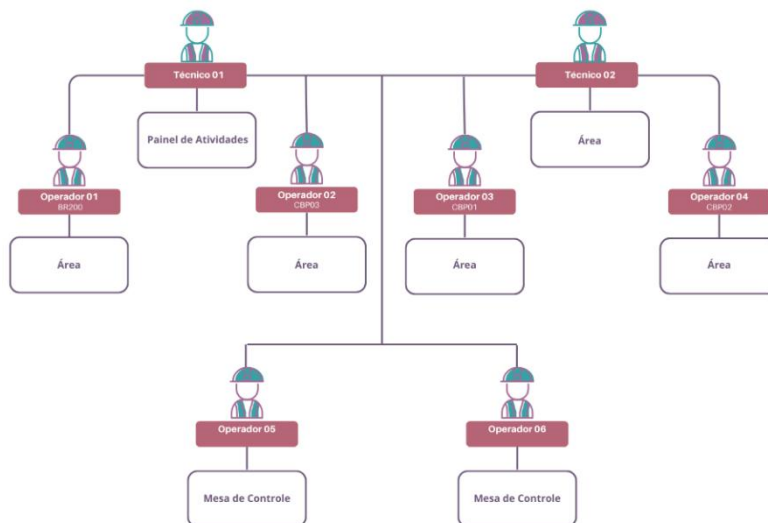
- Silos de alimentação
- Britadores
- Calhas

- Peneiras
- Túnel
- Separador Magnético.

Além disso, apoiará o preenchimento de paradas, melhorando assim as informações.

E a implementação de uma quarta turma operacional, com a utilização do mesmo quadro de funcionários, apenas fazendo a mudança de turno, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Organograma da Britagem CBP02.



Fonte: Autoria própria (2024)

Onde tem-se:

Quadro Atual

1º TURNO:

10 Operadores

2º TURNO:

09 Operadores

3º TURNO:

07 Operadores

Total = 26 Operadores

Quadro Necessário:

06 Operadores em Cada Turno

Total = 24 Operadores e 02 para as férias.

Para a implementação da quarta turma operacional é necessário que o plano de ação seja colocado em prática, com auxílio da sala de painel de atividades e com o monitoramento das câmeras.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, após a construção do histórico de informações e o consequente estudo, permitiu entender o funcionamento das linhas de produção no circuito de britagem. Neste caso, foi possível observar os problemas operacionais e mecânicos, que influenciavam negativamente a produção de Lump (granulados). Também conseguiu-se mapear os problemas recorrentes que envolviam o processo de britagem, que implicava na má gestão da equipe. A identificação desses problemas permitiu traçar diretrizes visando otimizar as etapas de britagem, e proporcionar uma melhor qualidade dos serviços, a partir da implementação de uma quarta turma, sem a implicação de custos.

A partir do desenvolvimento desta pesquisa foram identificadas outras oportunidades de alocação de funcionários entre os equipamentos de britagem, resultando em melhoras nos índices de produtividade de horas trabalhadas. Essa melhoria permite que a liderança amplie a visão em relação aos problemas recorrentes e atue de forma preventiva, de acordo com as causas raízes dos problemas enfrentados na planta de beneficiamento.

O sistema utilizado para recolher as informações sobre disponibilidade e utilização funciona atualmente de forma macro. Há a necessidade de melhorar o sistema, de modo que o mapeamento das informações seja detalhado por equipamento.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, Arthur P.; PERES e colaboradores. Teoria e Prática no Beneficiamento de Minérios. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2002. V. 1.
- CHAVES, Arthur P.; PERES e colaboradores. Teoria e Prática no Beneficiamento de Minérios. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2004. V. 2.
- CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C. Teoria e Prática no Beneficiamento de Minérios. 2. ed., São Paulo: Signus Editora, 2003. V. 3.
- CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C.; ARAÚJO, Armando C. Teoria e Prática no Beneficiamento de Minério. Flotação: o estado da arte no Brasil. São Paulo: Signus Editora, 2006. V. 4.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. Teoria e prática de tratamento de minérios – britagem, peneiramento e moagem. 3. ed. São Paulo: Signus, 2006. p. 425-555. V. 3.
- LUZ, A. B.; FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004
- VALADÃO, G. E. S; ARAÚJO, A. C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- WILLS, Barry. Mineral Processing Technology. 7. ed. Austrália: Elsevier, 2006.

RECONCILIAÇÃO ENTRE O PLANEJAMENTO DE LONGO E CURTO PRAZO DE UMA MINA DE MINÉRIO FOSFÁTICO (P2O5)

 10.56238/livrosindi202660-002

Felipe Rodrigues dos Santos

Bacharel (2021) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: felipe.rodrigues@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8879550954953795

Hugo Leonardo Oliveira Tomaz de Aquino

Bacharel (2021) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: hugo.aquino@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 7939409335900085

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG

Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV

Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN

Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES

Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras

Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES

Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros

E-mail: herbert.silva@afya.edu.br

ID Lattes: 3925629376472160

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

Orientador deste trabalho

E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 4556375475161993

RESUMO

É recorrente a discrepância dos valores estimados pelo planejamento de mina e os atingidos após as operações de extração. Tal fato se deve à complexidade dos processos de formação geológica dos depósitos, aliada à limitação na quantidade de amostras disponíveis, devido aos altos custos e o espaçamento entre os furos de sondagem necessários para a construção do modelo geológico. Essa divergência nos valores estimados podem prejudicar o retorno financeiro, logo se faz necessário atividades de reconciliação. As atividades de reconciliação mais comuns são pautadas em furos de sondagem adicionais na frente de lavra, uso do pó presente nas perfuratrizes utilizadas para os furos da atividade de desmonte e coleta de amostras na frente de lavra. Entretanto, esses métodos geram custos adicionais ou demandam um maior tempo de análise das amostras. Portanto é imprescindível a utilização de métodos mais rápidos e menos onerosos de reconciliação, a fim de se ter uma maior periodicidade de dados e como consequência melhores tomadas de decisão no planejamento. Atualmente, softwares especializados em planejamento de mina como da empresa Deswik oferecem soluções para essa demanda, por meio do processo de cubagem de sólidos. O presente trabalho utilizou o *software* citado para gerar sólidos referentes ao avanço de lavra do primeiro semestre de 2024 da mina de Cajati, em São Paulo. Posteriormente realizou-se o cálculo de cubagem desses sólidos e com os resultados comparou-se os valores estimados pelo planejamento de mina de longo prazo com os resultados na frente de lavra, pelo fator de correção *Mine Call Factor* (MCF).

Palavras-chave: Planejamento de mina; Reconciliação; Software de mineração; Cubagem de sólidos; Mina de Cajati.

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineira se encontra intrinsecamente conectada à evolução tecnológica da espécie humana. Nos primórdios das civilizações hominídeas, as rochas foram utilizadas como ferramentas primitivas. Por meio do impacto entre as rochas foi possível a produção e utilização do fogo, já as lascas foram usadas como ferramentas cortantes, para a caça, produção de roupas, e coleta de materiais combustível. Essa evolução por meio do uso dos bens minerais, permitiu com que os hominídeos sobrevivessem, multiplicassem e prosperassem em diversos ambientes do planeta Terra, definindo um marco na história humana, denominada Idade da Pedra (Curi, 2017).

Contudo essa correlação da evolução tecnológica da civilização humana com o uso dos bens minerais, não se limita apenas a um período específico da história, mas define assim a própria história humana, como exemplo: a idade do Bronze e a idade do Ferro. Deste modo é possível relacionar o avanço tecnológico com o uso de tais minerais, seja para a produção de ferramentas mais eficientes, fertilizantes, fármacos, reagentes químicos, minerais metálicos, eletrônicos, construção civil, indústria automobilística, aeroespacial ou por meio da mudança de matrizes energéticas, como exemplo: o carvão mineral, urânio, baterias de lítio, petróleo e diversas outras aplicações (Enríquez, 2008).

A exploração dos bens minerais é realizada após diversos estudos que garantem a viabilidade econômica, operacional, legal e ambiental, para extração de uma jazida. Inicialmente

ocorre a pesquisa mineral, a fim de identificar uma região da superfície terrestre que possua uma concentração anômala de uma ocorrência mineral, com forma, mergulho, quantidade, qualidade e diversos outros aspectos geológicos e geométricos, capazes de fornecer minerais de interesse econômico e assim formular o modelo geológico. Todavia, esse depósito mineral não foi submetido a uma avaliação econômica, fazendo-se responsável por essa, o planejamento da mina (Curi, 2017).

O planejamento de mina é crucial nas atividades de mineração, pois objetiva a extração eficiente dos recursos minerais, não renováveis, garantindo a maximização de lucro, minimização de custo e eficiência operacional, a fim de que a extração da jazida mineral seja economicamente viável (Campos, 2017). O planejamento de lavra é o projeto de avanço da lavra e a relação entre recursos e custos intrínsecos a esse avanço (Torres, 2024). A realização do planejamento da lavra só é possível, se a equipe de planejamento possuir dados ou premissas, fundamentais para a tomada de decisões como o modelo geológico do corpo de minério, topografia, faixa de teores, limites ambientais, informações geotécnicas, capacidade de processamento da usina de beneficiamento de minério e custos associados, capacidade dos equipamentos, custos operacionais e administrativos entre outros (Souza, 2022).

O planejamento de uma mina é dividido em planejamento de longo, médio e curto prazo. O planejamento de lavra de longo prazo é responsável pela análise de viabilidade econômica, formulação da cava final, planejamento de barragens, sequenciamento das operações entre outros objetivos estratégicos. O planejamento de médio prazo visa garantir a continuidade do processo de lavra e cumprimento de parâmetros técnicos e econômicos nas atividades de operação de lavra diárias (IBRAM, 1996). Já o planejamento de curto prazo objetiva a elaboração de planos de lavra semestrais, mensais, semanais e diários, para atingir a qualidade requerida pela usina de beneficiamento, programação da disposição das pilhas de estéril e de ROM, diluição programada, atualização do banco de dados e da topografia da mina e a quantificação dos estoques no final de cada mês (Chimuco, 2010).

O plano de lavra de curto prazo, busca cumprir os objetivos do planejamento de longo e médio prazo, este é avaliado por índices de aderência e cumprimento do plano de lavra. Contudo, se faz recorrente em diversos empreendimentos minerários a discrepância dos valores planejados e dos resultados atingidos após as operações de extração, causando riscos que podem prejudicar o retorno financeiro. Entre os diversos fatores para essa desalinhamento evidenciam-se aqueles

Sendo assim, a realização deste trabalho possibilita demonstrar o quanto é imprescindível para uma empresa de mineração a reconciliação periódica, entre os valores estimados (planejados) e os vistos na frente de lavra (operacionais). Para realizar a reconciliação são

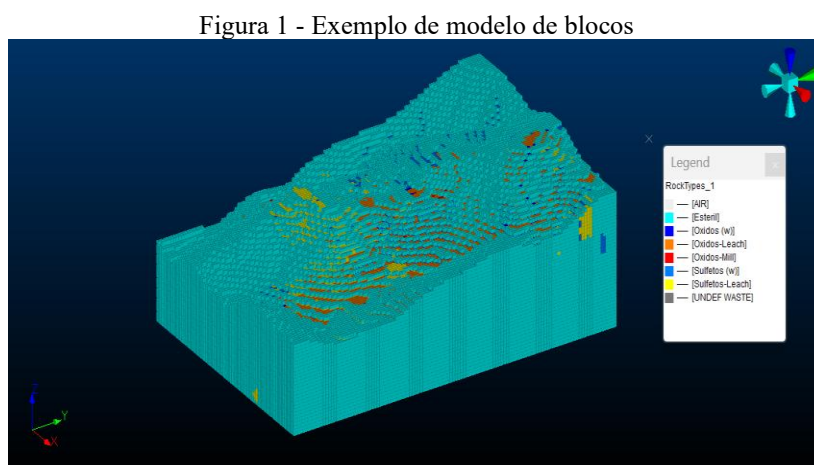
empregados alguns softwares especializados em planejamento de mina, principalmente pelo método de comparação das superfícies das cavas operacionalizadas ao longo do desenvolvimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MODELO DE BLOCOS

Um modelo geológico tridimensional, ou modelo de blocos é uma representação detalhada e precisa da jazida mineral, na qual é dividida em milhares de blocos. Esses blocos contêm informações sobre o teor de minerais em determinado volume, densidades, coordenadas, limites da zona mineralizada, informações geológicas e metalúrgicas associadas a premissas econômicas. A construção desse modelo é fundamental, pois permite uma visualização mais clara e precisa do depósito mineral. O uso de técnicas computacionais nesse contexto é essencial para a mineração moderna, pois permite estimar com uma maior precisão a concentração dos altos valores de teor do minério e a quantidade total de material dentro da reserva. Isso fornece uma base sólida para a tomada de decisões, como o delineamento das áreas de exploração, a previsão de recursos, direcionamento da cava e o desenvolvimento de planos operacionais (Amaral, 2008).

A Figura 1 demonstra um modelo de blocos conceitual com blocos catalogados em minérios oxidados, sulfetados, estéril e blocos sem informações suficientes para serem categorizados.



Fonte: Autoria própria (2024).

A construção do modelo geológico começa com perfurações no corpo mineral, denominadas furos de sondagem, nas quais são coletadas amostras ou corpos de prova, para determinar os teores de minérios presentes no depósito. Essas amostras fornecem informações

fundamentais sobre a concentração de minerais em diferentes locais da mina e os limites da jazida (Bueno, 2021).

Após a coleta das amostras, essas informações são colocadas em uma malha, na qual cada ponto representa o centro de um bloco do modelo geológico. Esse procedimento permite visualizar o depósito mineral em três dimensões e ajuda a estabelecer um perfil dos teores nas áreas já amostradas. Em seguida, para estimar os teores nos blocos onde os valores são desconhecidos, são aplicadas técnicas como krigagem ou interpolação. Essas técnicas estatísticas e computacionais ajudam a preencher lacunas de dados, criando uma representação mais completa (Hustrulid & Kuchta, 1995).

Posteriormente os blocos do modelo geológico recebem uma atribuição econômica, ou seja, uma função que atribui a receita e custos associados à extração de cada bloco do modelo, denominada de função benefício. Os blocos são classificados como minério ou estéril, os minérios são assim classificados baseados no cálculo da receita, quantidade de minério existente no bloco, seu preço de venda e os custos necessários para a extração, transporte e vendas destes. Já os blocos de estéril, na qual a receita é negativa, recebem a atribuição dos custos relacionados à extração e deposição destes em pilhas (Bueno, 2021).

Dessa forma, o modelo de blocos é a representação visual que permite entender a estrutura do reservatório e determinar assim a cava ótima, sequenciamento de lavra, teores de corte, estimativa de reserva e outros aspectos, essenciais para o planejamento de mina (Amaral, 2008).

2.2 PLANEJAMENTO DE MINA

O planejamento de lavra se dá pelo detalhamento do avanço da mina, descrevendo as fases e direcionando a lavra, por tomadas de decisões estratégicas que consideram todos os custos associados à sua realização. Esse planejamento atinge todos os aspectos do empreendimento mineiro, desde as fases de sondagem e amostragem até a venda e despacho do minério (Lopes, 2012). O objetivo de um planejamento de mina eficiente é arquitetar a lavra, otimizando o sequenciamento de extração e reduzindo a remoção de estéril, a fim de maximizar o valor presente líquido (Silva, 2008).

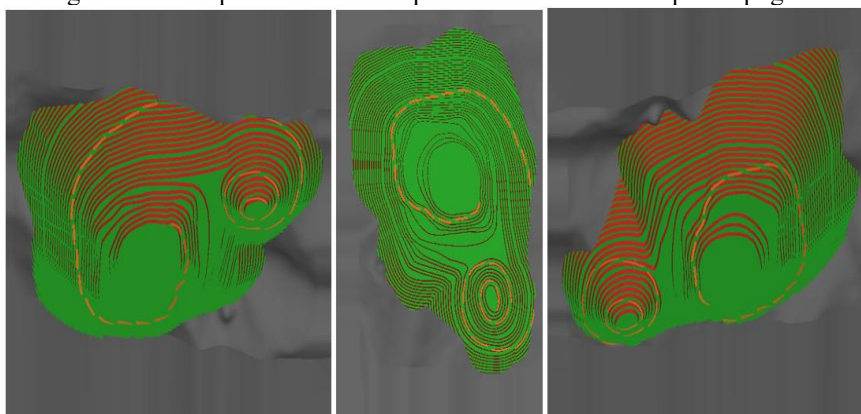
O plano de lavra deve se basear em dados confiáveis, a fim de garantir uma implantação precisa e que viabilize economicamente todas as operações necessárias para o empreendimento mineiro (Cury, 2017). Entretanto, não se faz possível padronizar todos os parâmetros, desde o início do projeto até o final do empreendimento impondo que o planejamento de mina seja dinâmico. Devido ao fato de novas informações sobre a jazida mineral surgirem a todo momento é imprescindível adaptações no plano original, mas tal fator não descredibiliza a realização de

um plano inicial, com as informações disponíveis, para a formulação de um cronograma de produção.

Esse plano é essencial para o planejamento a longo prazo, visto que é o mais estratégico das operações. Este possui como objetivos calcular uma reserva teoricamente viável, o volume de material estéril, relação estéril/minério e estabelecer os limites finais da cava. Além disso é fundamental que os resultados obtidos, como a definição da cava ótima, a relação estéril/minério e o dimensionamento das frotas, sejam precisos para que a extração de minérios se inicie de forma correta e sem geração de custos extras (Tôrres, 2024). Portanto, o planejamento de mina empenha -se em descrever as ações, operações e adaptações que a jazida sofrerá ao longo do tempo até o esgotamento da mina (Bueno, 2021).

A Figura 2 demonstra uma cava ótima gerada por softwares especializado em planejamento de mina, após receber parâmetros de operacionalização e com as vias de acesso, cortada pela topografia.

Figura 2 - Exemplo de uma cava operacionalizada cortada pela topografia



Fonte: Autoria própria (2024).

2.2.1 Planejamento de mina de longo prazo

O planejamento de mina é segmentado em estágios, no primeiro momento há um estudo conceitual com as informações preliminares, a fim de se esboçar um plano. Posteriormente, análises de pré-viabilidade e estudos de viabilidade, na qual as condições técnicas, ambientais, legais e econômicas são consideradas (Mariz, 2018).

As análises de viabilidade do projeto, apresentam a confecção de cavas e o sequenciamento da lavra, essas determinam um direcionamento para a lavra por meio de operações em uma cava pequena que se desenvolve para cavas maiores, de modo que envolva as cavas anteriores. Dessa forma se materializa uma sequência de cavas, chamadas de pushbacks,

essa sequência se desenvolve até uma configuração de cava, denominada de cava final (Rodrigues, 2018).

Portanto, as superfícies geradas com os limites fronteirios, categorizam as informações existentes no modelo de blocos em material lavrável e não lavrável de acordo com economicidade dos mesmos (Silva, 2008). Tais limites se baseiam em todas as variáveis técnicas e econômicas de um projeto de lavra e seu dinamismo se deve às variações frequentes para os valores de receita e custo. Portanto é imprescindível o conhecimento dos limites da cava, pois eles representam até onde o corpo de minério será lavrado (Bueno, 2021). A geração e os limites de cava é desenvolvida visando atingir as metas propostas ao longo da vida útil da mina, o que na literatura de planejamento de lavra, se classifica como planejamento de lavra de longo e dessa forma a definição de cava final, geração de pushbacks e sequenciamento da produção são de responsabilidade do planejamento de longo prazo.

2.2.2 Planejamento de mina de médio prazo

O planejamento de médio prazo é essencial para garantir o cumprimento dos objetivos intermediários da operação, abrangendo geralmente períodos de 1 a 5 anos. Esse planejamento visa organizar a lavra anualmente, definir as superfícies operacionais, estabelecer as atividades auxiliares necessárias. Entre suas funções, o dimensionamento das frotas e das correias transportadoras, o desenvolvimento do plano de drenagem e infraestrutura da mina, e a realização de análises de riscos (Tôrres, 2024).

O planejamento de médio prazo é responsável por garantir a continuidade eficiente das operações de lavra, a fim de garantir determinadas variáveis técnicas e econômicas envolvidas nessas operações (IBRAM, 1996). Dessa forma, o planejamento de médio prazo divide o plano de longo prazo em planos mais curtos como exemplo em planos anuais (Malta, 2023).

2.2.3 Planejamento de mina de curto prazo

O planejamento de curto prazo foca nos aspectos operacionais e nos objetivos do plano de médio prazo, por isso planeja a lavra em intervalos menores como anuais, semestrais, mensais e semanais (Souza, 2013). O planejamento aplicado dessa forma objetiva garantir que as especificações do material extraído e que as metas de produção sejam alcançadas. Outras atividades desse planejamento são a programação das pilhas de ROM (*run of mine*), a disposição do estéril, o controle de qualidade dos produtos, o estudo de acessos temporários e a coleta de amostras nas frentes de lavra (Malta, 2023).

Dessa forma, o planejamento de curto prazo, presa que o minério originado das diferentes frentes de lavra (minério bruto), proporcionem à usina de beneficiamento uma quantidade e qualidade específica de massa, a fim de não exceder a capacidade física do sistema e não deixar parte dos equipamentos ociosos. Outra meta é o controle da qualidade do minério a ser despachado. Portanto o planejamento de curto prazo se torna mais criterioso a fim de sanar as imprecisões das operações. Outra atividade se suma importância para o planejamento é a realização de reconciliações com o plano de lavra, ou seja, utilização de diversos métodos como sondagem das frentes de lavra, que requer um elevado custo ou mesmo análises topográficas a fim de verificar o quanto as operações realizadas estão em conformidade com o planejado (Mandarino, 2018).

2.3 SEQUENCIAMENTO DE MINA

O sequenciamento de mina objetiva determinar uma sequência de extração dos blocos presentes na cava final que satisfaça as metas propostas no planejamento. Esse processo de sequenciar a mina define como será o desenvolvimento da mesma, assim como determina a produção e a vida útil. Apesar de escolhida uma cava ótima, a sequência de extração também deve ser otimizada (Malta, 2023).

O sequenciamento de lavra é organizado em várias etapas operacionais chamadas "*pushbacks*", que são, por sua vez, divididas anualmente. Nessa fase, são definidas as estratégias para a extração, que abrange a produção dos minerais, os teores e a relação estéril minério (REM), que podem variar ao longo dos anos de operação. O sequenciamento da lavra deve respeitar algumas restrições, como a variação dos volumes de minério e estéril, a capacidade de armazenamento em pilhas, a capacidade da mina e da usina de processamento, além das restrições geotécnicas e operacionais (Chimuco, 2010). A principal dificuldade no sequenciamento de lavra em minas a céu aberto é determinar a ordem ideal para a remoção dos blocos maximizando o Valor Presente Líquido -VPL (Andrade, 2014).

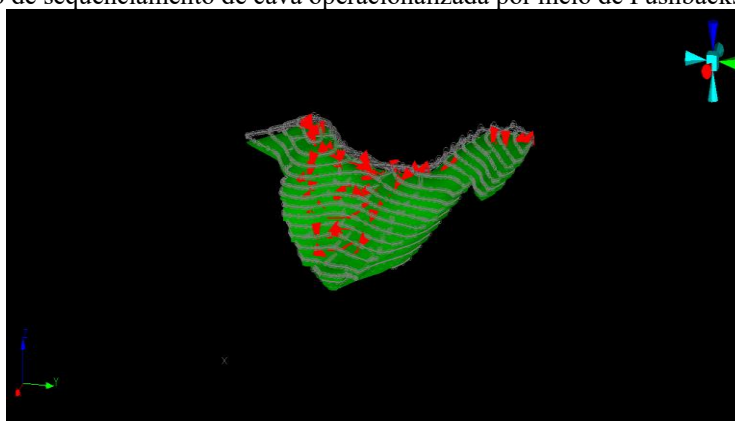
O sequenciamento da lavra inicia - se após a produção e escolha da cava final, pela análise da melhor sequência para a extração dos blocos, baseado na realidade da jazida e do empreendimento mineiro como um todo. Em seguida é estabelecido como a mina será desenvolvida e definida a sua vida útil, que é calculada pela taxa de produção alcançada (Halatchev, 2002).

O método de sequenciamento da mina atrelada a métodos de pesquisa operacional fornece uma sequência ótima de extração. Este método de otimização opera com a subdivisão da cava final em pequenos avanços operacionais (*pushbacks*) responsáveis por gerar diversas pequenas

cavas, que unidas formam a cava final como mencionado anteriormente. Estes pushbacks são separados em blocos menores denominados de *Mining Blocks*, no qual objetivam um melhor detalhamento das operações de avanço da mina em relação às premissas desejadas (Morales & Rubio, 2009).

A Figura 3 representa o sequenciamento de uma cava operacionalizada por meio de um software de planejamento de mina, na qual as setas em vermelho demonstram a sequência de extração ótima.

Figura 3 - Exemplo de sequenciamento de cava operacionalizada por meio de Pushbacks e de Mining blocks



Fonte: Autoria própria (2024).

2.4 SOFTWARES DE PLANEJAMENTO DE MINA

Os softwares são atualmente uma das ferramentas mais utilizadas para auxiliar e otimizar inúmeros processos nas mais diversas indústrias, inclusive nas atividades de mineração. Devido, a redução dos depósitos minerais com altos teores que sejam economicamente viáveis associada a queda dos preços de várias commodities de minérios, a indústria vem investindo em soluções especializadas que desenvolvam aplicativos capazes de otimizar o planejamento da mina em um curto espaço de tempo, algo inexecutável manualmente além de permitir uma visão mais ampla e integrada dos processos de mineração assim como uma melhor visualização, tridimensional, da mina (Mandarino, 2018).

Essas soluções de computação gráfica assistem o desenvolvimento de mina, desde o planejamento até a execução das operações. Atualmente os softwares de mineração oferecem muitas ferramentas que contribuem nas atividades do planejamento de lavra, como a construção do modelo de blocos, visualização tridimensional da mina, estimativa da reserva, projeto de cava ótima e o sequenciamento de lavra (Amaral, 2008). Atuando no sequenciamento da lavra os softwares de mineração permitem uma maior agilidade nas tomadas de decisão com a menor probabilidade de erros ao longo do processo.

A *Deswik* é uma empresa de consultoria multinacional que oferece softwares de planejamento de minas para os mais diversos minérios e para minas com diversos métodos de extração. O software *Deswik* é utilizado em mais de 50 países como uma plataforma única integrada em toda a cadeia de produtos (Deswik, 2021).

Deswik.CAD é uma ferramenta que permite gerir as informações do modelo de blocos e aplicá-las de forma gráfica, visualização tridimensional, possibilitando exibir, analisar e gerar relatórios. Essa plataforma de projetos é o módulo que une as ferramentas de projeto de minas, desenvolvido para aplicações específicas para todos os setores da atividade mineira, tornando uma ferramenta integrada de diversas soluções. O software possibilita a criação de sólidos, a combinação de arquivos do tipo GIS com dados de mineração tridimensionais, a utilização de filtros e sobreposição de legendas personalizadas e como resultado gera relatórios gráficos (Deswik, 2021).

2.5 RECONCILIAÇÃO

O processo de reconciliação é o comparativo entre estimativas do modelo de recursos, o modelo de reservas e o modelo de controle de teores (Hajj, 2013). As estimativas do modelo de reservas objetivam prever a massa e o teor de minério, o modelo de recursos é apoiado no modelo de reserva e utilizado para o planejamento de longo prazo para prever a massa e o teor de alimentação da usina. Já o modelo de controle de teores, define os limites entre o que é minério e o que é estéril, utilizado no modelo de curto prazo. A formulação desse modelo ocorre por meio de perfurações adicionais e amostragens na frente de lavra, em sua maioria são utilizados o pó presente nas perfuratrizes que realizam a perfuração para o desmonte do material. Esse método possui como vantagem a ausência de custos adicionais e o pequeno espaço entre os furos, gerando uma densidade de amostragem maior, contudo essas possuem um enviesamento motivado pela segregação de densidade e tamanho das partículas (Chieregati; *et al*, 2008).

Ao realizar a reconciliação, são analisados os volumes e áreas lavradas, além da comparação entre a qualidade planejada e a qualidade alcançada na planta de beneficiamento. Este processo ajusta as estimativas futuras e nos métodos de amostragem utilizados, podendo contribuir com melhorias nos resultados da operação (Malta, 2023).

3 METODOLOGIA

Inicialmente foi inserida no software especializado em planejamento de mina da empresa Deswik a superfície topográfica da cava da mina de Cajati, em São Paulo. Essa superfície foi concebida por um conjunto de pontos e linhas, fundamentada nos dados do levantamento

topográfico realizado pela equipe de topografia. Esses pontos e linhas por sua vez formam triângulos, denominados *wireframes*, a união desses triângulos constituem a superfície topográfica (Silva, 2019).

Subsequentemente essas superfícies foram utilizadas para conceber as superfícies das cavas operacionalizadas referente aos meses do primeiro semestre de 2024. Posteriormente, comparou-se as superfícies antecessoras e atuais. O primeiro passo para gerar os sólidos lavrados no mês de Janeiro de 2024, foi comparar a superfície do avanço de Dezembro de 2023, com a superfície de avanço do mês de Janeiro de 2024 e então foi obtido o sólido do material lavrado no mês Janeiro. Esse processo foi replicado para os meses de Fevereiro a Junho de 2024, tendo em vista que o processo de análise é o comparativo entre a superfície de avanço do mês antecessor com o posterior.

Após a elaboração dos sólidos referentes a cada mês foi realizada a cubagem dos mesmos. Esse processo se dá pelo cálculo das variáveis presentes nos blocos do modelo que compõem o sólido gerado como, o teor, volume, densidade, litologia, massa de minério de estéril e outros. Dessa forma, obtém-se como resultado desse processo, denominado cubagem de sólidos, planilhas com dados quantitativos e qualitativos, desses sólidos, que por sua vez, representam o avanço da lavra de cada mês (Silva, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho apresenta como resultado os sólidos gerados pelo software de planejamento de mina Deswik, esses representam o avanço da lavra ao longo do primeiro semestre de 2024 na mina Cajati, em São Paulo. Posteriormente, houve o cálculo de cubagem desses sólidos com o intuito de quantificar e qualificar o material presente na frente de lavra no período de Janeiro a Junho de 2024. Como resultado do processo de cubagem gerou-se planilhas, a fim de se comparar os valores estimados pelo planejamento de mina de longo prazo com os obtidos na frente de lavra pelo planejamento de mina de curto prazo e averiguar o nível de reconciliação. O comparativo do produto entre eles se dá o nome de *mine call factor* (MCF).

A Figura 4 representa os sólidos lavrados no mês de Janeiro na mina de Cajati em São Paulo.

Figura 4 - Sólido (gerado pelo software Deswik) mostrando o avanço realizado no mês de Janeiro de 2024



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da Figura 4 é observado que o avanço da lavra ocorreu nas direções Noroeste e Sudeste da cava, conforme demonstra a atualização topográfica realizada pela equipe de topografia.

As Tabelas 1 e 3 apresentam em sua primeira linha os respectivos registros: CLASS (classificação da litologia do corpo de minério, categorizado de 1 a 4), TIPO_RSV_CAL (classificado como minério e estéril), Volume (volume ocupado por cada material em metros cúbicos), Tonnes (tonelagem dos diferentes materiais presentes no sólido), Density (densidade de cada material), P₂O₅_d (apatita), SiO₂_d (sílica), CaO (óxido de cálcio), umi_bu_d (umidade de base umida diluída), REND_RSV (rendimento mássico), rmet_t_d, p2o5cf_d (recuperação metalúrgica), p2o5cf_d (quantidade de P₂O₅ presente no concentrado final), e na penúltima e última linha os registros denominados de minério e estéril.

A seguir na Tabela 1 é apresentado os valores estimados do planejamento de mina de longo prazo referente a janeiro de 2024.

Tabela 1 - Tabela gerada pela cubagem do sólido lavrado no mês de Janeiro de 2024, com os valores estimados pelo modelo do planejamento de mina de longo prazo.

CLASS	TIPO_RSV_CAL	Volume	Tonnes	Density	p2o5_d	sio2_d	cao_d	umi_bu_d	REND_RSV	rmet_t_d	p2o5cf_d
1	0	0	0	2.9	7.66	2.12	42.64	0.16	0.00	71.53	33.50
1	11	16,412	47,366	2.9	5.92	1.17	46.50	0.16	12.90	73.21	33.50
1	12	42,015	118,263	2.8	5.17	1.36	48.62	0.16	11.21	72.88	33.50
1	13	18,714	53,981	2.9	5.27	2.69	41.75	0.16	11.44	72.79	33.50
1	14	2,141	6,129	2.9	3.41	15.49	34.94	0.16	6.63	65.00	33.50
1	51	2,126	5,964	2.8	2.71	11.24	39.14	0.16	4.95	58.32	30.80
2	0	0	0	2.9	3.29	20.88	28.04	0.16	0.00	65.29	33.50
2	11	12,787	37,464	2.9	5.70	0.96	46.88	0.16	12.62	74.31	33.50
2	12	7,164	20,602	2.9	4.43	3.77	45.03	0.16	9.65	73.17	33.50
2	13	1,074	3,190	3.0	5.60	1.49	42.35	0.16	12.24	74.06	33.50
2	14	2,838	8,117	2.9	3.28	17.48	34.82	0.16	6.36	65.00	33.50
2	51	2,684	7,434	2.8	2.59	19.67	34.21	0.16	4.09	50.35	30.05
3	51	105	302	2.9	2.81	19.97	27.63	0.16	3.64	29.37	14.86
4	51	6,900	19,363	2.8	3.59	10.76	41.07	0.16	7.51	67.76	33.15
Unclassified		225,876	698,985	3.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Minério			280,866	2.9	5.34	1.71	46.38	0.16	11.62	73.14	33.50
Estéril			746,292								

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 1 é possível identificar as estimativas do modelo de longo prazo com um total de minério de 280 T e de estéril de 746 T, com a densidade média nas litologias 2.9 g/m³ e o teor do principal produto Apatita (P₂O₅) de 5.34 %, SiO₂ com um teor de 1.71%, CaO com um teor de 46.38%. O rendimento mássico foi de 11.62% e a recuperação metalúrgica de 73.14% e concentrado final de (P₂O₅) de 33.50%.

As Tabelas 2, 4, 6, 8, 10 e 12 apresentam em sua primeira linha os respectivos registros: TIPO2 (classificado como minério, numeração 1, 2 e 3 e os demais é estéril ou ausência de informação), Volume (ocupado por cada material), Tonnes (tonelagem dos diferentes materiais presentes no sólido), Density (densidade de cada material), P₂O₅ (apatita), SiO₂ (sílica), CaO (óxido de cálcio), umi_bu_d (umidade de base umida diluída), RMT (rendimento mássico), rmet_t (recuperação metalúrgica). Na penúltima e última linha das Tabelas 12, 15, 18, 21, 24 e 27 temos os registros denominados de minério e estéril.

A seguir na Tabela 2 é apresentado os valores estimados do planejamento de mina de curto prazo referente a janeiro de 2024.

Tabela 2 - Tabela gerada pela cubagem do sólido lavrado no mês de Janeiro de 2024, com os valores imputados no modelo do planejamento de mina de curto prazo.

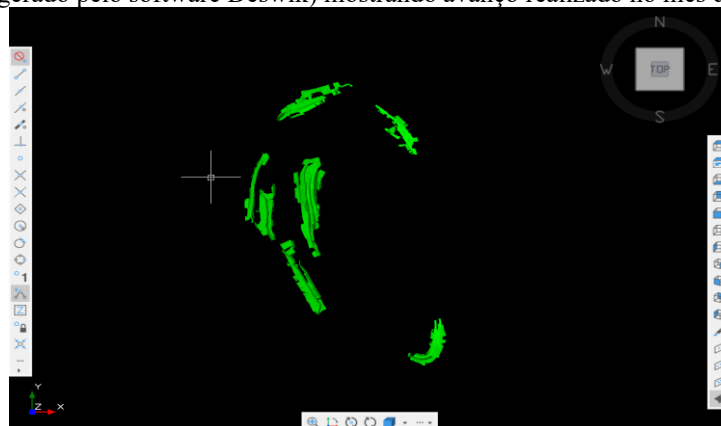
TIPO2	Volume	Tonnes	Density	p2o5	sio2	cao	umi_bu	RMT	rmet_t
1	52,316	150,949	2.89	5.84	1.37	46.24	0.16	13.18	78.84
2	57,942	162,577	2.81	5.54	1.68	47.02	0.16	12.68	79.49
3	12,463	35,509	2.85	6.12	3.41	39.61	0.16	12.81	80.95
4	4,767	13,610	2.86	2.73	14.03	34.34	0.17	3.91	76.20
53	50,561	141,128	2.79	2.09	23.11	27.59	1.98	1.22	74.37
54	162,785	514,133	3.16	0.50	36.10	20.83	0.25	0.00	71.13
Unclassified	1	2	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINÉRIO		349,035	2.8	5.7	1.7	45.9	0.2	12.9	79.4
ESTÉRIL		668,874							

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 2 é possível identificar as estimativas do modelo de curto prazo com um total de minério de 349 T e de estéril de 668 T, com a densidade média nas litologias 2.8 g/m³ e o teor do principal produto Apatita (P₂O₅) de 5.7%, SiO₂ com um teor de 1.7%, CaO com um teor de 45.9%. O rendimento mássico foi de 12.9% e a recuperação metalúrgica de 79.4% e concentrado final de (P₂O₅) de 45,05%.

A Figura 5 representa os sólidos lavrados no mês de Fevereiro na mina de Cajati em São Paulo.

Figura 5 - Sólido (gerado pelo software Deswik) mostrando avanço realizado no mês de Fevereiro de 2024



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da Figura 5 é observado que o avanço da lavra ocorreu nas direções Norte, Noroeste, Oeste e Sudeste da cava, conforme demonstra a atualização topográfica realizada pela equipe de topografia.

A seguir na Tabela 3 é apresentado os valores estimados do planejamento de mina de longo prazo referente a fevereiro de 2024.

Tabela 3 - Tabela gerada pela cubagem do sólido lavrado no mês de Fevereiro de 2024, com os valores estimados pelo modelo do planejamento de mina de longo prazo.

CLASS	TIPO_RSV_CAL	Volume	Tonnes	Density	p2o5_d	sio2_d	cao_d	umi_bu_d	REND_RSV	rmet_t_d	p2o5cf_d
1	0	137	398	2.9	4.61	0.42	38.17	0.16	0.00	71.89	
1	11	11,772	33,928	2.9	5.72	1.07	48.93	0.16	12.59	74.00	33.50
1	12	15,543	44,570	2.9	5.62	3.11	45.30	0.16	12.05	72.04	33.50
1	13	36,486	104,374	2.9	5.30	3.40	40.33	0.16	11.46	72.60	33.50
1	14	6,411	18,587	2.9	3.73	15.62	33.40	0.16	7.23	65.00	33.50
1	51	3,327	9,333	2.8	2.47	19.19	31.75	0.16	3.70	48.31	29.65
2	0	27	76	2.8	4.76	0.28	34.53	0.16	0.00	72.00	33.50
2	11	11,169	32,435	2.9	5.61	1.11	48.79	0.16	12.48	74.75	33.50
2	12	5,260	15,416	2.9	4.58	5.74	44.89	0.16	9.84	71.55	33.50
2	13	4,055	11,411	2.8	4.71	5.44	41.72	0.16	10.13	71.77	33.50
2	14	3,268	9,057	2.8	3.47	13.57	35.69	0.16	6.73	65.00	33.50
2	51	3,523	9,811	2.8	2.65	18.45	30.98	0.16	3.91	45.61	27.35
3	0	4	12	2.9	3.56	0.23	33.17	0.16	0.00	72.00	33.50
3	51	301	856	2.8	4.86	7.82	33.20	0.16	9.71	58.04	27.64
4	51	3,098	8,500	2.7	3.56	12.04	38.41	0.16	7.22	65.65	33.03
Unclassified		295,255	893,905	3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Minério			242,134	2.9	5.4	3.0	43.9	0.2	11.7	72.9	33.5
Estéril			950,535								

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 3 é possível identificar as estimativas do modelo de longo prazo com um total de minério de 242 T e de estéril de 950 T, com a densidade média nas litologias 2.9 g/m³ e o teor do principal produto Apatita (P₂O₅) de 5.40%, SiO₂ com um teor de 3.0%, CaO com um teor de 43.9%. O rendimento mássico foi de 11.70% e a recuperação metalúrgica de 72.90% e concentrado final de (P₂O₅) de 33.50%.

A seguir na Tabela 4 é apresentado os valores estimados do planejamento de mina de curto prazo referente a fevereiro de 2024.

Tabela 4 - Tabela gerada pela cubagem do sólido lavrado no mês de Fevereiro de 2024, com os valores imputados no modelo do planejamento de mina de curto prazo.

TIPO2	Volume	Tonnes	Density	p2o5	sio2	cao	umi_bu	RMT	rmet_t
1	50,373	148,230	2.9	5.85	1.56	48.31	0.16	13.44	80.22
2	63,937	185,953	2.9	6.60	2.20	44.84	0.16	14.84	79.38
3	17,957	53,746	3.0	4.80	5.15	39.89	0.16	9.59	80.07
4	8,778	27,368	3.1	2.63	9.93	38.26	0.16	4.11	80.08
53	81,775	235,981	2.9	2.17	23.16	27.20	1.17	1.31	74.50
54	176,818	541,391	3.1	0.59	38.36	21.03	0.16	1756092147	72.28
Unclassified	0	1	3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Minério		387,929	2.9	6.1	2.4	45.5	0.2	13.6	79.8
Estéril		804,740							

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 4 é possível identificar as estimativas do modelo de curto prazo com um total de minério de 387 T e de estéril de 804 T, com a densidade média nas litologias 2.9 g/m³ e o teor do principal produto Apatita (P₂O₅) de 6.10%, SiO₂ com um teor de 2.4%, CaO com um teor de 45.5%. O rendimento mássico foi de 13.60% e a recuperação metalúrgica de 79.80% e concentrado final de (P₂O₅) de 52.67%.

4.1 RECONCILIAÇÃO

Após adquiridos os dados de cubagem dos sólidos lavrados referentes aos meses de Janeiro a Junho de 2024, foi possível calcular o parâmetro denominado de F1, que se dá pelo cálculo dos valores de interesse obtidos no modelo de longo prazo dividido pelos valores de interesse do modelo de curto prazo.

Em virtude desta prática obteve três modelos de reconciliação: reconciliação de massa (RMF1), reconciliação de qualidade química (RQF1) e reconciliação de qualidade geometalúrgica (RGF1).

Tabela 13 - Tabela com os cálculos de reconciliação.

RECONCILIAÇÃO DE MASSA (RMF1)			
FONTE	Minério (ton/bu)	Estéril (ton/bu)	
Modelo - Curto Prazo (CP)	2,137,840	4,427,128	
Modelo - Longo Prazo (LP)	1,522,801	5,049,005	
RECONCILIAÇÃO DE MASSA	1.40	0.88	
RECONCILIAÇÃO DE QUALIDADE QUÍMICA (RQF1)			
FONTE	P ₂ O ₅ %	CaO %	SiO ₂ %
Modelo - Curto Prazo (CP)	5.89	44.58	2.22
Modelo - Longo Prazo (LP)	5.46	44.30	2.33
RECONCILIAÇÃO DE QUALIDADE GEOMETALÚRGICA	1.08	1.01	0.95
RECONCILIAÇÃO DE QUALIDADE GEOMETALÚRGICA (RGF1)			
FONTE	Mas. Rend. %	Met. Rec. %	
Modelo - Curto Prazo (CP)	13.09	80.04	
Modelo - Longo Prazo (LP)	11.85	72.97	
RECONCILIAÇÃO DE QUALIDADE GEOMETALÚRGICA	1.10	1.10	

Formula
F1 = CP/LP

Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com as informações contida nos modelos de bloco de longo e curto prazo foi possível observar por meio da (RMF1) uma maior quantidade de massa de minério no modelo de curto prazo em relação ao modelo de longo prazo, dessa forma acarretando em um fator de reconciliação de 1.40. Nota-se uma maior quantidade de massa de estéril no modelo de longo prazo em relação ao de curto com um fator de 0.88, esses valores demonstram diferenças desconsideráveis pois estão próximos da margem de referência, 0.85 e 1.15. Foram utilizados esses valores para a margem de referência de forma empírica, esses *ranges* atendem às demandas da usina de beneficiamento, definidas pela empresa.

Os valores apresentados em (RQF1), estão dentro da margem de referência com variações insignificantes. Por fim, os valores obtidos em (RGF1) também apresentam-se dentro da margem de referência, ou seja, uma variação insignificante. Sobre os resultados obtidos é possível afirmar que o modelo de longo prazo demonstra estar subestimado, uma vez que, os valores são inferiores ao que realmente se apresenta pelo modelo de curto prazo, na qual descreve a realidade das operações de lavra. O modelo de longo prazo é um modelo conservador, uma vez que, o planejamento da mina é realizado para os cinco anos futuros e devido a discrepâncias nos valores inevitáveis da atividade, torna-se mais sensato criar uma margem de perda, ou seja, atribuir ao modelo uma quantidade menor de minério para que os investimentos não sofram perdas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado enfatizou a importância dos processos de reconciliação nas estimativas elaboradas pela equipe de planejamento de mina com a realidade encontrada na subsuperfície. Em virtude desse processo, há uma maior confiabilidade dos investidores no retorno financeiro previsto e consequentemente na indústria de mineração que outrora era imprevisível.

O desenvolvimento das atividades demonstraram a possibilidade de uma reconciliação semestral para a mina de Cajati em São Paulo. O método de comparação das superfícies de cavas operacionalizadas e a cubagem dos sólidos gerados, que representam o avanço mensal da lavra, também foi avaliado, assim como a escolha do software de planejamento de mina, Deswik, para se realizar o método supracitado. Essa metodologia de reconciliação provou sua eficácia em consequência da sua praticidade, rapidez e baixo custo de aplicação. Esse método só tornou-se possível, devido às ferramentas oferecidas pelo software aplicado, demonstrando sua vital importância para a reconciliação.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. Modelos Matemáticos e Heurísticos Para Auxílio ao Planejamento de Operações de Lavra em Minas a Céu Aberto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- ANDRADE, A. Q. Sequenciamento e Programação de Lavra com Alocação de Equipamentos de Carga; São Paulo 2014.
- BOOCH et al. The Unified Modeling Language User Guide 2nd, 1999.
- BUENO, J. C. M. L; Análise de sensibilidade para um modelo de blocos simulado comparando duas metodologias de sequenciamento de lavra, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2021.
- CAMPOS, P. H. A. Um Comparativo de Metodologias no Planejamento de Lavra: Sequenciamento direto de Blocos Vs. Planejamento Tradicional. Ouro Preto 2017.
- CHIEREGATI, A. C., *et al.* Reconciliação na mineração: desafios e soluções. Journal of Mining and Geology, v. 40, n. 3, p. 297-309, 2008.
- CHIMUCO, J. P. J, Metodologia de Planejamento de Mina Para Retomada Das Operações de Lavra Das Jazidas de Kassinga Norte – Angola. Ouro Preto 2010.
- CURI, A. Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- CURI, A. Lavra de Minas. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- DESWIK. Sobre a Deswik. c2021. Disponível em: <https://www.deswik.com/pt-br/>
- ENRÍQUEZ, M. A. R. da Silva. 2008. Mineração: maldição ou dádiva? Os dilemas do desenvolvimento sustentável a partir de uma base mineira. São Paulo: Signus Editora, 2008.
- HAIJ, T, M; Reconciliação Ilusória: Compensação de erros por amostragem manual, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, São Paulo, 2013.
- HALATCHEV, R. A. Technological factors in mine planning. Journal of Mining Technology, v. 17, n. 2, p. 123-135, 2002.
- IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. Workshop “Planejamento De Mina: Práticas e Experiências de Empresas de Mineração”, Módulo I e II. Belo Horizonte, 1996
- LOPES, G. F. Transição da mina a céu aberto para subterrânea no Morro da Mina. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 83f. 2012.
- MALTA, A. O. Análise dos índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra a curto prazo, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2023.

MARIZ, J. L. V; Análise da aderência à realidade brasileira dos métodos de previsão da taxa de produção em fases prematuras de projeto. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 84f. 2018.

MANDARINO, F. M; Análise de métodos para planejamento de curto prazo: Uma abordagem para o Line UP, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2018.

MORALES, N. E., & RUBIO, E. M; "Block Sequencing for Long-term Open-Pit Mine Planning with Mixed Integer Linear Programming". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 23, n. 1, p. 34-48, 2009.

OLIVEIRA, M. C. N. T; Integrando estratégia e eficiência: O papel do planejamento de curto prazo na operação de lavra em minas a céu aberto.

RODRIGUES, H. C; Análise comparativa dos métodos de lavra Terrace Mining e Strip Mining para mineração de gipsita. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 119f. 2018.

ROSADO. R. C; Avaliação do impacto da incerteza de teores no planejamento de mina subterrânea, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de pós graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2019.

RUMBAUGH, J; Object-oriented modeling and design. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1991.

SILVA, N. C. S; Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais. Tese de doutorado em engenharia mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 128 p.

SOUZA, B. F; KPIs e indicadores de qualidade no planejamento de lavra de curto prazo, Ouro Preto, 2022.

TORRES, A. L. P; Análise detalhada do índice de aderência no planejamento de mina a curto prazo, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2024.

DESMONTE CONTROLADO E DESEMPENHO GEOMECÂNICO DE TALUDES: ESTUDO DE CASO NA MINA FAZENDA BRASILEIRO (EQUINOX GOLD)

 10.56238/livrosindi202660-003

Gustavo da Silva Garcia

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: gustavo.garcia@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 4329104155385934

Sérgio Eduardo Rodrigues Costa

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2026) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: eduardo.rodrigues@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 1497142140248337

Vitor Abraão Gonçalves Silva

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: vitor.silva@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 3513045511447876

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG

Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV

Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN

Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES

Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras

Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES

Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros

E-mail: herbert.silva@afya.edu.br

ID Lattes: 3925629376472160

RESUMO

Este estudo avaliou a eficácia técnica e geomecânica do desmonte controlado com o explosivo industrial PowerSplit, associado à detonação independente do pré-corte, na Mina Fazenda Brasileiro (Equinox Gold), considerando a interação com galerias subterrâneas preexistentes. Os resultados indicaram que o uso do PowerSplit promoveu maior uniformidade nos furos e melhoria na definição geométrica dos taludes; contudo, a detonação independente do pré-corte não foi suficiente para o desmonte completo do material, resultando em blocos remanescentes e necessidade de retrabalho mecanizado. Verificou-se também que a variação incompleta em áreas sobre galerias subterrâneas evidencia a necessidade de calibração mais precisa dos ângulos de perfuração e instrumentação de monitoramento. Conclui-se que, embora o método apresente potencial para controle de danos e redução de overbreak, sua aplicação em contextos geomecanicamente complexos requer ajustes operacionais e validação adicional em escala de produção. O estudo fornece subsídios técnicos para aprimorar práticas de desmonte em lavras a céu aberto, contribuindo para a redução de custos, aumento da segurança e otimização da produtividade em minas com coexistência de estruturas subterrâneas.

Palavras-chave: Desmonte controlado; Overbreak; Estabilidade de taludes; Explosivo PowerSplit; Lavra a céu aberto.

1 INTRODUÇÃO

A mineração a céu aberto constitui uma das formas mais amplamente utilizadas de extração mineral no Brasil e no mundo, devido à sua elevada produtividade e à viabilidade econômica em depósitos de grande extensão e baixos teores. Esse método caracteriza-se pela remoção sucessiva de camadas de solo e rocha até a exposição do corpo mineral, sendo empregado na lavra de minério de ferro, ouro, fosfato, bauxita e agregados. De acordo com Chaves (2019), a lavra a céu aberto envolve uma sequência de operações interdependentes, tais como: perfuração, desmonte, carregamento e transporte que requerem planejamento e controle rigorosos para garantir segurança, eficiência e sustentabilidade ambiental.

O avanço das frentes de lavra está diretamente condicionado à estabilidade dos taludes e à manutenção das bermas, elementos fundamentais para a segurança operacional. Conforme Hustrulid e Kuchta (2013), o dimensionamento e o controle geométrico de taludes devem considerar a interação entre parâmetros geotécnicos, estruturais e operacionais, de modo a equilibrar a estabilidade e o aproveitamento econômico do depósito. A perda de bermas e o overbreak excedente de material desmontado além do limite de projeto figuram entre os

principais fatores de risco para a integridade da cava e para o aumento dos custos operacionais. Nesse contexto, a etapa de perfuração e desmonte exerce papel decisivo no desempenho geotécnico das minas a céu aberto. Segundo Jimeno, Jimeno e Carcedo (1995), a fragmentação e o controle do maciço rochoso dependem da correta definição dos parâmetros de perfuração, carregamento e sequência de detonação. Um desmonte mal planejado pode provocar vibrações excessivas, fraturas não desejadas e danos à parede final, comprometendo a estabilidade dos taludes e o formato projetado da cava.

Para minimizar esses efeitos, técnicas de desmonte controlado, como o pré-corte (pre-split) e o smooth blasting (detonação suave), têm sido amplamente aplicadas. Essas práticas visam criar uma superfície de fratura contínua e regular, reduzindo os danos no maciço remanescente e preservando as bermas. Conforme Hustrulid (1999), o sucesso do desmonte controlado está diretamente relacionado à precisão na execução da malha de furos, à separação adequada entre as linhas de produção e de pré-corte e ao controle da sequência de iniciação.

A interação entre o desmonte e as estruturas geotécnicas torna-se ainda mais relevante quando há coexistência de operações subterrâneas e a céu aberto, cenário em que as vibrações e tensões induzidas pela detonação podem afetar galerias, câmaras ou pilares. Estudos compilados por Singh e Xavier (2005) indicam que a detonação independente do pré-corte pode reduzir significativamente a propagação de energia para regiões sensíveis do maciço, favorecendo o controle de danos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho técnico e geomecânico do desmonte controlado com PowerSplit e detonação independente do pré-corte, aplicado na Mineração Fazenda Brasileiro, pertencente ao grupo Equinox Gold, localizada no município de Barrocas (BA). A pesquisa busca verificar a eficácia dessa metodologia na redução do overbreak e preservação das bermas, considerando também a interação com estruturas subterrâneas adjacentes.

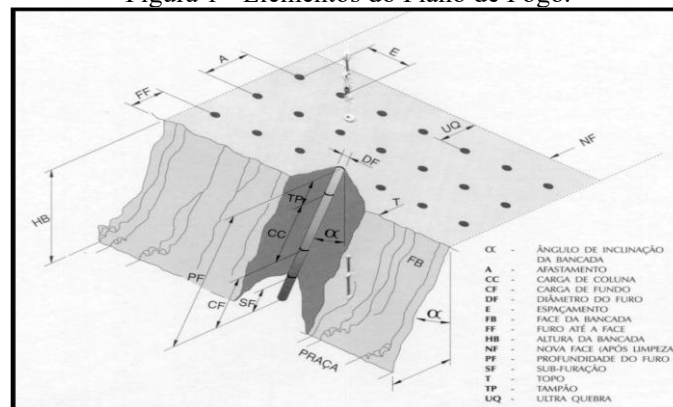
Assim, este estudo contribui para o aprimoramento das práticas operacionais em lavra a céu aberto, integrando fundamentos teóricos da mecânica das rochas e da engenharia de desmonte com observações empíricas e análises de campo. Espera-se que os resultados obtidos subsidiem recomendações técnicas voltadas à melhoria da estabilidade de taludes e à otimização do desempenho geotécnico em minas brasileiras, conforme as boas práticas descritas por Hustrulid e Kuchta (2013) e Chaves (2019).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PLANO DE FOGO

O plano de fogo é o projeto executivo do desmonte a céu aberto que especifica, de forma prévia, os elementos e procedimentos necessários à detonação com uso sistemático de explosivos (Geraldi, 2011). Esses elementos são mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Elementos do Plano de Fogo.



Fonte: Silva (2014)

2.1.1 Diâmetro de Perfuração

É a dimensão transversal do furo executado no maciço rochoso, normalmente expressa em milímetros ou polegadas, que determina a capacidade de acomodação de carga explosiva e influencia a fragmentação e o consumo de explosivos.

Segundo Ricardo e Catalani (1990), o diâmetro máximo de perfuração (em polegadas) deve corresponder à capacidade da caçamba do equipamento de carga, medida em jardas cúbicas. Como várias variáveis do plano de fogo estão diretas ou indiretamente relacionadas ao diâmetro do furo, as dimensões dos blocos resultantes da detonação também são afetadas por essa escolha.

2.1.2 Afastamento

O afastamento (distância entre a linha de frente e a linha seguinte de furos de início) é definido de modo a permitir que os primeiros furos criem um vazio de arranque adequado e que as fases subsequentes empurrem o material para esse espaço, garantindo o contorno desejado da frente e minimizando o dano às paredes da bancada. O afastamento adotado deve também ser compatível com a capacidade de escavamento dos equipamentos de carregamento e com a estratégia de sequência de detonação (Silva, 2009; Geraldi, 2011).

2.1.3 Espaçamento

O espaçamento entre furos (medido ao longo da frente na direção da bancada) determina a área de influência de cada furo e, em conjunto com o afastamento, define a malha de perfuração e o volume de rocha fragmentado por furo. Espaçamentos menores tendem a produzir fragmentos mais finos e maior consumo de explosivo, enquanto espaçamentos excessivos reduzem a eficiência do arranque e aumentam a probabilidade de blocos grandes ou repés (Ricardo e Catalani, 2007; Silva, 2015).

2.1.4 Tipos de Malha

O tipo de malha deve ser escolhido conforme o objetivo de fragmentação, geometria da bancada e eficiência de perfuração. As malhas estagiadas (pé de galinha) costumam distribuir melhor o esforço de ruptura e reduzir volumes não fragmentados por furo, enquanto malhas retangulares e quadradas são mais simples de implantar e alinhar com equipamentos. A área da malha multiplicada pela altura da bancada fornece o volume de rocha por furo, parâmetro essencial para dimensionamento de cargas (Geraldini, 2011; Bernardes, 2022).

2.1.5 Inclinação dos Furos

A inclinação dos furos é o ângulo em relação à vertical ou horizontal e é usada para otimizar o confinamento do explosivo na coluna, melhorar a interação com fraturas naturais e evitar repés no pé da bancada. A inclinação também depende do método de perfuração disponível e da necessidade de subperfuração para garantir a escavação do pé da bancada (Silva, 2015).

Segundo Quaglio (2003), a perfuração inclinada, embora exija maior precisão, costuma ser preferível à perfuração vertical, por oferecer melhor desempenho operacional. Algumas vantagens são aumento da fragmentação junto ao tampão, melhor arranque do pé da bancada (reduzindo necessidade de subperfuração) e menor ultra lançamentos.

2.1.6 Altura da Bancada

A altura da bancada é uma variável que deve ser compatível com o diâmetro de perfuração, com os equipamentos de carregamento e com a capacidade de britagem/beneficiamento. Alturas maiores aumentam o volume por furo e a produtividade teórica, mas podem exigir furos de maior diâmetro, maior consumo de explosivo, e apresentam maiores riscos de uma má fragmentação e instabilidade se não houver ajuste adequado do plano de fogo (Ricardo e Catalani, 1990).

2.1.7 Carga de Fundo e Carga de Coluna

A carga de fundo consiste em uma carga reforçada colocada na base do furo, região onde a rocha apresenta maior resistência. Já a carga de coluna é a carga que vem logo acima. Não precisa ser tão concentrada quando a de fundo, já que a rocha desta região não é tão presa. São cargas projetadas para garantir confinamento suficiente e transferência efetiva de energia para a rocha, a carga de fundo assegura a compactação inicial (reduzindo perda de gases e melhorando eficiência), enquanto a carga de coluna (densidade, comprimento e tipo do explosivo) determina a energia disponível para fragmentação. A seleção do material e a proporção entre carga de fundo e coluna consideram tipo de explosivo, fraturamento do maciço e objetivo de fragmentação (Ricardo e Catalani, 2007; SILVA, 2009).

2.1.8 Tampão

O tampão corresponde ao material inerte utilizado para preencher a parte superior do furo não carregada com explosivo. De acordo com Koppe e Costa (2012), o material mais adequado para o tamponamento é granular, como a brita, devendo apresentar granulometria compatível com o diâmetro do furo. Apesar de ser comum, o uso do pó de perfuração não é recomendado. A principal função do tampão é evitar a fuga dos gases produzidos na detonação, garantindo melhor aproveitamento da energia para a fragmentação da rocha e reduzindo a ocorrência de ultra-lançamentos.

2.1.9 Sequenciamento

O sequenciamento é tempos de retardo entre os furos/linhas e é crítico para controlar direção de fratura, diminuir vibrações transmitidas ao ambiente e otimizar a fragmentação. É definido pelo padrão de retardo e, com o uso de detonadores eletrônicos, é possível obter dispersões de retardo muito pequenas, o que melhora a sincronização e o controle de vibrações. Projetos de sequenciamento consideram também a presença de estruturas sensíveis e limites de carga por espera (Geraldi, 2011).

2.1.10 Carga Máxima por Espera

A carga máxima por espera refere-se à quantidade máxima de energia explosiva iniciada simultaneamente. Para Geraldi (2011), esse parâmetro é calculado a partir de critérios de atenuação de vibração, distância a estruturas sensíveis e normas locais, e deve ser definido no plano de fogo para garantir conformidade com restrições ambientais e segurança operacional.

Quando os intervalos de retardo são suficientemente longos para evitar a sobreposição de ondas, é essa carga máxima por espera, e não a carga total detonada, que determina diretamente a magnitude da vibração gerada (Jimino, 1990).

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a Mineração Fazenda Brasileiro Desenvolvimento Mineral, localizada no município de Barrocas, região nordeste do estado da Bahia, a cerca de 191 km de Salvador.

A escolha da área fundamenta-se em sua relevância geotécnica e operacional. A mina apresenta operações combinadas de lavra subterrânea e a céu aberto. Além disso, o histórico de perda de bermas e deformações locais nos taludes de produção foi determinante para a seleção do local, uma vez que fornece base empírica para a formulação e teste das hipóteses relacionadas ao efeito da energia de desmonte sobre a geometria dos taludes.

A metodologia compreendeu três eixos principais:

1. Diagnóstico técnico-operacional, voltado à identificação dos mecanismos de instabilidade e das não conformidades entre o projeto geométrico e o talude executado;
2. Experimentação controlada, com a proposição de arranjos alternativos de desmonte, testando diferentes explosivos e sequências de detonação;
3. Análise e validação, relacionando os resultados obtidos em campo aos parâmetros geotécnicos e de desempenho operacional.
- 4.

3.2 DIAGNÓSTICO OPERACIONAL E FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES

O diagnóstico inicial foi conduzido a partir de inspeções em campo, observação direta das frentes de lavra e discussões técnicas com as equipes de Operação, Planejamento de Mina e Geomecânica. As inspeções evidenciaram que as bermas planejadas não estavam sendo preservadas conforme o projeto, resultando na formação de paredões verticais e perda de controle geométrico das bancadas (Figura 2).

Figura 2 - Paredão formado por má qualidade de bermas.



Fonte: Próprio autor (2025).

A partir das observações de campo e da análise dos relatórios operacionais, formulou-se a hipótese de que a instabilidade estava associada principalmente a dois fatores:

- a) A **superposição de cargas explosivas** entre os furos de produção e de pré-corte, ocasionando excesso de energia e *overbreak*; e
- b) **Falhas na confecção manual dos cartuchos de explosivo “churrasquinho”**, cuja diferença dimensional em relação ao diâmetro dos furos promovia inclinações laterais e descontinuidades no plano de pré-corte.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com base no diagnóstico, foi desenvolvido um plano experimental comparativo destinado a testar a eficácia de soluções alternativas de detonação. Foram estabelecidas duas variáveis principais:

- i. a substituição do explosivo encartuchado manual por **Power Split**, um produto industrializado de maior uniformidade e controle dimensional; e
- ii. a **detonação independente** da linha de pré-corte em relação à linha de produção, visando reduzir a interação entre as ondas de choque e minimizar o impacto na berma.

O planejamento técnico da malha de perfuração considerou parâmetros de projeto previamente utilizados pela mina, ajustados conforme recomendações técnicas da literatura (Hustrulid & Johnson, 2001; Oriard, 1987), a saber: espaçamento entre furos de 3,3 m; afastamento entre linhas de 2,2 m; e diâmetro dos furos de pré-corte de 0,0762 m (3”). A

perfuração foi realizada com leve angulação, garantindo a interseção das galerias subterrâneas sem comprometer sua estabilidade estrutural.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação das soluções propostas para a mitigação dos problemas de overbreak e perda de bermas identificados na Mina Fazenda Brasileiro, pertencente ao grupo Equinox Gold.

4.1 DIAGNÓSTICO INICIAL: OVERBREAK E PERDA DE BERMAS

O diagnóstico inicial, apresentado na metodologia, revelou que a perda de bermas e a formação de paredões estavam relacionadas à má definição entre pé, crista e berma dos taludes, consequência direta de desmontes com excesso de energia. A Figura 3 ilustra as frente de lavra da Cava C Sul, em que se observam os efeitos do overbreak, com a remoção de material além do limite de projeto, resultando na redução da largura das bermas planejadas e, conseqüentemente, na diminuição do fator de segurança global do talude.

Figura 3 - Frente de lavra e o overbreak após o desmonte de rochas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme evidenciado na Figura 3, o desmonte executado com a sobreposição de cargas gerou uma frente irregular e desconexa, o que inviabiliza o uso da berma como plataforma operacional. Além disso, a geometria resultante aumenta a exposição dos taludes às ações intempéricas, favorecendo processos erosivos e instabilidades progressivas. Esse quadro motivou a revisão dos parâmetros de perfuração e carregamento, conduzida em conjunto com as equipes de Planejamento, Operação e Geomecânica, além da consultoria técnica da empresa Órica.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

Com base nas recomendações técnicas, foram introduzidas duas medidas corretivas principais:

- (i) a substituição do explosivo artesanal tipo “churrasquinho” pelo explosivo industrial PowerSplit, fabricado pela Senatel, e
- (ii) a execução do pré-corte em um evento de detonação independente da linha de produção, de forma a minimizar o acúmulo de energia e o impacto na parede final do talude.

A Figura 4 apresenta o modelo de cartucho PowerSplit.

Figura 4 - Explosivo Senatel Powersplit.



Fonte: Autoria própria (2025).

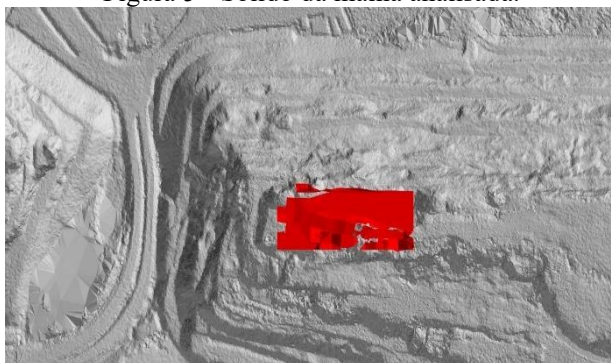
A principal vantagem observada com o uso do PowerSplit foi a uniformidade do diâmetro do encartuchado em relação ao furo, reduzindo o risco de inclinações laterais e garantindo o correto posicionamento da carga ao longo da coluna. Além disso, a industrialização do produto eliminou falhas na montagem e variações de densidade explosiva, comuns nos dispositivos confeccionados manualmente.

Uma das propostas de solução apresentada pela Órica, seria a utilização do “churrasquinho” industrial, chamado de Powersplit, onde o mesmo já viria acabado de fábrica, descartando a produção manual e podendo utilizar um diâmetro de furo maior que o método anterior utilizava

4.3 PLANEJAMENTO GEOMECÂNICO E INTERAÇÃO COM A MINA SUBTERRÂNEA

A cota que se deseja chegar após a detonação e limpeza dessa malha, é a cota 300 (metragem medida acima do nível do mar), onde foi feito o plano de perfuração pelo planejamento, a partir do sólido da área a ser trabalhada e analisada. Na Figura 5 é apresentado o sólido da malha a ser perfurada, localizado na cava sul, cota 300 e com numeração da malha 009.

Figura 5 - Sólido da malha analisada.



Fonte: Arquivo interno do planejamento Equinox.

A partir da Figura 6, pode-se analisar que parte da linha dos furos de pré-corte intersecta a galeria subterrânea.

Figura 6 - Galeria subterrânea e as recomendações geomecânica.



Fonte: Arquivo interno da geomecânica da Equinox

Em ambos os ângulos, destacados pelas linhas pontilhadas preta e vermelha, respectivamente, é necessária a variação para que o teto da galeria representado em cinza, à esquerda não permaneça de pé. Na Figura 7 é apresentado o plano de perfuração, com a linha de pré-corte e os furos de produção.

Figura 7 - Plano de perfuração da malha.



Fonte: Arquivo interno da geomecânica da Equinox.

A partir da Figura 7 identificamos as linhas topográficas da mina a céu aberto e algumas regiões destacadas em azul. A área evidenciada em azul corresponde a antigas galerias da mina subterrânea, atualmente lavradas por meio da lavra a céu aberto. Na região do pré- corte, onde o trabalho está sendo executado, existe um teto de uma galeria logo à frente. Este é o ponto onde será necessária a variação durante a perfuração (furos 1 ao 45), com o objetivo de rebaixar o teto da galeria e evitar qualquer interação com vazios.

Essas recomendações foram fundamentais para compatibilizar as operações de lavra a céu aberto com a estrutura subterrânea existente. O controle geométrico, executado pela equipe de topografia, assegurou a correta marcação dos furos e a conformidade com o plano de perfuração aprovado.

4.4 EXECUÇÃO DOS TESTES E DESMONTE CONTROLADO

A perfuração foi realizada utilizando a perfuratriz Lobo XIX (Figura 8), indicada para furos entre 3" e 4", cuja operação foi supervisionada para evitar desvios excessivos que comprometessem a variação das galerias.

Figura 8 - Perfuratriz Lobo XIX.



Fonte: Próprio autor (2025).

Após a conclusão da perfuração, a topografia efetuou novo levantamento para verificar a conformidade da malha e corrigir eventuais desvios. Em seguida, foi elaborado o plano de fogo e definido o esquema de temporização, que, no caso do pré-corte, consistiu em uma sequência única de iniciação simultânea. A detonação foi executada no dia 01/04/2025, após a adoção de todas as medidas de segurança operacional. A Figura 9 apresenta o momento da detonação do pré-corte.

Figura 9 - Detonação dos furos de pré-corte.



Fonte: Próprio autor (2025).

4.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Após o desmonte, foi realizada uma análise topográfica e geomecânica da área de teste. Na região diretamente acima da galeria subterrânea, a variação não se completou integralmente, conforme evidenciado na Figura 10. O teto da galeria permaneceu parcialmente intacto, exigindo o isolamento da área pela equipe de Geomecânica. Esse resultado aconteceu devido a equipe de perfuração não ter realizado os furos com os ângulos planejados, realizando perfurações de 90°.

Figura 10 - Vista de fora da galeria subterrânea.



Fonte: Próprio autor (2025).

É possível observar o isolamento da área e a lateral da galeria, que apresentou apenas um 'buraco' em sua estrutura, enquanto o teto permaneceu no mesmo lugar. A aplicação em áreas com interação direta entre o pré-corte e cavidades subterrâneas requer ajustes adicionais, especialmente quanto à inclinação e profundidade dos furos. A hipótese de que a angulação incorreta ou desvios durante a perfuração possam ter comprometido a variação é tecnicamente plausível e deve ser considerada em trabalhos futuros.

4.6 DISCUSSÃO TÉCNICA E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A substituição do explosivo artesanal pelo PowerSplit, associada à detonação independente do pré-corte, mostrou-se eficaz na redução da energia excessiva transmitida aos taludes e na consequente preservação das bermas. Essa constatação é coerente com o princípio de controle de energia em desmontes de precisão, segundo o qual a separação de eventos detonantes evita a propagação de ondas de choque sobrepostas, reduzindo o dano na parede final

(Jimeno et al., 1995; Konya & Walter, 1990). Porém, a força da carga dos explosivos dos furos de pré-corte, não foram suficientes para promover um desmonte de qualidade da malha. Na Figura 11 é possível analisar o resultado real do desmonte.

Figura 11 - Local da detonação pós desmonte.



Fonte: Próprio autor (2025).

É possível perceber que parte do desmonte não ocorreu conforme o planejado, resultando em uma trinca no local onde deveria ter sido realizado o pré-corte. Isso deixou um grande bloco de material que precisará ser removido em um novo desmonte de regularização da área, já que não é possível retirá-lo com escavadeiras nem o reduzir utilizando rompedor.

A partir da Figura 12, é possível observar a parte da malha em que o bloco se fragmentou.

Figura 12 - Pré-corte com material fragmentado.



Fonte: Próprio autor (2025).

Embora o material tenha se fragmentado durante o desmonte, é evidente a presença de diversos blocos com granulometria muito acima do recomendado (50-60cm), para a abertura do britador de mandíbulas, onde os mesmos apresentaram aproximadamente 90-120cm. Dessa forma, além do desmonte de regularização do material que não se desprende do pré-corte, esses blocos também precisaram ser novamente fragmentados com o uso de rompedor, a fim de facilitar seu transporte e a britagem primária.

Mesmo com parte do material se fragmentando, é possível observar que o piso não chegou na cota objetiva (300), sendo necessário a realização de repé por meio de escavadeira. O repé é a retirada mecanizada do material remanescente do desmonte, com o objetivo de deixar o piso da malha no padrão planejado. Nessa malha foi possível observar que ficou remanescente aproximadamente 50 cm de altura de repé, sendo observado a olho nú, gerando uma quantidade considerável de material. Na Figura 13 pode-se analisar o retrabalho realizado pela escavadeira a partir do desmonte mal executado.

Figura 13 - Escavadeira realizando repé e regularizações.



Fonte: Próprio autor (2025).

A Figura 13 demonstra o retrabalho da escavadeira para a regularização do piso para a cota objetiva, além da limpeza do material fragmentado pelo rompedor, com a finalidade de limpar o acesso até a linha do pré-corte.

O tempo de liberação da respectiva malha foi muito maior que o planejado, onde o tempo comum de ciclo é de 2 a 3 dias, porém essa malha demorou de 7 a 9 dias para ser liberada, ocasionando atrasos no sequenciamento das malhas sobrepostas, através do desmonte mal executado, retrabalho com regularização do piso e desprendimento do bloco remanescente, além de dificuldades de acesso a área, provocado pela interação com o vazio não preenchido (galeria subterrânea).

A meia cana, que é o formato côncavo formado no fundo do furo em função do tipo de broca e do avanço rotativo, pode influenciar diretamente a eficiência do desmonte, especialmente no assentamento do explosivo e na transmissão da energia, o que pode resultar em sobras no pé do banco se não for bem considerada (Hustrulid, 1999). Os pontos positivos observados foram que a meia cana da linha do pré-corte ficou bem definida, evidenciando a efetividade do uso do PowerSplit e indicando que o desenho do pré-corte atendeu aos padrões esperados. Por outro lado, a carga de detonação da linha independente da produção mostrou-se pequena e insuficiente para fragmentar adequadamente o material, deixando como aprendizado a necessidade de novos estudos voltados à preservação das bermas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a eficácia técnica e geomecânica da aplicação do desmonte controlado utilizando o explosivo industrial PowerSplit, em conjunto com a detonação independente do pré-corte, na tentativa de mitigar o overbreak e preservar a integridade das bermas na Mina Fazenda Brasileiro (Equinox Gold). A análise considerou também a interação com estruturas subterrâneas preexistentes, permitindo uma visão integrada das variáveis operacionais, geomecânicas e de planejamento que influenciam o desempenho do desmonte. A pesquisa forneceu um panorama detalhado sobre as dificuldades e limitações do método, assim como os pontos que demandam atenção para futuras aplicações.

Os resultados obtidos demonstraram que, embora o uso do PowerSplit tenha promovido maior uniformidade na execução dos furos, a detonação independente do pré-corte não foi suficiente para alcançar o desmonte completo do material. Observou-se a formação de blocos remanescentes e necessidade de retrabalho mecanizado, evidenciando que o método, nas condições testadas, não alcançou a redução efetiva do overbreak nem a preservação das bermas, especialmente em áreas com interação direta com galerias subterrâneas. Essa constatação indica que o controle de energia e a precisão operacional continuam sendo fatores críticos para o sucesso de desmontes controlados.

A análise da interação entre o pré-corte e as galerias subterrâneas evidenciou limitações claras no método, principalmente na variação incompleta do teto das cavidades. Este resultado reforça a necessidade de calibração mais rigorosa dos ângulos de perfuração, bem como da implementação de instrumentação de monitoramento, como borehole deviation logs ou modelagem numérica, para melhor prever e controlar a propagação de energia em maciços heterogêneos.

Em termos de planejamento e execução, o estudo evidenciou que a integração entre equipes de planejamento, geomecânica, topografia e perfuração é essencial para minimizar riscos operacionais. A experiência com a malha experimental permitiu identificar pontos críticos de execução, como a necessidade de ajustes na inclinação dos furos e no carregamento de explosivos, oferecendo subsídios práticos para revisões de procedimentos e futuras otimizações no controle de danos e estabilidade de taludes.

A pesquisa também fornece contribuições relevantes para estudos futuros, ao demonstrar a importância de testar o PowerSplit em condições de produção real, em diferentes litologias e geometrias de talude, a fim de avaliar sua robustez e adaptabilidade. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de análises numéricas detalhadas e o monitoramento contínuo de

deformações e vibrações, permitindo melhor compreensão do comportamento do maciço e aprimoramento dos planos de perfuração e detonação.

Em síntese, o estudo cumpriu seu objetivo de avaliar o desempenho técnico e geomecânico do desmonte controlado com PowerSplit, evidenciando limitações, desafios operacionais e oportunidades de melhoria. As conclusões obtidas não apenas descrevem as falhas observadas, mas também fornecem base sólida para decisões técnicas futuras, reforçando a relevância da pesquisa para operações complexas em lavras a céu aberto, especialmente quando coexistem estruturas subterrâneas, e consolidando fundamentos para aprimoramentos metodológicos e operacionais em estudos subsequentes.

REFERÊNCIAS

- BERNARDES, J.P.V. Dimensionamento de planos de fogos reduzindo a formação de matacões provenientes de desmontes de rochas. 2022. 52 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 28 jul. 2022. Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
- CHAVES, C. R. FREITAS, L. C., & SILVA, M. A. Planejamento de Médio Prazo em Mineração a Céu Aberto: Estudo de Caso na Mina X. Revista de Mineração, v. 65, n. 2, p. 124-135, 2019.
- GERALDI, J.L.P. O ABC das Escavações de Rocha. Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 2011.
- HUSTRULID, W. A. Blasting Principles for Open Pit Mining. Rotterdam: A.A. Balkema, 1999. Vol. 1 e 2. ISBN 978-90-5410-458-2.
- HUSTRULID, William A.; KUCHTA, Mark; MARTIN, Randall K. Open pit mine planning and design. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- JIMENO, C. L; JIMENO, E. L; GARCÍA, P. Manual de perforacion y voladura de rocas. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 1990. 442 p.
- JIMENO, Carlos López; JIMENO, Emilio López; CARCEDO, Francisco Javier Ayala. Drilling and blasting of rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995.
- KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. In: Manual de agregados para a construção civil. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.7. p.127-145.
- QUAGLIO, Osvail André. Otimização da perfuração e da segurança nos desmontes de agregados através dos sistemas laser profile e boretrak. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2003.
- RICARDO, H. S.; CATALANI, G. Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha. Edição 2. Editora Pini, 1990.
- RICARDO, H.S.; CATALANI, G. Manual Prático de Escavação – Terraplenagem e Escavação de Rocha. 3 ed. São Paulo: PINI, 2007.
- SILVA, V. C. Apostila do Curso de Mineração - Operações Mineraias. Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009.
- SILVA, R.C. Relatório de estágio integrado: perfuração e desmonte de rochas. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015. 48 p.

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA E HIDROGEOOLÓGICA SUBSUPERFICIAL APLICADA À AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE BARRAGEM DE REJEITOS DE AREIA

 10.56238/livrosindi202660-004

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Claydson Ferreira Faria

Geólogo (2005) pela UFMG
Mestre (2011) em Geologia Aplicada pela UFMG
E-mail: claydsonf@gmail.com
ID Lattes: 4006810103238307

Danillo Gustavo Silva Azevedo

Geógrafo (2012) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
E-mail: danillosazevedo99@gmail.com
ID Lattes: 9431176143066681

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ
Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8848937012868572

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 4556375475161993

RESUMO

A segurança e o monitoramento de barragens de rejeitos demandam o emprego de técnicas capazes de caracterizar, de forma indireta e não invasiva, as condições estruturais e hidrogeológicas do maciço

e de sua fundação. Neste contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas em subsuperfície de uma barragem de rejeitos de areia por meio da aplicação integrada dos métodos geofísicos de eletrorresistividade e potencial espontâneo. Foram executados dezesseis caminhamentos elétricos distribuídos estrategicamente na área do empreendimento, permitindo a obtenção de seções geoeletricas e a identificação de contrastes associados à cobertura de rejeitos argilo-arenosos, solos residuais e ao embasamento ortognáissico do Complexo Belo Horizonte. Os resultados evidenciaram significativa heterogeneidade do meio, com zonas de alta resistividade relacionadas à rocha menos alterada e regiões de resistividade intermediária e baixa associadas a materiais inconsolidados, fraturados e potencialmente saturados. A análise integrada dos perfis indicou variações na espessura da cobertura superficial e a presença de possíveis caminhos preferenciais de percolação de água, fornecendo subsídios importantes para a compreensão da dinâmica hidrogeológica local e para o monitoramento geotécnico da estrutura.

Palavras-chave: Geofísica de eletrorresistividade; Barragem; Areia.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos geofísicos de superfície constitui uma ferramenta amplamente consolidada para a investigação indireta das condições de subsuperfície, permitindo a identificação de heterogeneidades litológicas, estruturas geológicas e zonas de saturação sem a necessidade de escavações ou intervenções invasivas. No contexto da geofísica rasa, os métodos elétricos destacam-se pela versatilidade e pela relação custo-benefício, sendo amplamente empregados em estudos ambientais, hidrogeológicos e geotécnicos (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). De modo geral, o levantamento geofísico com auxílio da técnica de tomografia elétrica (método da eletrorresistividade) é bastante utilizado para prospecção e seleção de alvos sondagem pesquisa de bens minerais, locação de poços tubulares e auxiliando trabalhos de geotecnia.

O método da eletrorresistividade baseia-se na injeção de corrente elétrica no solo por meio de eletrodos e na medição das diferenças de potencial geradas na superfície, possibilitando a estimativa da resistividade aparente dos materiais investigados. A resistividade elétrica dos solos e das rochas é influenciada por fatores como composição mineralógica, porosidade, teor de umidade e grau de fraturamento, o que torna essa técnica particularmente sensível à presença de zonas alteradas ou saturadas (Reynolds, 2011). Dessa forma, variações laterais e verticais de resistividade podem ser correlacionadas a mudanças litológicas, descontinuidades estruturais e à circulação de fluidos em subsuperfície.

No âmbito hidrogeológico, a eletrorresistividade tem sido aplicada com sucesso na delimitação de aquíferos, na locação de poços tubulares e na identificação de zonas com maior potencial de armazenamento ou fluxo subterrâneo (Xavier, 2004). A interpretação integrada de seções bidimensionais de resistividade permite a construção de modelos geoeletricos

compatíveis com a realidade geológica local, desde que considerados os condicionantes estratigráficos e estruturais da área de estudo (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Complementarmente, o método do potencial espontâneo (SP) é empregado na detecção de anomalias relacionadas ao fluxo de fluidos em meios porosos, sendo particularmente útil em investigações envolvendo estruturas de contenção e áreas sujeitas à percolação de água (Reynolds, 2011). A integração entre eletrorresistividade e SP amplia a capacidade interpretativa do estudo, permitindo a correlação entre contrastes litológicos e possíveis caminhos preferenciais de fluxo.

A aplicação da geofísica de eletrorresistividade tem se mostrado uma ferramenta relevante na investigação de barragens, especialmente na avaliação de condições internas relacionadas à saturação, percolação e heterogeneidades estruturais do maciço e de suas fundações. Os diferentes tipos de materiais existentes nos ambientes geológicos apresentam, como uma de suas propriedades fundamentais, o parâmetro físico de resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, entre outros parâmetros, e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (Braga, 2007).

Por meio da análise das variações de resistividade elétrica, é possível identificar zonas com maior teor de umidade, caminhos preferenciais de fluxo e possíveis regiões de enfraquecimento, contribuindo para o monitoramento da integridade e da estabilidade dessas estruturas (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Em barragens de terra e de rejeitos, onde processos de infiltração e erosão interna representam fatores críticos de risco, os métodos geoeletricos permitem a detecção indireta de anomalias associadas à presença de água e à alteração do material, funcionando como importante instrumento de apoio às análises geotécnicas e aos programas de segurança de barragens (Reynolds, 2011).

A resistividade das rochas, está amarrada em diversas condições, para que apenas um valor único possa representar certo tipo litológico. Um determinado tipo litológico pode proporcionar, deste modo, uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, como relatado em Braga (2007), particularmente, os minerais são razoavelmente consistentes em suas propriedades elétricas, mas num conjunto, como ocorrem às rochas na natureza, a variação total de suas resistividades é maior.

Nesse contexto, o presente trabalho aplica técnicas geoeletricas com o objetivo de caracterizar as condições geológicas e hidrogeológicas de subsuperfície de uma barragem de rejeitos de areia, contribuindo para a compreensão estrutural do meio e fornecendo subsídios técnicos para análises geotécnicas e ambientais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo baseou-se na aplicação integrada de métodos geofísicos não invasivos, com ênfase na eletrorresistividade e no potencial espontâneo, visando à caracterização indireta das condições geológicas e hidrogeológicas em subsuperfície. A definição dos perfis de aquisição considerou aspectos geomorfológicos, estruturais e operacionais da área, buscando abranger as principais feições associadas ao maciço e às zonas de deposição. Os dados obtidos em campo foram posteriormente processados e interpretados à luz das características litológicas locais, permitindo a identificação de contrastes geoeletricos e a delimitação de possíveis áreas com influência de umidade e fluxo subterrâneo.

2.1 LOCAL DE ESTUDO

A área de estudo está inserida em contexto geológico típico de terrenos sedimentares e/ou cristalinos alterados, apresentando cobertura de solo residual sobre substrato rochoso com diferentes graus de intemperismo. Do ponto de vista geomorfológico, caracteriza-se por relevo suavemente ondulado a moderadamente inclinado, com presença de estruturas de contenção associadas à atividade antrópica. Sob o aspecto hidrogeológico, a dinâmica subterrânea é condicionada tanto pela porosidade do material superficial quanto por possíveis descontinuidades estruturais no embasamento, que podem atuar como zonas preferenciais de percolação. Essas características tornam a área particularmente adequada à aplicação de métodos geoeletricos, visando à identificação de contrastes litológicos, variações no grau de saturação e possíveis heterogeneidades associadas à estabilidade e ao comportamento hidráulico local.

Figura 1. Localização da área do estudo



Fonte: Autoria própria.

O Complexo Belo Horizonte está inserido no contexto do embasamento cratônico do Cráton do São Francisco, sendo constituído predominantemente por rochas granito-gnáissicas e migmatíticas de idade arqueana, que representam parte das unidades mais antigas da região metropolitana de Belo Horizonte e seus municípios vizinhos, como Betim e Contagem (Neto, 2019). Esse conjunto rochoso integra um embasamento cristalino complexo, composto por gnaisses, migmatitos e intrusões graníticas diferenciadas, refletindo uma evolução geológica de alto grau de metamorfismo e deformação (Júnior, 2016). Estudos geotécnicos localizados reforçam essa caracterização, descrevendo gnaisses cinzentos com bandamento composicional e feições migmatíticas amplamente expostos em afloramentos, compatíveis com a definição do Complexo Belo Horizonte como unidade de embasamento regional (Ávila; Lana, 2014).

Os solos residuais formados a partir do intemperismo de litologias cristalinas, como rochas graníticas e gnáissicas, resultam da decomposição in situ da rocha-matriz, sem transporte significativo, gerando uma transição gradativa entre a rocha original e o solo (Cirone, 2020). Em perfis residuais derivados de granito e gnaiss, é comum observar uma ampla variação mineralógica e textural, com frações de areia, silte e argila distribuídas verticalmente conforme o grau de intemperismo, o que favorece texturas que podem variar de silto-arenosas a argilo-arenosiltosas (Zhang et al., 2023).

Além disso, solos residuais jovens frequentemente preservam estruturas remanescentes da rocha matriz, incluindo a presença dispersa de blocos de granitognaisse no interior do solo, caracterizando um material heterogêneo e de origem claramente ligada ao embasamento cristalino (Cirone, 2020). As propriedades físicas desses solos tendem a se diferenciar das propriedades da rocha original nas áreas em que a cobertura residuosa atinge maiores espessuras, sendo condicionadas pela textura, composição mineralógica e perfil pedogenético resultante do processo de intemperismo (Zhang et al., 2023).

O empreendimento submete a areia explotada a um simples beneficiamento. Após o desmonte mecânico na frente de lavra, os caminhões responsáveis pelo transporte do minério basculam na pilha pulmão da planta de beneficiamento. O minério é então submetido a uma série de peneiras separadoras e/ou classificadoras. Ao final do processo obtém-se areia fina, grossa e mista. Já a porção mais fina, classificada como argilo arenosa, é o rejeito resultado do beneficiamento, material este que foi depositado ao longo dos anos na barragem de rejeitos do empreendimento.

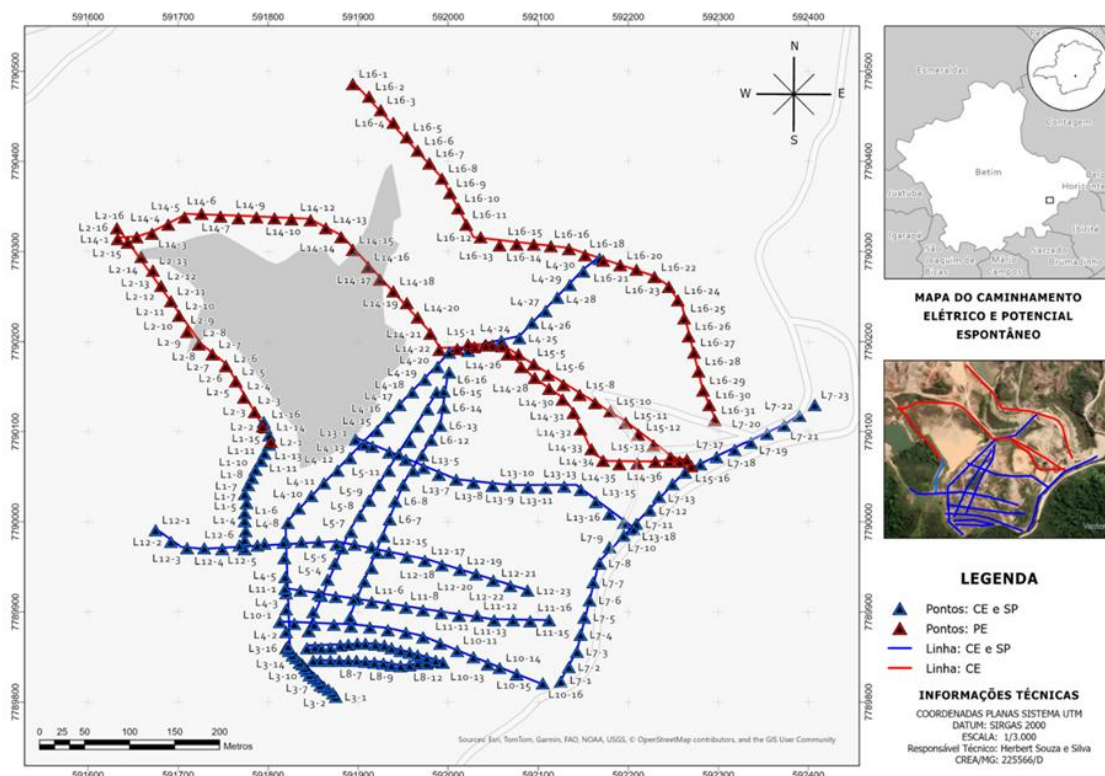
A interpretação dos dados foi efetuada considerando as características da litologia local e também do ambiente em que foram feitas as sondagens, já que se trata de uma área de deposição de rejeitos provenientes da lavagem de areia. O rejeito é aqui qualificado como sendo um material de granulometria bastante fina, caracterizado como argilo-arenoso, este compõe toda a cobertura do local, logo abaixo se encontra o maciço rochoso ortognáissico do Complexo Belo Horizonte, já caracterizado anteriormente.

2.2 DESENHO AMOSTRAL

As sondagens geofísicas realizadas neste estudo tiveram como propósito a identificação das características locais, caracterização das regiões de resistividade (RES) em subsuperfície além das regiões mais favoráveis a percolação de água no subsolo através dos levantamentos de Potencial Espontâneo (SP).

Foram realizados os seguintes levantamentos por intermédio de 16 linhas geofísicas, numeradas de CE-1 a CE-16, com variação do comprimento horizontal dos caminhamentos. Os levantamentos de potencial espontâneo foram realizados nas mesmas marcações dos caminhamentos elétricos. A disposição das linhas pode ser vista na Figura 2.

Figura 2. Localização das linhas geofísicas dentro do empreendimento



Legenda. Em azul as linhas e pontos que foram analisadas através de Caminhamento Elétrico (CE) e Potencial Espontâneo (SP), em vermelho as linhas e pontos analisadas apenas com Caminhamento Elétrico (CE)
Fonte: Autoria própria.

Os caminhamentos foram realizados nas bermas do barramento, seguindo a mesma direção das estruturas, outros levantamentos foram realizados perpendicularmente em relação a direção do maciço da barragem, alguns levantamentos foram realizados sobre diques de lagos existentes dentro do empreendimento. Tal configuração, tem como objetivo cobrir a maior área possível dentro do empreendimento, sendo assim capaz de caracterizar a área de interesse.

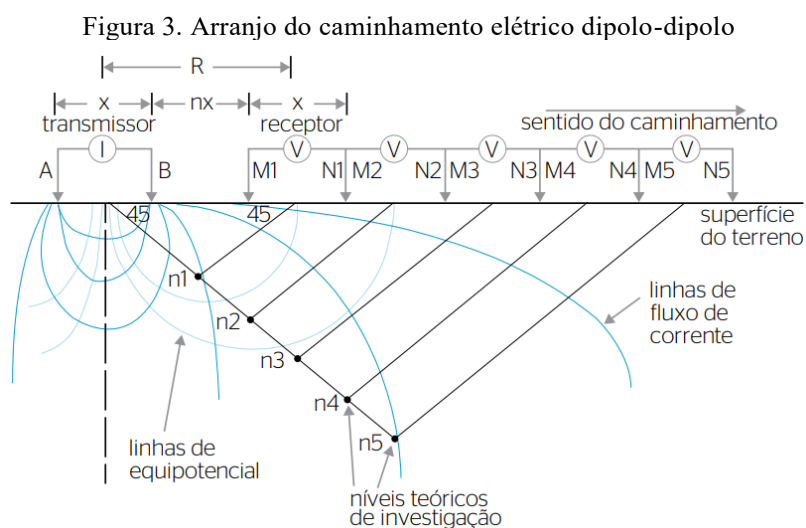
Para a realização deste estudo, foram utilizados os seguintes materiais: Cartas geológicas digitalizadas em escalas diversas, boletins de sondagem realizadas no empreendimento, planilhas de acompanhamento dos níveis de água nos poços existentes no empreendimento. Equipamentos: nos levantamentos de eletrorresistividade foi utilizado o eletrorresistímetro fabricado pela Auto Energia, modelo X5 500, auxiliado por dois multímetros digitais da Hikari modelo HM-2090. Como acessórios, foram utilizados cabos de conexão elétrica, trenas, bateria, gerador de energia, eletrodos de alumínio para o envio de corrente elétrica, eletrodos não polarizáveis para leitura do potencial espontâneo e um GPS portátil eTrex 10 Garmin para o georreferenciamento dos locais de estudo.

Foram interpretados os dados geológicos, morfológicos de relevo e da drenagem superficial além dos métodos construtivos da barragem objeto deste estudo, restringindo-se ao

polígono da área de estudo. Após a caracterização das características citadas anteriormente dentro do polígono escolhido como área de estudo, as informações foram unificadas em um banco de informações georreferenciadas em um sistema de informação geográfica (SIG).

2.3 LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS EM CAMPO

O arranjo utilizado para a investigação de subsuperfície na área, foi o arranjo dipolo-dipolo. Para atingir as profundidades adequadas para o estudo foi utilizado espaçamento entre os eletrodos de vinte e cinco metros, com doze níveis de investigação. Este arranjo é configurado em campo com um par de eletrodos de corrente, próximos um do outro, e um par de eletrodos de potencial (dipolos de recepção), também próximos, medindo a tensão gerada pelos eletrodos de corrente.



Fonte: Becegato et al 2016.

Os centros desses dipolos são deslocados na superfície, de forma que quanto mais afastados dos dipolos de corrente, maior a profundidade de investigação atingida. Cada afastamento regular realizado pelos dipolos de recepção representa um nível de investigação (profundidade teórica investigada). Assim, quanto mais afastados os eletrodos, maior a profundidade de investigação (Figura 3).

Apenas em dois conjuntos de linhas distintos foram utilizados espaçamentos diferentes do padronizado para o estudo. Em duas bermas inferiores do barramento representados pelos caminhamentos CE-8 e CE-9, além do CE-1 foi utilizado o espaçamento de 10 metros entre eletrodos. Já no caminhamento CE-3 foi utilizado o espaçamento de 5 metros. Nos demais caminhamentos o espaçamento empregado foi de 20 metros entre eletrodos. Esses espaçamentos também foram empregados durante os levantamentos de potencial espontâneo.

As medidas coletadas em campo são impressas e interpoladas, em computador, tendo como resposta uma pseudo-seção da resistividade aparente daquele local. No trabalho de análise dos dados, como a pseudo-seção não pode ser atribuída como uma imagem verdadeira do subsolo, já que a profundidade alcançada pelo estudo não está sujeita exclusivamente a configuração impressa à geometria do caminhamento utilizado, mas igualmente dos contrastes de resistividade das litologias em subsuperfície. Sendo assim, os resultados encontrados nas pseudo-seções não caracterizam a realidade das profundidades e nem das medidas de resistividades reais (Gandolfo, 2007).

A apreciação de anomalias é comumente realizada de modo qualitativo, para isso se utilizando de programas para a inversão dos dados e assim gerar os modelos geoeletricos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

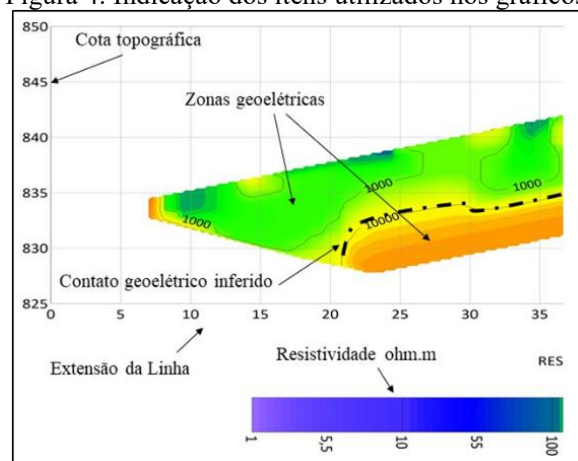
Após o processamento e a modelagem, os dados de eletrorresistividades aparentes coletados nos caminhamentos foram apresentados como seções verticais de resistividade e profundidade, com a resistividade apresentada em intervalos de contornos logarítmico, com legenda colorimétrica.

Foram consideradas a existência de três regiões de resistividade neste levantamento, na interpretação as regiões das seções com resistividade menores do que 550ohm.m como áreas de ocorrência de calcários alterados e/ou muito fraturados, podendo haver preenchimento destes espaços por sedimentos carreados pelo fluxo hídrico e podendo então estarem saturados, ou até mesmo considerar que estes espaços possam estar preenchidos por água.

Reiterando, os valores de resistividade encontrados nos caminhamentos, que serão apresentados neste estudo, são harmônicos com aqueles estabelecidos como limites de variação estabelecidos por Luiz; Silva (1995), Borges (2007) e Braga (2007), para os materiais litológicos encontrados na geologia regional.

Os gráficos de resistividade juntamente com a interpretação geológica apresentados terão como padrão as especificações definidas na Figura 4, utilizada como padrão para as análises feitas sobre os gráficos este estudo.

Figura 4. Indicação dos itens utilizados nos gráficos.



Fonte: Autoria própria

Entre as dezesseis linhas de caminhamento elétrico executadas, as extensões variaram conforme a configuração geométrica e os objetivos específicos de cada setor investigado. As linhas CE-1, CE-8 e CE-9 apresentaram 140m, 150m e 150m, respectivamente; CE-2, CE-5, CE-6, CE-10, CE-11 e CE-15 tiveram 300m cada; CE-3 totalizou aproximadamente 100m; CE-4 atingiu 600m; CE-7 apresentou 420m; CE-12 alcançou 460m; CE-13 teve 340m; CE-14 correspondeu à maior extensão, com 760m; e CE-16 totalizou 600m. Essa variação de comprimentos permitiu a adequada cobertura espacial da área de estudo e a investigação de diferentes compartimentos geológico-estruturais.

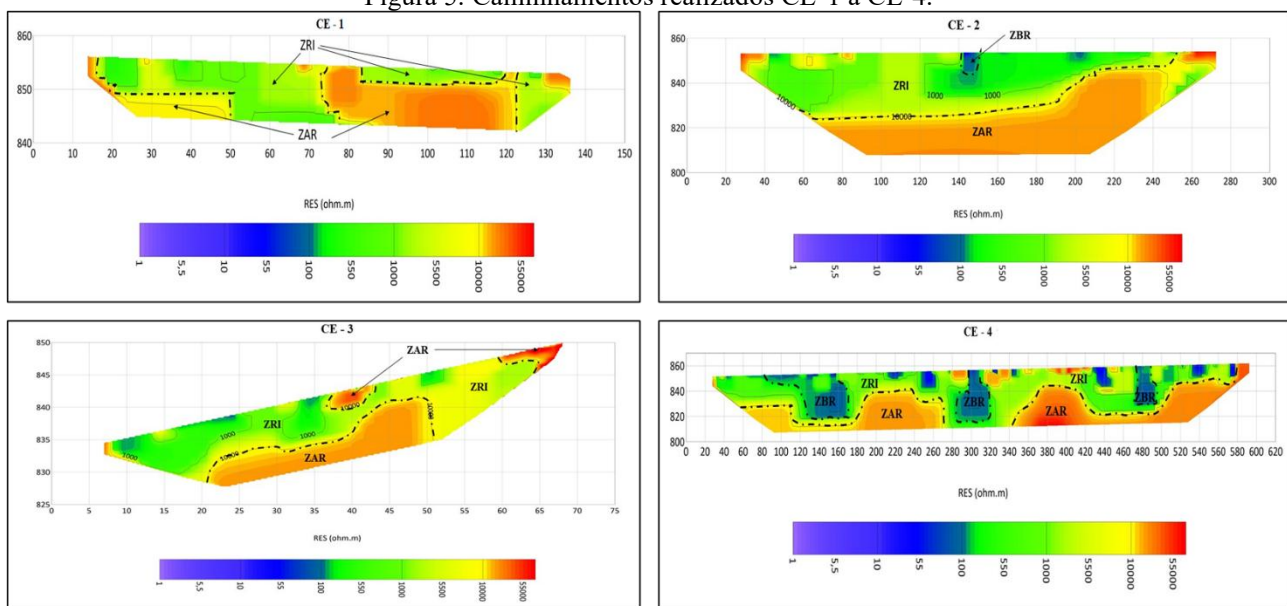
Os resultados obtidos nos caminhamentos elétricos CE-1 a CE-4 indicam um padrão geoeletrico compatível com o contexto geológico regional e com a presença de materiais de cobertura argilo-arenosa sobre o embasamento ortognáissico. No CE-1, observa-se a ocorrência de uma Zona de Alta Resistividade (ZAR) a partir da porção média do perfil, interpretada como o topo do maciço gnáissico. Associada a esta feição, identifica-se uma Zona de Resistividade Intermediária (ZRI) que sugere uma possível descontinuidade estrutural, compatível com regiões topograficamente mais rebaixadas e potencialmente associadas à presença de material mais alterado e com maior teor de umidade.

Nos perfis CE-2, CE-3 e CE-4, os padrões observados são coerentes com a distribuição lateral dos materiais já identificados no CE-1, reforçando a presença de contrastes geoeletricos associados ao contato entre a cobertura inconsolidada e o embasamento rochoso. As zonas de resistividade mais baixa tendem a indicar materiais mais alterados, possivelmente saturados, enquanto os domínios de resistividade elevada estão associados à rocha menos intemperizada. A recorrência dessas feições ao longo dos quatro perfis sugere continuidade lateral do maciço

rochoso e a presença de setores com maior grau de fraturamento e alteração, que podem atuar como caminhos preferenciais para a percolação de água.

Do ponto de vista interpretativo, o conjunto dos quatro perfis indica um ambiente heterogêneo, no qual as variações de resistividade refletem principalmente a espessura da cobertura residual, o grau de alteração do substrato e possíveis zonas de descontinuidade estrutural. Essas feições são coerentes com processos de intemperismo diferencial e com a evolução geomorfológica local, evidenciando áreas com maior potencial de saturação hídrica intercaladas com setores dominados por rocha mais competente.

Figura 5. Caminhamentos realizados CE-1 à CE-4.



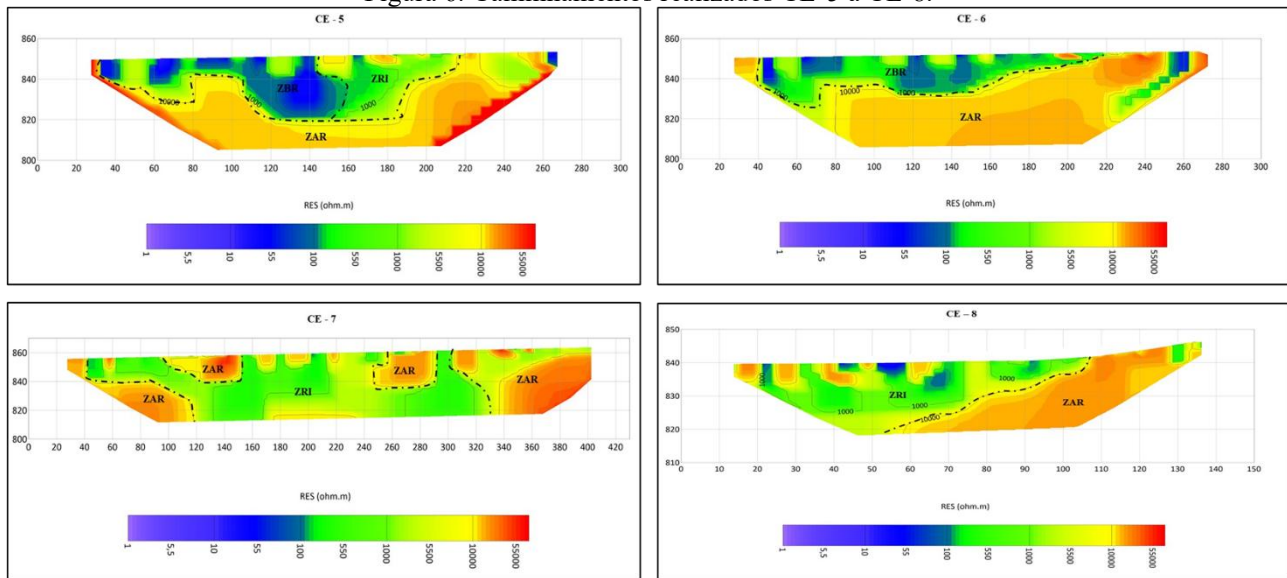
Fonte: Autoria própria

Nos perfis CE-5 a CE-8, observa-se uma continuidade das características geolétricas previamente descritas, com predomínio de zonas de resistividade intermediária e baixa nos níveis mais superficiais, interpretadas como materiais inconsolidados e mais alterados. Em profundidade, destacam-se setores com resistividade elevada, associados ao embasamento rochoso. A distribuição dessas feições sugere variações locais na espessura da cobertura sedimentar e no grau de alteração do substrato.

A presença de domínios com resistividade reduzida, especialmente em setores mais próximos às bermas do barramento, indica materiais com maior capacidade de retenção de água e possível saturação. Tais condições são compatíveis com a natureza argilo-arenosa dos rejeitos depositados na área, que favorecem a infiltração e o armazenamento hídrico. A continuidade dessas zonas ao longo dos perfis CE-5 a CE-8 pode estar relacionada a processos de deposição e redistribuição de sedimentos finos ao longo do tempo.

Em termos de interpretação integrada, esse conjunto de perfis sugere um sistema hidrogeológico relativamente ativo, no qual a água subterrânea pode se concentrar nas porções mais alteradas e fraturadas. A identificação dessas áreas é relevante, pois podem representar regiões de maior permeabilidade relativa e, conseqüentemente, potenciais rotas de fluxo subsuperficial associadas à dinâmica hídrica local.

Figura 6. Caminhamentos realizados CE-5 à CE-8.



Fonte: Autoria própria

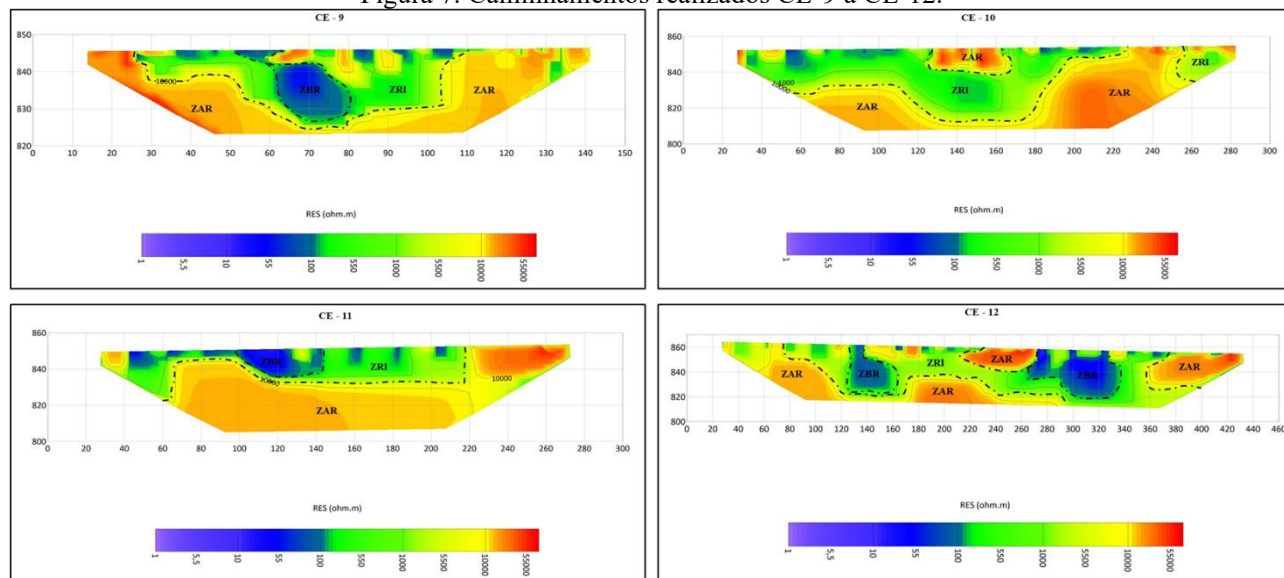
Os resultados dos perfis CE-9 a CE-12 evidenciam um comportamento geoeletrico mais variado, com maior alternância entre zonas de alta e baixa resistividade ao longo das seções. Esse padrão indica uma heterogeneidade significativa do meio, com possíveis variações na litologia, no grau de alteração e na presença de fraturas. Em determinados trechos, as zonas de baixa resistividade sugerem materiais mais saturados, enquanto as de alta resistividade indicam rocha mais compacta e menos alterada.

A alternância lateral dessas feições pode estar associada à presença de discontinuidades estruturais, como fraturas e zonas de cisalhamento, que influenciam diretamente a circulação de água subterrânea. A presença de setores com resistividade intermediária entre domínios contrastantes pode indicar zonas de transição, possivelmente relacionadas ao aumento da porosidade ou à presença de material coluvionar e residual.

A análise conjunta desses quatro perfis sugere que essa porção da área apresenta maior complexidade estrutural, com indícios de heterogeneidade litológica e geomorfológica. Essas características podem favorecer a formação de caminhos preferenciais para o fluxo de água,

especialmente em zonas onde o maciço rochoso se encontra mais fraturado ou recoberto por espessas camadas de material inconsolidado.

Figura 7. Caminhamentos realizados CE-9 à CE-12.



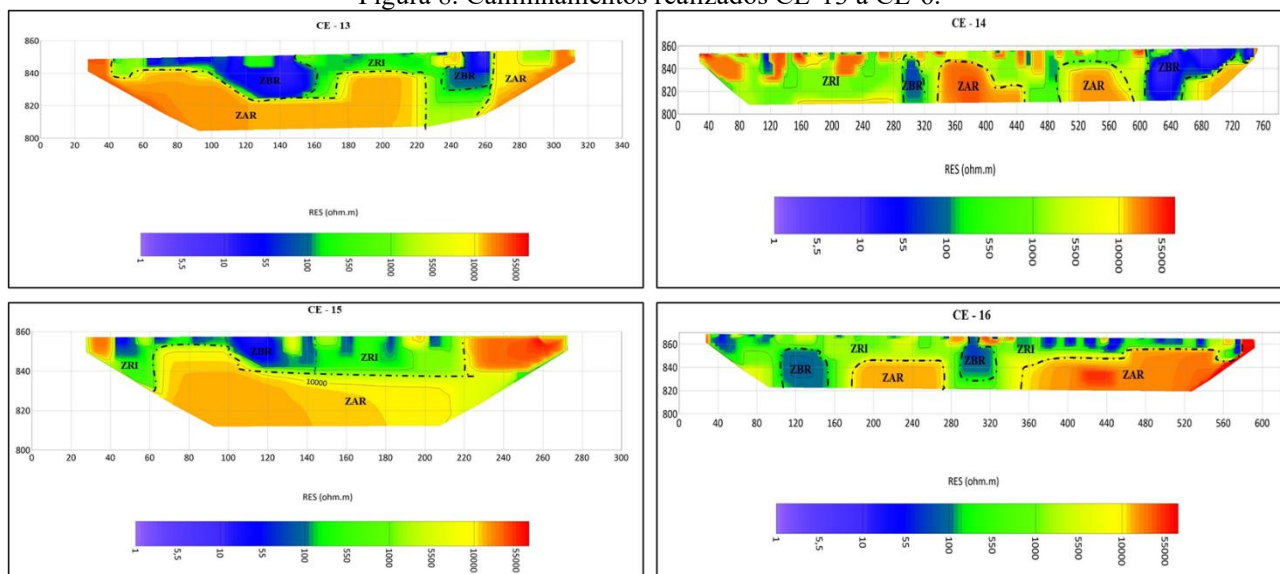
Fonte: Autoria própria

Os perfis CE-13 a CE-16 representam a etapa final do levantamento e consolidam o entendimento do comportamento geoeletrico da área como um todo. Nestes caminhamentos, as zonas de alta resistividade se mantêm associadas ao embasamento ortognáissico, enquanto os domínios de resistividade mais baixa correspondem a materiais alterados e potencialmente saturados, indicando a presença de cobertura sedimentar e rejeitos.

A distribuição espacial dessas feições sugere uma tendência de variação lateral na espessura da camada superficial, com setores onde a cobertura inconsolidada é mais espessa e outros onde o topo rochoso se encontra mais próximo da superfície. Em algumas seções, a ocorrência de zonas intermediárias pode estar associada a áreas de fraturamento ou alteração mais intensa do maciço, com possível influência no comportamento hidrogeológico local.

De forma integrada, os perfis CE-13 a CE-16 reforçam a interpretação de que o sistema apresenta significativa heterogeneidade geoeletrica, com a presença de compartimentos distintos controlados por fatores litológicos e estruturais. As zonas de menor resistividade, distribuídas ao longo desses perfis, podem representar áreas com maior umidade e maior potencial de circulação de fluidos, sendo particularmente relevantes em estudos voltados ao monitoramento geotécnico e hidrogeológico da área.

Figura 8. Caminhamentos realizados CE-13 à CE-6.



Fonte: Autoria própria

4 CONCLUSÃO

A interpretação integrada dos dados de eletrorresistividade e potencial espontâneo permitiu caracterizar de forma consistente as condições geolétricas e hidrogeológicas da área estudada. Os resultados indicam a presença de uma cobertura superficial predominantemente argilo-arenosa, com espessura variável, sobreposta ao embasamento ortognáissico, identificado por zonas de alta resistividade em profundidade. As zonas de resistividade intermediária refletem materiais inconsolidados e rejeitos, enquanto as regiões de baixa resistividade sugerem maior teor de umidade e possíveis áreas de saturação.

As variações laterais observadas ao longo dos perfis indicam um meio heterogêneo, influenciado pelo grau de alteração do maciço, pela espessura da cobertura e pela presença de descontinuidades estruturais, que podem atuar como caminhos preferenciais para o fluxo subterrâneo. As anomalias identificadas pelo método de potencial espontâneo reforçam essa interpretação, evidenciando setores com maior dinâmica hídrica em subsuperfície.

De modo geral, o estudo demonstrou a eficiência dos métodos geofísicos na identificação de contrastes litológicos, delimitação do topo rochoso e reconhecimento de zonas potencialmente saturadas. Os resultados obtidos constituem um importante suporte técnico para a avaliação geotécnica e o monitoramento da área, recomendando-se a continuidade das investigações por meio da integração com métodos diretos, a fim de refinar o modelo interpretativo e ampliar a segurança da estrutura.

REFERÊNCIAS

- ÁVILA, Cássio Ricardo de; LANA, Milene Sabino. Comportamento geotécnico e classificação geomecânica de maciços rochosos em taludes na região de Belo Horizonte. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. 2014.
- BECEGATO, Valter Antonio; FERREIRA, Francisco José Fonseca, STEVANATO, Rodoilton; CASTRO, Luís Gustavo de; CUNHA, Jefferson Ulisses da; BECEGATO, Vitor Rodolfo. Tomografia elétrica 2D e gravimetria para detecção de sítio contaminado por derivados de petróleo em área de passivo ambiental. *Eng Sanit Ambient* | v.21 n.4 | out/dez 2016. 643-654.
- BORGES, Welintom Rodrigues. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado IAG/USP. 2007. 271 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Geofísica Aplicada, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BRAGA, José Luiz. Midiatização como processo interacional de referência. In: MÉDOLA, Ana Sílvia; ARAUJO, Denize Correa; BRUNO, Fernanda (Org.). *Imagem, visibilidade e cultura midiática: livro da XV Compós*. Porto Alegre: Sulina, 2007.
- CIRONE, Alessandro. Theory and implementation of constitutive models for geomaterials. 2020. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. 215 f. Tese - Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- JUNIOR, Walter dos Reis. Caracterização das unidades geotécnicas da porção leste da região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Dissertação. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.
- LUIZ, José; SILVA, Lúcia María da e. Geofísica de Prospecção. Belém: UFPA/CEJUP, 1995.311p.
- NETO, Domingos José de Paula. Influência da estrutura no comportamento hidromecânico de um solo tropical residual de gnaiss do complexo Belo Horizonte. Dissertação. Mestrado em Geotecnia e Transportes. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2019.
- REYNOLDS, John M. An introduction to applied and environmental geophysics. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- SILVA, H.M. Sistemas de Informações Geográficas do Aquífero Cártico da microrregião de Irecê, Bahia: subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos dos rios Verde e Jacaré. 2005.142p. Dissertação. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 2005.
- TELFORD, William M.; GELDART, Louis P.; SHERIFF, Robert E. Applied geophysics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- XAVIER, Fernando da Fontoura. Aplicação da sondagem geofísica – método elelorresistividade – na locação de poços tubulares profundos. Águas Subterrâneas, São Paulo, 2004.

ZHANG, Shuai; ZHANG, Yanhe; HUANG, Guangjun; ZHANG, Xiaoping; WANG, Junbo; LI, Zhongwu. Linkage between Granite Weathering and Gully Erosion in Subtropical Region. *Water*, v. 16, n. 5, p. 751, 2024.

MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA O ESTUDO DE DOLINAS EM AMBIENTE CÁRSTICO NO NORTE DE MINAS GERAIS



10.56238/livrosindi202660-005

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Claydson Ferreira Faria

Geólogo (2005) pela UFMG
Mestre (2011) em Geologia Aplicada pela UFMG
E-mail: claydsonf@gmail.com
ID Lattes: 4006810103238307

Thatiane Lais Santos Silva

Engenheira de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Engenheira de Saúde e Segurança do Trabalho (2019) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
E-mail: thatilss.ls@gmail.com
ID Lattes: 2816971391143485

Danillo Gustavo Silva Azevedo

Geógrafo (2012) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
E-mail: danillosazevedo99@gmail.com
ID Lattes: 9431176143066681

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ
Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8848937012868572

RESUMO

As dolinas representam feições geomorfológicas típicas de ambientes cársticos, desempenhando papel relevante na dinâmica hidrológica e na sensibilidade ambiental dessas áreas. Este estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um método de avaliação multicritério para a caracterização de dolinas no norte de Minas Gerais, utilizando como base a adaptação da matriz de interação associada à análise de intensidade e grau de importância dos impactos ambientais. Foram realizadas atividades de campo em 29 dolinas previamente identificadas, incluindo caminhamentos, registro fotográfico e aerofotogrametria por drone para obtenção de ortomosaicos e modelos digitais de elevação. A partir dos dados coletados, foram avaliados atributos como tipo de impacto, área de abrangência, duração, reversibilidade, magnitude e prazo de manifestação, permitindo a valoração quantitativa e a hierarquização das feições analisadas. Observou-se que dolinas de menores dimensões apresentam papel relevante na infiltração hídrica, enquanto feições mais profundas e amplas apresentam maior sensibilidade ambiental e potencial de concentração de fluxos e processos erosivos. A aplicação do método demonstrou-se eficiente na sistematização das informações e na identificação de áreas mais suscetíveis a impactos, evidenciando sua utilidade como ferramenta de suporte à avaliação ambiental, ao planejamento territorial e à gestão de ambientes cársticos.

Palavras-chave: Dolina; Carste; Avaliação multicritério; Matriz de interação; Impactos ambientais.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Ferreira e Uagoda (2020), o carste é caracterizado essencialmente pelos processos dissolutivos na interação da água com rochas propícias a esse processo, sobretudo os carbonatos. A dissolução ocorre predominantemente em subsuperfície, notadamente relacionada à espeleogênese epigênica e hipogênica (Klimchouk, 2015). O intemperismo químico é o processo dominante se comparado ao transporte mecânico, resultando num conjunto único de paisagens (Jones; White, 2012) e pode ou não resultar em formas superficiais como dolinas, lapíás, torres, vales cegos, entre outras feições notáveis e particulares.

As dolinas têm formatos e tamanhos muito variados e podem ocorrer de forma disseminada na paisagem, o que torna a sua detecção muitas vezes um desafio, especialmente feições suaves, pequenas ou sob a densa vegetação (Ferreira; Uagoda, 2020). A partir da identificação e delimitação destas depressões é possível realizar uma série de análises morfológicas e de distribuição que podem subsidiar discussões a respeito da evolução da paisagem, principais condicionadores (climáticos, estruturais, litológicos, entre outros) e relacionar a aspectos ambientais, sobretudo hidrológicos ou de risco. Esse tipo de análise

quantitativa retira o fator subjetividade nas análises comparativas entre regiões cársticas (Ferrari, Hiruma, Karmann, 1998).

Nas últimas décadas, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) tem sido aplicada em todo o mundo como uma ferramenta de gestão ambiental, mostrando-se eficaz na prevenção da degradação do meio ambiente e no aumento da qualidade de vida humana proporcionando um conjunto de informações essenciais para o processo de tomada de decisão a respeito da viabilidade ambiental dos projetos (SADLER, 1996; JAY et al., 2007). Conforme a Constituição Federal (1988), a avaliação de impacto ambiental é um dos instrumentos mais importantes para a proteção dos recursos ambientais.

O método de matrizes de interação possibilita avaliar simultaneamente a magnitude e a importância das interações, favorecendo a compreensão dos mecanismos geradores dos impactos e subsidiando a proposição de medidas de controle ambiental direcionadas às causas potenciais e às respectivas formas de deterioração (Leopold et al., 1971; Munn, 1979; Bisset, 1982). Além disso, a estrutura matricial contribui para a organização e hierarquização das informações, reduzindo a subjetividade da análise e ampliando a capacidade de planejamento ambiental (Mota, 1997; Stamm, 2003).

Métodos espontâneos ou “Ad Hoc” utilizam o conhecimento empírico dos profissionais envolvidos em atividades de levantamento de dados, ou seja, são descritos os impactos ambientais positivos e negativos do empreendimento baseado nas experiências dos técnicos (Fedra, Winkelbauer, Pantulu, 1991; Lohani et al., 1997). Consiste na formação de grupos de trabalho multidisciplinares com profissionais qualificados em diferentes áreas de atuação, apresentando suas impressões baseadas na experiência para elaboração de um relatório que irá relacionar o projeto a ser implantado com seus possíveis impactos causados (Stamm, 2003).

Desta forma, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um método multicritério para avaliação de dolinas em ambientes cársticos, levando como exemplo o norte de Minas Gerais.

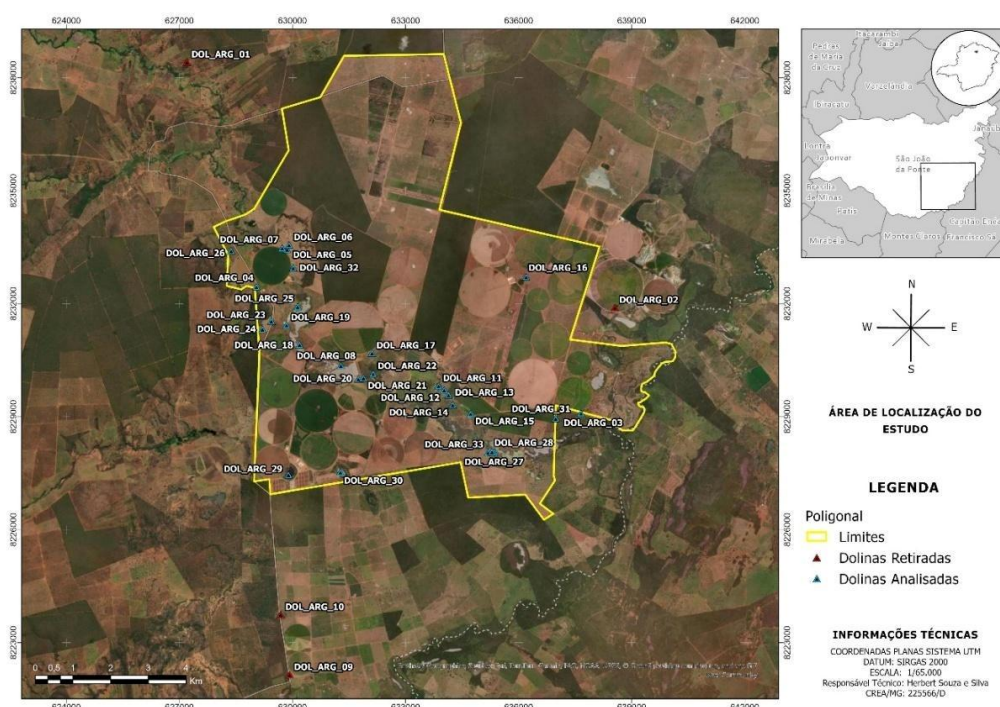
2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada com o objetivo de sistematizar a caracterização e a análise comparativa das dolinas por meio de uma abordagem integrada, combinando levantamento de campo, registro aerofotogramétrico e aplicação de método multicritério.

2.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada entre os dias 13 e 16 de julho de 2021, na área de estudo (Figura 1) que fica no município de São João da Ponte no Norte de Minas Gerais. Foram realizados caminhamentos em cada uma das 29 dolinas selecionadas e do seu entorno, com o intuito de permitir a caracterização física, a observação do uso e ocupação do solo no local e a avaliação dos impactos ambientais existentes. As dolinas DOL_ARG_01, DOL_ARG_02, DOL_ARG_09 e DOL_ARG_10, apesar de identificadas, foram retiradas do estudo por estarem fora da área delimitada.

Figura 1. Área de estudo.



Legenda: Em azul as dolinas selecionadas para o estudo e em vermelho as dolinas identificadas, mas não utilizadas para o estudo.

O caminhamento foi realizado por dois engenheiros de minas com dupla formação, sendo um dos profissionais também biólogo e o outro geógrafo. Para melhor entendimento da condição atual de cada uma das dolinas, uma vez que, as imagens de satélite por muitas vezes se encontram desatualizadas, optou-se por realizar a aerofotogrametria com drone para a realização de imagens aéreas. Todos os voos foram realizados com um drone da Marca DJI, modelo Phantom 3, com voos autônomos, resultando em um processamento mais adequado.

Além da aerofotogrametria com drone, fotos de cada uma das dolinas visitadas foram tiradas em campo, com o intuito de exemplificar da melhor maneira possível as características morfométricas, bem como as condições ambientais e de uso e ocupação do solo.

2.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS E ORTOMOSAICOS

O processamento das imagens e geração dos mapas se deu através do uso de diferentes *softwares* que se complementam. O *Google Earth Pro*[®] foi utilizado principalmente para acessar as informações de forma rápida. O *software GPS TrackMaker*[®] versão 13.9, por sua vez, foi utilizado principalmente para conversão de arquivos entre os formatos .kml, .gtm e .gpx, bem como para a edição de tais arquivos. O *software Global Mapper*[®], na sua versão 21.0, foi utilizado para a compilação das imagens fornecidas na etapa de aerolevantamento, gerando os arquivos ortomosaicos.

Através da compilação e processamento das imagens aerolevantadas, foram gerados dois outros produtos, sendo um deles os arquivos denominados *Mesh* ou 3D e o segundo produto gerado, a nuvem de pontos, serviu de base para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) de cada uma das dolinas.

O *ArcGIS Pro*[®] versão 2.8, foi o principal *software* de elaboração de mapas utilizado. O *ArcGIS Pro*[®] foi utilizado desde as etapas de preparação, anterior à incursão de campo, na geração de MDE e plotagem de dados referentes à área de estudo e às dolinas mapeadas.

2.3 MATRIZ DE INTERAÇÕES

Para este estudo, o método Ad Hoc foi utilizado preliminarmente, juntamente com os levantamentos bibliográficos e de dados secundários, de forma a nortear a decisão das demais metodologias a serem aplicadas e subsidiar o trabalho de campo. Além disso, foi utilizado durante a discussão dos resultados, corroborando para a elaboração da conclusão do estudo.

A partir dos levantamentos feitos nos estudos explicitados anteriormente, da avaliação das ações do empreendimento e do diagnóstico ambiental das dolinas e do seu entorno, estabeleceu-se uma metodologia própria para identificação e classificação dos impactos, utilizando como instrumento básico a matriz de interação. Essa metodologia de avaliação de Impactos ambientais se baseia na Matriz de Leopold (Leopold et al., 1971), com as adaptações pertinentes, visto as particularidades do local de estudo.

Essa matriz de interação funciona como uma listagem de controle bidimensional, dispondo ao longo de seus eixos, vertical e horizontal, respectivamente, as ações do empreendimento, geralmente organizadas por fase de ocorrência, e os fatores ambientais passíveis de alteração. A identificação dos impactos ocorre nas interseções entre linhas e colunas, nas quais são assinaladas as relações de causa e efeito entre cada ação e os componentes ambientais por ela modificados, permitindo a visualização sistemática das interações e a posterior valoração quanto à magnitude e à importância (Tommasi, 1993; Ribeiro, 1999).

Cada uma das interações foi avaliada considerando-se os impactos resultantes quanto ao seu tipo, categoria, área de abrangência (extensão), duração (temporalidade), reversibilidade, magnitude e prazo. Os diversos fatores ambientais presentes nessa matriz são definidos e estabelecidos em função do diagnóstico ambiental realizado. Para a interpretação, classificação e valoração dos impactos ambientais, desenvolveu-se uma análise criteriosa que permitiu estabelecer previamente um prognóstico sobre eles, adotando-se os seguintes critérios para cada atributo:

2.3.1 Tipo do impacto

Este atributo para classificação do impacto considera a consequência do impacto ou de seus efeitos em relação ao empreendimento, podendo ser classificado como direto ou indireto (Quadro 1).

Quadro 1. Tipo do impacto.

DIRETO	Quando os efeitos do aspecto gerador (atividade ou ação) sobre o fator ambiental decorrem de uma relação direta de causa e efeito.
INDIRETO	Quando os efeitos sobre um fator ambiental decorrem de um impacto direto, como resultado de uma reação secundária.

2.3.2 Categoria do impacto

O atributo categoria do impacto considera a sua classificação em negativo (adverso) ou positivo (benéfico) (Quadro 2).

Quadro 2. Categoria do impacto.

NEGATIVO	Alteração de caráter adverso, quando resulta em dano ou perda ambiental.
POSITIVO	Alteração de caráter benéfico, quando resulta em melhoria da qualidade ambiental.

2.3.3 Área da abrangência

A definição criteriosa e bem delimitada das áreas de influência de um determinado empreendimento permite a classificação da abrangência de um impacto em local, regional ou estratégico, conforme estabelecido no Quadro 3.

Quadro 3. Área da abrangência.

LOCAL	Quando o impacto, ou seus efeitos, ocorrem ou se manifestam na área diretamente afetada pela dolina (ADA) ou na área de influência direta (AID) definida para a dolina.
REGIONAL	Quando o impacto, ou seus efeitos, ocorrem ou se manifestam na área de influência indireta (AII) definida para a dolina em questão.

ESTRATÉGICO	Quando o impacto, ou seus efeitos, se manifestam em áreas que extrapolam as Áreas de Influência definidas para o empreendimento, sem, contudo, se apresentar como condicionante para ampliar tais áreas
-------------	---

2.3.4 Duração ou temporalidade

Este atributo de classificação/valoração de um impacto corresponde ao tempo de duração do impacto na área em que se manifesta, variando como temporário ou permanente. Adotam-se os seguintes critérios para classificação em temporário ou permanente (Quadro 4).

Quadro 4. Duração ou temporalidade.

TEMPORÁRIO	Quando a manifestação ocorre apenas durante a atuação do fato gerador. São impactos que cessam quando a acaba a ação que os causou.
PERMANENTE	Quando a manifestação se estende durante a vida útil do empreendimento, e em alguns casos para além da vida útil. São impactos que permanecem quando acaba a ação que os causou.

2.3.5 Reversibilidade

A classificação de um impacto segundo este atributo considera as possibilidades de ele ser reversível ou irreversível, para o que são utilizados os seguintes critérios indicados no Quadro 5.

Quadro 5. Reversibilidade.

REVERSÍVEL	Quando é possível reverter a tendência do impacto ou os efeitos decorrentes das atividades do empreendimento, levando-se em conta a aplicação de medidas para sua reparação (no caso de impacto negativo) ou com a suspensão da atividade geradora do impacto.
IRREVERSÍVEL	Quando mesmo com a suspensão da atividade geradora do impacto não é possível reverter a sua tendência.

2.3.6 Prazo para a manifestação de um impacto

Este atributo de um impacto considera o tempo para que ele, ou seus efeitos, se manifestem independentemente de sua área de abrangência, podendo ser classificado como imediato, médio prazo ou longo prazo, procurando atribuir um aspecto quantitativo de tempo para este atributo, de forma a permitir uma classificação geral segundo um único critério de tempo, como pode ser visto no Quadro 6.

Quadro 6. Prazo para a manifestação de um impacto.

IMEDIATO	Ocorre imediatamente ao início das ações que lhe deram origem.
MÉDIO	Ocorre após um período médio contado do início das ações que o causaram.
LONGO	ocorre após um longo período contado do início das ações que o causaram.

2.3.7 Magnitude

Este atributo, na metodologia utilizada, considera a grandeza de um impacto em termos absolutos, podendo ser definido como a medida de alteração de um atributo ambiental, em termos quantitativos ou qualitativos, adotando-se uma escala nominal de fraco, médio, forte ou variável. De forma a auxiliar na classificação, foram elaboradas definições para os critérios envolvendo a magnitude dos impactos (Quadro 7).

Quadro 7. Magnitude.

MAGNITUDE FRACA	É atribuída quando as alterações ambientais ocasionadas pelo impacto são mínimas ou irrisórias.
MAGNITUDE MÉDIA	Atribuído quando o impacto causa alterações, porém não são de alta grandeza. E muito significativas. É a classificação intermediária.
MAGNITUDE FORTE	Atribuído quando as alterações provocadas pelo impacto são significativas e intensas

2.3.8 Valoração de impactos

Uma vez procedida a classificação de todos os impactos ambientais identificados para a área de estudo em relação aos atributos anteriormente, foi adotada uma metodologia de valoração, objetivando a quantificação de cada um dos impactos em valores unitários, permitindo a sua comparação direta e a hierarquização.

O Quadro 8 apresenta os valores de cada atributo e suas qualificações na metodologia adotada, sendo posteriormente abordado o procedimento para a obtenção da valoração percentual de cada impacto.

Quadro 8. Valoração de impactos.

TIPO DE IMPACTO		MAGNITUDE		REVERSIBILIDADE	
INDIRETO	1	FRACA	1	REVERSÍVEL	1
DIRETO	2	MÉDIA OU VARIÁVEL	3	IRREVERSÍVEL	2
		FORTE	5		
PRAZO		DURAÇÃO/TEMPORALIDADE		ÁREA DE ABRANGÊNCIA	
MEDIATO (Médio ou Longo Prazo)	1				
IMEDIATO (Curto Prazo)	2	TEMPORÁRIO	1	LOCAL	1
		PERMANENTE	3	REGIONAL OU ESTRATÉGICA	2
INTENSIDADE					

A intensidade de um determinado impacto é o valor que expressa a sua manifestação sobre o ambiente. Para sua definição, levam-se em consideração os atributos do impacto

ambiental, avaliados através da percepção e experiência dos técnicos da equipe multidisciplinar envolvida no estudo.

Desse modo, a metodologia considera a análise objetiva de cinco atributos: tipo de impacto (direto ou indireto); área de abrangência (local, regional ou estratégico; prazo (impacto imediato – curto prazo, ou mediato – médio ou longo prazo); duração/temporalidade (impacto temporário ou permanente); reversibilidade (impacto irreversível ou reversível); magnitude (Frac, Média ou Variável e Forte).

Para valoração, a metodologia adota uma caracterização que toma por base os atributos que o compõem, aos quais são conferidos valores de 1 a 2, de acordo com seus aspectos mais relevantes, sendo que no caso dos impactos permanentes e com magnitude média optou-se por atribuir o valor 3, e quando de forte magnitude houve a atribuição de pontuação 5.

Sendo assim, esse agrupamento, considerando a soma dos valores dos seus atributos, poderá assumir valores entre 7 (menor valor) e 18 (maior valor) para cada impacto analisado.

A intensidade dos impactos ambientais é obtida pelo somatório dos pesos atribuídos, que a depender do resultado encontrado, se enquadrarão nas classes de intensidade fraca média ou forte, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9. Intensidade do impacto.

1 – 6	INTENSIDADE FRACA
7 - 13	INTENSIDADE MÉDIA
14 - 16	INTENSIDADE FORTE

2.3.9 Grau de importância do impacto

A intensidade e importância constituem os pontos principais dos impactos ambientais, uma vez que informam sobre a sua significância. O Grau de Importância dos impactos ambientais será avaliado a partir da relação entre sua intensidade e a sensibilidade do ecossistema ou do meio social afetado.

A importância é a ponderação do grau de intensidade de um impacto em relação ao fator ambiental afetado e a outros impactos. Pode ocorrer que certo impacto, embora de intensidade elevada, não seja importante quando comparado com outros, no contexto de uma dada avaliação de impacto ambiental (Moreira, 1985). A sensibilidade da área onde se manifesta um determinado impacto será determinada a partir das informações constantes no Diagnóstico Ambiental da área de influência desse empreendimento. Adicionalmente, quando não retratada de forma objetiva nestes itens, o profissional responsável pelo tema identifica o grau de sensibilidade da área em questão. Estes atributos, intensidade e sensibilidade, representam a base

da avaliação do Grau de Importância do impacto em análise, conforme representado na Quadro 10.

Quadro 10. Grau de importância do impacto.

SENSIBILIDADE	INTENSIDADE		
	FORTE	MÉDIA	FRACA
ALTA	Grande	Grande	Médio
MÉDIA	Grande	Médio	Pequeno
BAIXA	Médio	Pequeno	Pequeno

Dessa forma, a partir das inter-relações possíveis de ocorrer, conforme as classificações de intensidade e sensibilidade, procede-se à classificação do Grau de Importância de cada impacto identificado. Assim, um impacto de forte intensidade incidindo sobre um fator ambiental de alta ou média sensibilidade apresenta Grau de Importância grande. O cruzamento entre forte intensidade e baixa sensibilidade, ou vice-versa, indica Grau de Importância médio para o impacto. Por fim, impactos de fraca intensidade incidindo sobre fatores de baixa ou média sensibilidade são considerados como Grau de Importância pequeno.

Além disso, deve-se esclarecer que, para fins da valoração do impacto e obtenção da intensidade, considerou-se sempre a pior valoração possível para cada impacto, ou seja, impactos que podem, por exemplo, se manifestar direta ou indiretamente foram considerados como diretos para efeito de cálculo da intensidade. O mesmo critério foi adotado na descrição dos impactos, quando, independentemente da existência de diferentes classificações do impacto de acordo com o aspecto ambiental relacionado, para apresentação da intensidade e, portanto, do grau de importância, assumiu-se sempre a pior valoração do impacto.

2.3.10 Classificação e descrição dos itens das matrizes

Para o estudo em questão, as áreas alvo a serem abordadas são as dolinas e seu entorno e por isso, os eixos bidimensionais da Matriz de interação contemplam as atividades do empreendimento realizadas nas proximidades da área de estudo e seus respectivos aspectos e impactos ambientais encontrados durante os levantamentos anteriores. Os itens que serão avaliados na matriz de interação podem ser vistos no Quadro 11.

Quadro 11. Classificação e descrição dos itens das matrizes.

ATIVIDADES/OPERAÇÕES DO EMPREENDIMENTO	ASPECTOS AMBIENTAIS	IMPACTOS AMBIENTAIS POTENCIAIS
Operações Auxiliares (Transporte, Captação de Água,	Trânsito de veículos e	Compactação do solo

Presença de Estruturas, Aterramentos, Barramentos, Estradas, Operações Fabris, Operações Escritório e Áreas Comuns)	operação de máquinas pesadas	Propagação de particulados e favorecimento processo de assoreamento
		Geração de vibração e favorecimento processos erosivos
	Presença de Estruturas (Barramentos e aterramentos)	Alteração de uso e ocupação do solo no entorno
		Aumento dos processos de abatimento
		Fugas d'água
	Abertura de Estradas	Compactação do solo
		Aspersão de Vias e Manutenção de estradas
		Favorecimento de processos erosivos
	Captação em recurso hídrico subterrâneo	Rebaixamento do lençol freático
		Alteração da paisagem
		Favorecimento do processo de dolinamento
	Geração de efluentes líquidos	Contaminação do solo
		Contaminação lençol freático
	Geração de resíduos sólidos	Contaminação do solo
		Contaminação lençol freático
Pecuária Intensiva	Geração de efluentes líquidos	Contaminação do solo
		Contaminação lençol freático
	Geração de Resíduos Sólidos	Contaminação do solo
		Contaminação lençol freático
	Pisoteamento animal	Compactação do solo Carreamento de material e favorecimento de processos erosivos
Culturas Agrossilvipastoris	Preparo do Solo	Perda de solo por erosão e favorecimento do assoreamento
		Favorecimento de processos erosivos
	Utilização de fitossanitários	Contaminação do solo
		Contaminação do lençol freático

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados a partir da separação das dolinas em quatro grupos distintos, definidos com base na afinidade entre as informações levantadas em campo e na similaridade dos atributos morfológicos e ambientais observados, além da necessidade de sistematização e melhor disposição dos dados para análise comparativa. Cada conjunto reúne feições com padrões próximos de classificação e intensidade dos parâmetros avaliados. Para cada grupo, há uma tabela específica em anexo contendo a matriz de classificação e a intensidade detalhada dos atributos analisados, servindo como base quantitativa para a interpretação apresentada.

No primeiro conjunto, que engloba as dolinas DOL_ARG_03, DOL_ARG_04, DOL_ARG_05, DOL_ARG_06, DOL_ARG_07, DOL_ARG_08, DOL_ARG_11, DOL_ARG_12, DOL_ARG_13, DOL_ARG_14, DOL_ARG_15, DOL_ARG_18, DOL_ARG_19, DOL_ARG_21, DOL_ARG_22, DOL_ARG_24, DOL_ARG_25, DOL_ARG_26, DOL_ARG_27, DOL_ARG_28, DOL_ARG_31 e DOL_ARG_33, observa-se predominância de feições com morfologia relativamente homogênea, caracterizadas por contornos bem definidos, vertentes suaves e fundos com acúmulo de material inconsolidado. Em termos gerais, essas dolinas apresentam dimensões pequenas a médias, com valores médios de diâmetro e profundidade moderados e relevo interno pouco abrupto, refletindo processos dominantes de dissolução progressiva e subsidência gradual. A presença recorrente de sedimentos finos e maior retenção de umidade no interior das depressões indica condições favoráveis à infiltração, reforçando o papel dessas feições na recarga hídrica subterrânea.

Do ponto de vista da sensibilidade ambiental e geomorfológica, este grupo apresenta grau de importância moderado, uma vez que, embora representem áreas preferenciais de infiltração e armazenamento hídrico, tendem a apresentar maior estabilidade relativa e menor suscetibilidade imediata a processos de colapso abrupto. Ainda assim, sua ampla distribuição espacial e frequência elevada tornam esse conjunto relevante para o controle da dinâmica hidrológica local e para a manutenção do equilíbrio do sistema cárstico. Os dados quantitativos médios e a intensidade dos atributos classificados para esse conjunto encontram-se detalhados na tabela em anexo correspondente a este grupo (APÊNDICE A).

O segundo conjunto, composto pelas dolinas DOL_ARG_16, DOL_ARG_17, DOL_ARG_20 e DOL_ARG_23, apresenta feições com maior profundidade relativa e encostas internas mais inclinadas em comparação ao grupo anterior. De modo geral, esse conjunto registra valores médios de profundidade superiores e maior amplitude topográfica interna, com fundos mais rebaixados e maior concentração de sedimentos finos. As dimensões médias indicam

estruturas mais bem desenvolvidas, possivelmente associadas a maior intensidade de dissolução e subsidência localizada.

Em alguns casos, observa-se aporte coluvial a partir das bordas, sugerindo dinâmica geomorfológica mais ativa. Em termos de sensibilidade, essas dolinas apresentam grau de importância elevado, uma vez que a maior profundidade e a inclinação das encostas internas indicam maior propensão à instabilidade localizada e maior eficiência na condução e concentração de fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais. Dessa forma, configuram pontos críticos para a recarga do aquífero e para possíveis processos de subsidência diferencial, demandando maior atenção em análises ambientais e de uso do solo. A síntese quantitativa dos parâmetros médios e a matriz de classificação com suas respectivas intensidades estão apresentadas na tabela em anexo referente a este grupo (APÊNDICE B).

As dolinas DOL_ARG_29 e DOL_ARG_30, reunidas no terceiro conjunto, destacam-se por apresentarem maiores dimensões médias em relação aos demais grupos, com maior amplitude lateral e profundidade mais expressiva. Essas feições exibem bordas mais marcadas e maior grau de dissecação, evidenciando atuação de processos erosivos mais intensos e transporte de material para o interior das depressões. O acúmulo significativo de sedimentos e o maior desenvolvimento pedológico no fundo sugerem evolução mais prolongada e relativa estabilização morfológica.

Sob o ponto de vista da sensibilidade e do grau de importância, essas dolinas assumem papel de destaque no sistema cárstico local, uma vez que sua maior escala geométrica favorece a concentração de escoamento superficial e a infiltração em maior volume. A dimensão e a profundidade mais elevadas indicam potencial maior de interação com o sistema subterrâneo, o que as caracteriza como feições estratégicas para a dinâmica de recarga e armazenamento hídrico. Além disso, a maior amplitude morfológica pode refletir zonas de fraqueza estrutural, elevando sua relevância em análises de susceptibilidade a processos de subsidência. Os valores médios associados às dimensões dessas dolinas e a intensidade dos parâmetros avaliados encontram-se no Apêndice C correspondente a este conjunto.

Por fim, a dolina DOL_ARG_32, analisada isoladamente no quarto grupo, apresenta características morfológicas particulares, com valores dimensionais que a diferenciam das demais feições mapeadas. A estrutura é bem delimitada, com fundo relativamente profundo e acúmulo expressivo de material fino, indicando evolução localizada e potencial papel como zona preferencial de infiltração. Mesmo considerada individualmente, seus parâmetros médios de dimensão e intensidade dos atributos analisados foram organizados em uma tabela específica em anexo, na qual se encontra a matriz de classificação detalhada dessa feição. Em termos de

sensibilidade, essa dolina pode ser considerada de média importância relativa, sobretudo por representar uma feição singular dentro do conjunto analisado. Sua configuração geomorfológica e o grau de concentração de processos indicam forte controle local, possivelmente associado a condicionantes estruturais ou litológicos específicos, o que a torna um ponto-chave para a compreensão da dinâmica cárstica e da recarga subterrânea na área de estudo (APÊNDICE D).

4 CONCLUSÃO

A aplicação do método multicritério baseado na matriz de interação mostrou-se uma ferramenta adequada para a caracterização e análise comparativa das dolinas estudadas em ambiente cárstico. A valoração dos impactos por meio da intensidade e do grau de importância possibilitou uma interpretação mais objetiva das feições, permitindo identificar padrões morfológicos e funcionais relevantes e reduzir a subjetividade nas avaliações ambientais.

A organização dos resultados em quatro grupos, definida pela afinidade entre os atributos levantados em campo, contribuiu para a sistematização dos dados e para a compreensão da dinâmica das dolinas. De modo geral, observou-se que feições menores tendem a apresentar importância relacionada à infiltração hídrica e à recarga local, enquanto dolinas mais profundas e de maior dimensão demonstram maior sensibilidade ambiental e maior capacidade de concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais.

Os resultados indicam que a metodologia adotada constitui uma ferramenta consistente para a identificação e hierarquização de dolinas quanto à sua relevância ambiental, podendo subsidiar estudos de avaliação de impactos, planejamento do uso do solo e gestão de áreas cársticas.

REFERÊNCIAS

- BISSET, Ronald. Environmental impact assessment. London: Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. 1988.
- FEDRA, Kurt; WINKELBAUER, Lothar; PANTULU, Vedurumudi R. Expert systems for environmental screening. An application in the lower Mekong basin. 1991.
- FERRARI, J. A., HIRUMA, S. T., KARMANN, I. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos - PETAR). Revista Do Instituto Geológico, 19(1/2), 9–17. 1998.
- FERREIRA, C. F., UAGODA, R. E. S. Desafios no mapeamento de dolinas e as possibilidades do uso de modelos digitais de elevação – MDE's: uma revisão metodológica. Revista Brasileira de Geomorfologia. 2020.
- JAY, Stephen; JONES, Carys; SLINN, Paul; WOOD, Christopher. Environmental impact assessment: Retrospect and prospect. Environmental impact assessment review, v. 27, n. 4, p. 287-300, 2007.
- JONES, W. K.; WHITE, W. B. Karst. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), Encyclopedia of Caves. Second Ed. New York: Elsevier. pp.430-438. 2012.
- LEOPOLD, Luna B.; CLARKE, Frank E.; HANSHAW, Bruce B.; BALSLEY, James R. A Procedure for evaluating environmental impact. Washington: U.S. Geological Survey. 1971.
- LOHANI, B., J.W. Evans, H. Ludwig, R.R. Everitt, Richard A. Carpenter, and S.L. Tu. Environmental Impact Assessment for Developing Countries in Asia. Volume 1 - Overview. 356 pg. 1997.
- KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. Acta Carsologica, 44/3, 289–313. 2015.
- MOREIRA, I. V. D. Origem e síntese dos principais métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA) In: Manual de avaliação de impactos ambientais (MAIA). Curitiba, SUREHMA/ GTZ. 1992.
- MOTA, Suetônio. Introdução à engenharia ambiental. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1997.
- MUNN, Robert E. Environmental impact assessment: principles and procedures. Chichester: John Wiley & Sons, 1979.
- RIBEIRO, Maurício Andrés. Avaliação de impacto ambiental: uma abordagem prática. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 1999.
- SADLER, Barry. Canadian Environmental Assessment Agency. Environmental Assessment in a Changing World. Evaluating Practice to Improve Performance-final Report. 1996.

STAMM, H.R. Método para avaliação de impacto ambiental (AIA) em projetos de grande porte: estudo de caso de uma usina termelétrica. 284f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis-SC. 2003.

TOMMASI, Luiz Roberto. Estudo de impacto ambiental. São Paulo: CETESB, 1993.

APÊNDICE A

[illegible]

APÊNDICE B

[illegible]

APÊNDICE C

[illegible]

APÊNDICE D

D O L I N A	A T I V I D A D E	A M B I E N T A L	A I M P L I C A C I O E S	TPO		NATUREZA	ÁREA DE ABRANGÊNCIA		REVERSIBILIDADE		PRazo DE MANIFESTAÇÃO				DURAÇÃO TEMPORALIDADE		MAGNITUDE			S O M A T O R I O	INTENSIDADE		SENSIBILIDADE		GRau DE IMPORTÂNCIA			
				D I R E T O	I M P D I R E T O		P O S I T I V A	R E G I O C A L	E S T A T I S T I C O	R E V E R S I V E L	C U R T O	M E D I O	L O N G O	P E R M A N E N T E	T E M P O R A R I O	F A C I L	M E D I A	F O R T E	R A I X A		M E D I A	A L T A	P E S Q U E R O	M E D I A	G R A N D E			
DOL_ARG_32	Operações Auxiliares (Transporte, Canteiro de Obras, Transporte de Estruturas, Acumulação, Beneficiamento, Armazenamento, Operações de Corte, Operações de Escavação e Assentamento)	Presença de estruturas e trânsito de veículos e a operação de máquinas pesadas	Ocupação do solo		1		X	1			1			1	3		1			8		X			X			X
			Proteção de estruturas e funcionamento processo de armazenamento	2			X	1				1		1	3		1			9		X			X			X
			Aspavto de vias e manutenção de estradas	2		X		1		0	0	2			3				5	13		X			X			X
			Geração de vibração e funcionamento processo mineração		1		X	1			1			1	3		1			8		X			X			X
	Cultivo Agropecuária	Preparo do solo	Perda de solo por erosão e funcionamento do armazenamento	2			X	1			1			1		1	1			7	X				X		X	
			Funcionamento de processos mineração	2			X	1			1			1		1	1			7	X				X		X	

AVALIAÇÃO GEOLÓGICO-TECNOLÓGICA E ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE UMA JAZIDA DE AREIA NA REGIÃO DE MONTES CLAROS (MG)

 10.56238/livrosindi202660-006

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Claydson Ferreira Faria

Geólogo (2005) pela UFMG
Mestre (2011) em Geologia Aplicada pela UFMG
E-mail: claydsonf@gmail.com
ID Lattes: 4006810103238307

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ
Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8848937012868572

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 4556375475161993

RESUMO

Areias são sedimentos clásticos gerados por processos de fragmentação de rocha, constituídos basicamente por partículas de quartzo, podendo conter minerais secundários. Areias são importantes em vários segmentos industriais e são extremamente importantes na construção civil. O objetivo deste estudo foi avaliar se uma ocorrência mineral (Serra Nova) próximo à cidade de Montes Claros/MG pode ser enquadrada como jazida mineral, além de analisar se a areia desta ocorrência se assemelha e pode ser utilizada como as areias comerciais (padrão lavada e de chapada) normalmente utilizadas na região. Como resultado pôde-se afirmar que a Serra Nova de fato se caracteriza como uma jazida

de areia para a exploração. A qualidade da areia da Serra Nova se assemelha à areia comumente utilizada na construção civil no preparo do reboco (areia de chapada padrão) e apesar de não apresentar uma granulometria semelhante à areia lavada, não apresentou diferenças quanto à resistência à compressão.

Palavras-chave: Areeira; Areia de Chapada; Areia Lavada; Granulometria; Cubagem.

1 INTRODUÇÃO

Areia é um material com granulometria típica entre 0,5 e 0,1 mm resultante de desagregação natural ou cominuição de rochas, mais ou menos cimentadas. Os termos, areia industrial, areia de quartzo, areia quartzosa ou mesmo areia de sílica (*silica sand*) são atribuídos geralmente a areias que apresentam alto teor de sílica, SiO_2 , na forma de quartzo (Ferreira; Daitx, 1997). Atualmente, compreende, além dos materiais naturais, a chamada areia artificial, produto da britagem de rochas, normalmente subproduto da indústria de rochas britadas (BRASIL, 2012).

A areia é extraída de leito de rios, várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos. No Brasil, 70% da areia é extraída em leito de rios. No Estado de São Paulo, a relação é diferente. 45% da areia extraída é proveniente de várzeas, 35%, de leito de rios, e o restante, de outras fontes (BRASIL, 2009). Areias são sedimentos clásticos gerados por processos de fragmentação de rocha, constituídos basicamente por partículas de quartzo, podendo conter minerais secundários. Os processos de desagregação e transporte podem ocorrer em meio aquoso ou eólico. As características físicas dos grãos, tais como as dimensões, grau de arredondamento e de esfericidade estão relacionadas com a distância de transporte e o meio no qual as partículas foram transportadas (BRASIL, 2010).

Areias são materiais extremamente importantes em vários segmentos industriais: na fabricação de vidros e na indústria de fundição (em moldes), seus principais usos; bem como na indústria cerâmica, na fabricação de refratários e de cimento; na indústria química, fabricação de ácidos e de fertilizantes; no fraturamento hidráulico para recuperação secundária de petróleo e gás; como carga e extensores em tintas e plásticos etc.; e também em aplicações não industriais como horticultura e locais de lazer (Ferreira; Daitx, 1997). Os agregados minerais, especialmente areia e brita, representam matérias-primas essenciais para a construção civil, sendo sua caracterização técnica fundamental para o controle de qualidade do concreto e argamassas (Valverde, 2001).

O termo “agregados para a construção civil” é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral bruta ou beneficiada de emprego imediato na indústria da construção civil. São basicamente a areia e a rocha britada. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma ABNT NBR 7211/2011 fixa as

características exigíveis na recepção e na produção de agregados, miúdos e grãos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas (Valverde, 2001). A ABNT ainda define escalas referentes à granulometria das areias. A norma ABNT NBR 7211/83 define a seguinte classificação granulométrica para areia de uso na construção civil (Quadro 1) (BRASIL, 2010).

Quadro 1. Classificação Granulométrica para Areia

Abertura das peneiras (mm)		% em massa retida e acumulada			
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Nº	mm	<i>muito fina</i>	<i>fina</i>	<i>média</i>	<i>grossa</i>
0	9,5	0	0	0	0
2	6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4	4,8	0 a 5(A)	0 a 10	0 a 11	0 a 12
8	2,4	0 a 5(A)	0 a 15(A)	0 a 25(A)	5(A) a 40
16	1,2	0 a 10(A)	0 a 25(A)	10(A) a 45(A)	30(A) a 70
30	0,6	0 a 20	21 a 40	45 a 65	66 a 85
50	0,3	50 a 85(A)	60(A) a 88(A)	70(A) a 92(A)	80(A) a 95
100	0,15	85(B) a 100	90(B) a 100	90(B) a 100	90(B) a 100

Fonte: BRASIL, 2009.

A produtividade das empresas desse ramo da mineração em todo o mundo é bem alta devido à facilidade de crédito para investimentos em maquinário e equipamentos em geral, contando ainda com um mercado para agregados quase sempre aquecido (BRASIL, 2009).

Todas as unidades da federação do Brasil são produtoras de areia, conforme os relatórios anuais de lavra entregues ao DNPM. Porém, medidas indiretas retiradas do consumo de um importante produto complementar, o cimento, demonstram que os números obtidos por esta fonte estatística estão muito aquém do total produzido em todas as regiões. Tendo em conta esta constatação, as estatísticas publicadas para a areia no Brasil têm sido estimadas pela relação areia/cimento e areia/asfalto (CAF) para os vários usos da areia na construção civil (BRASIL, 2012).

Estimativas apontam que a produção nacional de agregados para construção, incluindo areia, atingiu valores superiores a 400 milhões de toneladas anuais na década de 2020, evidenciando um aumento expressivo em relação aos valores registrados no início dos anos 2000. O consumo também acompanha essa tendência, sendo diretamente correlacionado ao desempenho do setor cimenteiro e ao crescimento urbano, que permanecem como os principais vetores de demanda por agregados miúdos no país (IBRAM, 2023; ANEPAC, 2022). Esse cenário reforça a relevância econômica da atividade e demonstra a intensificação do uso desse

recurso mineral ao longo dos anos, tornando necessária a ampliação de estudos voltados à quantificação de reservas e ao aproveitamento racional de novos depósitos.

O consumo de areia no Brasil apresenta forte relação com a expansão urbana e com a dinâmica da construção civil, sendo este material um dos principais insumos minerais utilizados na produção de concretos, argamassas e artefatos cimentícios. Estudos recentes indicam que a demanda nacional é elevada e contínua, acompanhando o crescimento da infraestrutura e da habitação, além de possuir significativa parcela de produção vinculada ao setor informal. Estimativas apontam que grande parte da areia utilizada no país entre 2010 e 2020 esteve associada a cadeias produtivas não plenamente regularizadas, o que evidencia a magnitude do consumo e os desafios de gestão e controle desse recurso (Oliveira et al., 2024). Além disso, a atividade de extração apresenta importância estratégica para o desenvolvimento regional, sendo a areia a substância mineral com maior número de unidades produtoras no território nacional, diretamente ligada à expansão da construção civil e à demanda por obras de infraestrutura (IBRAM, 2020). Em escala global, a areia é considerada o segundo recurso natural mais consumido pela sociedade, atrás apenas da água, com crescente pressão sobre jazidas naturais em função do avanço urbano e industrial, cenário que também se reflete no contexto brasileiro (UNEP, 2023; Leal Filho et al., 2021).

Estudos recentes destacam que a crescente demanda por agregados finos, aliada a desafios ambientais e de sustentabilidade, tem impulsionado a busca por alternativas ao uso tradicional de areia natural em concreto, incluindo materiais com desempenho técnico comparável e menor impacto ambiental (Sanusi et al., 2026; Hamada et al., 2025). Em contextos brasileiros, a caracterização tecnológica de areias naturais revela significativa variabilidade em propriedades físico-químicas e granularidade, com implicações diretas na utilização como agregados na construção civil (Santos, 2025; Koch & Sousa Júnior, 2024). Paralelamente, pesquisas de dosagem e substituição apontam caminhos promissores para a incorporação de areias de mineração e industriais em concretos de desempenho satisfatório (Barbosa & Menezes, 2024; Santos, 2024).

A mineração é uma atividade que está diretamente interligada a economia do país, visto que esta é a base para os outros setores econômicos. A mineração com isso sofre a influência diretamente proporcional ao desenvolvimento econômico do país. Diante da Legislação Brasileira abordando sobre os recursos minerais sendo bens da União, as autorizações para conceder a autorização a terceiros para minerar vem desta. Sendo necessários processos de licenciamentos da União para a pesquisa e lavra dos recursos minerais. Segundo o Decreto nº

62.934, de 2 de julho de 1968 que aprova o Regulamento do Código de Mineração no Capítulo III Art. 7, classifica a areia como Classe II.

Diante desses Licenciamentos o Código de Mineração, no Decreto Lei nº227 de 28/02/1967, determinou no artigo 7º, que a utilização das jazidas necessita de alvará de autorização de pesquisa do Diretor-Geral do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral - DNPM, já concessão de lavra, deve ser outorgada pelo Ministro de Estado de Minas e Energia. Neste mesmo Decreto-Lei já Art. 42, vem a esclarecer que a autorização será recusada caso se a lavra for considerada prejudicial ao bem público ou comprometer interesses que superem a utilidade da exploração industrial, a juízo do Governo.

Com todo o processo de Licenciamento da extração não se pode olvidar que esta atividade é passível de exploração dos recursos naturais, necessitando também de Licenças Ambientais. Segundo Fiorillo (2005), a Política Nacional de Meio Ambiente – PNMA busca o equilíbrio ecológico e a busca de minimização da degradação ambiental por esta atividade.

As jazidas mais importantes deste bem mineral estão localizadas nos Estados de São Paulo e Minas Gerais segundo Coelho (2009). Os principais locais de extração de areia são em várzeas e em leitos de rios, depósitos lacustres e mantos de decomposição de rochas. Em torno de 70% da areia no Brasil são produzidas em leitos de rios e 30% nas várzeas segundo (BRASIL, 2006). A areia inconsolidada encontrada em leitos de rios e em dunas pode ser ainda o produto resultante do retrabalho das formações areníticas ou mesmo do processo erosivo de rochas ígneas/metamórficas que possuam quartzo em sua composição original segundo Quaresma (2009).

A extração de areia no Brasil é predominantemente realizada por meio de lavra a céu aberto, utilizando métodos distintos conforme a origem do depósito, como leitos de rios, várzeas, cavas aluvionares e mantos de alteração. Em ambientes fluviais, é comum o emprego de dragas de sucção e recalque, com posterior beneficiamento por processos de lavagem e classificação granulométrica, enquanto em depósitos terrestres a lavra ocorre geralmente por escavação mecânica com pás carregadeiras e escavadeiras hidráulicas, seguida de transporte para unidades de peneiramento (IBRAM, 2023). Além disso, diretrizes técnicas enfatizam que o beneficiamento, incluindo lavagem, peneiramento e, em alguns casos, atrição, é etapa essencial para garantir a adequação granulométrica e a qualidade do material destinado à construção civil (ANEPAC, 2022; Silva et al., 2025).

Em algumas minerações no Sul do Brasil, a lavra é feita a céu aberto, em bancadas, com a extração da areia por retro-escavadeiras, seguido de transporte, por caminhões basculantes, para a usina de beneficiamento. O processamento da areia industrial é variável em complexidade,

dependendo das especificações requeridas. O processamento típico consiste em: lavagem e classificação; atrição e peneiramento (Ferreira; Daitx, 2003).

Este estudo tem como objetivo avaliar se uma ocorrência mineral próxima à cidade de Montes Claros/MG pode ser enquadrada como jazida mineral, além de analisar se a areia desta ocorrência se assemelha e pode ser utilizada como as areias comerciais normalmente utilizadas na região.

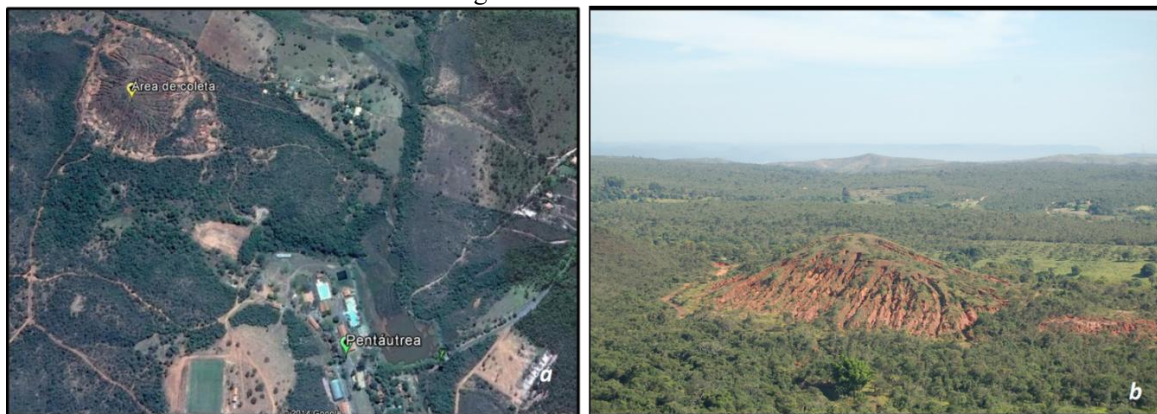
2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi estruturada para permitir a avaliação integrada da ocorrência arenosa, envolvendo atividades *in loco*, análises laboratoriais e estimativas volumétricas e econômicas. Foram realizados procedimentos de amostragem e caracterização tecnológica das areias, incluindo análise granulométrica, quantificação de matéria orgânica e ensaios de resistência à compressão. Paralelamente, efetuou-se a estimativa do volume explotável e a análise preliminar de viabilidade econômica, com base em custos e dados de mercado.

2.1 LOCAL DE ESTUDO

Este estudo foi realizado no dia 07 de setembro de 2014 na Serra Nova que fica localizada dentro da área privada do Clube Campestre Pentáurea (Figura 1a), nas proximidades da cidade de Montes Claros, norte de Minas Gerais. O Clube se encontra na Latitude $16^{\circ}54'33.22''S$ e Longitude $43^{\circ}52'58.60''O$ e a Serra na Latitude $16^{\circ}54'11.97''S$ e Longitude $43^{\circ}53'14.84''O$. A Serra Nova apresenta uma geomorfologia côncava, se enquadrando como calota esférica (Figura 1b). A areia encontrada na região é classificada como areia de chapada, uma vez que não se encontra próxima a corpos d'água.

Figura 1. Área amostral.



Legenda: (a) Área amostral em detalhe (foto de satélite), no mesmo enquadramento do Clube Campestre Pentáurea, empresa proprietária da Serra Nova. (b) Imagem aérea da Serra Nova, nota-se a concavidade da Serra.
Fonte: a. Google Earth; b. Autoria Própria.

2.2 DESENHO AMOSTRAL

Foram marcados 10 pontos que contornavam a Serra Nova (Figura 2) onde foram coletados aproximadamente 500gr de areia e acondicionados em sacos plásticos lacrados e posteriormente encaminhados ao Laboratório de Materiais das Faculdades Integradas Pitágoras, onde a areia foi homogeneizada e mensurada a sua granulometria. A quantidade de matéria orgânica, por sua vez, foi realizada no Laboratório de Análises Químicas da mesma faculdade. Além do material coletado, foram adquiridos 100kg de areia lavada e 100kg de areia de chapada (padrões) para serem usadas na confecção dos corpos de prova (devido à semelhança entre as areias de chapada comprovada nos testes de granulometria e matéria orgânica).

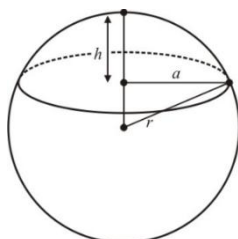
Figura 2. Localização dos pontos de coleta de onde foram retiradas as amostras de areia de chapada-pentáurea.



Fonte: Google Earth.

2.3 CUBAGEM E AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA MINERAL

A Serra Nova apresenta-se na forma de uma calota esférica (Figura 3) permitindo sua estimativa usando a fórmula abaixo para o seu cálculo:



$$V=16\pi h3a2+h2$$

h : altura máxima da serra

a : raio da base da calota

As informações como altura máxima e o raio da Serra Nova foram calculadas com o auxílio do *software Google Earth Pro*[®]. Além das informações obtidas no software, foi observado em campo, em trincheiras naturais que abaixo da cota zero da Serra, existe pelo menos mais um metro de areia não consolidada, viável para a comercialização, sendo esta metragem adicionada à altura utilizada para a estimativa da jazida.

Para o cálculo do estéril a ser desprezado do volume total da jazida, foi mensurado em cada ponto de coleta a altura do estéril no local. A média dos valores do estéril foi então multiplicada pela área superficial da calota esférica calculada no *software Google Earth Pro*[®].

Para a avaliação se a ocorrência mineral se trata realmente de uma ocorrência ou de uma jazida mineral, ou seja, passível de exploração com retorno econômico, foram levantados dados sobre o custo inicial de produção e os prováveis custos mensais para um empreendimento mineiro de pequeno porte, além do levantamento do preço atual de mercado e da absorção do agregado pelo mercado atual.

2.4 GRANULOMETRIA E CLASSIFICAÇÃO DAS AREIAS

A granulometria foi realizada para a areia da Serra Nova e para as areias padrões (chapada e lavada). Para tal processo foram utilizadas peneiras de diversas malhas respeitando a NBR 7217 e a NBR 7211. Primeiramente as peneiras foram pesadas, posteriormente anotado o seu peso vazio e em seguida foi adicionado 1Kg da areia amostrada para serem passadas pelo peneirador eletrônico. Após o término no peneirador eletrônico (3 minutos), cada malha foi novamente pesada e limpa com uma escova de cerdas macias para o próximo processo.

2.5 QUANTIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

Para quantificação da matéria orgânica presente em cada uma das areias testadas foi pesado um cadinho vazio, posteriormente o cadinho com aproximadamente 5g de cada amostra de areia em balança semianalítica. As amostras foram secas em estufa de secagem e posteriormente colocadas no forno mufla a 400°C por uma hora. Após o tempo de queima, as amostras foram levadas ao dessecador e ao resfriarem foram novamente pesadas em balança semianalítica e subtraindo-se o peso inicial pelo final, obteve-se a quantidade de matéria orgânica presente em cada amostra. Os testes foram feitos em triplicata.

2.6 CONFEÇÃO E ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram confeccionados com as areias padrão (usadas comercialmente) sendo utilizado como parâmetro NBR 12655/1996. Para o traço foi utilizado 6kg de areia, 6 kg de brita nº 1, 6 kg de cimento *portland* e 1,5 L de água, este último podendo ser acrescido de mais água caso fosse preciso.

Foram confeccionados 18 corpos de prova, sendo nove corpos de areia lavada padrão e nove de areia de chapada. Os corpos de prova após serem enformados segundo a NBR 5738/1994, e posteriormente acondicionados em uma câmara úmida onde permaneceram até o momento do teste de compressão. Os testes de compressão foram realizados 7, 14 e 28 dias após a confecção do corpo de prova para a comparação da influência da areia sobre a resistência do concreto. Tais testes seguiram a NBR 5739/1994.

Para a comparação entre os testes foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA), executada no programa estatístico gratuito Assit 7.7 Versão Beta. Foram feitas comparações entre os diferentes tratamentos (areia lavada e chapada), além da comparação entre os diferentes dias de rompimento dos corpos de prova (7, 14 e 28).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos pelo software de georreferenciamento indicou a altura total da Serra Nova em 22m e a sua largura total em 302m, ou seja, o raio da calota esférica foi de 151m. A média do estéril, por sua vez, foi de 15,1cm. Com a utilização das fórmulas especificadas anteriormente na metodologia deste estudo, o volume total da ocorrência foi de 793.521,274m³, que após ser retirado o valor estimado de estéril presente na área (14.375,2 m³), teve como volume passível de extração um total de 779.146,074m³.

Sobre o volume explotável é adicionado o fator de empolamento de 30%. Segundo Moretti (2011) o fator de empolamento é o aumento de volume do material com o qual se está trabalhando, ou seja, é o aumento do volume do estado natural dele, em seu local de origem, para o seu estado solto depois de ter sido explotado. Para a reserva estudada o volume acrescido do fator de empolamento sobre para 1.012.889,896m³.

Para a classificação da ocorrência como jazida mineral, os valores de investimento inicial foram estimados em R\$529.000,00, como o mostrado na tabela de custos abaixo (Tabela 1).

Tabela 1. Custo para investimento inicial (estimado)

Descrição	Custos
Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD)	R\$ 110.000,00

Plano de Controle Ambiental (PCA)	R\$ 15.000,00
Pá carregadeira	R\$ 120.000,00
Trator de esteiras	R\$ 90.000,00
Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)	R\$ 4.000,00
Montagem de um escritório	R\$ 10.000,00
Montagem de um galpão de máquinas	R\$ 20.000,00
Abertura de vias de acesso a mina	R\$ 10.000,00
Custos das licenças ambientais	R\$ 150.000,00
TOTAL	R\$ 529.000,00
Fonte: Próprios Autores	

O cálculo de retorno do investimento e lucro líquido definidos para a exploração da jazida levou em conta o custo mensal para manutenção dos investimentos. Para este estudo o custo mensal foi de R\$24.890,00 (Tabela 2).

Tabela 2. Custo fixo mensal (estimado)

Descrição	Custos
Salário de três funcionários	R\$ 4.000,00
Engenheiro de minas	R\$ 6.000,00
Gastos com a segurança do trabalho	R\$ 1.000,00
Contabilidade	R\$ 1.000,00
Despesas com a manutenção de equipamentos	R\$ 7.000,00
Despesas com luz, água, telefone, despesas do escritório	R\$ 300,00
Manutenção de estradas	R\$ 590,00
Valor mensal do combustível para as máquinas da empresa	R\$ 5.000,00
TOTAL	R\$ 24.890,00
Fonte: Próprios Autores	

Após os custos iniciais e custos mensais calculados, o tamanho do empreendimento foi estimado a partir de um empreendimento areeiro próximo de tamanho semelhante ao tamanho da jazida. Tal empreendimento vende em média 20 caminhões de areia diários em 24 dias trabalhados por mês. Dentre os caminhões mais utilizados na região do estudo, estão caminhões com capacidade de carga 16m³ de areia que são vendidos ao preço médio de R\$15,00 por metro cúbico.

O volume total de areia vendida segundo a estimativa deste estudo é de 7.680m³ mensais o que geraria um lucro bruto mensal de R\$115.200,00. Sobre o valor bruto mensal devem ser abatidos 11% de impostos o que deixa o lucro bruto mensal em R\$77.638,00.

Em posse destes números somados à uma estimativa de custos de implantação do empreendimento mineiro e com o valor de venda atual do metro cúbico de areia de chapada, é

possível afirmar que se trata de uma jazida mineral, que quitará o investimento do empreendedor em apenas sete meses após o a instalação do empreendimento.

Pode-se afirmar que se trata de uma jazida uma vez que no cenário simulado neste estudo a exploração se estenderá por aproximadamente 11 anos com uma expectativa de lucro líquido total de R\$10.238.899,44.

A granulometria mostrou semelhança entre as areias de chapada (padrão e pentáurea) corroborando a ideia de que a areia de chapada padrão representa a areia de chapada coletada neste estudo (Tabela 3).

Tabela 3. Granulometria entre as amostras

	ACPad	ACPent	AL
Malha	Massa(g)	Massa(g)	Massa(g)
4	2,88	100,29	2,23
8	17,02	57,24	1,74
10	3,65	14,57	0,30
16	8,93	22,81	2,11
30	30,99	36,85	18,19
40	93,53	39,57	129,32
50	389,08	181,92	704,37
100	344,49	452,87	134,09
200	99,20	78,28	5,47
Fundo	10,18	14,90	2,00
TOTAL	999,95	999,30	999,82

Legenda: Granulometria feita segundo a NBR 7217 e a NBR 7211. Legenda: ACPad: Areia de Chapada Padrão, ACPent: Areia de Chapada Pentáurea e AL: Areia Lavada. Fonte: Próprios autores.

É possível notar que a quantidade de areia que ficou retida na malha 100 foi muito semelhante entre as duas areias de chapada, além de uma distribuição semelhante entre as duas de forma geral. A única diferença entre as areias de chapada a se ressaltar é o fato da areia de chapada pentáurea apresentar uma concentração acima das outras na malha 4 (100,29g). Este fato pode indicar uma maior quantidade de matéria orgânica ou de corpos rochosos que por apresentar maior tamanho ficam retidos logo na primeira malha.

Ao se comprar as duas areias de chapada com a areia lavada é possível notar que a areia lavada é mais homogênea, pois fica retida em sua maioria (704,37g) na malha 50, enquanto as areias de chapa, mais heterogêneas apresentam quantidades diversas entre as diferentes malhas. A Tabela 4 apresenta a quantidade de matéria orgânica em cada uma das areias amostradas.

Tabela 4. Quantidade de matéria orgânica

ACPad

Amostra	Massa (g)	M.O. (g)	M.O. (%)
1	5,0079	0,0259	
2	5,0096	0,0201	
3	5,0025	0,0190	
	5,0066	0,0649	1,298269

ACPent

Amostra	Massa (g)	M.O. (g)	M.O. (%)
1	5,024	0,150	
2	5,002	0,143	
3	5,006	0,135	
	5,010	0,142	2,846667

AL

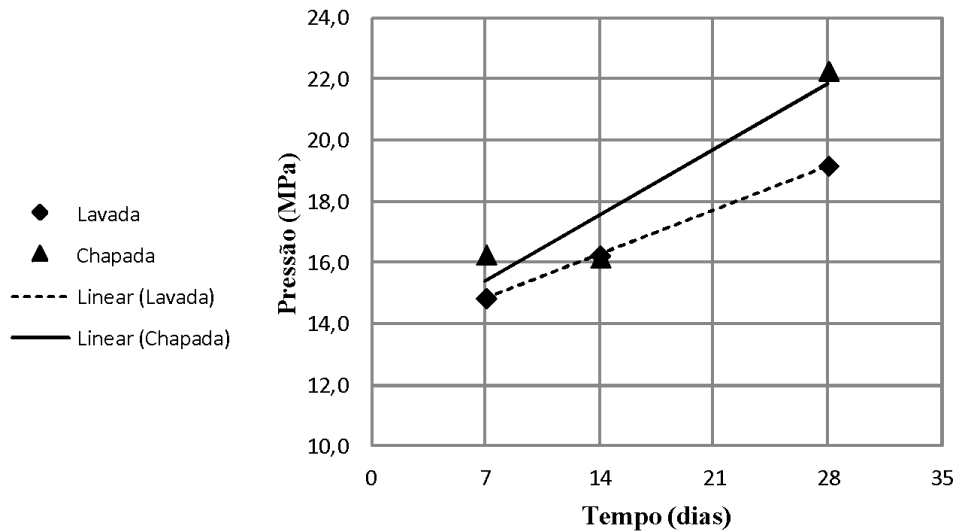
	Massa (g)	M.O. (g)	M.O. (%)
1	5,0003	0,0151	
2	5,0016	0,0256	
3	5,0090	0,0203	
	5,0036	0,0609	1,219114

Legenda: Quantidade de matéria orgânica presente nas amostras de areia Legenda: M.O: Matéria Orgânica;
 ACPad: Areia de Chapada Padrão; ACPent: Areia de Chapada Pentáurea e AL: Areia Lavada. Fonte: Próprios
 Autores.

É possível notar uma grande diferença na quantidade de matéria orgânica presente nas amostras. A areia de chapada-pentáurea apresentou o dobro de matéria orgânica apresentada pelas outras duas areias, o que pode influenciar de forma negativa a sua resistência à compressão com o passar do tempo.

Os testes de compressão indicaram que não existem diferenças estatísticas significativas entre as areias lavada e de chapada, que apresentaram rompimentos estatisticamente iguais ($p=0,2852$).

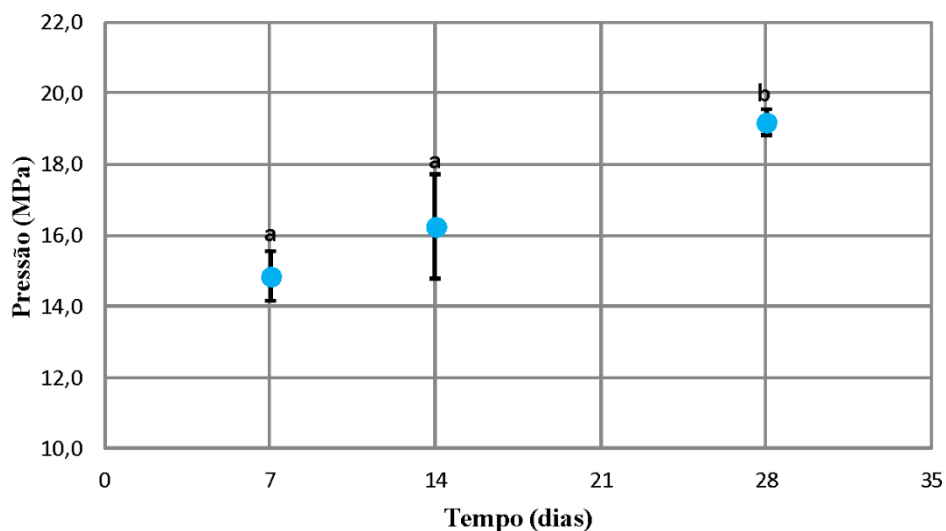
Figura 4. Comparação de resistência à compressão entre diferentes areias



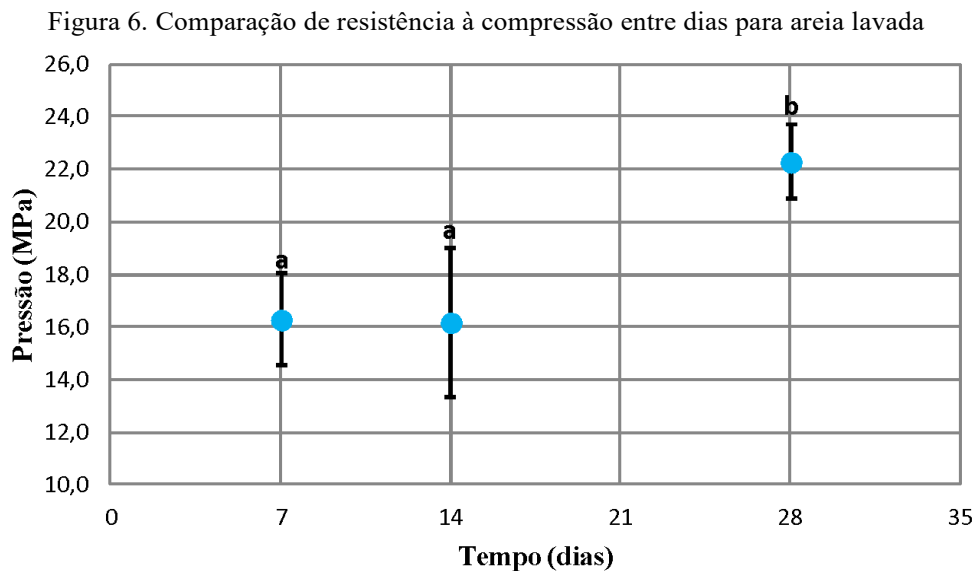
A igualdade dos resultados revela uma nova discussão. O fato de as resistências não serem significativamente distintas pode elevar a areia de chapa ao nível comercial da areia lavada, que hoje é vendida a R\$60,00 por metro cúbico, enquanto a areia lavada tem em média o preço de R\$15,00 por metro cúbico. Tal diferença de preço se dá porque a areia lavada é usada como agregado para concreto enquanto a areia de chapada é preferencialmente para reboco.

Os resultados comparativos entre os diferentes dias, para a areia lavada, foram significativos ($p=0,0489$). Na Figura 5 é possível notar que houve apesar da não significância, uma tendência de ganho de resistência à compressão com o passar dos sete primeiros dias e que foi confirmada com os rompimentos do dia 28.

Figura 5. Comparação de resistência à compressão entre dias para areia lavada



A Figura 6 apresenta os resultados obtidos com o rompimento dos corpos de prova produzidos com areia de chapada. É possível notar que não houve ganho de resistência após primeiro rompimento. No entanto, entre o dia 14 e 28, houve ganho significativo de resistência do concreto ($p=0,0493$).



4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que a ocorrência arenosa da Serra Nova apresenta características técnicas e econômicas compatíveis com sua classificação como jazida mineral passível de aproveitamento. A estimativa volumétrica indicou reserva explotável significativa, com perspectiva de retorno financeiro em curto prazo, considerando os custos de implantação e operação estimados. Do ponto de vista tecnológico, a análise granulométrica demonstrou similaridade com a areia de chapada comercial, e os ensaios de resistência à compressão não evidenciaram diferenças estatisticamente significativas em relação à areia lavada, indicando potencial de aplicação como agregado na construção civil. Embora a maior presença de matéria orgânica na amostra local requeira atenção quanto ao controle de qualidade, os resultados gerais confirmam a viabilidade técnica e econômica do empreendimento, recomendando-se, contudo, estudos complementares de caráter ambiental, geotécnico e de mercado para subsidiar uma futura implantação em escala comercial.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). NBR 12655: Concreto - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro.
- ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE
- AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. Panorama do setor de agregados para construção no Brasil. São Paulo: ANEPAC, 2022.
- BARBOSA, C.; MENEZES, M. F. L. Avaliação de concretos produzidos com variadas areias de mineração. Revista Vértices, Campos dos Goytacazes, v. 26, n. 1, 2024.
- BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Senado, 1988.
- BRASIL. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral – DNPM. Sumário Mineral 2006 — Brasília – DF.
- BRASIL. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral – Sumário Mineral Brasileiro 2012 — Brasília – DF.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. Luiz Felipe Quaresma. Perfil da Areia para a Construção Civil – Relatório Técnico 31. 2009.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. Luiz Felipe Quaresma. Areia Industrial – Relatório Técnico 44. 2010.
- CÓDIGO DE MINERAÇÃO, Decreto LEI nº227 de 28/02/1967. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227.htm. Acessado em: 17 de setembro de 2014.
- CÓDIGO DE MINERAÇÃO, DECRETO nº 62.934, de 2 de julho de 1968. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/D62934.htm. Acessado em: 17 de setembro de 2014.
- COELHO, U. M.. Ferramenta Instrucional para Mineração de Dados Usando Classificação. 2010. Dissertação (Programa de Mestrado em Ciência da Computação) – Faculdade de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2010.
- FERREIRA, G. C.; DAITX, E. C. A mineração produtora de areia industrial na região Sul do Brasil. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v.56, n.1, p.59-65, jan./mar. 2003.

FERRREIRA, G. C. e DAITX, E. C. Áreas produtoras de areia industrial no Estado de S. Paulo, Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 50 (4), out./dez. p. 54-60. 1997.

FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. Curso de Direito Ambiental Brasileiro. 6º ed. ampl. São Paulo: Saraiva, 2005, p. 60.

HAMADA, H. M.; ABED, F.; TRACY, K.; et al. Utilizing raw desert sand as a sustainable fine aggregate: impact on concrete performance and environmental benefits. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 19, 2025.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações e análises da economia mineral brasileira 2020. Brasília: IBRAM, 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações e análises da economia mineral brasileira 2023. Brasília: IBRAM, 2023.

KOCH, R. H.; SOUSA JÚNIOR, L. G. Influência da granulometria da areia natural nas propriedades do concreto e argamassas. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 16, n. 2, 2024.

LEAL FILHO, W.; et al. Sand and sustainability: global challenges and opportunities. Journal of Cleaner Production, v. 289, 2021.

MORETTI, André Luís. Desenvolvimento de diretrizes para obras de infraestrutura que envolvam movimento de terra. Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, 2011.

OLIVEIRA, A. L.; et al. Produção e consumo de agregados minerais no Brasil e sua relação com a construção civil. Revista Brasileira de Geociências, v. 54, n. 1, 2024.

QUARESMA, L. F. Perfil da mineração de bauxita. Relatório Técnico 22, Projeto ESTAL, MME/SGM – Banco Mundial. Brasília: J. Mendo Consultoria, 2009, 49.

SANTOS, C. C. Estudo da influência da areia industrial sobre as propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 13, n. 1, 2024.

SANTOS, H. M. da C. Qualidade tecnológica da areia utilizada na construção civil na região Norte do Brasil. Revista de Geociências Aplicadas, v. 14, n. 1, 2025.

SANUSI, A.; et al. Replacing river sand in concrete: a review of emerging sustainable fine aggregate materials. Discover Civil Engineering, v. 6, 2026.

SILVA, T. L.; COSTA, J. R.; MENEZES, P. A. Processamento e controle tecnológico de agregados miúdos para concreto. Revista Engenharia Civil Contemporânea, v. 12, n. 1, 2025.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. Nairobi: United Nations, 2023.

VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. Balanço Mineral Brasileiro 2001.

PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO



10.56238/livrosindi202660-007

Héllen Tatiane Dias Cordeiro

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2024) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: hellen.cordeiro@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 7469603264924402

Ângela Maria da Silva

Bacharel (2023) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: angela.maria@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 6074181789817571

Eliane Alves Souza

Bacharel (2019) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2022) em Engenharia de Minas pela UFVJM

Especialista (2025) em Lavra e Planejamento de Mina pela UFCAT

E-mail: eliane.souza@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 6771225479030874

Talívia Rodrigues Brito

Bacharel (2024) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: talivia.rodrigues@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 0713759084403203

Silvânia Pereira Monção

Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: silvania.moncao@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 7078255139114177

Joyce Gabriele Lopes Silva

Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: joyce.gabriele@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 2844356695040792

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 4556375475161993

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
Orientador deste trabalho
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma pesquisa aplicada aos equipamentos e processos de concentração magnética no beneficiamento de minério de ferro. Inicialmente, conduziu-se uma revisão bibliográfica ampla. Em seguida, foram investigados dois estudos de casos práticos em mineradoras, nos quais os separadores magnéticos foram responsáveis pela elevação da recuperação metalúrgica e mássica, além de aprimorar a qualidade dos produtos, economia de recursos e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Concentração magnética; Recuperação metalúrgica; Qualidade dos produtos; Sustentabilidade ambiental; Eficiência operacional.

1 INTRODUÇÃO

A mineração de ferro é amplamente reconhecida como uma das principais commodities minerais no cenário global, sendo a principal fonte de ferro metálico, matéria-prima indispensável para a fabricação de aço na indústria siderúrgica (Lu, 2015). As reservas globais de minério de ferro são estimadas em aproximadamente 180 bilhões de toneladas, das quais 85 bilhões de toneladas ao ferro contido. Atualmente, Austrália e Brasil destacam-se como os maiores produtores e exportadores dessa matéria-prima, seguidos pela China e pela Índia (USGS, 2023).

Os depósitos de minério de ferro, segundo Carvalho et al. (2014), podem ser classificados de acordo com seu tipo de formação (sedimentar, soluções hidrotermais, atividades vulcânicas e metamorfismo). Os depósitos de maior relevância são aqueles resultantes da sedimentação de forma acamada, pois originam as formações ferríferas bandadas – Banded Iron Formation (BIFs), que constituem as maiores reservas de ferro do mundo. As BIFs são caracterizadas por serem rochas laminadas constituídas por bandas de minerais portadores de ferro (especialmente magnetita e hematita) e sílica (quartzo).

O ferro é o quarto elemento mais encontrado e, dentre os metais, é o segundo mais abundante na crosta terrestre, correspondendo a uma porcentagem média de 5% em massa dessa composição (Takehara, 2004). Embora diversos minerais tenham o ferro como componente essencial, apenas alguns destes são considerados economicamente viáveis para exploração do ferro, dependendo das variações de teor e das distribuições desses minerais nas rochas que constituem os corpos de minério (Carvalho et al., 2014).

A Tabela 1 apresenta os principais minerais contendo ferro atualmente explorados (minerais-minério), mostrando sua classe, fórmula química e conteúdo de ferro. Esta tabela também apresenta a classe e fórmula química dos principais minerais de ganga (minerais sem aproveitamento econômico) associados.

Tabela 1. Classe e fórmula química dos principais minerais minério e minerais de ganga de depósitos de minério de ferro (Carvalho et al., 2014).

Mineral	Classe	Fórmula química	Conteúdo de ferro
Minerais minério			
Hematita	Óxido	Fe_2O_3	69,9%
Magnetita	Óxido	Fe_3O_4	72,4%
Goethita	Óxido	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9%
Limonita	Óxido	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8%
Minerais de ganga			
Quartzo	Silicato	SiO_2	-
Caulinita	Filossilicato	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	-
Gibbsita	Hidróxido	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-

Acredita-se que 90% ou mais de todas as formações de ferro que foram preservadas se encontram nos distritos da classe “muito grande” (Figura 1), os quais são: Labrador Trough e

suas extensões no Canadá; Hamersley na faixa da Austrália Ocidental; Quadrilátero Ferrífero situado em Minas Gerais, Brasil; bacias do Transvaal-Griquatown, na África do Sul; e áreas de Krivoy Rog-KMA da URSS (James e Trendall, 1982).

Figura 1. Localizações dos principais depósitos de minério de ferro no mundo (Castro e Dias, 2018)



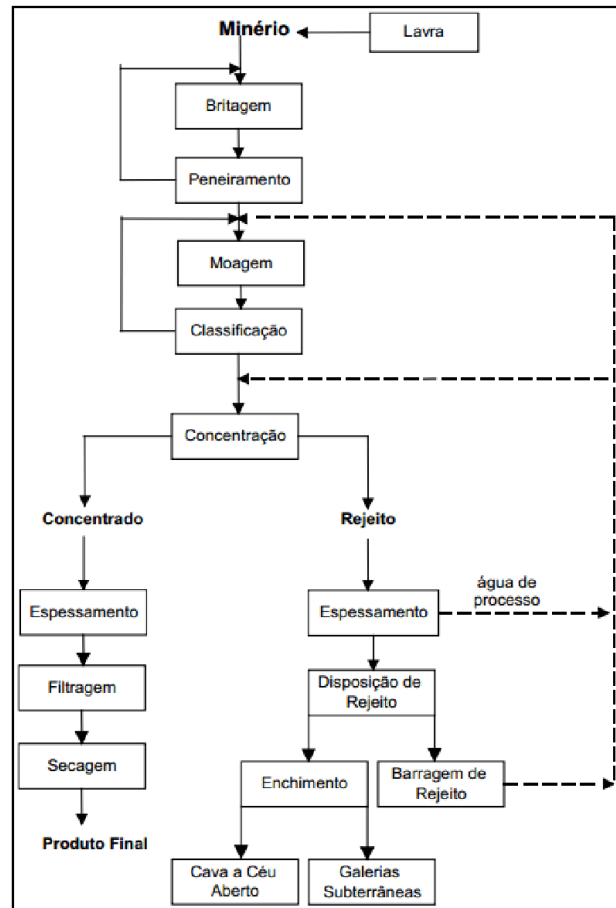
Segundo Caxito e Dias (2018), a exploração de minério de ferro corresponde à principal atividade mineral do Brasil, representando 61,7% do total de substâncias metálicas comercializadas no Brasil. Em 2021, estima-se que a produção comercializada de minério de ferro (bruto e beneficiado) rendeu mais de 250 bilhões de reais, totalizando 8,7 bilhões de reais em arrecadação de CFEM (compensação financeira por exploração mineração) para a União (ANM, 2023).

Beneficiamento mineral

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em operações, aplicada aos bens minerais, com intuito de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem modificar a identidade química ou física dos minerais (Luz e Lins, 2010).

A Figura 2 exibe um fluxograma típico de beneficiamento de minérios, o qual é aplicável também para minérios de ferro. Segundo Luz e Lins (2010), essas operações unitárias são classificadas em: cominuição, compondo-se da britagem e moagem; classificação, destacando-se peneiramento e ciclonação; concentração, que se subdivide em gravítica, magnética, eletrostática e flotação; desaguamento, consistindo em espessamento e filtração; secagem, na qual os principais equipamentos são secador rotativo, spray dryer e secador de leito fluidizado; e disposição de rejeitos.

Figura 2. Fluxograma de uma típica rota de tratamento de minério de ferro (Luz e Lins, 2010)



De acordo com Carvalho (2012), os produtos de minério de ferro, além de serem definidos pelos teores de ferro e quantidades de impurezas, devem atender também às especificações granulométricas dos produtos gerados, que são rigidamente controladas.

Se tratando de minério de ferro, os produtos gerados nas usinas de beneficiamento ocorrem basicamente em três faixas granulométricas, as quais podem ter diferenças a depender da usina produtora e das características do minério (Vale, 2021):

- Granulado (lump ore), minério granulado entre 50,0 e 6,35 mm. Para consumo em altos-fornos;
- Sinter feed, representa a faixa granulométrica de 6,35 a 0,150 mm para sinterização;
- Pellet feed, concentrado abaixo de 0,150 mm, utilizado na produção de pelotas para alto forno.

Particularidades da Separação Magnética

A separação magnética pode ser entendida como a interação entre um dipolo magnético e um campo magnético. Quando uma partícula é exposta a esse campo, ela se magnetiza, formando polos magnéticos em suas extremidades, que se alinham ao longo das linhas de campo

(Silva Maximiliano, 2012). Essa técnica de separação possui diversas aplicações, incluindo, dentre outros: separação de materiais ferrosos e não ferrosos, remoção de gangas magnéticas em minérios (por exemplo, fosfatos), concentração de minérios de ferro e reciclagem de resíduos industriais (Svoboda e Fujita, 2003). A terceira aplicação citada é o objeto do presente trabalho.

A separação magnética é um método utilizado para separar misturas, fundamentado nas propriedades magnéticas dos materiais. Este processo explora a diferença na suscetibilidade magnética, que é a habilidade de um material ser magnetizado quando submetido a um campo magnético (Silva, 2020). O campo magnético refere-se à área de influência da força magnética gerada por um corpo magnético (ímã natural) ou por um corpo previamente magnetizado (ímã induzido), sendo representado por linhas que indicam a direção de atração ou repulsão do dipolo desse corpo (Chaves & Chaves Filho, 2013).

Para que a separação ocorra, é necessário que o campo magnético tenha um gradiente de força, ou seja, deve ser um campo convergente, concentrando suas linhas em um ou mais pontos onde a intensidade magnética é maior. Isso provoca uma aceleração nas partículas suscetíveis em direção a esses pontos (Wills & Finch, 2015). Para aprimorar o gradiente dos campos magnéticos gerados, são empregadas matrizes em diversos equipamentos de separação magnética (Chaves & Chaves Filho, 2013).

A suscetibilidade magnética é uma característica intrínseca dos materiais, influenciada por diversos fatores, como composição, estrutura cristalina, tamanho de grão e temperatura, entre outros. Os materiais podem exibir três comportamentos magnéticos principais: diamagnético, paramagnético e ferromagnético (Callister e Retwisch, 2016).

Minerais ferromagnéticos são aqueles que são fortemente atraídos por ímãs comuns, com a magnetita sendo o exemplo mais conhecido. Os minerais paramagnéticos apresentam uma atração fraca, com a hematita sendo um exemplo clássico. Já os minerais diamagnéticos têm suscetibilidade magnética negativa e, por isso, são repelidos quando expostos a um campo magnético. Entre esses, destacam-se o quartzo, a cerussita, a magnesita, a calcita, a barita, a fluorita e a esfalerita, entre outros (Sampaio et al., 2004).

Existem dois tipos principais de separação magnética: a separação magnética de alta intensidade e a de baixa intensidade. Na separação de alta intensidade, um campo magnético é aplicado a uma mistura para separar os materiais magnéticos dos não magnéticos. Já na separação de baixa intensidade, um campo magnético mais fraco é utilizado, permitindo que os materiais magnéticos sejam separados com base em sua suscetibilidade magnética. Os materiais magnéticos são atraídos para áreas com maior intensidade de campo, enquanto os não magnéticos permanecem em regiões de menor intensidade (Silva, 2020).

Equipamentos de separação magnética

Existem vários tipos de separadores magnéticos que podem ser usados em diferentes processos de separação de materiais magnéticos. Alguns dos principais tipos de separadores magnéticos são:

- a) separador magnético de tambor (LIMS) (Figura 3), constituído por um tambor giratório que abriga ímãs permanentes em seu interior. Quando os materiais são alimentados no tambor, os metais ferrosos são atraídos para a superfície do tambor pela força magnética, onde permanecem aderidos. Ao mesmo tempo, os materiais não ferrosos seguem seu caminho e são descarregados na extremidade da correia transportadora ou em calhas. Esse tipo de separador pode ser projetado para lidar com diferentes tamanhos de partículas e capacidades de produção, além de permitir a configuração de variados graus de intensidade magnética para se ajustar a diferentes materiais e requisitos de separação (Sampaio et al., 2018).

Figura 3. Separador magnético de tambor (INBRAS, 2024)



- b) separador magnético de correia (Figura 4), composto por uma correia transportadora que passa sobre um tambor magnético. Este tambor, que é um cilindro oco revestido com ímãs permanentes ou eletroímãs, gera um campo magnético intenso. Conforme a correia se movimenta, os materiais colocados sobre ela são levados em direção ao tambor magnético (Sampaio et al., 2018). Os materiais ferromagnéticos, como partículas de minério contendo ferro, são atraídos pelo campo magnético e se aderem à superfície da correia, enquanto os materiais não magnéticos continuam seu percurso e são descarregados em outra área. À medida que a correia se afasta do tambor, os materiais ferromagnéticos são liberados e coletados em uma área separada (Silva, 2020).

Figura 4. Separador magnético Steinert de correia cruzada (Svoboda, 2003)



- c) O separador magnético de carrossel (Figura 5), também conhecido como separador magnético Jones e/ou WHIMS (wet high intensity magnetic separator), é um equipamento utilizado na indústria de mineração para a separação magnética de minerais ferrosos e não ferrosos. Este tipo de separador é composto por várias bobinas magnéticas fixas em um carrossel, que gira em torno de um eixo central. O processo inicia-se com a alimentação sendo direcionada ao centro do carrossel, onde passa pelas bobinas dispostas em uma posição fixa em relação ao eixo. À medida que a alimentação se desloca pelas bobinas, os minerais ferrosos são atraídos pela força magnética e separados dos minerais não ferrosos, que continuam seu trajeto e são descarregados em uma saída distinta (Silva, 2020).

Figura 5. Separador magnético carrossel G-3600 (Gaustec, 2011)



Dentro dos rotores estão localizadas as matrizes, feitas em aço ferromagnético, por onde circula a polpa de minério. As partículas magnéticas são atraídas pelo campo magnético e aderem às placas de imantação (concentrado). Isso acontece, por serem atraídas para as matrizes na região de atuação do campo magnético, devido aos gradientes magnéticos formados no interior das matrizes. Já as partículas não magnéticas (diamagnéticas) são removidas por arraste hidráulico e pela gravidade (rejeito) e as partículas mistas são descartadas por ação entre forças competitivas (médio).

Avanços Tecnológicos no Projeto de Matrizes Magnéticas

O desempenho de um separador magnético de alta intensidade está intrinsecamente ligado ao projeto e à geometria de suas matrizes ferromagnéticas. Tradicionalmente constituídas por placas de aço ranhuradas, as matrizes convencionais apresentavam limitações operacionais ao processarem partículas finas, especialmente abaixo de 0,15 mm, com tendência a entupimentos e redução da capacidade de processamento (PINTO, 2020). Para superar esses desafios, desenvolvimentos recentes focaram na modificação da geometria das ranhuras. A matriz do tipo Big Flux, por exemplo, introduziu um aumento no "passo" entre as cristas das ranhuras, ampliando a área de fluxo de polpa para uma mesma abertura (gap), o que resulta em maior capacidade volumétrica e menor susceptibilidade a bloqueios (RIBEIRO et al., 2017).

Paralelamente, a matriz Wave, com seu perfil ondulatório alternado, promove um redirecionamento mais eficiente das linhas de campo magnético, intensificando o gradiente de campo nas regiões de captura e melhorando a recuperação de partículas ultrafinas. Essas inovações no design das matrizes são fundamentais para viabilizar economicamente o tratamento de minérios de ferro de granulometria cada vez mais fina, um requisito comum no beneficiamento de itabiritos compactos e no reprocessamento de rejeitos.

Parâmetros Operacionais Determinantes em Separadores de Alta Intensidade

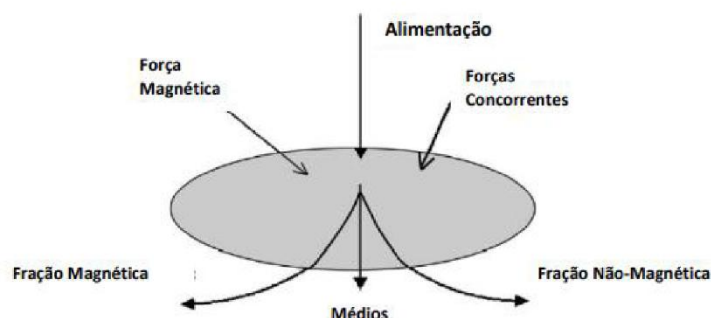
A eficiência da concentração magnética de alta intensidade, particularmente em separadores do tipo carrossel (WHIMS), não depende apenas do equipamento, mas de um controle rigoroso de um conjunto de variáveis operacionais inter-relacionadas. A intensidade do campo magnético, regulada pela corrente elétrica aplicada nas bobinas, é o principal parâmetro de controle, devendo ser ajustada conforme a susceptibilidade magnética do mineral-alvo, como a hematita (SVOBODA, 1993). Contudo, um aumento excessivo do campo pode saturar a matriz, reduzir sua porosidade e arrastar partículas de ganga, prejudicando a seletividade.

A velocidade de rotação do carrossel define o tempo de residência da polpa na zona de influência do campo, afetando diretamente a probabilidade de captura das partículas magnéticas. Outro fator crítico é o sistema de lavagem, composto por jatos de água de baixa pressão (rinse) para remoção do material intermediário (médio) e de alta pressão para desprendimento do concentrado. Pressões inadequadas podem levar à contaminação do concentrado ou à recirculação interna de material, reduzindo a recuperação em massa (WASMUTH e UNKELBACH, 1991). Além disso, características da alimentação, como a percentagem de sólidos na polpa e a distribuição granulométrica, influenciam a viscosidade do meio e a dinâmica de separação. Portanto, a otimização do processo consiste no equilíbrio sinérgico dessas variáveis, exigindo um profundo conhecimento do minério e monitoramento constante para maximizar a recuperação metalúrgica e a qualidade do concentrado.

Forças aplicadas à separação magnética

As forças que atuam em uma partícula podem ser representadas de acordo com o diagrama de forças apresentado abaixo na Figura 6. A figura também apresenta os fluxos de material tanto na alimentação do separador magnético, quanto dos produtos gerados na separação: fração magnética, fração não magnética e fração intermediária. Existem também as forças que competem com a força magnética, sendo elas: o peso das partículas, o arraste hidrodinâmico e interações de superfície. Na separação a úmido, o arraste hidráulico é importante e a seletividade da separação pode ser influenciada pelo tamanho da partícula (Svoboda e Fujita, 2003).

Figura 6 - Diagrama de representação das forças que atuam sobre uma partícula no processo de separação magnética (Svoboda e Fujita, 2003)



A separação das partículas magnéticas das não magnéticas ou das partículas menos magnéticas, ocorre se forem satisfeitas as condições expressas na equação 1.

$$F_m^{mag} > \Sigma F_c^{mag} \text{ e } F_m^{non-mag} < \Sigma F_c^{non-mag} \quad (1)$$

Onde, F_m^{mag} e $F_m^{non-mag}$ se referem, à força magnética que atua sobre as partículas magnéticas e sobre as partículas não magnéticas, respectivamente. E F_c^{mag} e $F_c^{non-mag}$ referem-se às forças concorrentes à força magnética, que atuam sobre as partículas magnéticas e não magnéticas, respectivamente. Portanto, para se obter uma maior recuperação das partículas magnéticas, a intensidade da força magnética deve ser significativamente maior que a soma das intensidades das forças concorrentes (Svoboda e Fujita, 2003).

A força magnética é a principal influência externa sobre as partículas em um separador magnético, sendo diretamente proporcional à intensidade do campo magnético aplicado. Assim, as variações na intensidade do campo podem afetar o desempenho dos separadores. Em geral, um campo magnético mais forte resulta em uma maior recuperação de partículas magnéticas no concentrado. No entanto, há situações em que um aumento no campo pode prejudicar tanto a recuperação quanto à qualidade do concentrado. Isso pode ser atribuído a dois fatores principais: o primeiro é a diminuição da susceptibilidade magnética das partículas à medida que a intensidade do campo aumenta, e o segundo é a redução da área disponível na matriz para captura das partículas, o que ocorre com o aumento do campo aplicado. O aumento da quantidade de material depositado na matriz diminui a porosidade da camada formada, o que, por sua vez, acelera a velocidade de escoamento da polpa no interior da matriz (Svoboda, 1993).

A separação é realizada de forma seletiva, uma vez que é possível controlar com facilidade diversas variações operacionais, como a intensidade do campo magnético, o elemento

responsável pela conversão do fluxo, a taxa de alimentação, a porcentagem de sólidos na polpa, a velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas (Sampaio et al., 2018).

Concentração magnética de minérios de ferro

Ressalta-se que, para a separação magnética aplicada à minérios de ferro, esta operação unitária é denominada de concentração magnética. Tal nomenclatura deve-se ao fato de haver a rejeição, no processo, de minerais não magnéticos contendo teores mais elevados de sílica e alumina, o que traz o enriquecimento desejado dos teores de ferro nos produtos. Portanto, a concentração magnética é uma alternativa muito utilizada, em mineradoras de minério de ferro, para a obtenção de concentrados magnéticos de alta pureza, como Sinter feed e Pellet Feed (Vale, 2021).

A análise das operações de concentração magnética voltadas ao beneficiamento de minério de ferro demonstrou o papel estratégico dessa técnica na indústria mineral brasileira. Em especial, a aplicação da separação magnética em plantas industriais revelou ganhos substanciais tanto na recuperação metalúrgica quanto na qualidade final do concentrado. Essa eficiência é alcançada, principalmente, pela capacidade do processo de separar minerais com diferentes suscetibilidades magnéticas, como a magnetita e a hematita.

Conforme ilustrado na Figura 7, os separadores magnéticos de baixa intensidade (LIMS – Low Intensity Magnetic Separator) são comumente aplicados à separação de partículas de magnetita, devido à sua forte resposta ao campo magnético. O método se destaca por ser contínuo, de baixo consumo energético e elevado rendimento quando aplicado a minérios com predominância de espécies ferromagnéticas.

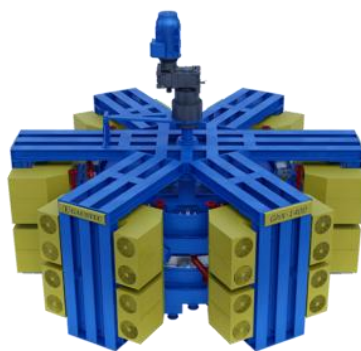
Figura 7. Separador magnético de tambor LIMS em operação industrial (Metso, 2025)



A separação magnética tem aplicação fundamental na concentração de minérios de ferro, especialmente quando há predominância de minerais como a magnetita, que são fortemente magnéticos (Chaves 2012). Essa operação é favorecida pela simplicidade, seletividade e flexibilidade para ajustes operacionais, como intensidade de campo, tempo de residência e densidade da polpa.

No caso de minérios com maior proporção de hematita, mineral com comportamento paramagnético, é necessário o uso de separadores de alta intensidade, como os WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separator). A Figura 8 exemplifica esse tipo de equipamento, comumente adotado em circuitos de retratamento ou no beneficiamento de itabiritos pobres.

Figura 8. Separador magnético tipo carrossel WHIMS (Gaustec, 2025).



As partículas são atraídas para as matrizes na região de atuação do campo magnético devido aos gradientes formados no interior dessas matrizes (Svoboda e Fujita 2003). O WHIMS é particularmente eficaz na recuperação de hematita finamente disseminada, contribuindo para o aumento do teor de ferro no concentrado final.

Além da recuperação metalúrgica, a separação magnética promove significativa redução nos teores de contaminantes como sílica e alumina, cuja presença excessiva prejudica o processo siderúrgico. Essa purificação torna o produto adequado às exigências industriais, como a produção de sinter feed e pellet feed, conforme relatado no Relatório de Sustentabilidade da Vale (2021).

A separação magnética é uma operação unitária eficaz na concentração de minérios de ferro, especialmente quando os minerais apresentam diferentes graus de susceptibilidade magnética (Sampaio e Luz 2010).

Outro ponto relevante é o controle das variáveis operacionais, que afetam diretamente a seletividade do processo. O bom desempenho da concentração magnética está diretamente

relacionado à adequada regulação dos parâmetros operacionais: intensidade de campo, tempo de residência e características granulométricas da alimentação (Chaves 2012).

A resposta diferenciada de magnetita, hematita e quartzo aos campos magnéticos decorre da configuração eletrônica desses minerais; elétrons desemparelhados alinham seus momentos magnéticos quando submetidos a um campo externo, (Callister e Rethwisch, 2016).

No plano estratégico, elevar a recuperação e cortar perdas encaixa-se nas metas de sustentabilidade da mineração brasileira. A literatura indica que tecnologias de maior eficiência energética reforçam essa agenda (Carvalho, 2012). Além disso, o controle mineralógico e tecnológico do beneficiamento é apontado como requisito para ganhos metalúrgicos, ambientais e econômicos (Carvalho et al., 2014).

A escolha inadequada da granulometria ou da intensidade de campo pode comprometer a eficiência da separação, gerando sobrecarga da matriz ou perdas de partículas úteis no rejeito. Um campo magnético excessivamente forte pode diminuir a seletividade, capturando partículas de ganga ou reduzindo a porosidade da matriz magnética (Wills e Finch 2015).

Portanto, a aplicação da concentração magnética, desde que ajustada às características físico-químicas do minério e às condições operacionais, constitui uma etapa técnica e economicamente vantajosa para o beneficiamento de minérios de ferro. Sua eficácia está associada tanto à recuperação de ferro, quanto à melhoria na qualidade do concentrado final, otimizando a performance global da planta.

A Separação Magnética como Tecnologia Estratégica para Minérios de Baixo Teor e Sustentabilidade

O cenário atual da mineração de ferro é marcado pela necessidade de processar materiais com teores metálicos decrescentes e pela pressão ambiental para redução de rejeitos. Nesse contexto, a separação magnética destaca-se como tecnologia essencial, permitindo não apenas o enriquecimento de minérios de baixo teor, mas também a recuperação de partículas valiosas a partir de resíduos antes descartados (SAMPAIO et al., 2018). A eficiência do processo reside na diferença de susceptibilidade magnética entre os minerais, o que viabiliza a separação seletiva de fases portadoras de ferro, como magnetita e hematita, de gangas predominantemente diamagnéticas, como o quartzo (CHAVES, 2012).

No Quadrilátero Ferrífero, região de grande relevância mineral para o Brasil, a ocorrência de itabiritos com teores variáveis de ferro e elevados teores de sílica exige rotas de beneficiamento cada vez mais adaptadas. A concentração magnética, em suas modalidades de baixa e alta intensidade, tem sido amplamente empregada para elevar a qualidade química e

granulométrica de produtos como sinter feed e pellet feed (LUZ; LINS, 2010). Estudos recentes demonstram que o uso combinado de secagem e separação magnética a seco, bem como a aplicação de separadores de alta intensidade do tipo WHIMS, possibilita alcançar teores superiores a 65% de Fe em concentrados, mesmo a partir de materiais inicialmente considerados marginais (SANTOS, 2024; RODRIGUES, 2022).

Do ponto de vista ambiental e operacional, a tecnologia magnética oferece vantagens significativas. A operação a seco reduz expressivamente o consumo hídrico, aspecto crítico em regiões com restrições de água, enquanto o reprocessamento de rejeitos contribui para a redução de passivos ambientais e para a extensão da vida útil de minas (CARVALHO, 2012). Avanços no design de matrizes magnéticas, como os modelos Big Flux e Wave, têm permitido maior capacidade de captura de partículas finas e operação com menores espaçamentos, elevando a eficiência global do processo (PINTO, 2020).

Dessa forma, a concentração magnética consolida-se não apenas como etapa técnica fundamental no beneficiamento de minério de ferro, mas também como ferramenta estratégica para uma mineração mais sustentável e economicamente viável. O presente trabalho busca analisar os principais equipamentos, parâmetros operacionais e casos de aplicação dessa tecnologia, com o objetivo de contribuir para a otimização de processos em plantas industriais brasileiras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho baseou-se, inicialmente, em uma pesquisa preliminar, com o objetivo de fornecer uma visão geral sobre as operações de separação magnética e sua aplicabilidade em plantas de beneficiamento de minérios.

Aprofundou-se, posteriormente, a pesquisa com o foco na identificação e detalhamento de estudos de casos reais relacionados a operações de concentração magnética de minério de ferro, com foco em: ações de otimização de processos, ajustes nos equipamentos e ganhos obtidos em termos de qualidade, recuperação metalúrgica e redução de custos.

Foram pesquisadas publicações técnicas na internet, baseadas nas seguintes palavras-chaves: separação magnética, minério de ferro e concentração magnética. Tal pesquisa gerou uma lista de diversos documentos: artigos, livros, capítulos de livros, dissertações, resumos, anais de conferências e citações de referências.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados dois exemplos práticos e documentados da aplicação da concentração magnética na melhoria da qualidade e recuperação metalúrgica dos produtos de minério de ferro, os quais servem para ilustrar os avanços e desafios na otimização do processo.

3.1 OTIMIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM USINA DE PROCESSAMENTO MINERAL COM SECAGEM E CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA

Este estudo, desenvolvido por Santos (2024), investigou o problema relacionado à baixa recuperação mássica e metalúrgica observada em uma usina de beneficiamento instalada no município de Sabinópolis, Minas Gerais. Essa dificuldade operacional estava ligada a diversos fatores, como: inadequação da rota de processo, presença de itabiritos de diferentes composições (compacto e semi-compacto) e elevada heterogeneidade da frente de lavra. Como consequência, o minério alimentado à planta apresentava granulometria desfavorável e alto teor de contaminantes como sílica e alumina.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de novas estratégias de beneficiamento, foram conduzidos testes em escala piloto utilizando diferentes configurações de equipamentos e rotas de processo. Este trabalho investigou a combinação entre secagem e concentração magnética a seco como alternativa à rota convencional a úmido. A proposta era otimizar a recuperação mássica e o teor de ferro no concentrado final, reduzindo o consumo de água e os impactos ambientais associados.

Entre os equipamentos empregados para a otimização do processo destacam-se:

- Secador rotativo, responsável pela remoção da umidade do minério antes da concentração, permitindo melhor desempenho dos separadores magnéticos a seco;
- Separadores magnéticos de tambor de alta intensidade (7.500 e 14.000 Gauss), utilizados para recuperação de partículas magnéticas em diferentes granulometrias;
- Separador magnético Re-Roll, equipamento de alta intensidade aplicado em múltiplas etapas para elevar o grau de pureza do concentrado;
- Separadores híbridos (úmido e seco), empregados em uma rota combinada para beneficiamento do itabirito compacto, com resultados superiores à concentração isolada.

Conforme demonstra a Figura 9, o secador rotativo foi projetado especificamente para atender à demanda da unidade de Sabinópolis, sendo essencial para reduzir a umidade do minério

e viabilizar o funcionamento eficiente da separação magnética a seco. O controle da umidade mostrou-se determinante para a qualidade final do concentrado.

Figura 9. Secador rotativo em fabricação (Santos, 2024)



Além disso, a Figura 10, representa o tambor magnético de 14.000 Gauss utilizado nos testes com partículas finas. Esse equipamento foi responsável pela recuperação de partículas paramagnéticas, como a hematita, em faixas granulométricas menores, contribuindo significativamente para o aumento do teor de ferro no concentrado.

Figura 10. Tambor magnético 1400 Gauss (Modelo RE) (Santos, 2024)



Os testes práticos demonstraram que o itabirito semi-compacto, quando cominuído a menos de 1 mm e submetido à secagem, apresentou recuperação mássica de 49,2% e recuperação metalúrgica de 88,8%, com teor médio de 60,4% de ferro no concentrado. Já para o itabirito compacto, foi adotada uma rota híbrida, onde a fração mais fina foi tratada a úmido e a restante a seco. Essa abordagem resultou em concentrado com 65% de teor de ferro, recuperação mássica de 49,7% e recuperação metalúrgica de 87,7%.

Esses resultados confirmam a eficiência da etapa de secagem como pré-condição para o desempenho ideal dos separadores magnéticos a seco. Além disso, o estudo evidencia que o controle granulométrico e a adaptação dos equipamentos às características mineralógicas do minério são fatores decisivos para o sucesso do processo de concentração magnética,

contribuindo para o aumento da produtividade e da sustentabilidade na cadeia do minério de ferro.

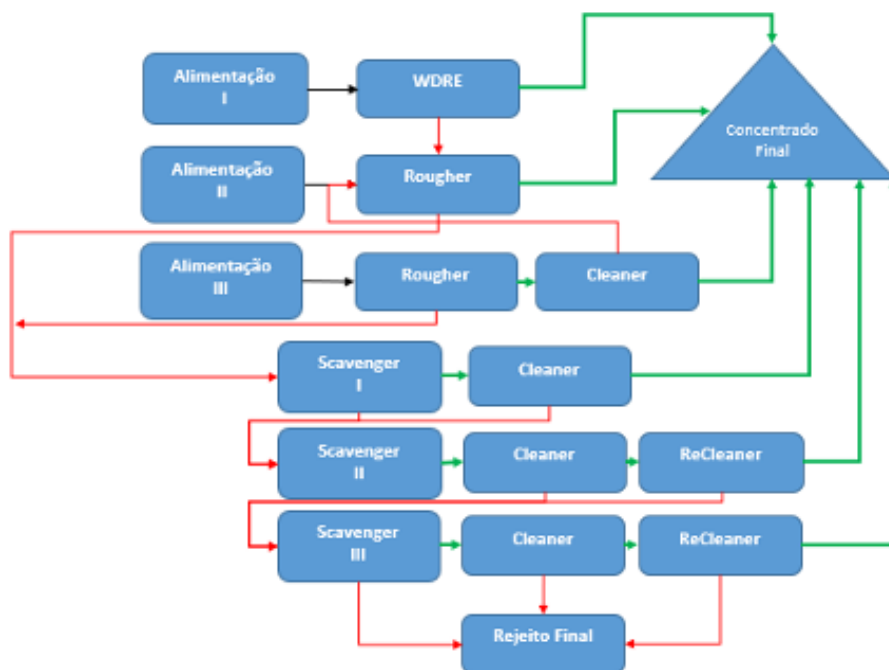
O estudo desenvolvido por Rodrigues (2022) teve, como foco, a avaliação do reaproveitamento de rejeitos da usina de beneficiamento de minério de ferro da empresa Itaminas Comércio de Minérios S/A, localizada no município de Sarzedo, Minas Gerais.

Figura 11 - Fluxograma do rejeito final Itaminas (Rodrigues, 2022)

O estudo detalhou a configuração do circuito industrial da usina, composto por uma sequência de separadores magnéticos de diferentes modelos, faixas granulométricas e intensidades de campo. O fluxograma simplificado do processo está representado na Figura 12,

onde são destacados os fluxos de concentrados (em verde), rejeitos (vermelho) e alimentação (preto).

Figura 12 – Fluxograma simplificado - Itaminas Comércio de Minério S/A (Rodrigues, 2022)



Nessa configuração, destacam-se os seguintes equipamentos utilizados:

- Tambores magnéticos WDRE para escalpe magnético da alimentação;
- Ghp-400, Gx-3600, G-3600, Ghp-150 e G-3200, operando nas etapas rougher, cleaner, scavenger e recleaner;
- Hexapolares Ghx-1400 para as etapas finais de recuperação.

Conforme o fluxograma, o circuito de beneficiamento da planta contempla uma cadeia complexa de separadores magnéticos interligados, permitindo a maximização da recuperação de ferro a partir de rejeitos. A presença de múltiplas etapas em série permite a purificação progressiva do concentrado e a minimização da perda de ferro.

Os testes em planta piloto mostraram resultados altamente positivos. A recuperação metalúrgica e o teor de ferro no concentrado foram significativamente elevados, comprovando a eficiência da rota de concentração magnética com a tecnologia Super BigFLUX®. Embora os resultados numéricos estejam diluídos ao longo das análises do relatório, os dados apresentados reforçam que a aplicação dos separadores magnéticos modernos é capaz de recuperar minério de

valor a partir de fluxos antes considerados rejeitos, com qualidade comercial viável e impacto ambiental reduzido.

Dessa forma, o estudo conduzido em Sarzedo evidencia que, mesmo em processos industriais já estabelecidos, a revisão de rotas tecnológicas com foco em aproveitamento de rejeitos pode se traduzir em ganhos significativos de eficiência e sustentabilidade para a indústria mineral brasileira.

3.3 ANÁLISE INTEGRADA DOS ESTUDOS DE CASO

A análise dos dois estudos de caso evidencia a eficiência da concentração magnética como alternativa viável para o beneficiamento de minérios de ferro, especialmente em contextos de baixo teor, escassez hídrica e reaproveitamento de rejeitos. No caso de Sabinópolis (MG), a combinação da secagem com separação magnética a seco mostrou bons resultados, principalmente para partículas finas de itabirito semi-compacto, alcançando até 60,4% de ferro e alta recuperação metalúrgica. Já o itabirito compacto exigiu uma rota híbrida, com concentração a seco e úmida, atingindo 65% de Fe. No segundo caso, a aplicação da tecnologia Super BigFLUX® no rejeito da Itaminas demonstrou alto desempenho mesmo com partículas finas, superando 63% de Fe no concentrado, com destaque para a eficiência do equipamento e a necessidade de revisar a classificação granulométrica da planta. Em síntese, os estudos reforçam que a concentração magnética, aliada a ajustes operacionais e inovações tecnológicas, pode ser estratégica para aumentar a recuperação de ferro, reduzir impactos ambientais e melhorar a eficiência das plantas de beneficiamento.

4 CONCLUSÃO

Os estudos de casos apresentados avaliaram a utilização de testes com diferentes equipamentos de concentração magnética e rotas de processos, permitindo aprimorar a qualidade dos produtos e a eficiência das operações.

No primeiro estudo de caso, na unidade de Sabinópolis em Minas Gerais, a investigação foi dirigida para otimizar a recuperação mássica e o teor de ferro no concentrado final, reduzindo o consumo de água e os impactos ambientais. Verificou-se problemas com rotas de processo ineficientes e grande variabilidade de minérios na alimentação do beneficiamento. Isto acarretava perdas de ferro para o rejeito, além de alto teor de sílica e alumina nos produtos.

Foram testadas diferentes rotas de processo, combinando secagem e concentração magnética como alternativas à rota convencional a úmido.

Foi possível identificar condições adequadas para tratar diferentes tipologias. Para o itabirito semi-compacto, a moagem abaixo de 1 mm seguida de secagem favoreceu o atingimento de bons índices de recuperação mássica, recuperação metalúrgica e teor médio de ferro no concentrado. Para o itabirito compacto, adotou-se uma rota híbrida, tratando-se a fração mais fina a úmido e a restante a seco, com índices de recuperação e qualidade aceitáveis.

Desta forma, foi possível confirmar a eficiência da secagem como condição para a otimização dos separadores magnéticos a seco. Além disso, o estudo evidencia que o controle granulométrico e a adaptação dos equipamentos às características mineralógicas do minério são fatores decisivos para o sucesso do processo de concentração magnética, contribuindo para o aumento da produtividade e da sustentabilidade na cadeia do minério de ferro.

O segundo estudo de caso foi dirigido ao reaproveitamento de rejeitos da usina de beneficiamento de minério de ferro da empresa Itaminas Comércio de Minérios S/A, localizada no município de Sarzedo, Minas Gerais.

O problema em estudo foi a perda excessiva de ferro em determinadas etapas do processo. Investigou-se a utilização de separadores magnéticos, em escala piloto, para diferentes etapas do processo.

Os ensaios conduzidos em planta piloto apresentaram resultados muito promissores. Foram obtidas melhorias expressivas nas recuperações metalúrgicas e no teor de ferro no concentrado, reduzindo assim as perdas metálicas nos rejeitos e obtendo ganhos significativos de eficiência e sustentabilidade.

Portanto, foi possível demonstrar a grande versatilidade e eficiência dos equipamentos e processos de concentração magnética de minério de ferro. Os resultados apresentados demonstram que com ajustes operacionais, melhoria da tecnologia e ações de otimização dos processos é possível garantir a qualidade, benefícios e redução de custos de forma eficaz e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos docentes e discentes do Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia (IECT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) - Campus Janaúba, pelos conhecimentos técnico-acadêmicos compartilhados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas, ano base 2021. 23 p. Brasília: ANM, 2023.
- ALMEIDA, Diego C. Estudo de aproveitamento de rejeitos de minério de ferro por separação magnética. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFOP, 2013.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma abordagem integrada. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARVALHO, B. C. Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2012.
- CARVALHO, F. M. S. Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.
- CARVALHO, F. M. S.; OLIVEIRA, M. G.; SILVA, J. P. Minérios de ferro: geologia, mineralogia, tecnologia de beneficiamento e aproveitamento sustentável. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.
- CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; SILVA, Marcelo Machado; ROCIO, Marco Aurélio; MOSZKOWICZ, Jacques. Minério de Ferro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 1, n. 39, p. 197-233, mar. 2014. Semestral.
- CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana Gonçalves. Ferro. In: PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos; VOLL, Eliane; CUNHA, Edson Campos (org.). Recursos Minerais de Minas Gerais Online: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração em minas gerais. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge), 2018. Cap. 10. p. 1-36. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substanciasminerais/ferro/#principais-dep%C3%B3sitos-de-ferro-de-minas-gerais>. Acesso em: 02 de setembro de 2024.
- CHAVES, Arthur Pinto. Teoria e prática do tratamento de minérios. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CHAVES, A. P.; & Chaves Filho, R. C. Separação magnética. In Chaves, A. P.; & Chaves Filho, R. C. Teoria e prática do tratamento de minérios: Separação densitária. (vol. 6). São Paulo: Oficina de Textos. 2013.
- COSTA, F. J. Otimização do processo de concentração magnética da planta de ultrafinos da mina de Brucutu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFMG, 2015.
- GAUSTEC. WHIMS. Disponível em: < <https://gaustec.com/a-empresa/>>. Acesso em 22/06/2025. 2025.
- GAUSTEC. G-3600. Disponível em: < <https://gaustec.com/2010/10/01/rem-2010-gx-3600-worlds-largest-magnetic-separator-up-to-800-tph/>>. Acesso em 22/06/2025. 2011.

INBRAS. Separador Magnético WDRE. Disponível em: <<https://inbras.com.br/separadormagnetico-de-tambor-de-alta-intensidade-via-umida-separador-wdre/>>. Acesso em: 20/06/2025. 2024.

LU, Liming (ed.). Iron Ore: mineralogy, processing and environmental sustainability. Elsevier Science & Technology Books, 2015.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. Introdução Ao Tratamento De Minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. (ed.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Cap. 1. p. 3-20. Rio de Janeiro:

METSO. Separadores Magnéticos de Baixa Intensidade (LIMS). Disponível em: <<https://www.metso.com/portfolio/lims-magnetic-separators/>>. Acesso em 23/06/2025. 2025.

PINTO, P. H. F. Aproveitamento de lamas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero por concentração magnética de alta intensidade de campo magnético. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas e Petróleo) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T.; PINTO, P. F.; ROCHA, R. B. The Challenge to Scavenger IRON from Tailings Produced By FLOTATION A New Approach: The Super-WHIMS & the BigFLUX Magnetic Matrix. REM, Int. Eng. J., v. 70, n. 3, p. 357-363, jul.-set. 2017.

ROCHA, Rafael Rodrigues. Estudo do processo de concentração magnética de alta intensidade na recuperação de finos de minério de ferro. TCC (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

RODRIGUES, Guilherme Henrique Gualandi. Concentração magnética de alta intensidade (WHIMS) para rejeito de ferro com a tecnologia Super Bigflux® Gaustec Magnetic Technology [manuscrito]. 2022. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2022.

SAMPAIO, Carlos H.; LUZ, Antônio B. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, Antônio B.; FRANÇA, Sílvia C. A.; BRAGA, Paulo F. A. (org.). Tratamento de minérios. 5. ed. p. 353–404. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

SAMPAIO, J. A. E LUZ, A. B. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). p. 303-335. Tratamento de Minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

SAMPAIO, J. A. et al. Separação magnética e eletrostática. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, Cap.8, p.341-379. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2180>. Acesso em: 22 de outubro de 2024. 2018.

SANTOS, Priscilla Leão. Otimização da concentração de minério de ferro em usina de processamento mineral com secagem e concentração magnética. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, 2024.

SILVA, C. B. da; PAIVA, P. R. P. de. Artificial stone production using iron ore tailing (IOT). Cerâmica, [S.L.], v. 66, n. 378, p. 164-171, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663782854>.

SILVA, Maximiliano Batista da. Separação magnética de ultrafinos hematíticos. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

SVOBODA, J. The Effect of Magnetic Field Strength on the Efficiency of Magnetic Separation. *Minerals Engineering*, Volume 7, p. 747-757, Sep. 1993.

SVOBODA, Jiří; FUJITA, Takashi. Recent developments in magnetic methods of material separation. *Minerals Engineering*, Oxford, v. 16, n. 9, p. 785–792, 2003.

TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed. 2004. 421 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

U. S. Geological Survey (Estados Unidos). Mineral Commodity Summaries, 2023. Estados Unidos: USGS, 2023. 210 p. <https://doi.org/10.5066/P9WCYUI6>.

VALE S.A. Palestra: Minas de minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero, ministrada por Marcelo Rodriguês. SEMINÁRIO DE PALESTRAS TÉCNICAS DA ENGENHARIA DE MINAS/ UFVJM. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JXeZiZ1Zsy0>. Acesso em: 02 setembro de 2024.

VALE S.A. Relatório de sustentabilidade e performance operacional – 2021. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://vale.com>. Acesso em: 20 jun. 2025.

WASMUTH, H. D.; UNKELBACH, K. H. Recent Developments in Magnetic Separation of Feebly Magnetic Minerals. *Minerals Engineering*, v. 4, n. 7-11, p. 825-837, 1991.

WILLS, Barry A.; FINCH, James. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DESMONTES DE ROCHA EM PEDREIRAS SITUADAS NO VALE DO MUCURI EM MINAS GERAIS



10.56238/livrosindi202660-008

André Luiz Alves da Silva

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: luiz.andre@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8461611200274998

Ricardo Alves de Silva

Engenheiro de Minas (2010) e Mestre (2019) em Engenharia Mineral pela UFPE

Doutor (2019) em Ciência da Computação pela UFPE

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: ricardo.silva@ufvjm.edu.br

ID: 3636464438163605

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 4556375475161993

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES

Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras

Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES

Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros

E-mail: herbert.silva@unifipmoc.edu.br

ID Lattes: 3925629376472160

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG

Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV

Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN

Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

Orientador deste trabalho

E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8385118400138330

RESUMO

O desmonte de rocha com explosivos é uma operação unitária fundamental para garantir a eficiência nas operações de extração de minérios. Gerando matérias-primas com granulometria adequada para a alimentação da britagem e, por consequência, uma efetividade maior na geração dos produtos ao longo da planta de beneficiamento mineral. O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre dois desmontes de rochas realizados na região do vale do Mucuri, situado no nordeste do estado de Minas Gerais. O primeiro desmonte de rocha foi feito em um quartzito muito compacto e com alto teor de SiO_2 . A estratégia utilizada contemplou a utilização de ANFO como explosivo, além de uma inicialização mais simples. Obteve-se, como resultado, uma rocha desmontada de boa granulometria e adequada para a área metalúrgica, além de preservar o maciço remanescente e garantir uma operação segura. O segundo desmonte de rocha foi realizado em um gnaiss compacto, utilizando-se, como explosivo, a emulsão bombeada, contando também com uma inicialização mais sofisticada. Após a detonação, foi possível constatar que a rocha desmontada apresentou boa regularidade em termos granulométricos, facilitando assim o manuseio, transporte e britagem. Portanto, a seleção dos explosivos e a forma de inicialização devem ser planejadas e realizadas cuidadosamente, para que os resultados obtidos sejam aderentes ao previsto.

Palavras-chave: Desmonte de rochas; Planta de Beneficiamento; Operações Unitárias; Explosivos.

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da humanidade, impulsionando o avanço tecnológico e industrial ao redor do mundo. Os minerais e metais possuem grande relevância econômica e estão amplamente presentes no cotidiano do ser humano moderno. No entanto, essa atividade precisa se consolidar dentro de uma perspectiva de Desenvolvimento Sustentável, crescendo com base no uso racional dos recursos naturais e buscando um equilíbrio harmônico entre o ser humano e o meio ambiente (SGB, 2024).

A mineração é frequentemente considerada uma das atividades mais impactantes para o meio ambiente. Ainda assim, é indispensável para o bem-estar da sociedade, já que os minérios são fundamentais na construção civil, na fabricação de veículos, no desenvolvimento de novas tecnologias e em muitos outros aspectos do dia a dia, com o intuito de melhora para o ser humano e preservação do meio ambiente (DNPM, 2010).

O desmonte de rocha é uma das etapas mais importantes e complexas dentro dos processos de mineração, obras de engenharia civil, construção de túneis, barragens, rodovias e outras grandes intervenções em ambientes geológicos. Essa atividade consiste na fragmentação controlada de maciços rochosos com o objetivo de permitir sua remoção, transporte e processamento. Os métodos de desmonte variam conforme as características físicas e mecânicas da rocha, a finalidade da obra, as condições ambientais e os aspectos de segurança envolvidos (Diniz, 2010).

Existem dois métodos principais de desmonte: o mecânico, que utiliza equipamentos como rompedores hidráulicos, escavadeiras e fresadoras; e o com uso de explosivos, que é o

mais comum em mineração devido à sua eficiência em grandes volumes de rocha. O desmonte com explosivos requer um planejamento rigoroso, envolvendo o estudo detalhado da rocha, o dimensionamento das cargas explosivas, a definição da malha de perfuração e a análise dos impactos, como vibrações, lançamento de fragmentos e emissão de ruídos e poeira (Silva, 2012).

Além da eficiência operacional, o desmonte de rocha deve ser executado de forma segura e sustentável. Isso significa adotar medidas que reduzam os riscos aos trabalhadores, às comunidades próximas e ao meio ambiente. O avanço das tecnologias e das práticas de engenharia tem permitido melhorias significativas no controle dos efeitos indesejáveis do desmonte, como a utilização de explosivos de baixo impacto, o monitoramento de vibrações e a aplicação de técnicas de confinamento dos fragmentos de rocha (ICMM, 2020).

Portanto, o desmonte de rocha não é apenas uma etapa técnica do processo produtivo, mas também um ponto crítico que exige responsabilidade, conhecimento especializado e planejamento adequado para garantir que os objetivos sejam alcançados com o menor impacto possível (ICMM, 2020).

O presente trabalho apresenta dois estudos de caso práticos de desmonte de rocha realizados em pedreiras localizadas no Vale do Mucuri, região nordeste do estado de Minas Gerais. Tais análises incluem considerações sobre os tipos de rocha e características das rochas, configurações da perfuração e plano de fogo, tipos de explosivos e acessórios e sequência de detonação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um estudo comparativo entre dois desmontes de rocha com finalidades distintas, voltados para áreas como construção civil, metalurgia e pavimentação de estradas. Tais desmontes foram acompanhados pelo autor deste trabalho.

Ambos foram executados em pedreiras localizadas no Vale do Mucuri, região Nordeste do estado de Minas Gerais, com rochas e características diferentes. As operações foram conduzidas por uma empresa especializada em serviços de carregamento de explosivos e detonação. Não houve a permissão de citar-se os nomes das referidas empresas.

Uma das empresas, localizada na cidade de Gouveia, produz e comercializa quartzo, tendo como foco principal o setor metalúrgico. A outra empresa está localizada na cidade de Teófilo Otoni, produzindo e comercializando rochas gnáissicas. Tem, como foco principal, a venda para empresas que atuam na construção civil e pavimentação de estradas.

Antes da execução dos desmontes, o engenheiro de minas da empresa prestadora de serviços realizou uma visita técnica à frente da lavra. Nessa ocasião, ele obteve informações

detalhadas sobre o processo de perfuração, onde a malha, espaçamento, afastamento, profundidade dos furos, subfuração e o tampão já estão definidos e perfurados pela pedreira. O profissional avaliou in loco as operacionais durante essa etapa preliminar, foram considerados aspectos como, localização da bancada, disponibilidade de ROM (Run of Mine) para abastecimento da planta de britagem, tipo litológico predominante, potenciais impactos ambientais e estruturais, análise dos explosivos e acessórios a serem utilizadas e o acesso dos veículos até a bancada, e questões específicas de interesse do cliente.

Com o objetivo de atender às exigências sociais, ambientais e de segurança, em determinadas situações a administração da pedreira opta por incluir, no pacote de serviços, o monitoramento sismográfico. Por meio da utilização de sismógrafos, foi possível registrar vibrações no solo e níveis de pressão sonora gerados pelas detonações (Lopes, 2023). Esses dados foram consolidados em relatórios técnicos que servem de base para avaliar a eficiência dos desmontes, além de identificar e mitigar riscos potenciais a estruturas próximas, tanto a empresa como a comunidades vizinhas, contribuindo para uma operação mais segura e ambientalmente responsável (ABNT, 2017).

Para a elaboração dos planos de fogo, foram considerados diversos parâmetros técnicos fundamentais, tais como: profundidade e inclinação dos furos, diâmetro da perfuração, subfuração, presença de repés, afastamento e espaçamento entre furos (malha de perfuração), dimensionamento do tampão, granulometria desejada, localização da bancada, ocorrência de descontinuidades ou fissuras na rocha e a natureza do material a ser desmontado. A análise integrada desses fatores foi essencial para definir as melhores práticas operacionais, com foco em: otimizar o rendimento da lavra; reduzir o consumo de explosivos e acessórios; e mitigar os impactos ambientais e estruturais (DINIZ, 2010).

Além disso, a comparação entre os desmontes permitiu observar como diferentes litologias e condições geomecânicas exigem ajustes específicos no plano de fogo, influenciando diretamente na fragmentação do material, na produtividade do carregamento e na estabilidade das bancadas. A experiência prática reforça a importância do planejamento técnico detalhado e do monitoramento contínuo como ferramentas estratégicas para garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade nas operações de lavra por desmonte de rocha (Coelho, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. DESMONTE DE ROCHA NA EMPRESA A

A empresa A possui um depósito mineral portador de rochas quartzíticas de alto teor de sílica (SiO_2), beneficiando e comercializando produtos ricos em silício metálico para o setor

metalúrgico. Tal empresa está localizada no Vale do Mucuri, precisamente na cidade de Gouveia, estado de Minas Gerais.

A cidade de Gouveia está inserida em uma região de grande relevância geológica. As rochas presentes nessa área fazem parte, principalmente, do embasamento cristalino do Cráton do São Francisco, especificamente dentro do Bloco Jequitinhonha, uma subdivisão geológica que abriga rochas muito antigas e complexas (UFMG, 2012).

O quartzito encontrado em Gouveia tem origem no processo de metamorfismo regional de arenitos quartzosos, submetidos a altas temperaturas e pressões durante os eventos tectônicos associados à formação do Orógeno Araçuaí Neoproterozóico, há cerca de 600–500 milhões de anos (UFMG, 2012).

Esses quartzitos pertencem principalmente às unidades do Grupo Macaúbas, especificamente à Formação Chapada Acauã, e estão relacionados ao ambiente de bacia sedimentar marinha, posteriormente metamorfoseada durante colisões continentais (UFMG, 2012).

Com relação a sua composição mineralógica, tais rochas se constituem, predominantemente, por quartzo (acima de 90%), podendo conter micas como muscovita e biotita, feldspato e minerais acessórios como turmalina e rutilo. A fórmula química característica do mineral predominante (quartzo) é SiO_2 (dióxido de silício), classe química silicatos, subclasse tectossilicatos. O sistema cristalino é trigonal, apresentando forma cristais prismáticos com terminações piramidais. Pode ocorrer, também, com hábitos maciços ou granular. Sua origem pode ser ígnea, metamórfica ou sedimentar. A textura da rocha é granoblástica, podendo apresentar: grãos equidimensionais em rochas metamórficas como quartzito; grãos intergranulares, em rochas ígneas e sedimentares; ou textura sacaróide, ou seja, semelhante a açúcar cristal, comum em quartzitos (UFMG, 2012).

A cor se apresenta variável: cinza-claro, bege, rosado e esverdeado, dependendo da presença de impurezas minerais. A estrutura é comumente massiva, podendo apresentar foliações secundárias e estratificação originada da rocha sedimentar original.

A dureza desta formação rochosa se apresenta muito alta, por força da predominância do quartzo em sua composição (dureza de 7 na escala Mohs), sendo resistente a abrasão e intempéries. Desta forma, torna-se ideal para utilização em revestimentos. A densidade in situ é de, aproximadamente, $2,6 \text{ t/m}^3$ (UFMG, 2012).

3.1.1 Planejamento e realização do desmonte

O planejamento do desmonte levou em conta os explosivos adequados frente às características da rocha presente, pois tal análise implica, diretamente, em resultados na produção e qualidade do produto a ser processado e entregue ao cliente.

O responsável pelo desmonte visitou o cliente com antecedência, coletando dados e estabelecendo o melhor plano de ação possível. Salienta-se que a perfuração dos furos a serem carregados foi previamente realizada pelo cliente. Desta forma, parâmetros como espaçamento, afastamento, tipo de malha (malha estagiada pé de galinha) foram considerados pelo engenheiro de minas, servindo de base para o plano de fogo (Figura 1).

O referido plano de fogo levou, em consideração, questões importantes do maciço rochoso e da perfuração: configuração e resistência da rocha; localização da bancada; proximidade da bancada com relação a edificações da empresa, de terceiros e o perímetro urbano; altura da bancada; diâmetro do furo; espaçamento e afastamento; densidade da rocha; quantidade de furos; razão de carga e outros aspectos. A altura do tampão foi dimensionada para assegurar a segurança e boa granulometria do material. Todos esses parâmetros foram estudados pela empresa contratada, visando garantir uma boa prestação de serviço.

Escolheu-se o explosivo ANFO convencional (Granulado + Encartuchado) para o carregamento dos furos, mantendo-se uma distribuição homogênea dos explosivos na bancada e facilitando o carregamento dos furos (CHICARELLI, 2008).

Figura 1 - Plano de Fogo da empresa A

PLANO DE DESMONTE											
CLIENTE:						Local: GOUVEIA MG			Data:		
Parâmetro do desmonte - Bancada:				Bancada:				Rocha: Quartzito			
Dados da Bancada e Perfuração											
Num.	Dados	Un.	Quant.	Num.	Dados	Un.	Quant.	Num.	Dados	Un.	Quant.
1	Diâmetro dos furos	pol	3"	7	Tampão	m	1,50	12	Nº de Furos/Desmonte	nº	50,00
2	Densidade da rocha	g/cm³	2,60	8	Quantidade de Furos	nº	50,00	13	Nº de Desmontes	nº	50,00
3	Afastamento	m	2,50	9	Metragem furada	mt	750,00	14	Volume Total Desmontado	m³	8.437,50
4	Espaçamento	m	4,50	10	Metros de tampão	nº	80,00	15	Toneladas Desmontadas	ton.	21.937,50
5	Altura M. Bancada (com sub. F)	m	15,00	11	Densidade Do Explosivo	g/cm³	4,10	16	Razão de carga	g/m³	453,33
6	Subturação	m	0,00	12	Carga de fundo/espera	0	2.080,00	17	Razão de carga	g/ton.	174,36
Explosivos Utilizados											
EMULSÕES				ANFO				REFORÇADORES			
Num.	Descrição	Un.	Quant.	Num.	Descrição	Un.	Quant.	Num.	Descrição	Un.	Quant.
19	Emulsão Enc. 1 X 24"	kg		23	Granulado	kg	3.500,00	24	Booster 150g	Pcs	0
19	Emulsão Enc. 1 1/2 X 24"	kg						25	Booster 230g	Pcs	0
20	Bombeado	kg									
21	Emulsão Enc. 2 1/4 X 24"	kg	325,00								
22	Emulsão Enc. 2 X 24"	kg									
Procedência: CR:											
Acessórios Utilizados											
NÃO ELÉTRICOS DE LIGAÇÃO					CORDEIS						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pcs)	Num.	Descrição	Un.	Quant.			
26	NÃO ELÉTRICO LIGAÇÃO				26	NP10	m	1.500,00			
27	NÃO ELÉTRICO LIGAÇÃO				27	NP05	m	0,00			
28	NÃO ELÉTRICO LIGAÇÃO				28	NP03	m	0,00			
				0,00	29	NP40	m	0,00			
					30	NP60	m	0,00			
NÃO ELÉTRICOS DE COLUNA					RETARDOS PARA CORDEL						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pcs)	Num.	Descrição	Tempo (MS)	Qtd (Pcs)			
26	BRINEL COLUNA				26		25,00	50,00			
26	BRINEL COLUNA				27		0,00	0,00			
					28		0,00	0,00			
				0,00	29		0,00	0,00			
					30		0,00	0,00			
NÃO ELÉTRICOS LEAD LINE					ESPOLETOPIM						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pcs)	Num.	Descrição	Tam. (m)	Qtd (Pcs)			
23	LINEMEX	500	0	0	26	ESPOLETOPIM	1,20	6			
Procedência: CR:											
Observações											
Carregamento			Avaliação da Fragmentação			Rato de Isolamento		Condições do Bit			
Inicio: 7:00 Horas			Ótimo 9 e 10			Ideal 500 metros		Novo			
Term: 17:30 Horas			Bom 7 e 8					Médio			
H. Desmonte: 17:40 Horas			Regular 5 e 6					Ruim			
Notas:			Ruim 3 e 4			Técnico: BLASTER		Assinatura:			
			Péssimo 1 e 2								

Fonte: Próprio Autor (2025)

Foram utilizados explosivos e acessórios adequados para auxiliar na máxima eficiência do desmonte, indispensável para obter um resultado satisfatório e íntegro. No desmonte

realizado, além do ANFO, os acessórios foram escolhidos conforme a rocha, visando garantir a segurança e obter um bom resultado.

O cordel foi utilizado como elo das cargas de coluna e fundo, além de ligação entres os furos. Sua composição química contempla o nitrato de amônia envolto por uma camada de plástico, e cumpre a função dupla de acionamento e queima a uma velocidade linear de 7000 m/s linear. O cordel transmite a energia para detonação, tanto para o furo quanto para as cargas de fundo e coluna. Uma amarração correta do cordel reduz a possibilidade de mal acionamento (ABNT, 2010).

Os retardos foram utilizados com a função de aliviar as ondas de choque produzidas pelos gases gerados durante a detonação. Esse processo traz benefícios tanto para o maciço remanescente quanto para o solo ao redor, promovendo um bom alívio das ondas de choque e contribuindo para uma melhor fragmentação da rocha (Silva, 2012).

A Figura 2 exibe a bancada antes da detonação. Nota-se, pela imagem, uma bancada de bom acesso para carro e caminhão e outras máquinas, além de fácil carregamento por ser uma bancada com boa mobilidade. Tais fatores influenciaram, positivamente, na dinâmica de carregamento da bancada.

Figura 2 - Bancada antes do carregamento



Fonte: Próprio Autor (2025)

A Figura 3 acima exhibe a bancada pós detonação, permitindo notar que todas as minas foram detonadas, não gerando retrabalho e, como consequências positivas, uma granulometria adequada do material desmontado e não ocorrência de ultralancamento de fragmentos de rocha.

Figura 3 - Bancada após a detonação



Fonte: Próprio Autor (2025)

3.2 DESMONTE DE ROCHA NA EMPRESA B

O segundo plano de desmonte foi realizado na cidade de Teófilo Otoni, também localizada no Vale do Mucuri, estado de Minas Gerais. A rocha produzida e comercializada pela empresa B é gnáissica, com uma aplicação vasta nas áreas civil e pavimentação de estradas.

A formação geológica dos gnaisses encontrados na região de Teófilo Otoni está fortemente relacionada à evolução tectônica do Orógeno Araçuaí, um cinturão de dobramentos neoproterozóicos localizado entre o Cráton do São Francisco e o Bloco Jequitinhonha. Esses gnaisses compõem o embasamento cristalino da região e representam rochas metamórficas de alto grau, originadas principalmente pela transformação de rochas ígneas (como granitos e tonalitos) e sedimentares (como pelitos) submetidas a elevadas pressões e temperaturas durante

processos de colisão continental, ocorridos entre aproximadamente 600 a 500 milhões de anos atrás (Pedrosa-Soares et al., 2001; Souza & Pedrosa-Soares, 2011).

Esses eventos geodinâmicos resultaram em intenso metamorfismo regional, gerando gnaisses com mineralogia composta predominantemente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e micas (biotita e muscovita), além de minerais acessórios como granada, sillimanita e zircão. A estrutura típica dessas rochas é bandada ou foliada, refletindo a reorganização mineral durante o metamorfismo, frequentemente associada à presença de zonas de cisalhamento dúctil. Em alguns trechos da região, os gnaisses sofreram anatexia parcial, processo em que parte da rocha funde e forma estruturas migmatíticas, com leucossomos (bandas claras) e melassomos (bandas escuras), evidenciando condições de temperatura superiores a 650 °C (CPRM, 2012; Silva et al., 2008).

Na folha geológica de Teófilo Otoni, elaborada pela CPRM, os gnaisses são classificados dentro de unidades como o Complexo Gnáissico-Migmatítico e são encontrados em associação com migmatitos, anfibolitos e quartzitos. Essas unidades representam testemunhos de múltiplos ciclos tectônicos, com recristalização progressiva e deformações sucessivas. A história desses gnaisses registra desde a formação de crosta continental antiga até eventos de colisão e soerguimento que moldaram a geologia do leste mineiro. A relevância desses gnaisses vai além do aspecto acadêmico, pois eles também abrigam minerais acessórios de interesse econômico, como turmalina, granada, zircão e muscovita, frequentemente associados a zonas de fraturamento hidrotermal (Souza & Pedrosa-Soares, 2011; CPRM, 2012). A Tabela 1 apresenta as principais características dos gnaisses na região de Teófilo Otoni.

Tabela 1 - Características Petrográficas dos Gnaisses de Teófilo Otoni

Característica	Descrição
Composição Mineralógica	Quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita, muscovita; por vezes granada, sillimanita e turmalina.
Textura	Granoblástica, porfiroblástica ou lepidoblástica. Textura bandada típica (alternância de bandas claras e escuras).
Estrutura	Folheada a bandada. Presença de dobras, cisalhamento dúctil e migmatização local
Cor	Tons de cinza, branco, bege, com bandas mais escuras (biotita).
Dureza	Alta dureza (≥ 6 na escala de Mohs).
Ambiente de Formação	Subducção continental, colisão orogênica e espessamento crustal.

Fonte: CPRM (2012)

3.2.1 Planejamento e realização do desmonte

A análise minuciosa da região ajudou a escolher um plano de ação com objetivo de obter o melhor resultado para o cliente. Definiu-se o tipo de explosivo e acessórios mais adequados, garantindo a granulometria esperada pelo cliente e custos operacionais adequados, demonstrado na Figura 4. Foi feita uma avaliação prévia da bancada para planejar um plano de segurança, visto haver a proximidade de casas, pontes, prédios, sítios e outras edificações. Além disso, levou-se em conta os possíveis impactos ambientais.

Figura 4 - Plano de Fogo para a empresa B

PLANO DE DESMONTE											
CLIENTE:						Local: TEÓFILO OTONI MG				Data:	
Parâmetro do desmonte - Bancada				Bancada:				Rocha: Gneisse			
Dados da Bancada e Perfuração											
Num.	Dados	Un.	Quant.	Num.	Dados	Un.	Quant.	Num.	Dados	Un.	Quant.
1	Diâmetro dos furos	pol	3,50	7	Tampão	m	1,20	12	Crista / Início Furação	mt	2,00
2	Densidade da rocha	g/cm ³	2,80	8	Quantidade de Furos	n°	152,00	13	M1 (Frente do desmonte)	mt	2,00
3	Afastamento	m	2,00	9	Metragem furada	mt	1.717,80	14	Volume Total Desmontado	m ³	17178
4	Espaçamento	m	5,00	10	METROS TAMPÃO	n°	182,40	15	Toneladas Desmontadas	ton.	42940
5	Altura M. Bancada (com sub. F)	m	11,30	11	METROS A CARREGAR	mt	1.535,20	16	Razão de carga	g/m ²	625,87
6	Subfuração	m	0,00	12	Crista / Início Furação	mt	0,00	17	Razão de carga	g/ton.	250,3493
Explosivos Utilizados											
EMULSÕES				ANFO				REFORÇADORES			
Num.	Descrição	Un.	Quant.	Num.	Descrição	Un.	Quant.	Num.	Descrição	Un.	Quant.
18	Emulsão Bombeada	kg	0,00	23	EMULSÃO BOMBEADA	kg	10.650	24	Booster 150g	Pçs	0,00
19	Emulsão Enc. 1 X 24"	kg	0,00	24	GRANULADO	KG	0,00	25	Booster 230g	Pçs	152,00
20	Emulsão Enc. 2 X 24"	kg	0,00								
21	Emulsão Enc. 2 1/2 X 24"	kg	100								
22	Emulsão Enc. 2 1/2 X 24"	kg	0								
Procedência: CR:											
Acessórios Utilizados											
NÃO ELÉTRICOS DE COLUNA					CORDEIS						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pçs)	Num.	Descrição	Un.	Quant.			
26	BRINEL COLUNA	12	500	85	26	NP10	m	1.500,00			
27	BRINEL COLUNA	18	500	80	27	NP05	m	0,00			
28	EXEL LIGAÇÃO	0	0	0	28	NP03	m	0,00			
29	BRINEL LIGAÇÃO	0	0	0	29	NP40	m	0,00			
30	BRINEL LIGAÇÃO	0	0	0	30	NP60	m	0,00			
NÃO ELÉTRICOS DE LIGAÇÃO					RETARDOS PARA CORDEL						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pçs)	Num.	Descrição	Tempo (MS)	Qtd (Pçs)			
29	BRINEL LIGAÇÃO	6	9	0	26	RETARDO PARA CORDEL	25,00	0,00			
30	BRINEL LIGAÇÃO	6	17	39	27	RETARDO PARA CORDEL	0,00	0,00			
31	BRINEL LIGAÇÃO	6	25	57	28		0,00	0,00			
32	BRINEL LIGAÇÃO	6	42	56	29		0,00	0,00			
					30		0,00	0,00			
NÃO ELÉTRICOS LEAD LINE					ESPOLETOPIM						
Num.	Descrição	Tam. (m)	Tempo (MS)	Qtd (Pçs)	Num.	Descrição	Tam. (m)	Qtd (Pçs)			
23	BRINEL	0	0	0	26	ESPOLETOPIM	1,20	2			
Procedência: CR:											
Observações											
Carregamento		Avaliação da Fragmentação		Raio de Isolamento		Condições do Bit					
Início: 7:00 Horas		Ótimo 9 e 10		Ideal 500 metros		Novo					
Term: 17:30 Horas		Bom 7 e 8				Médio					
H. Desmonte: 17:40 Horas		Regular 5 e 6				Ruim					
Notas:		Ruim 3 e 4 Pessim 1 e 2		Técnico: CREA-MG:		Assinatura:					

Fonte: Próprio Autor (2025)

Durante a avaliação, foram averiguadas as características da rocha, tais como: boa resistência da rocha; presença de fraturas ou fissuras; e presença moderada de água. A partir da

análise de todos os parâmetros selecionou-se, como explosivo, a emulsão bombeada. A emulsão bombeada é um tipo de explosivo industrial do grupo das emulsões explosivas, composto por uma fase oxidante, geralmente o nitrato de amônio, misturada com uma massa junto com água. Esta mistura densa, viscosa e homogênea é chamada de emulsão bombeada, pelo fato de ser fabricada e carregada diretamente nos furos de desmonte por caminhões-usina. Tal procedimento reduz riscos e melhora a eficiência operacional (ABIMEX, 2021).

Existem alguns componentes utilizados para reforçar a eficácia da detonação, especialmente quando o explosivo principal tem baixa sensibilidade ao detonador comum, que é o caso da emulsão bombeada. Destaca-se, neste íterim, o Booster, que usualmente é considerado explosivo e não acessório. Este dispositivo é utilizado como intermediário entre o iniciador (detonador) e a carga principal do explosivo. Seu objetivo é garantir uma transmissão eficaz da detonação (Silva, 2015). Portanto, no presente desmonte o Booster foi aplicado para garantir a eficiência esperada.

Foram utilizados detonadores não elétricos de coluna, a fim de garantir o contato de toda a carga de coluna. Este dispositivo é um tubo plástico fino, internamente revestido com uma fina camada de material explosivo (HMX, PETN ou outro produto explosivo), geralmente de cor laranja ou amarela, com uma espoleta em sua ponta que entra em contato direto com o booster e transmite uma onda de choque de aproximadamente 2.000 m/s (Silva, 2019).

Foram utilizados retardos de 17 ms, 25 ms e 42 ms. Ressalta-se que o retardo é um acessório de extrema relevância no desmonte de rocha, tendo funções de coordenar a sequência de detonação dos furos de forma controlada e cronometrada. Desta forma, os furos saem em sequência e simultaneamente, permitindo diversas vantagens: fragmentação eficiente da rocha, redução de vibrações sísmicas, melhor aproveitamento da energia dos explosivos e aumento da segurança operacional. O retardo pode ser aplicado entre furos vizinhos ou entre fileiras de furos, com tempos que variam de milissegundos (ms) até centenas de milissegundos, dependendo do projeto de desmonte (Silva, 2019).

O estopim é um acessório explosivo utilizado para transmitir a chama ou a ignição de uma fonte de fogo (como um pavio ou isqueiro) até o explosivo principal, promovendo a iniciação controlada da detonação. Trata-se de um tubo revestido internamente por uma substância química inflamável que queima de maneira lenta e constante, permitindo o controle do tempo entre a ignição e a detonação (Silva, 2012).

Todas as informações, referentes ao presente desmonte, foram registradas no Plano de Fogo, apresentado anteriormente na Figura 4. Pode-se destacar as seguintes informações: densidade da rocha, afastamento, espaçamento, tipo de malha (estagiada pé de galinha), altura

da bancada, quantidade de furos, tampão, volume do desmonte, razão de carga, quantidade de retardo, quantidade de não elétricos (de coluna e de ligação), quantidade de emulsão bombeada e encartuchada.

Com a proximidade da empresa, casas e outras estruturas da bancada a ser desmontada, fez-se necessárias algumas providências: tamponamento controlado, adequada colocação dos retardos e preparo correto (massa, nitrito e água). Pelo fato da geração de energia ser maior com a emulsão bombeada do que com o ANFO, foram realizados vários testes com a emulsão. Sabe-se que, a cada metragem preenchida com a emulsão, a densidade muda e tal propriedade está diretamente ligada ao poder de fragmentação do explosivo. Portanto, foi necessário calcular a densidade da emulsão ao longo do carregamento.

A fim de monitorar os parâmetros de segurança, foi contratado o serviço de sismografia. Tal monitoramento tem por finalidade a geração de dados confiáveis de ruído e vibração (LOPES, 2023).

O sismógrafo foi instalado, a medição foi realizada e um relatório técnico foi gerado pela empresa prestadora de serviços. No relatório, foram avaliados os valores de vibração e ruído, os quais demonstraram estar dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras.

Tanto o planejamento quanto a execução do segundo desmonte ocorreram de maneira íntegra e satisfatória, alcançando os resultados esperados. Não houve lançamento excessivo (ultra lançamento) nem formação de fragmentos indesejados (matacos), obteve-se uma face livre de boa qualidade. Todos os explosivos e acessórios foram detonados corretamente, resultando no completo desmonte da bancada sem necessidade de retrabalhos. A granulometria resultante foi excelente, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Pós desmonte



Fonte: Próprio Autor (2025)

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu uma análise detalhada sobre os processos de desmonte de rochas em duas importantes regiões do estado de Minas Gerais: Gouveia e Teófilo Otoni. A partir do estudo das características geológicas locais e da mineralogia das rochas extraídas — quartzito em Gouveia e gnaiss em Teófilo Otoni — foi possível compreender não apenas a relevância econômica desses materiais, mas também a complexidade técnica que envolve sua extração de forma segura, eficiente e ambientalmente responsável.

A região de Gouveia, situada no Vale do Mucuri, apresenta quartzitos originados do metamorfismo de arenitos quartzosos, com alta pureza de sílica (SiO_2), o que os torna ideais para aplicação em processos industriais, especialmente na produção de silício metálico. Já Teófilo Otoni se destaca pela presença de gnaisses de alto grau metamórfico, associados ao Orógeno Araçuaí, cuja aplicação é amplamente voltada para o setor da construção civil e pavimentação. A análise geológica minuciosa das formações rochosas contribuiu para a seleção correta dos explosivos e acessórios, demonstrando que o conhecimento da origem, textura, estrutura e

composição mineralógica das rochas é essencial para a elaboração de um plano de fogo adequado e assertivo.

No primeiro plano de fogo, em Gouveia, a escolha do ANFO convencional (granulado) para a carga de coluna foi embasada nas propriedades do quartzo, como: dureza elevada, ausência de fraturas abertas, baixa umidade e excelente resistência à abrasão. A definição da malha estagiada (tipo “pé de galinha”), bem como os parâmetros técnicos como afastamento, espaçamento, altura da bancada, quantidade de furos e tipo de acessórios, resultou em uma fragmentação eficaz, sem geração de maticos, ultralançamentos ou falhas de detonação. A granulometria alcançada se mostrou adequada para o britador primário, garantindo produtividade à planta de beneficiamento da empresa contratante.

Já para o segundo plano de fogo, realizado em Teófilo Otoni, o cenário exigiu um nível maior de controle devido à proximidade de construções, presença de estruturas sensíveis e ao tipo de rocha – o gnaiss – que possui estrutura foliada, presença de zonas de cisalhamento e, eventualmente, água. Com base nesses fatores, foi adotada a emulsão bombeada, explosivo de alta performance e sensibilidade ajustável, que oferece maior segurança e controle. A escolha foi complementada pelo uso estratégico de acessórios não elétricos de coluna, estopim e retardos milimétricos, fundamentais para garantir a detonação plena e ordenada, diminuindo riscos sísmicos e promovendo fragmentações mais homogêneas.

As duas operações analisadas evidenciam que não existe uma solução padrão em engenharia de desmonte de rocha. Cada cenário requer um diagnóstico preciso das condições geológicas, estruturais e ambientais, para que a seleção dos materiais e dos parâmetros técnicos seja feita de forma personalizada. A avaliação de fatores como densidade da rocha, altura da bancada, espaçamento e afastamento entre furos, tipo de explosivo, tempo de retardo e granulometria desejada demonstrou-se essencial para atingir os objetivos técnicos e econômicos do projeto.

Além disso, este trabalho reforça a necessidade de integração entre várias áreas, e responsabilidade socioambiental. A correta execução dos desmontes não apenas otimiza o processo produtivo, como também evita retrabalhos, minimiza impactos ambientais e garante a segurança de trabalhadores, populações vizinhas e estruturas próximas.

Em síntese, o estudo dos dois casos práticos evidencia que o sucesso de uma operação de desmonte de rocha depende diretamente do conhecimento técnico e de um bom plano de fogo, sendo este embasado em uma leitura precisa das condições geológicas locais. A engenharia aplicada ao desmonte de rochas, quando bem executada, transforma desafios em resultados

concretos e sustentáveis, promovendo avanços significativos para a indústria extrativa mineral na região noroeste de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- ABIMEX. Explosivos de emulsão bombeada – aplicações e segurança. 2021.
- ABNT NBR 9653:2020 – Emprego de explosivos e acessórios na mineração.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9653: Vibrações decorrentes de detonações – Limites de vibrações para estruturas civis. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2030. Brasília: MME, 2019.
- CHICARELLI, M. I. Perfuração e desmonte de rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- COELHO. A. P; INFRAESTRUTURA DE MINA APLICADO AO PLANEJAMENTO DE LAVRA. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 2023.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2012). Mapa Geológico da Folha Teófilo Otoni – Escala 1:100.000.
- DINIZ, D. Perfuração e Desmonte de Rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral Brasileiro. Brasília: DNPM, 2010.
- ICMM – International Council on Mining and Metals. Good Practice Guidance on the Management of Environmental and Social Risks in Mining. Londres: ICMM, 2020.
- LOPES R. M. S. K; A CONTRIBUIÇÃO DA PSICOLOGIA AMBIENTAL NA ABORDAGEM DO IMPACTO DE RUÍDO E VIBRAÇÕES ORIUNDO DE DESMONTE DE ROCHA DE ATIVIDADE DE MINERAÇÃO. Escola de Arquitetura. Universidade Federal de Minas Gerais. 2023.
- Pedrosa-Soares, A.C. et al. (2001). Orogenic evolution of the Araçuaí Belt and its links to the West Congo Belt. Precambrian Research.
- Serviço Geológico do Brasil (SGB) – Mineração: Avanços e Perspectivas para 2024. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/w/mineracao-avancos-e-perspectivas-para-2024?utm_source=chatgpt.com
- SILVA, G. D. A. (2015). Explosivos na mineração: propriedades, aplicações e efeitos. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Silva, L.C. et al. (2008). Geologia da região de Teófilo Otoni (MG).
- Silva, M. G. Desmonte de rochas. Oficina de Textos. Ouro preto. Edição 1. 2019.
- SILVA, R. M. da. Explosivos e Técnicas de Desmonte de Rochas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Souza, J.S. & Pedrosa-Soares, A.C. (2011). Gnaisses e Migmatitos do Orógeno Araçuaí. Revista Brasileira de Geociências.

UFMG / IGc – Instituto de Geociências. Teses e dissertações sobre a Caracterização geoquímica e geocronológica do complexo Jequitinhonha na área tipo, Orógeno Araçuaí, 2012.

PANORAMA DOS PROCESSOS METALÚRGICOS E AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL DOS REJEITOS DA NEXA RESOURCES TRÊS MARIAS

 10.56238/livrosindi202660-009

Rômulo Eduardo Miranda

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM

Bacharel (2025) em Engenharia de Minas pela UFVJM

E-mail: romulo.miranda@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 7615450018255025

Ricardo Alves de Silva

Engenheiro de Minas (2010) e Mestre (2019) em Engenharia Mineral pela UFPE

Doutor (2019) em Ciência da Computação pela UFPE

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: ricardo.silva@ufvjm.edu.br

ID: 3636464438163605

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ

Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF

Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8848937012868572

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 4556375475161993

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES

Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras

Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES

Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros

E-mail: herbert.silva@afya.edu.br

ID Lattes: 3925629376472160

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG

Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV

Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN

Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG

Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM

Orientador deste trabalho

E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

ID Lattes: 8385118400138330

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o panorama dos processos metalúrgicos da unidade Nexa Resources localizada em Três Marias, Minas Gerais e a identificação de possíveis aproveitamentos dos rejeitos gerados. A Nexa Resources, uma das maiores empresas do setor de mineração e metalurgia no Brasil, desempenha papel crucial na produção de zinco, cobre e outros metais essenciais para a indústria global. A unidade de Três Marias é responsável por diversos processos, incluindo a extração mineral, o beneficiamento e a produção de concentrados, além do processamento metalúrgico para obtenção de metais refinados. O estudo comenta os processos de flotação, lixiviação, fundição e refino, destacando as inovações tecnológicas adotadas para otimizar a eficiência operacional e minimizar os impactos ambientais. Além disso, são discutidos os desafios logísticos, a gestão de resíduos e as práticas de sustentabilidade implementadas na unidade. Foram identificados e discutidos três artigos nos quais foram apresentadas soluções viáveis para a geração de coprodutos a partir de rejeitos gerados na metalurgia do zinco.

Palavras-chave: Processos metalúrgicos; Nexa Resources; Três Marias; Mineração; Zinco; Cobre; Tecnologias; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A mineração e a exploração comercial de recursos minerais têm contribuído, significativamente, para a introdução de metais traço na hidrosfera. Metais como mercúrio, cádmio, chumbo e arsênio, podem ser liberados no meio ambiente durante e após as operações de mineração. Os rejeitos das atividades mineiras contêm concentrações elevadas de metais e são frequentemente armazenados em barragens ou descartados em corpos d'água. A instabilidade química e geotécnica desses materiais faz com que permaneçam como uma fonte potencial de contaminação por longos períodos.

Segundo Nunes (2014), a mineração compreende à extração e o processamento de substâncias inorgânicas encontradas no reino mineral. Essas substâncias são recursos naturais finitos amplamente utilizados na produção industrial. A atividade mineral é intrínseca à organização econômica desde os tempos antigos da humanidade. Nos últimos cinco séculos, especialmente com o advento da industrialização, a produção mineral se tornou a espinha dorsal do sistema capitalista de produção. Avanços significativos em tecnologia e ciência ocorreram através da interseção de disciplinas como mineralogia, física e química, proporcionando um crescimento substancial à indústria de mineração, que se consolidou como um setor complexo e essencial em todos os processos produtivos.

Historicamente, a extração mineral tem sido frequentemente negligenciada quanto às suas implicações ambientais, sociais e econômicas. Segundo Aguiar et al. (2011), somente nas últimas décadas foram estabelecidas normas e regulamentos no Brasil para mitigar os danos decorrentes da atividade mineradora. A falta de preocupação ambiental e os impactos sociais ainda são perceptíveis nas comunidades onde ocorre ou ocorreu a mineração de metais e pedras preciosas,

sugerindo que os benefícios econômicos gerados nem sempre se traduziram em desenvolvimento sustentável para essas regiões.

A Nexa Resources, empresa alvo dos estudos deste trabalho, é uma empresa de mineração global pertencente ao grupo Votorantim. Ela desempenha um papel significativo no mercado de metais não ferrosos, sendo uma das principais mineradoras do mundo e líder na América Latina. Em 2016, a produção de zinco metálico no Brasil foi de 273,3 mil toneladas, com 186,7 mil toneladas provenientes exclusivamente da unidade de Três Marias, localizada em Minas Gerais (VOTORANTIM METAIS, 2016).

O presente trabalho foi conduzido no sentido de investigar possíveis soluções para reduzir ou eliminar a disposição de rejeitos nas barragens da unidade Três Marias, da Nexa Resources. As principais alternativas de reaproveitamento estudadas podem ser citadas: mistura de cimento aos resíduos para formar tijolos e elementos construtivos; utilização como material base para pavimentação; e utilização de uma fração dos agregados utilizados na fabricação de concreto. Todas estas alternativas possuem limitações em seu uso, e uma das principais premissas consideradas é a capacidade de imobilizar os metais contidos nos resíduos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho consistiu em um estudo bibliográfico preliminar, no qual foram investigados os processos relacionados à metalurgia do zinco e os rejeitos gerados ao longo destes processos. A partir daí, a pesquisa foi dirigida à identificação de possíveis utilidades para o rejeito gerado proveniente da atividade de mineração na Nexa Resources, unidade Três Marias. Foram avaliados alguns trabalhos já publicados como base para esse estudo bibliográfico, nos quais os coprodutos gerados gerariam benefícios para o cotidiano humano. Dos trabalhos encontrados com os referidos temas, foram selecionados e apresentados os artigos cuja viabilidade de aplicação, a nível industrial, apresentam relevância e viabilidade.

A análise baseou-se, além de fontes documentais, em visitas técnicas e entrevistas com profissionais da área, permitindo uma compreensão dos fatores que influenciam o desempenho da unidade.

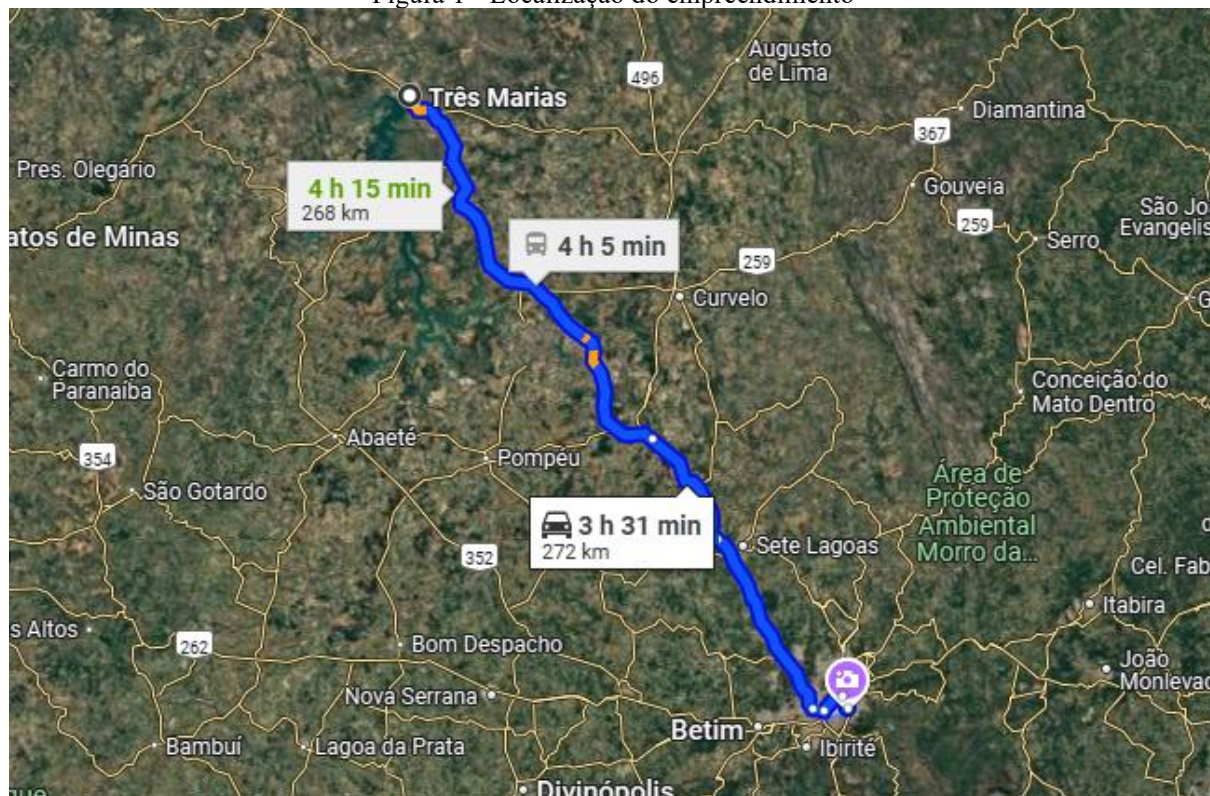
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 NEXA RESOURCES UNIDADE TRÊS MARIAS

A cidade de Três Marias está localizada na região central do estado de Minas Gerais, Brasil. Ela está situada a aproximadamente 200 quilômetros a norte da capital Belo Horizonte, ao longo do Rio São Francisco. A cidade de Três Marias é um importante centro regional e tem

sua economia voltada para a agricultura, pecuária e, principalmente, para a metalurgia, com destaque para a unidade da Nexa Resources. A Figura 1 exibe sua localização.

Figura 1 - Localização do empreendimento



Fonte: Google Maps (2024)

3.2 METALURGIA DO ZINCO

A metalurgia é um campo da ciência aplicada que abrange a produção de metais a partir de minérios, a purificação de metais, a fabricação de ligas, e a aplicação e desempenho dos metais na engenharia prática. Os processos metalúrgicos envolvem a extração e produção de metais, enquanto a metalurgia física concentra-se no comportamento mecânico dos metais (Andrade *et al.*, 1998).

A metalurgia como um campo ainda pouco explorado pela engenharia de processos implica que as soluções desenvolvidas frequentemente se limitam a análises específicas, sem considerar o impacto potencial de mudanças em uma parte da planta sobre o restante do processo. Este trabalho apresenta uma abordagem sob a ótica da engenharia para esse tipo de processo. Como estudo de caso, é analisado o processo de produção de zinco metálico em indústrias brasileiras.

A produção de zinco pode ser realizada por duas rotas distintas: hidrometalúrgica e a pirometalúrgica. A primeira opção é a rota tradicional que inclui o processo Roast-Leach-

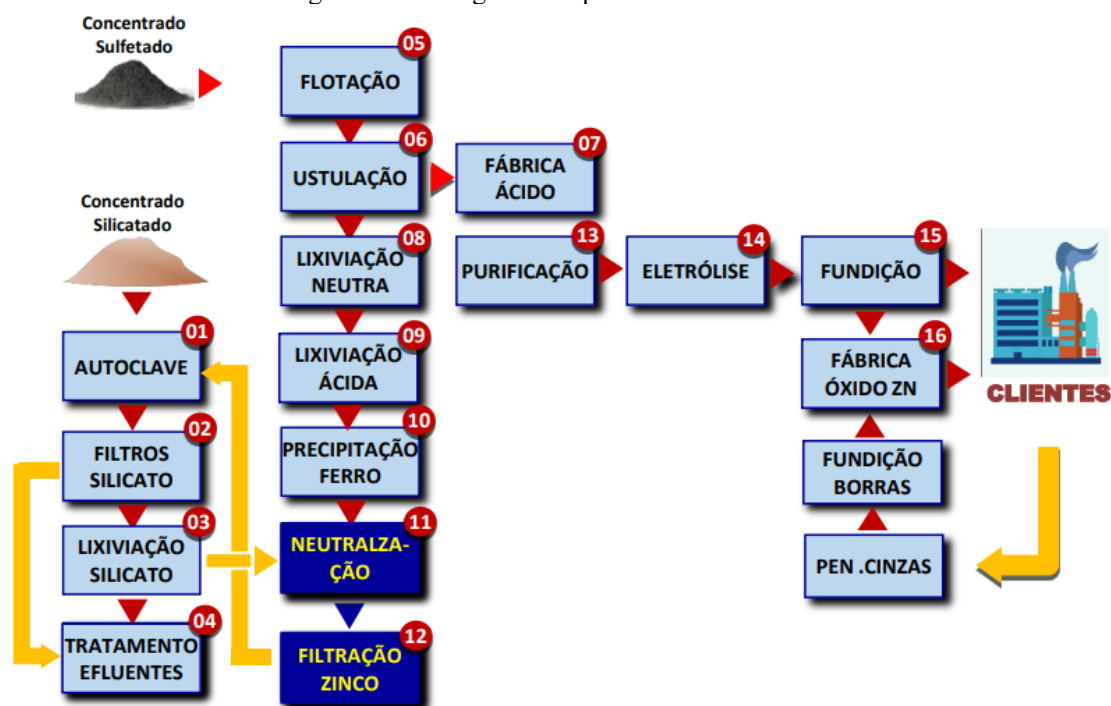
Electrowin (RLE), apresentando, como uma das principais vantagens, a obtenção do metal com elevado grau de pureza [FENEAU, 2002]. Enquanto isso, a rota pirometalúrgica é uma opção menos utilizada atualmente, que faz uso de alto fornos para realizar a redução do óxido de zinco e produzir o vapor de zinco que é condensado para obtenção do zinco metálico.

Existem dois processos principais de metalurgia do zinco: o processo pirometalúrgico, que responde por aproximadamente 20% da produção mundial de zinco, e o processo hidrometalúrgico, amplamente adotado e o mais usado globalmente (Andrade *et al.*, 1998).

No processo pirometalúrgico, também designado de Fábrica de Óxido de Zinco, o concentrado de zinco sulfetado passa, primeiramente, pelo processo de ustulação, que é oxidante com a existência de oxigênio, resultando assim com a formação de óxido de zinco e dióxido de enxofre (SO₂). Esse processo não é necessário se o minério já estiver oxidado. Depois que ocorrer a aglomeração do óxido de zinco, o material é processado em um alto-forno, produzindo vapor de zinco, que é então condensado para obter zinco metálico com aproximadamente 98% de pureza. Se for necessária uma pureza maior, o zinco é submetido a um processo de refino adicional, que envolve uma nova ebulição para a formação de vapor de zinco e posterior condensação, alcançando um zinco com 99,95% de pureza.

O processo hidrometalúrgico visa obter uma solução de sulfato de zinco com a maior pureza possível e precipitar o zinco metálico da solução por meio de eletrólise. Este processo possui as seguintes etapas: ustulação do concentrado, que visa converter o sulfeto em óxido, solúvel em ácido; lixiviação do material oxidado com ácido sulfúrico, que resulta em uma solução de sulfato de zinco; purificação da solução de sulfato de zinco, geralmente realizada pela adição de pó de zinco, que precipita impurezas como cobre, cádmio, cobalto e níquel; eletrolise da solução de sulfato de zinco, com regeneração do ácido para reutilização na lixiviação. Este processo resulta na produção de cátodos de zinco com uma pureza de 99,9%; refusão dos cátodos para a produção de zinco nas formas usuais, como lingotes ou placas (ANDRADE *et al.*, 1998). A Figura 2 exibe, de forma esquemática, o fluxograma da planta metalúrgica de Três Marias.

Figura 2 – Fluxograma da planta de Três Marias



Fonte: Votorantim Metais (2010)

Logo após os primeiros processos de beneficiamento do minério de zinco, conduzido nas mineradoras, é necessário que passe por processos para sua transformação em metal para comercialização. A seguir, são apresentados detalhes das principais etapas do fluxograma da planta metalúrgica de Três Marias.

Flotação

A flotação é uma técnica de separação de minérios que utiliza bolhas de ar para 'flutuar' as partículas minerais desejadas, separando-as das impurezas (ganga). O processo ocorre em um tanque com água, onde o minério é triturado e misturado. Ao injetar ar, as partículas minerais, tratadas com reagentes químicos, aderem às bolhas e sobem à superfície, formando uma espuma rica em minério. Os reagentes, chamados de coletores, aumentam a afinidade das partículas minerais pelas bolhas, enquanto outros aditivos auxiliam no controle da espuma e na seletividade da separação. (DELIYANNI; KYZAS; MATIAS, 2017).

Ustulação

A ustulação é um processo metalúrgico no qual um concentrado mineral é aquecido em contato com um gás, geralmente ar atmosférico ou gases enriquecidos em oxigênio. Esse tratamento térmico promove uma reação química que converte os sulfetos metálicos, presentes

em minérios como cobre, zinco e chumbo, em óxidos. Essa transformação é fundamental para a extração do metal por processos subsequentes, como a redução com carbono (SALES, 2020).

O sistema metal-enxofre-oxigênio é um sistema multicomponente complexo, caracterizado por alto grau de liberdade termodinâmica. A presença de múltiplas fases em equilíbrio, incluindo fases sólidas, líquidas e gasosas, confere ao sistema uma rica variedade de comportamentos. A composição da fase gasosa, que pode incluir SO₂, O₂, SO₃ e S₂, é fortemente influenciada pelas condições de temperatura e pressão, assim como pela composição da fase condensada.

A ustulação cloretante é um processo metalúrgico que envolve a reação de minérios com agentes clorantes a altas temperaturas. A escolha do reator, seja de leito fixo ou fluidizado, influencia diretamente a eficiência da reação e a qualidade do produto final. A estabilidade do agente cloretante e a energia livre de Gibbs das reações são parâmetros termodinâmicos cruciais para a volatilização dos cloretos metálicos e a obtenção dos produtos desejados (JAAFAR, 2014).

Autoclave e Lixiviação de Silicato

O processo autoclave na indústria de mineração é um método hidrometalúrgico empregado para a extração de metais, como o zinco, cobre e ouro, a partir de concentrados minerais complexos. Este processo ocorre em reatores autoclaves, que são equipamentos de alta pressão e temperatura. O objetivo principal do processo é maximizar a recuperação de metal e permitir a extração eficiente de metais valiosos de minérios que não podem ser tratados com métodos convencionais (VOTORANTIM METAIS, 2001).

Nesta fase, realiza-se a solubilização dos minerais que não foram removidos durante os processos de classificação por cor e densidade. Esses minerais estão presentes em altas concentrações como minério dolomítico no concentrado silicatado.

A remoção é necessária para prevenir a formação de incrustações nas tubulações e calhas, além de evitar a precipitação de seus respectivos sulfatos. O processo é realizado em uma autoclave, onde temperaturas entre 80 e 90°C favorecem a solubilização do material, permitindo a separação seletiva do zinco presente na solução. Ao final dessa etapa, a polpa com teor do material indesejado, cerca de 1,5%, é filtrada, e o filtrado é encaminhado para o tratamento de efluentes. A porção retida nos filtros segue para o processo de lixiviação do silicato, com o objetivo de extrair o zinco do silicato. A polpa gerada neste processo é então direcionada para a lixiviação neutra, integrando-se ao processo RLE. (PEREIRA, 2006 A; FEIJÓ, 2007; ABREU, 2009).

Lixiviação Neutra

Conforme Feijó (2007), o ustulado é constituído por cerca de 90% de óxido de zinco, com o restante composto por ferrita de zinco e outros óxidos metálicos. Çopur *et al.* (2004) explicam que a ustulação a altas temperaturas pode não apenas gerar concentrados de zinco, mas também resultar em resíduos na forma de ferrita de zinco e óxidos metálicos. Durante a lixiviação neutra, ocorre a solubilização do zinco presente no ustulado, além de realizar a primeira etapa de purificação da solução, removendo elementos como arsênio (As), germânio (Ge) e antimônio (Sb).

Lixiviação Ácida

De acordo com BRASIL (2009), os resíduos originados do processo de ustulação exigem condições de acidez mais intensas para sua remoção. Sua eliminação é fundamental antes do processo eletrolítico, uma vez que a presença de íons de ferro pode causar problemas no procedimento. A lixiviação ácida é realizada com o objetivo de remover esses resíduos, utilizando ácido sulfúrico concentrado para dissolver o zinco presente na forma de ferrita.

Segundo Martins (2012), A planta metalúrgica de Zinco de Três Marias enfrentou dificuldades com a espumação da lixiviação ácida a partir de meados de 2007 devido a mudanças no minério proveniente da mina de Vazante – MG. O aumento na presença de carbonatos e magnésio no minério exigiu a implementação de alternativas na planta de beneficiamento. Entre as soluções adotadas estão a flotação de carbonatos e técnicas de pré-concentração utilizando densidade e classificação ótica (*ore sorter*).

Purificação

Após as etapas de lixiviação neutra e ácida, a segunda fase da purificação tem como objetivo eliminar os metais Cd, Cu, Co e Ni, que são mais nobres do que o zinco (BRASIL, 2009 A). Feijó (2007) afirma que os processos de lixiviação geram impurezas, as quais devem ser removidas para garantir a eficiência e a qualidade da etapa de eletrólise. O autor também ressalta a relevância dos processos de cementação no beneficiamento do minério de zinco. Abreu (2009) descreve o uso de compostos de arsênio, ligas Zn-Al, Zn-Ca, Sn-Sb-Grafite, Cd-Su-Sb e sal de antimônio como ativadores na purificação. Após esse tratamento, a solução é filtrada e submetida a um novo processo para remover os excessos de zinco nos ativadores, antes de seguir para a etapa de eletrólise.

Eletrólise

A eletrólise, etapa final na produção do concentrado de zinco, envolve a passagem de uma corrente elétrica contínua entre os ânodos e cátodos, por meio da solução gerada no processo de purificação, resultando no depósito de zinco puro no cátodo (BRASIL, 2009 A). De acordo com Nicol (2005), a eficiência desse processo eletrolítico é influenciada por diversos fatores, como a concentração de Zn^{2+} , a acidez, a temperatura, a densidade da solução e as impurezas presentes nela.

Fundição

Após a eletrólise, o próximo processo que geralmente ocorre na cadeia de extração ou refino de metais é a fundição. A fundição é uma etapa essencial para transformar o metal extraído ou refinado em um produto com as características desejadas para comercialização.

Segundo Andrade *et al* (1998), a fundição é o processo de aquecer o metal até o ponto de fusão para convertê-lo em um líquido, que pode então ser moldado em diferentes formas ou lingotes, como apresentado na Figura 3. Esse processo é utilizado tanto para a produção de metais puros quanto para a fabricação de ligas metálicas (combinação de diferentes metais) para a produção de diversos produtos industriais.

Figura 3 - Lingotes prontos para comercialização Nexa Resources



Fonte: Próprio Autor (2024)

3.3 REJEITOS GERADOS NOS PROCESSOS METALÚRGICOS

O processo de metalurgia do zinco pode resultar na geração de diversos resíduos e impactos ambientais, especialmente porque o zinco geralmente está associado a outros metais como chumbo, prata e cobre. Portanto, o descomissionamento de unidades metalúrgicas

desativadas é de suma importância, especialmente do ponto de vista ambiental (ANDRADE *et al.*, 1998).

Os rejeitos são gerados, predominantemente, nas etapas de pirometalurgia, eletrolise e refinação. Estes rejeitos podem ter características variadas e requerem cuidados especiais no armazenamento devido aos riscos ambientais e de segurança, sendo passante em diversos filtros para serem liberados após o processo.

O rejeito da Unidade de Três Marias em Minas Gerais, objeto de estudo desse trabalho, é composto principalmente por minerais que contêm elementos metálicos como Zn e Pb. Estes elementos podem ser utilizados, entre outras aplicações, como nucleantes na fabricação de vidros, com vistas à produção de vitrocerâmicas (NAVARRO, 1985).

3.4 TRABALHOS TÉCNICOS ESTUDADOS

Foram selecionados, para o desenvolvimento da pesquisa, três trabalhos técnicos sobre a caracterização e aplicação de rejeitos gerados na unidade Três Marias em fins úteis para a sociedade. A Tabela 1 apresenta estas publicações.

Tabela 1 – Trabalhos Técnicos Selecionados para o Estudo

Autor	Ano de publicação	Título	Finalidade
Leite <i>et al</i>	2023	Economia circular: Estudo para utilização do resíduo do beneficiamento de zinco para fins industriais.	Uso do rejeito como corretor de acidez do solo e matéria prima para produção de clínquer.
Fonseca <i>et al</i>	2019	Uso de Rejeitos de mineração como matéria-prima para produção de materiais vitrocerâmicos.	Uso do rejeito como matéria prima para materiais vitrocerâmicos.
Coimbra <i>et al</i>	2004	Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland.	Uso do rejeito como agregado de cimento.

Fonte: próprio autor (2024)

3.4.1 Economia circular: Estudo para utilização do resíduo do beneficiamento de zinco para fins industriais

Este estudo de caso analisou o uso do resíduo do beneficiamento do minério de zinco, especificamente o underflow da flotação W (willemita) e C (calamina), como matéria-prima industrial. A Figura 4 nos apresenta o conceito de economia circular e utilização consciente dos recursos.

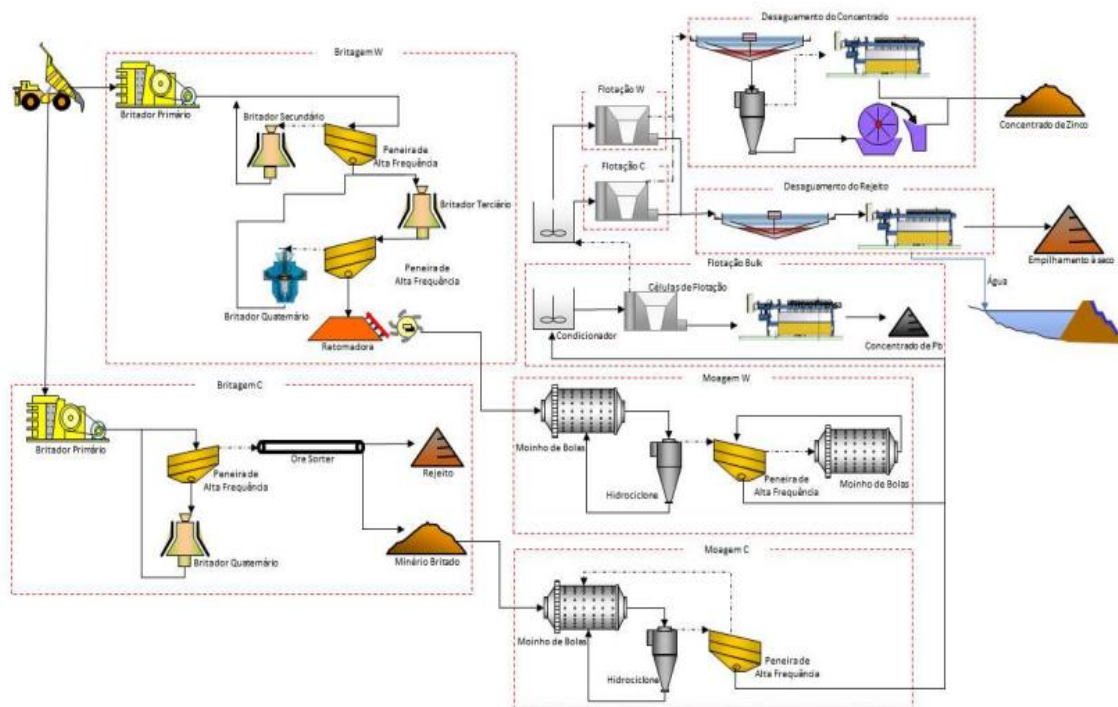
Figura 4 - Fluxograma Economia Circular



Fonte: Apcer Group (2023)

O objetivo foi realizar um estudo conceitual sobre as possibilidades de utilização de um resíduo do beneficiamento de minério de zinco, que atualmente é destinado a empilhamento a seco, bem como comparar as características do rejeito (umidade, densidade, granulometria e composição química) com os requisitos técnicos de mercado para aplicações usuais, tais como: corretivo de acidez, clínquer ou escorificante. A pesquisa focou no uso de dolomita, que compõe 73,9% da amostra, como fonte de óxido de cálcio e magnésio. Embora o resíduo precise de ajustes, especialmente em relação à umidade, metais pesados e granulometria, ele pode ser utilizado nas indústrias agrícola, cimenteira e metalúrgica, contribuindo para reduzir o passivo ambiental da mineradora. Na Figura 5, tem-se um fluxograma de uma unidade de beneficiamento de zinco.

Figura 5 - Fluxograma de beneficiamento de unidade mineradora de Zinco



Para identificação dos minerais, executou-se a análise de difração de raios X, através do método do pó total utilizando o difratômetro MiniFlex 300 da rigaku, sendo considerados os seguintes parâmetros: ângulo de 10-80°, com o passo de 0,02° a uma velocidade de 1,5°/min no modo *continuous*. A partir da densidade dos picos observados no difratograma e aplicação do método de refinamento de Rietveld, foi possível estimar o teor global de minerais constituintes do rejeito, sendo os principais: dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2), willemita (Zn_2SiO_4) e caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A Tabela 2 apresenta os percentuais encontrados, para cada amostra, na amostra.

Tabela 2 – Porcentagem de massa das fases cristalinas identificadas por difração de Raios-x

Amostra	Dolomita	Hematita	Quartzo	Willemita	Caulinita
Global	73,9%	20,6%	3,0%	1,5%	1,0%

Constatou-se potenciais de utilização do material para alimentar alguns processos industriais, desde que sejam feitas as adequações necessárias. No tocante a ser utilizado como corretivo de acidez, as principais dificuldades são a concentração de metais pesados e a umidade. Para a utilização como clínquer, faz-se necessário efetuar a separação do CaO e MgO antes do processo de calcinação. A presença excessiva de hematita também é um complicador para a

produção de clínquer. Além disso, considerando o escorificante, é preciso efetuar a diminuição do teor de SiO₂.

As aplicações levantadas apresentam um futuro promissor para o resíduo. Uma vez que viáveis, as hipóteses apresentarão grande consumo de um material, podendo ser fundamental no descomissionamento das barragens, como também na diminuição da quantidade de resíduo disposto à seco. A depender do modelo de negócio desenvolvido, tais aplicações podem passar de passivo para geradores de receita para a empresa.

3.4.2 Uso de Rejeitos de mineração como matéria-prima para produção de materiais vitrocerâmicos

O presente estudo busca uma solução para o rejeito gerado a partir da “Torta dos filtros Belt”. A solução proposta visa utilizar os metais do rejeito de Três Marias para a produção de um material vítreo, obtido pela fusão a 1400°C do rejeito, com grande potencial para reduzir sua disposição em barragens. A Tabela 3 indica a análise química do rejeito utilizado no presente estudo

Tabela 3 - Análise química do rejeito “Torta dos Filtros Belt”

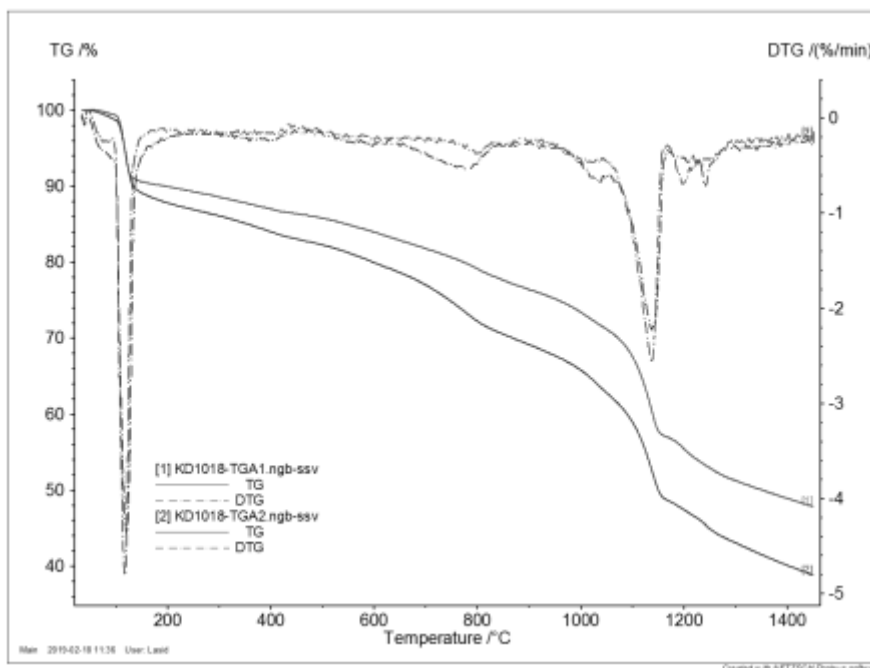
Elemento	Composição (%)	Metodologia
Zn	2,49	ICP – Plasma
SiO ₂	27,68	Gravimetria
Fe	8,96	Absorção atômica
Ca	8,48	ICP – Plasma
Pb	1,56	ICP – Plasma

O processo de cristalização, através de um tratamento térmico a 850°C, gera um material vitrocerâmico, predominantemente composto por hedenbergita, que pode ser moldado em placas com propriedades semelhantes aos materiais cerâmicos usados na construção civil. A proposta foi testada com amostras, que passaram por ensaios de lixiviação, comprovando a imobilização completa dos metais. A tecnologia oferece a possibilidade de gerar receita com a venda de um novo produto para pisos e revestimentos, alinhando-se ao conceito de Economia Circular.

A constituição química do rejeito estudado contribuiu no desenvolvimento de um material vitrocerâmico que tanto pode ser obtido pela cristalização volumétrica de placas de vidro já conformadas, como pela cristalização de painéis obtidos a partir da frita gerada pela fusão do rejeito a 1400 °C.

Nas análises termogravimétricas, foi observada uma perda de água em torno de 110°C, associado a um conjunto de volatilizações que se intensificam a partir de 1150°C, provavelmente correspondente à decomposição do sulfato presente, associadas à geração de SO₂/SO₃. A perda de massa total registrada está na faixa de 50% a 60%. A Figura 6 apresenta as referidas análises termogravimétricas.

Figura 6 - Análises termogravimétricas (TGA) do rejeito



Tendo em vista que esse material pode ser produzido utilizando-se as mesmas linhas de produção e equipamentos da indústria de pisos e revestimentos cerâmicos, e com parâmetros similares de operação, e ainda considerando-se que a matéria-prima principal é um rejeito, é perfeitamente plausível admitir que os custos de produção serão competitivos com os dos pisos hoje ofertados no mercado. A Figura 7 exhibe algumas peças obtidas a partir do rejeito estudado.

Figura 7 - Peças de vidro (esquerda) e vitro-cerâmica (direita) obtidas a partir do rejeito



Fonte: Fonseca *et al* (2019)

Ressalta-se que estes produtos poderão ser produzidos utilizando-se as mesmas linhas de produção e equipamentos da indústria de pisos e revestimentos cerâmicos, além de seguirem parâmetros similares de operação. Levando-se em consideração que a matéria-prima principal é um rejeito, é possível admitir que os custos de produção serão competitivos com os dos pisos hoje ofertados no mercado.

3.4.3 Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland

Este trabalho teve, como objetivo, recuperar resíduos de pilhas zinco-carvão para utilizá-los como aditivos em argamassas e concretos, oferecendo uma solução ambiental ao incluir esses resíduos na indústria brasileira de reciclagem. Foram realizadas diversas análises para caracterizar as pilhas, como densidade real, área específica (BET), difração de raios X, pH, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia dispersiva de raios X. O estudo avalia as possibilidades de uso desse rejeito na construção civil, especialmente em cimento Portland, argamassas e concreto. A Tabela 4 apresenta as propriedades do cimento Portland Itaú. Por sua vez, a Tabela 5 exibe as propriedades do rejeito pilha zinco-carvão.

Tabela 4 - Propriedades do cimento Portland Itaú.

Propriedade	Quantificação
Aparência	Pó cinza claro
Densidade real	3,18 g/cm ³
Área superficial específica	3,15 m ² /g
pH	12,7

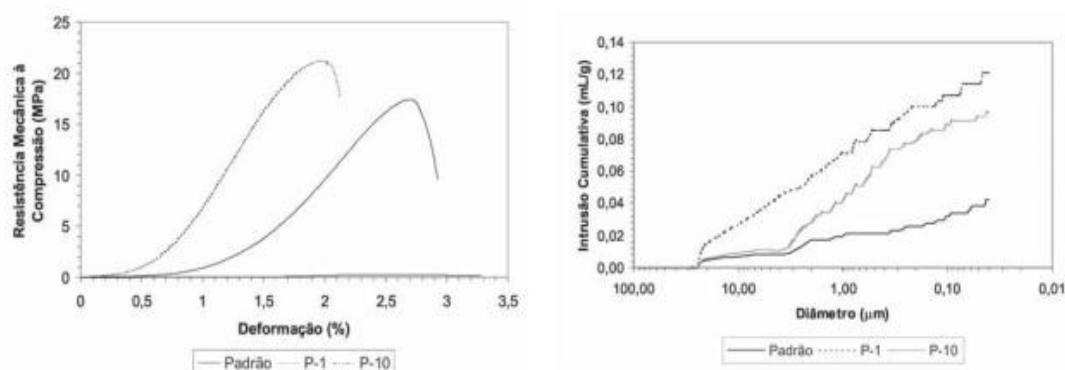
Tabela 5 - Características físicas da pilha zinco-carvão

Propriedade	Quantificação
Aparência	Pó preto
Densidade real	3,63 g/cm ³
Área superficial específica	4,43 m ² /g
pH	6,148

O rejeito da pilha zinco-carvão não apresentou estrutura cristalina, sendo necessária outra técnica para identificação das fases, assim como a espectroscopia dispersiva de energia por raios X (EDS), diferente da difração de raios X.

Inclusive, mostrou características de “esfarelamento” e perda de partículas de areia e brita, não mantendo a homogeneidade em sua utilização (Figura 8).

Figura 8 - Resistência da amostra de concreto com a adição do rejeito.



Observou-se que o concreto, com adição de 1% em peso de pilha zinco-carvão, aumentou a resistência mecânica à compressão e diminuiu a deformação, em relação ao concreto padrão (sistema com controle de carga). Porém, com 10% de adição, o concreto não apresentou fase aglomerante suficiente para apresentar resistência. Inclusive, mostrou características de “esfarelamento” e perda de partículas de areia e brita, não mantendo a homogeneidade em sua utilização.

3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Pode-se verificar que houve resultados positivos para as propostas definidas pelos três trabalhos técnicos estudados. É possível vislumbrar, portanto, que a utilização de novas tecnologias e novos métodos para o processamento e utilização de materiais denominados de “rejeitos” e considerados, atualmente, como um problema para a sociedade, poderá viabilizar novos tempos para a mineração. A busca pelo desenvolvimento sustentável é uma premissa importante a ser seguida pelas empresas.

Pode-se citar, como um dos pontos positivos para a utilização do rejeito como matéria prima, a redução do impacto ambiental. Tal iniciativa gera uma diminuição da quantidade de resíduos depositados em aterros ou despejados no meio ambiente, contribuindo para a preservação de ecossistemas e a redução da poluição. Outra questão relevante é a economia de recursos naturais.

Neste íterim, a utilização de rejeitos como matéria-prima reduz a necessidade de explorar novos recursos naturais, ajudando na conservação de matérias-primas raras e esgotáveis. Além disso, o processamento sustentável de rejeitos usualmente acarreta redução de custos de produção. Há, desta forma, a promoção da economia circular, onde os resíduos de um

processo tornam-se insumos para outro. Isso diminui a dependência de recursos não renováveis e diminui a pegada de carbono da produção.

A busca por soluções inovadoras para o aproveitamento de rejeitos pode incentivar novas tecnologias, resultando em novos processos e produtos. A transformação de matérias-primas consideradas “desperdícios” em recursos valiosos cria novas cadeias produtivas, gerando novas oportunidades de negócios.

Como dificuldades, pode-se citar a gestão da qualidade dos produtos. Os rejeitos podem apresentar grande variabilidade de composição, gerando dificuldades na padronização e qualidade do produto. Neste ínterim, faz-se necessário um maior controle de processo e, em alguns casos, tecnologias avançadas para garantir que os materiais atendam aos padrões exigidos. Podem acontecer contaminações por substâncias tóxicas ou perigosas, exigindo uma análise rigorosa de sua composição e processos de descontaminação para evitar riscos à saúde humana e ambiental.

Face a determinados desafios, podem ser necessárias tecnologias específicas e mais avançadas, elevando os custos de implementação, bem como investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Ressalta-se, também, a necessidade de garantir que o uso de rejeitos esteja coerente com as regulamentações ambientais e de segurança. Além disso, há que se considerar desafios logísticos e de armazenamento, especialmente quando esses materiais são volumosos, pesados ou têm características que dificultam o manejo, como umidade ou instabilidade química.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos a partir dos trabalhos observados nos processos, foi possível verificar o impacto positivo que seria o aproveitamento dos resíduos industriais sem utilização.

Em todos os trabalhos analisados, houve a obtenção de resultados satisfatórios, evidenciando a eficácia das metodologias aplicadas e o cumprimento dos objetivos propostos, o que demonstra o sucesso das abordagens utilizadas para alcançar os resultados esperados.

O trabalho “Economia circular: Estudo para utilização do resíduo do beneficiamento de zinco para fins industriais” analisou as possibilidades de uso dos rejeitos para correção de solos agricultáveis e para a produção de clínquer. Foram evidenciados os desafios e adequações necessárias para tais processos.

O artigo “Uso de Rejeitos de mineração como matéria-prima para produção de materiais vitrocerâmicos” apresentou uma destinação consciente e plausível para o rejeito, demonstrando que a tecnologia existente é capaz de reprocessar os rejeitos e gerar produtos que atendem as especificações exigidas.

No trabalho “Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland”, identificou-se ganhos significativos com a presença do rejeito no experimento.

A utilização de rejeitos como matéria-prima tem um grande potencial para a sustentabilidade, gerando benefícios econômicos, ambientais e sociais. No entanto, é necessário superar as dificuldades associadas à variabilidade dos materiais, à necessidade de tecnologias específicas e aos riscos de contaminação. Com avanços tecnológicos, investimentos em pesquisa e adaptação dos processos, esses desafios podem ser enfrentados, ampliando cada vez mais o uso de rejeitos na indústria.

Foi observado que, em todas as metodologias empregadas entre os artigos pesquisados, o maior desafio se dá como a forma de inertizar os metais pesados. O principal problema enfrentado é a necessidade de impedir que as concentrações desses metais, mesmo que pequenas em alguns casos, cheguem ao solo e acabem fazendo uma contaminação local ou até mesmo regional, dependendo das suas quantidades.

Pode-se considerar que o objetivo geral do trabalho foi atendido. Foram apresentadas algumas alternativas viáveis e funcionais para aproveitamento desse material que, muitas vezes, consiste em um grande passivo para as empresas, podendo tornar-se uma grande fonte de problemas após os fechamentos das barragens ou pilhas desses rejeitos.

REFERÊNCIAS

- ABIMEX. Explosivos de emulsão bombeada – aplicações e segurança. 2021.
- ABNT NBR 9653:2020 – Emprego de explosivos e acessórios na mineração.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9653: Vibrações decorrentes de detonações – Limites de vibrações para estruturas civis. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2030. Brasília: MME, 2019.
- CHICARELLI, M. I. Perfuração e desmonte de rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- COELHO. A. P; INFRAESTRUTURA DE MINA APLICADO AO PLANEJAMENTO DE LAVRA. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 2023.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2012). Mapa Geológico da Folha Teófilo Otoni – Escala 1:100.000.
- DINIZ, D. Perfuração e Desmonte de Rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral Brasileiro. Brasília: DNPM, 2010.
- ICMM – International Council on Mining and Metals. Good Practice Guidance on the Management of Environmental and Social Risks in Mining. Londres: ICMM, 2020.
- LOPES R. M. S. K; A CONTRIBUIÇÃO DA PSICOLOGIA AMBIENTAL NA ABORDAGEM DO IMPACTO DE RUÍDO E VIBRAÇÕES ORIUNDO DE DESMONTE DE ROCHA DE ATIVIDADE DE MINERAÇÃO. Escola de Arquitetura. Universidade Federal de Minas Gerais. 2023.
- Pedrosa-Soares, A.C. et al. (2001). Orogenic evolution of the Araçuaí Belt and its links to the West Congo Belt. Precambrian Research.
- Serviço Geológico do Brasil (SGB) – Mineração: Avanços e Perspectivas para 2024. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/w/mineracao-avancos-e-perspectivas-para-2024?utm_source=chatgpt.com
- SILVA, G. D. A. (2015). Explosivos na mineração: propriedades, aplicações e efeitos. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Silva, L.C. et al. (2008). Geologia da região de Teófilo Otoni (MG).
- Silva, M. G. Desmonte de rochas. Oficina de Textos. Ouro preto. Edição 1. 2019.
- SILVA, R. M. da. Explosivos e Técnicas de Desmonte de Rochas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Souza, J.S. & Pedrosa-Soares, A.C. (2011). Gnaisses e Migmatitos do Orógeno Araçuaí. Revista Brasileira de Geociências.

UFMG / IGc – Instituto de Geociências. Teses e dissertações sobre a Caracterização geoquímica e geocronológica do complexo Jequitinhonha na área tipo, Orógeno Araçuaí, 2012.

SEGURANÇA HÍDRICA NO NORTE DE MINAS GERAIS: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS NA GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

 10.56238/livrosindi202660-010

Wagner Cesar da Silva Lossano

Bacharel (2022) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM
Graduando em Engenharia de Minas pela UFVJM
E-mail: wagner.lossano@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 1635520548046263

Talívia Rodrigues Brito

Bacharel (2024) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM
Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM
E-mail: talivia.rodrigues@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 0713759084403203

Cleyton Fernandes de Souza

Graduando em Engenharia de Minas pela UFVJM
E-mail: cleyton.fernandes@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 2903020405745124

Joyce Gabriele Lopes Silva

Graduanda em Engenharia de Minas pela UFVJM
E-mail: cleyton.fernandes@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 2844356695040792

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 4556375475161993

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

RESUMO

A segurança hídrica no Norte de Minas enfrenta desafios ligados à escassez e ao uso insustentável da água. O termo "segurança hídrica" surgiu na literatura internacional na década de 1990. Este trabalho destaca a importância da gestão integrada das bacias hidrográficas e do uso racional das águas subterrâneas como estratégias fundamentais para garantir o abastecimento, preservar os ecossistemas e promover o desenvolvimento sustentável na região, especialmente em cenários de crise hídrica e mudanças climáticas. O Índice de Segurança Hídrica (ISH), foi criado para retratar com ferramentas claras e diretas, as dimensões de segurança hídrica, com quatro elementos principais, dimensão humana, dimensão econômica, dimensão ecossistêmica e dimensão de resiliência.

Palavras-chave: Recursos hídricos; Gestão ambiental; Semiárido mineiro; Conservação da água; Participação social.

1 INTRODUÇÃO

A segurança hídrica tem se consolidado como um tema central nas agendas ambientais, sociais e econômicas, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela intensificação da pressão sobre os recursos naturais. Esse conceito abrange não apenas a disponibilidade de água, mas também a capacidade de garantir o abastecimento em quantidade e qualidade adequadas para diferentes usos doméstico, agrícola, industrial e ecológico ao mesmo tempo em que se minimizam os riscos associados à escassez, contaminação e eventos hidrológicos extremos, como secas prolongadas e inundações severas (TUCCI & CHAGAS, 2015).

Para assegurar essa segurança de forma duradoura, é necessário adotar uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, que articule conhecimento técnico, participação social e políticas públicas eficazes. Essa abordagem envolve o fortalecimento das estruturas de governança hídrica, investimentos em infraestrutura, proteção dos mananciais e, sobretudo, o manejo racional das águas subterrâneas, especialmente em regiões onde os recursos superficiais são escassos ou vulneráveis (ONU, 2018). Nesse contexto, os aquíferos ganham importância estratégica, pois desempenham papel fundamental no abastecimento humano e na manutenção de ecossistemas resilientes.

No Brasil, essas questões são particularmente relevantes nas regiões semiáridas, onde a irregularidade das chuvas e os processos de degradação ambiental agravam a crise hídrica. O

Norte de Minas Gerais representa um recorte emblemático dessa realidade, por ser uma região marcada por limitações climáticas severas, perda de cobertura vegetal e baixa disponibilidade hídrica superficial, o que intensifica a dependência das águas subterrâneas para o abastecimento urbano, rural e agrícola (ALMG, 2017). A atuação de órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Águas, e o alinhamento às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, evidenciam a necessidade de promover soluções adaptadas às especificidades territoriais e climáticas.

Nesse cenário, destaca-se o papel da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), cuja atuação na prestação de serviços de abastecimento e saneamento básico tem sido considerada um modelo de eficiência em diversas regiões do estado. Estudos comparativos demonstram que a empresa apresenta desempenho positivo em indicadores operacionais, como cobertura de abastecimento, hidrometração e racionalização de mão de obra, sobretudo quando comparada à gestão direta por prefeituras (HELLER; COUTINHO; MINGOTI, 2006). No entanto, a empresa também é associada a tarifas mais elevadas, que impactam a renda familiar, além de apresentar uma concentração significativa de pessoal em atividades administrativas, o que levanta questões sobre equidade e justiça social no acesso aos serviços.

Além disso, a dependência crescente dos aquíferos no estado de Minas Gerais e em particular no semiárido mineiro exige atenção especial aos sistemas subterrâneos, como o aquífero cárstico da Jaíba, que abastece diversos municípios da região Norte. Estudos hidrogeológicos indicam a complexidade estrutural e a alta variabilidade das características hidrodinâmicas desse aquífero, com transmissividades variando entre 5 m²/dia, em zonas menos permeáveis, e até 500 m²/dia, em áreas de maior carstificação (SILVA et al., 1982). Essa heterogeneidade, somada a padrões distintos de recarga e descarga como a resposta rápida às chuvas no Morro Catarino e na Serra do Sabonetal, exige critérios técnicos rigorosos para garantir a exploração sustentável, evitando zonas argilosas e priorizando fraturas e dolinas orientadas.

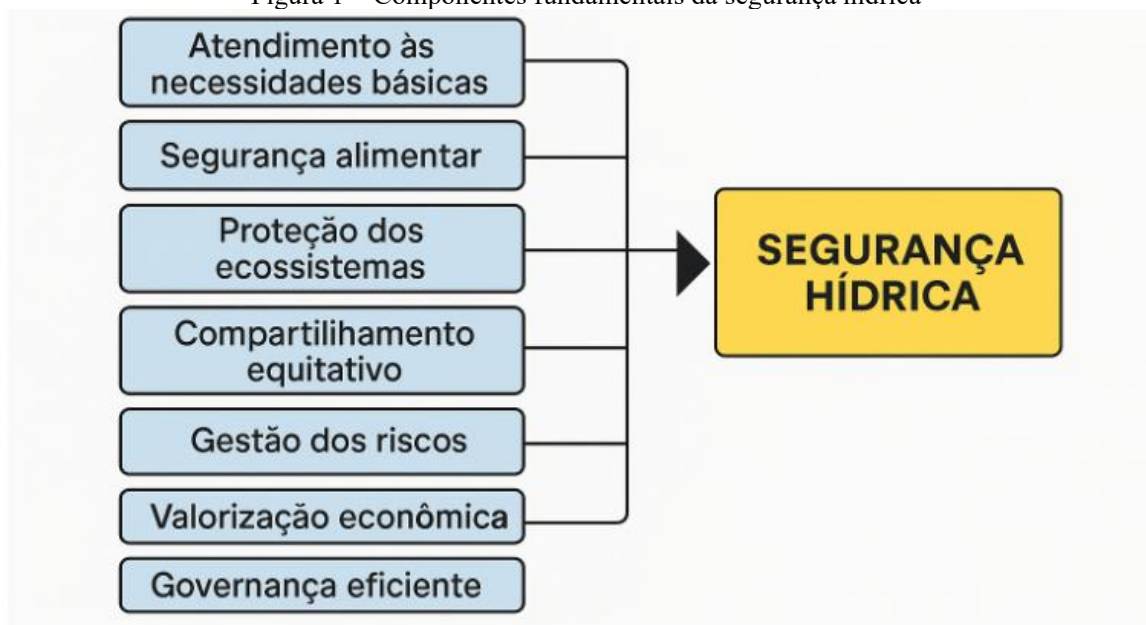
Dessa forma, este trabalho propõe-se a analisar os desafios e as oportunidades para a segurança hídrica no Norte de Minas Gerais, com foco na gestão sustentável dos recursos subterrâneos e no papel das instituições de saneamento frente às transformações climáticas e às crescentes demandas sociais. A relevância do estudo reside na busca por soluções integradas que conciliem conservação ambiental, inclusão social e desenvolvimento regional sustentável, contribuindo para políticas públicas mais eficazes e alinhadas à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2018).

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Segundo Cook e Bakker (2012) apud Tucci e Chagas (2018) o termo segurança foi cunhado na literatura internacional na década de 1990, associado inicialmente a políticas de recursos hídricos, agricultura, abastecimento humano, uso industrial, proteção ambiental e gestão de desastres naturais.

A primeira definição formal do termo ocorreu no Segundo Fórum Mundial da Água, realizado em 2000 em Haia. Este evento, que reuniu cerca de 5.700 participantes de 130 países, localizados a segurança hídrica como um conceito multidimensional, abrangendo sete aspectos exibidos na Figura 1.

Figura 1 – Componentes fundamentais da segurança hídrica



Fonte: Adaptado de Segundo Fórum Mundial da Água (2000).

Essa definição pioneira, consolidada na Declaração de Haia, marcou um ponto de inflexão nas discussões globais sobre água, estabelecendo as bases para o desenvolvimento de políticas e enquadramentos internacionais relacionados à gestão sustentável dos recursos hídricos. Desde então, o conceito de segurança hídrica tem evoluído e se expandido, incorporando novas dimensões, como os impactos das mudanças climáticas, a necessidade de cooperação em bacias transfronteiriças e o papel da inovação tecnológica. O tema permanece como um eixo central nos debates dos subsequentes Fóruns Mundiais da Água e na agenda global de desenvolvimento sustentável.

No Brasil, uma discussão sobre segurança hídrica ganhou forma com a promulgação da Lei das Águas em 1997, que são instrumentos de dinâmica importantes, como a outorga e o

enquadramento de rios. No entanto, enquanto a lei avançava no papel, muitas comunidades ainda enfrentam a escassez de água ou eram afetadas por enchentes devastadoras. O desafio brasileiro sempre foi transformar boas ideias em ações concretas, especialmente em regiões onde a seca não é uma emergência, mas uma realidade cotidiana.

No Norte de Minas, essa realidade é ainda mais severa. A região enfrenta longos períodos de estiagem, onde famílias agricultoras veem seus poços secarem e suas plantações murcharem. Aqui, a segurança hídrica não é apenas um conceito técnico; trata-se de garantir que as famílias tenham água para beber, que os produtores consigam irrigar suas plantações e que os rios não desapareçam. Enquanto órgãos como o IGAM e os Comitês de Bacia tentam equilibrar o uso da água, a população local está ciente de que, sem cuidados adequados, o futuro pode ser ainda mais seco do que o presente.

Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH)

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), um Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) é compreendido como um colegiado que congrega representantes do poder público, dos usuários da água e da sociedade civil, com a finalidade de promover a gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica.

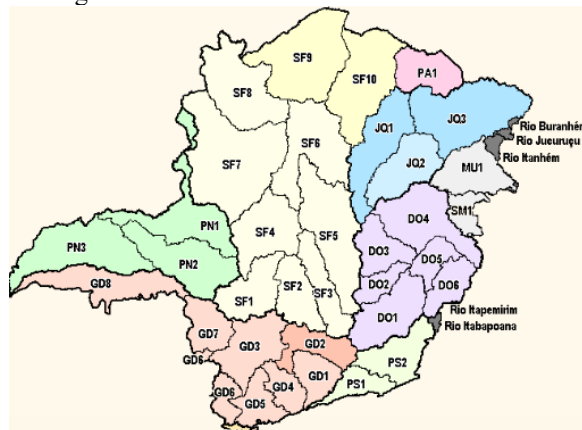
Nesse contexto, a estrutura dos CBHs contempla três segmentos principais: representantes governamentais (incluindo a União, os estados, o Distrito Federal e os Municípios abrangidos pela bacia), usuários dos recursos hídricos e organizações da sociedade civil atuantes na área. A composição de cada segmento, bem como os critérios de indicação dos membros, são definidos nos regimentos internos dos próprios comitês, podendo também ser regulamentados por legislações estaduais específicas. Ressalta-se, contudo, que a participação do poder executivo deve se restringir a, no máximo, 50% do total de membros, a fim de assegurar o equilíbrio entre os setores e garantir a efetiva representatividade social no processo decisório (Cardoso, 2003).

Em Minas Gerais, a estrutura de governança das águas contempla atualmente 34 Comitês de Bacia Hidrográfica instituídos. Esses colegiados foram implementados de forma gradual entre os anos de 1998 e 2009, com o propósito inicial de compor 36 comitês — um para cada Circunscrição Hidrográfica (CH) do estado. No entanto, em 2023, foi realizada a fusão de quatro comitês, como parte de um processo de racionalização administrativa e financeira voltado à melhoria da gestão participativa das águas. Como resultado, o número total de CBHs mineiros foi reduzido de 36 para 34 (IGAM, 2025).

Diante disso, a atuação dos CBHs é estratégica para a promoção da segurança hídrica nas regiões hidrográficas, especialmente em contextos de escassez, conflitos de uso e

vulnerabilidades ambientais. Ao reunir diferentes setores sociais em torno de um processo decisório coletivo, os comitês contribuem para a alocação equilibrada da água, o fortalecimento das capacidades locais de planejamento e a integração entre políticas públicas setoriais. Em regiões com histórico de estresse hídrico, como o Norte de Minas Gerais, o fortalecimento desses colegiados é condição essencial para garantir o uso sustentável e equitativo dos recursos hídricos. A Figura 2 apresenta os CBHs localizados no estado de Minas Gerais.

Figura 2 - Comitês do estado de Minas Gerais



Fonte: IGAM, 2025

Por que não é possível perfurar poços de forma indiscriminada?

O uso de águas subterrâneas, por meio da perfuração de poços tubulares é uma prática recorrente em regiões com déficit de oferta hídrica superficial, como ocorre na região Norte de Minas Gerais. Contudo, a perfuração de poços não é uma ação livre de regras ou implicações. Ao contrário, está sujeita a normas legais, critérios técnicos e condicionantes ambientais, justamente para evitar impactos negativos à quantidade e à qualidade dos aquíferos.

De acordo com a Lei Federal nº 9.433/1997 e com os marcos estaduais, como a Lei nº 13.199/1999 (MG), qualquer intervenção em recurso hídrico, seja superficial ou subterrâneo, depende de outorga ou autorização do órgão gestor, que, no caso de Minas Gerais, é o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). A perfuração sem licença configura infração ambiental e pode gerar penalidades, inclusive com lacração do poço e multas (IGAM, 2024).

Além do aspecto legal, há motivos técnicos e hidrogeológicos para limitar a perfuração indiscriminada. Os aquíferos são sistemas dinâmicos e interconectados, com capacidade limitada de recarga. Em regiões com sobreuso ou com baixa recarga natural, como em áreas de clima semiárido, a perfuração descontrolada apresenta diversas consequências para o aquífero como rebaixamento do nível freático, salinização da água e até à extinção de nascentes superficiais conectadas (REBOUÇAS, 2006).

Também deve-se considerar o impacto cumulativo das perfurações no território. Quando vários usuários, públicos e privados, extraem água de um mesmo aquífero sem coordenação, ocorrem conflitos de uso, redução da disponibilidade para usos prioritários (como o abastecimento humano) e comprometimento da segurança hídrica regional. Por essa razão, os órgãos gestores adotam políticas de controle e zoneamento da perfuração, priorizando áreas com maior potencial hidrogeológico e restringindo o uso em zonas críticas ou de conflito (ANA, 2022).

Logo, a pergunta "Por que não é possível perfurar poços de forma indiscriminada?" deve ser respondida não apenas com base na legalidade da ação, mas na responsabilidade coletiva pelo uso sustentável da água subterrânea. A gestão responsável dos poços, amparada por estudos técnicos e regulada por instrumentos como a outorga e o monitoramento, é fundamental para garantir que essa fonte estratégica continue a atender às populações de forma segura e equilibrada, sobretudo em regiões vulneráveis com a escassez de água como no Norte de Minas Gerais.

Instrumentos de Gestão Legal dos Recursos Hídricos

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, estabeleceu um conjunto de instrumentos de gestão com o objetivo de assegurar o uso racional e sustentável da água no território brasileiro. Esses instrumentos visam compatibilizar os diversos usos da água, garantir a sua disponibilidade em quantidade e qualidade adequadas e prevenir conflitos entre os usuários. Entre os principais mecanismos previstos em lei, destacam-se: a outorga de direito de uso, o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, os planos de recursos hídricos e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A outorga de direito de uso da água é o instrumento que regula o acesso aos recursos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos. Nenhuma captação significativa pode ser realizada sem prévia autorização do órgão gestor. Em Minas Gerais, esse processo é coordenado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que analisa critérios técnicos, a disponibilidade hídrica e os usos preexistentes na bacia. A outorga é fundamental para coibir a exploração desordenada e garantir o controle do uso da água em situações de escassez ou conflito (IGAM, 2024).

Outro instrumento essencial é o enquadramento dos corpos d'água em classes, conforme seus usos preponderantes, de acordo com padrões de qualidade definidos na Resolução CONAMA nº 357/2005. O enquadramento orienta ações de planejamento e controle da poluição,

funcionando como referência para investimentos em saneamento, preservação e recuperação ambiental (ANA, 2022).

A cobrança pelo uso da água tem como função reconhecer a água como um bem econômico e incentivar o uso eficiente. Os valores arrecadados devem ser reinvestidos na própria bacia hidrográfica, em ações como monitoramento, obras de conservação e educação ambiental. Em Minas Gerais, a cobrança é regulamentada pelo Decreto Estadual nº 48.160/2021, que estabelece os procedimentos para sua implementação no âmbito do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH/MG), respeitando as deliberações dos Comitês de Bacia e os critérios definidos em regulamentos específicos (MINAS GERAIS, 2021).

Por fim, o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (SIRH) constitui a base de dados oficial que subsidia o processo decisório e a transparência na gestão das águas. Ele reúne dados sobre disponibilidade, qualidade, demandas e conflitos, sendo essencial para o planejamento e a fiscalização. O sistema permite ainda que os gestores públicos e a sociedade tenham acesso a informações confiáveis e atualizadas, promovendo a governança hídrica com base em evidências (ANA, 2022).

Portanto, os instrumentos de gestão legal formam um arcabouço normativo e técnico indispensável para a efetividade das políticas públicas voltadas aos recursos hídricos. Em especial nas regiões com vulnerabilidades climáticas e pressões múltiplas sobre os recursos, como o Norte de Minas Gerais, sua aplicação integrada e articulada representa a base para a promoção da segurança hídrica, da equidade no acesso e da sustentabilidade ambiental.

Disponibilidade hídrica no norte de minas para águas subterrâneas

Os poços do Norte de Minas são monitorados pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão de Águas), com o novo sistema de outorga quase quadruplicou a outorga para novos poços, houve um considerável aumento de 900 pedidos em 2018 para 3.500 pedidos de perfuração em 2025.

Recursos hídricos superficiais, possuem duas principais outorgas. Primeiro, a outorga para a captação superficial, onde a vazão captada será um dos parâmetros, segundo é outorgada a vazão para a diluição (Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2006).

Essa vazão de diluição, será representada como a vazão necessária para diluir um efluente com concentração definida, aos valores de concentração estabelecidos no corpo hídrico. O indicador de comprometimento de bacias (ICB) é uma ferramenta prática para analisar o grau de estado crítico das bacias hidrográficas, em relação ao seu uso. O ICB representa a razão entre

vazão outorgada e a disponibilidade, identificando todas as áreas críticas, onde a demanda por água pode superar a oferta disponível. Assim, o cálculo da vazão outorgada é dado pela soma das vazões outorgadas, considerando as vazões na sua captação ($Q_{Captada}$) e as vazões para a diluição dos efluentes (Diluição). (STINGHEN; MANNICH, 2022). Segue o cálculo:

$$\sum Q_{outorgada} = \sum Q_{captada} + \sum Q_{Diluição} \quad (1)$$

Tabela 1 - Descrição das classes do indicador ICB por intervalos de valores.

Intervalo	Nomenclatura	Descrição
$0 < ICB \leq 0,5$	Satisfatório	Menor faixa do indicador que reflete tranquilidade em bacias de baixa demanda com relação a disponibilidade hídrica
$0,5 < ICB \leq 0,8$	Sob controle	Faixa do indicador que demonstra equilíbrio entre a demanda e disponibilidade hídrica, dentro dos limites outorgáveis
$0,8 < ICB \leq 1,0$	Subcrítico	Faixa onde o indicador ainda não caracteriza a bacia como crítica, mas que merece atenção
$1,0 < ICB \leq 1,6$	Crítico a priori	Indicador extrapolou o limite outorgável, mas existem excepcionalidades nessa faixa quanto a regularidade das outorgas
$1,6 < ICB \leq 2,0$	Crítico	Indicador demonstra criticidade da bacia, ainda dentro dos limites de 100% da vazão de referência
$2 < ICB$	Supercrítico	O indicador extrapolou o limite máximo, ou seja, a demanda é superior a 100% da vazão de referência

Fonte: (STINGHEN; MANNICH

Nesta tabela acima notamos que:

Disponibilidade hídrica fica entre $0 < ICB \leq 0,5$: Satisfatória;

Na faixa: $0,5 < ICB \leq 0,8$: Sob Controle;

Na faixa: $0,8 < ICB \leq 1,0$, representa um nível subcrítico; com 80 % da vazão outorgada.

Na faixa: $1,0 < ICB \leq 1,6$: zona de criticidade.

Até 80% da Q95%, serão consideradas críticas a priori;

Nas duas últimas faixas: $1,6 < ICB \leq 2,0$, extrapolam o caso excepcional, enquanto as bacias supercríticas com $ICB > 2$ apresentam demanda superior a 100% da Q95%. (STINGHEN; MANNICH, 2022).

Os dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018) indicam que cerca de 39 % dos municípios mineiros dependem exclusivamente de águas subterrâneas, e outros 14 % utilizam fontes mistas. No Norte de Minas Gerais, essa dependência se intensifica, especialmente no caso do aquífero cárstico da Jaíba, que apresenta grande variabilidade hidrogeológica: transmissividades entre 5 m²/dia, em zonas menos permeáveis, e até 500 m²/dia nas regiões de intensa carstificação (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM, 2021; SILVA et al.,

1984). Essa heterogeneidade indica que áreas de maior produtividade são também mais sensíveis à exploração excessiva, sobretudo em períodos de estiagem prolongada. Adicionalmente, estudos apontam que o mecanismo de recarga localizado, especialmente por dolinas, é fundamental para manutenção da disponibilidade hídrica no semiárido (BRAGA et al., 2010), evidenciando a necessidade de vigilância ambiental nessas áreas.

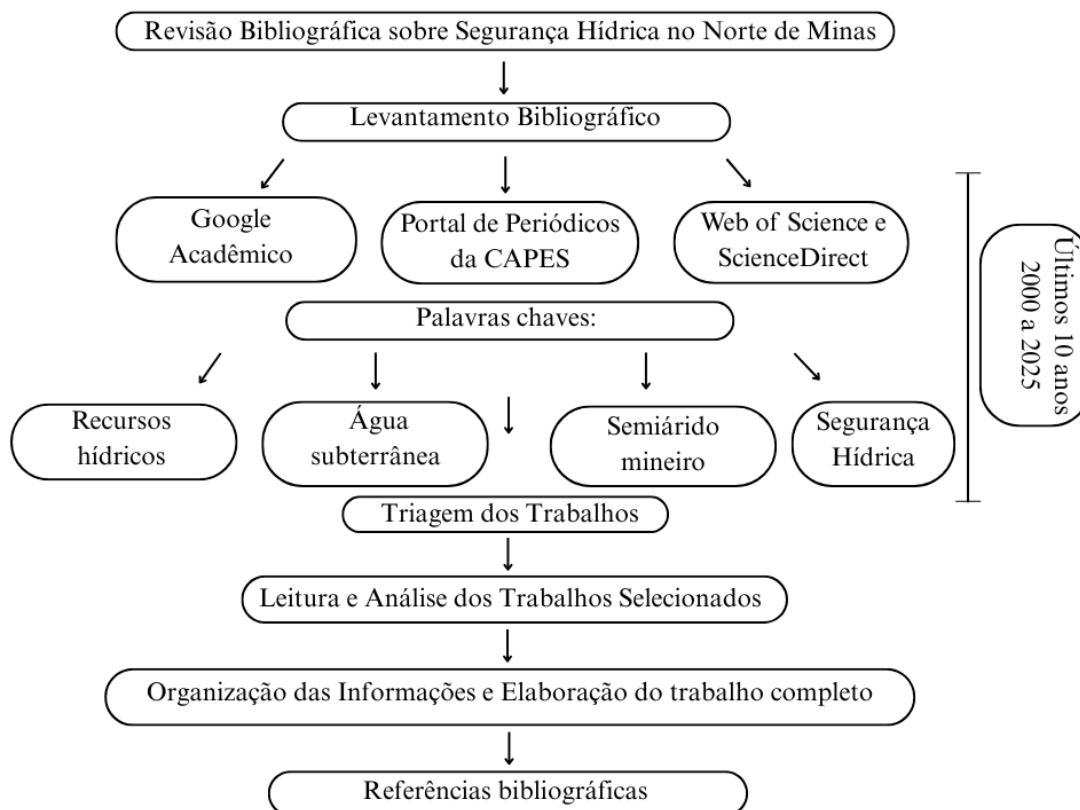
Nesse contexto, o uso de indicadores de estresse hídrico tem se mostrado uma estratégia relevante para avaliar a escassez hídrica, conforme demonstrado por Faro et al. (2019) e Silva et al. (2022). Com base nessa perspectiva, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em articulação com o Ministério do Desenvolvimento Regional, desenvolveu o Plano Nacional de Segurança Hídrica, estruturado no Índice de Segurança Hídrica (ISH), o qual permite identificar áreas prioritárias para intervenção, com vistas à mitigação dos impactos de eventos extremos, como secas e inundações, até o ano de 2035 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019a).

Dessa forma, o Índice de Segurança Hídrica (ISH) constitui uma ferramenta essencial para a identificação de regiões que demandam maior atenção no que tange à gestão dos recursos hídricos, contribuindo para o direcionamento e a definição de prioridades nas ações de planejamento. Em contrapartida ao conceito de segurança hídrica, destacam-se as chamadas áreas críticas, caracterizadas por uma insuficiência de disponibilidade hídrica superficial frente à demanda existente em determinadas bacias hidrográficas. Tais áreas refletem os pontos de maior vulnerabilidade no sistema, onde os múltiplos usos da água não conseguem ser plenamente atendidos, exigindo estratégias diferenciadas de monitoramento e manejo (STINGHEN; MANNICH, 2022).

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho é resumida e representada abaixo por um fluxograma, na figura 3.

Figura 3- Etapas da realização da pesquisa.



A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se por uma revisão sistemática da literatura, com abordagem qualitativa, voltada à análise e síntese de publicações científicas que tratam da aplicação da favorabilidade hidrogeológica, com ênfase em regiões semiáridas. A pesquisa foi conduzida por meio de uma investigação aprofundada em bases de dados científicas amplamente reconhecidas, a saber: Google Acadêmico, Portal de Periódicos da CAPES, Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Essas bases foram selecionadas em virtude de sua abrangência temática e da credibilidade das publicações indexadas, permitindo o acesso a artigos científicos, dissertações, teses, trabalhos técnicos e comunicações em eventos científicos, todos revisados por pares.

A busca bibliográfica foi orientada pelo uso de palavras-chave específicas, selecionadas conforme sua relevância para o tema em questão. Os descritores utilizados incluíram Recursos Hídricos, Água subterrânea, Semiárido mineiro e Gestão ambiental. Para assegurar a qualidade e a coerência dos materiais analisados, adotaram-se alguns critérios. Foram incluídos apenas estudos dos últimos vinte anos, com texto completo disponível e revisados por pares. Excluíram-se, resumos sem acesso ao conteúdo integral e trabalhos sem relação direta com a favorabilidade hidrogeológica em regiões semiáridas.

A triagem dos estudos foi realizada em etapas. Inicialmente, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para uma seleção preliminar. Em seguida, os textos completos dos trabalhos elegíveis foram lidos e analisados de forma criteriosa. Durante essa etapa, foram extraídas informações relevantes acerca das metodologias empregadas, nas áreas de aplicação (com destaque para as regiões semiáridas), dos fatores condicionantes da favorabilidade hidrogeológica tais como características geológicas, hidrológicas, climáticas e de uso do solo e da classificação desses fatores em função de sua relevância e impacto, conforme descrito nas publicações analisadas.

As informações obtidas foram organizadas em matrizes temáticas, o que permitiu a identificação de padrões metodológicos, recorrência de abordagens e convergência nos resultados. A adoção dessa abordagem sistemática possibilitou uma compreensão ampla e detalhada da aplicação da favorabilidade hidrogeológica, sobretudo em regiões semiáridas, e contribuiu para o desenvolvimento de uma base sólida para a proposição de estratégias práticas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Após o levantamento bibliográfico de diversos autores, notou-se uma preocupação crescente com a disponibilidade hídrica dos recursos hídricos, principalmente na região norte de Minas Gerais, com o órgão responsável pelas autorgas emitindo um documento para restringir a abertura de mais poços nessas regiões, entretanto, salvaguardando o direito de dimensão hídrica para a população e demais interessados em utilizar os recursos hídricos. A tabela 2, abaixo apresenta de forma direta, como os autores enxergam a relação de segurança hídrica com o estado crítico de falta de recarga dos principais aquíferos, importante meio de abastecimento no norte de Minas, a recarga está cada vez mais abaixo devido a diversos fatores, como falta de chuva, e desmatamento, com ação antrópica da região, também pode-se citar o uso do recurso hídrico em agricultura e dessedentação animal. Os principais artigos são de 2006 a 2022, as regiões são de Minas Gerais, São Paulo e do Nordeste do Brasil, já em relação aos fatores de índice de segurança hídrica: o artigo de Tucci e Chagas (2015) preza pela dimensão humana e econômica; Stinghen e Mannich (2022), inclui além deste, as dimensões ecossistêmicas e resiliência. Faro et al (2019) explora o índice de comprometimento de pressão (ICP), que mede o impacto da escassez hídrica sobre as populações e ecossistemas. Seguindo as dimensões humana e ecossistêmica. Heller et al (2006) levanta dados de 600 municípios em Minas Gerais, utiliza-se indicadores de diferentes órgãos como FUNASA e COPASA, onde o foco central seria o saneamento básico em relação às quatro dimensões dos fatores de índice de segurança hídrica. Concluindo a tabela comparativa

temos Silva (2022) elaborou um estudo com as seguintes etapas: (1) Definição das curvas de permanência para as estações fluviométricas; (2) Determinação da Q90, que em Pernambuco serve como parâmetro para concessão de outorga; (3) Levantamento das outorgas atuais e vigentes em cada sub-bacia; e (4) Cálculo do estresse hidrológico em cada sub-bacia, a identificar vazões de referência como a **Q90**, que representa a vazão excedida em 90% do tempo. Assim, este artigo também utilizou as quatro dimensões de fatores de índice de segurança hídrica.

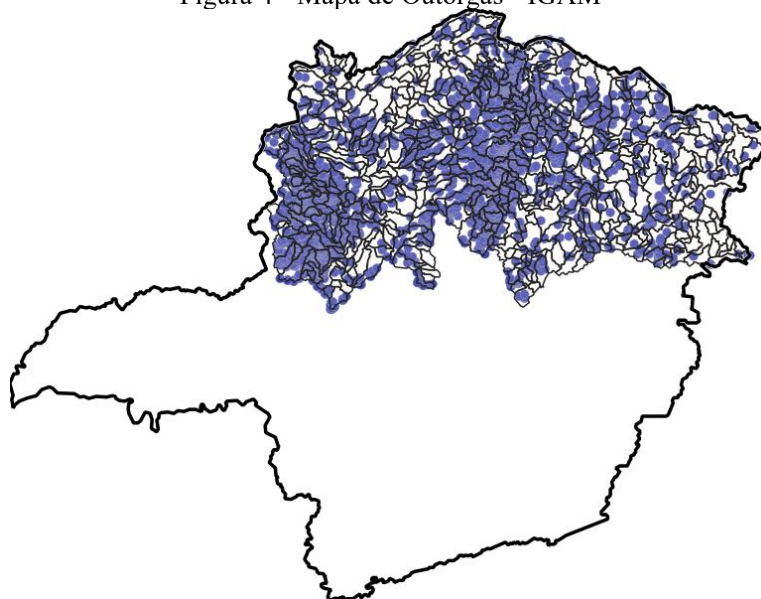
$$\text{Estresse (\%)} = (\text{Demanda total outorgada} / \text{Q90}) \times 100 \quad (2)$$

Tabela 2: Comparação entre artigos sobre ISH.

Referência	Nome do Artigo	Região de aplicação do Índice	Fatores de Índice de Segurança Hídrica
TUCCI & CHAGAS, 2015	Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais	Minas Gerais	Humana e econômica: Quantidade e qualidade;
STINGHEN ; MANNICH, 2022	Vista do Panorama das estratégias de gestão de bacias críticas no Brasil	Bacias hidrográficas do Brasil	Humana, econômica, ecossistêmica e resiliência;
FARO et al. 2019	(PDF) Aplicação de índices para avaliação de estresse em sistemas de recursos hídricos	Sistema Cantareira - São Paulo	ICP - Humana e ecossistêmica
HELLER et al. 2006	SciELO Brasil - Diferentes modelos de gestão de serviços de saneamento produzem os mesmos resultados? Um estudo comparativo em Minas Gerais com base em indicadores Diferentes modelos de gestão de serviços de saneamento produzem os mesmos resultados? Um estudo comparativo em Minas Gerais com base em indicadores	Minas Gerais	Indicadores operacionais, epidemiológicos e sociais - Humana, econômica, ecossistêmica
SILVA 2022	scielo.br/j/rbrh/a/H5n6Shby9FM4FsySTFNqQvf/?format=pdf&lang=en	Nordeste do Brasil	Grau de estresse hidrológico (EH) - Humana, econômica, ecossistêmica e resiliência;

Fonte: próprio autor (2025)

Figura 4 - Mapa de Outorgas - IGAM



Fonte: Mapa de Outorgas de perfurações de poços - IDE-SISEMA 2025

PANM - Potencial de comprometimento do recurso potencialmente explorável (RPE)

Segundo IGAM (2013) de forma contínua, esta é a representação vetorial das outorgas subterrâneas e do potencial de comprometimento do Recurso Potencialmente Explorável (RPE), a delimitação das bacias hidrográficas (CHs) foram: SH6, SF7, SF8, SF9, SF10, JQ1, JQ2, JQ3, PA1, MU1, e algumas bacias hidrográficas como as dos Rios Jucuruçu, Itanhém, parâmetros calculados com base das diretrizes estabelecidas pelo Projeto Águas do Norte de Minas (PANM). Analisou-se o saldo de disponibilidade e limites de 50%, 75% e 100% de exploração dos volumes de água de todas as outorgas vigentes, dentro da área do PANM já concedidas, Considera-se os valores anuais de captação. Assim, o objetivo geral deste projeto consiste em identificar a disponibilidade e saldo hídrico subterrâneo da região do norte do estado de Minas Gerais.

5 CONCLUSÕES

A metodologia do presente trabalho se mostrou adequada para atender aos resultados esperados.

Igualmente conclui-se que o evidenciou que a segurança hídrica no Norte de Minas Gerais está diretamente ameaçada pela escassez de recarga dos aquíferos, uso intensivo dos recursos subterrâneos e ausência de manejo adequado.

A análise bibliográfica destacou a importância dos instrumentos de gestão, como a outorga e o monitoramento, além do papel estratégico das instituições e dos Comitês de Bacia.

Conclui-se que a gestão sustentável das águas subterrâneas, aliada a políticas públicas integradas, é essencial para garantir o abastecimento e mitigar os efeitos das mudanças climáticas na região.

AGRADECIMENTOS

À UFVJM pelo suporte institucional e incentivo à extensão universitária.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Águas subterrâneas: gestão, riscos e uso sustentável. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 2 jul. 2025.

Agência Nacional de Águas – ANA. (2019a). Plano nacional de segurança hídrica (116p.). Brasília: ANA.

ALMG – ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Norte de Minas já tem municípios no clima árido. Belo Horizonte: ALMG, 2024. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/comunicacao/noticias/arquivos/Norte-de-Minas-ja-tem-municipios-no-clima-arido/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRAGA, Letícia Teixeira Palla et al. Investigação da recarga do tipo localizada nos aquíferos cársticos cobertos em região semiárida do Norte de MG. Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 53–59, 2010. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23090> . Acesso em: 13 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

CIDADÃO, A. DE M.-PEV DO. Políticas públicas – Gestão de bacias hidrográficas – Entenda – Informações gerais. Disponível em: https://politicaspUBLICAS.almg.gov.br/temas/gestao_bacias_hidrograficas/entenda/informacoes_gerais.html?tagNivel=273&tagAtual=10054. Acesso em: 11 jun. 2025.

Comitê de Bacia Hidrográfica. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-do-singreh/comites-de-bacia-hidrografica>>. Acesso em: 2 jul. 2025. Desafios e potencialidades dos comitês de bacias hidrográficas. Ciência e cultura, v. 55, n. 4, p. 40–41, 2003.

DE MELO, M. C. Disponibilidade hídrica, monitoramento e gestão de recursos hídricos em Minas Gerais. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/77718/2/Disponibilidade%20h%C3%ADdrica_monitoramento%20e%20gest%C3%A3o%20de%20recursos%20h%C3%ADdricos%20em%20Minas%20Gerais.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

Faro, Garcia, J. I. B., Oliveira, C. P. M., & Ramos, M. R. S. (2019). Application of indices for water resource systems stress assessment. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 24, e7. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.241920180106>.

HELLER, Léo; COUTINHO, Marcelo Libânio; MINGOTI, Sueli Aparecida. Diferentes modelos de gestão de serviços de saneamento produzem os mesmos resultados? Um estudo comparativo em Minas Gerais com base em indicadores. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 11, p. 325-336, 2006. Home - Comitês - SISEMA. Disponível em: <<https://comites.igam.mg.gov.br/>>. Acesso em: 2 jul. 2025.

IGAM, Disponível em: Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Igam - SISEMA. Acesso 14/06/2025 às 10:53hs.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos: orientações técnicas e legais. Belo Horizonte: IGAM, 2024.

MINAS GERAIS. Decreto nº 48.160, de 24 de março de 2021. Regulamenta a cobrança pelo uso de recursos hídricos no Estado e dá outras providências. Diário do Executivo, Belo Horizonte, MG, 25 mar. 2021. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/decreto/48160/2021/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

“Mudanças climáticas e segurança hídrica no Nordeste brasileiro: ações necessárias”. Diálogos Socioambientais, Santo André, v. 5, n. 15, p. 15–18, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufabc.edu.br/index.php/dialogosocioambientais/article/view/809>. Acesso em: 11 jun. 2025.

PLANO NACIONAL DE SEGURANÇA HÍDRICA. Disponível em: PNSH. Acesso em 01 de julho de 2025 as 13:00hs.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas: usos, potencialidades e vulnerabilidades. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVA, Alexson Caetano da et al. Determinação do estresse hidrológico em uma bacia hidrográfica no nordeste do Brasil. RBRH, v. 27, p. e2, 2022.

SILVEIRA, J. H. P. (Ed.). Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia: Vol 14. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2018. ISBN 978-65-5866-249-5. DOI 10.36229/978-65-5866-249-5. Disponível em: <https://poisson.com.br/2018/produto/meio-ambiente-sustentabilidade-e-tecnologia-volume-14/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Projetos de gestão integrada na bacia do São Francisco – Área do Jaíba: proposta técnica. Brasília: CPRM, 2021. Disponível em: https://dspace.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22005/1/rel_hidrologia_solos.pdf . Acesso em: 13 jun. 2025.

STINGHEN, Camila Marin; MANNICH, Michael. Panorama das estratégias de gestão de bacias críticas no Brasil. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 19, n. 2022, 2022.

TUCCI, C. E. M.; CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégias para Minas Gerais. REGA – Revista de Gestão de Águas da América Latina, Porto Alegre, v. 14, edição 12, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufrgs.br/REGA/article/view/80253>. Acesso em: 11 jun. 2025.

LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS: RELEVÂNCIA NA GESTÃO SUSTENTÁVEL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

 10.56238/livrosindi202660-011

Victor Almeida Matos

Bacharel (2025) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM
E-mail: victor.matos@ufvjm.edu.br

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 4556375475161993

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES
Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da Afya Montes Claros
E-mail: herbert.silva@afya.edu.br
ID Lattes: 3925629376472160

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG
Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8385118400138330

Luana Alves de Lima

Geóloga (2007) e Mestre (2009) em Geologia pela UFRJ
Doutora (2019) em Geociências (Geoquímica) pela UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
Orientadora deste trabalho
E-mail: luana.lima@ufvjm.edu.br
ID Lattes: 8848937012868572

RESUMO

Este trabalho discute a importância dos levantamentos topográficos para a gestão sustentável das bacias hidrográficas, com ênfase no estado de Minas Gerais. Esses levantamentos se mostram essenciais para compreender a dinâmica da água no território, permitindo a delimitação precisa das bacias, o monitoramento de processos erosivos e o suporte ao planejamento territorial. O principal objetivo da presente pesquisa é estudar e comparar os principais métodos de levantamento topográfico focados em estudos de bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais para gestão e sustentabilidade. A metodologia baseou-se em uma revisão bibliográfica de artigos e dissertações utilizando as palavras-chave: “levantamentos topográficos”, “bacias hidrográficas” e sustentabilidade” em plataformas de busca científica (Google Acadêmico, periódicos Capes e na plataforma SciELO) nos últimos 10 anos. Foram selecionados sete trabalhos científicos com base nessa busca que resultaram

em uma tabela síntese contendo as principais informações sobre o tema: a bacia hidrográfica estudada, principais técnicas de levantamento topográfico utilizado, o tipo de dado levantado, aplicação principal do levantamento, autor/ano. Os resultados indicam que as tecnologias mais recentes, como o LiDAR, VANTS e MDE, se destacam pela alta precisão e riqueza de detalhes, sendo especialmente eficazes em áreas com vegetação densa ou de difícil acesso para bacias hidrográficas. Verificou-se uma escassez significativa de estudos focados em bacias hidrográficas localizadas no Norte de Minas Gerais. Conclui-se que a metodologia aplicada atendeu aos objetivos propostos da pesquisa. A integração dos dados topográficos com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) fortalece o planejamento de bacias hidrográficas, promovendo uma gestão eficiente e sustentável. A escassez de estudos focados no Norte de Minas Gerais detectada, reforça a necessidade de mais pesquisas nesta região, que possam orientar políticas públicas e ações de manejo adequadas abrindo o campo para esta temática como perspectiva de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Topografia; Gestão hídrica; Geotecnologias; Sustentabilidade; Ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Os levantamentos topográficos são amplamente reconhecidos como ferramentas fundamentais para a compreensão das bacias hidrográficas, fornecendo dados essenciais para a modelagem do fluxo dos rios, o delineamento de planícies aluviais e a avaliação da dinâmica dos sedimentos (Neto, 2023).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) (2015), a importância da gestão integrada de bacias hidrográficas como uma abordagem essencial para assegurar a segurança hídrica, preservar a biodiversidade e enfrentar a degradação ambiental. Esses objetivos, no entanto, só podem ser plenamente alcançados com base em informações confiáveis e constantemente atualizadas. Nesse contexto o levantamento topográfico se destaca ao mapear com precisão o relevo, os cursos d'água e os diferentes usos do solo, essa ferramenta oferece subsídios fundamentais para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Com isso, torna-se possível prevenir enchentes, mitigar impactos ambientais e evitar conflitos pelo uso da terra dessa forma essa prática está diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial ao ODS 6, que trata do acesso à água potável e do saneamento para todos (United Nations, 2015; Un-Water, 2018; ANA, 2020).

Para cuidar de maneira responsável das bacias hidrográficas, é preciso entender de onde vem a água que usamos no nosso dia a dia. As principais fontes de água são os rios, lagos, mares e até as águas subterrâneas, que ficam no subsolo. Quando essas fontes estão conectadas em uma mesma área, formam as bacias hidrográficas, um sistema natural onde a água da chuva, ao cair, escorre em direção a um corpo d'água maior, como um rio. Essas bacias são compostas por regiões que compartilham características semelhantes, e o relevo local tem um impacto grande sobre a qualidade da água. Dependendo dessas características, a água pode ser doce, salgada ou salobra, por esse motivo entender como as bacias hidrográficas funcionam é indispensável para

que possamos usar a água de maneira equilibrada e sustentável, preservando-a para o futuro (Silva *et al.*, 2024).

Os mapeamentos topográficos vão muito além de mostrar o relevo de uma região. Eles ajudam a entender como a água se comporta dentro de uma bacia hidrográfica, revelando informações valiosas para aprimorar a gestão desse recurso essencial. Esses dados servem de apoio para decisões mais conscientes, desde ações de conservação até políticas públicas voltadas ao uso sustentável da água. Por isso, conhecer bem o relevo de uma bacia não é apenas uma questão técnica é um passo importante para equilibrar as necessidades humanas com a preservação do meio ambiente (Neto, 2023).

Nos últimos anos, os estudos sobre bacias hidrográficas têm ganhado cada vez mais importância, principalmente com o apoio das novas tecnologias voltadas para o entendimento do território. Ferramentas como o Sensoriamento Remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm revolucionado a forma como os recursos naturais são pesquisados. Com tais ferramentas, é possível observar o relevo, os rios e a forma das bacias de uma forma muito mais detalhada, que seria difícil ou demorada com métodos mais antigos. Um recurso que tem se mostrado essencial nesse processo é o Modelo Digital de Elevação (MDE), que permite visualizar a superfície do terreno em três dimensões (Latuf, Almeida e Araújo, 2010). Quando analisado em um ambiente SIG, esse modelo ajuda a identificar as principais características da bacia, como o caminho das águas, o formato do terreno e os limites naturais da área. Essas informações são fundamentais para entender como a água se movimenta pela paisagem, além de apoiar decisões importantes no planejamento do uso da terra, no manejo da água e na prevenção de desastres, como enchentes e deslizamentos (Neto; Silva; Barbosa, 2023). Diante do exposto o capítulo seguinte versará sobre os objetivos do presente trabalho.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como propósito estudar e comparar os principais métodos de levantamento topográfico focados em estudos de bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais para gestão e sustentabilidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar e descrever os principais métodos de levantamento topográfico aplicados na gestão de bacias hidrográficas de Minas Gerais.

- Comparar os métodos considerando sua contribuição para a sustentabilidade da gestão hídrica.
- Elaborar uma tabela síntese para comparação contendo as principais informações sobre o tema da pesquisa fomentando o estudo e comparação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS NA GESTÃO HÍDRICA SUSTENTÁVEL

Os levantamentos topográficos são a base para uma miríade de aplicações na gestão sustentável de bacias hidrográficas, fornecendo o arcabouço espacial necessário para a compreensão e intervenção nos processos naturais e antrópicos.

A gestão dos recursos hídricos é um desafio global que exige abordagens integradas e sustentáveis, especialmente em um cenário de crescentes pressões ambientais e socioeconômicas (Argaw, Abe e Abate, 2023). As bacias hidrográficas emergem como unidades territoriais fundamentais para o planejamento e a gestão eficaz da água, dada a sua complexidade que abrange tanto aspectos biofísicos quanto socioeconômicos (SáezArdura *et al*, 2025). Compreender a dinâmica dessas unidades é primordial para a formulação de políticas nacionais e a implementação de ações que garantam a segurança hídrica e a conservação ambiental (Argaw, Abe e Abate, 2023).

De acordo com Argaw, Abe e Abate (2023) gestão sustentável de bacias hidrográficas transcende a mera proteção ambiental, englobando o equilíbrio entre o desenvolvimento rural e a segurança dos meios de subsistência das comunidades. Práticas de desenvolvimento e gestão de bacias são reconhecidas como essenciais para impulsionar o desenvolvimento rural, resultando em benefícios tangíveis como o aumento da produtividade agrícola e da renda comunitária, a geração de novas oportunidades de emprego e a melhoria da infraestrutura e dos serviços sociais (SáezArdura *et al*, 2025). A implementação de tais práticas contribui para a diminuição da perda de solo, o aumento da cobertura vegetal, a redução da velocidade do escoamento superficial, a melhoria da infiltração de água no solo, o aumento da recarga de aquíferos e a diversificação da renda familiar. A gestão eficaz de bacias hidrográficas, portanto, não é apenas uma questão de conservação ambiental, mas um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e a segurança hídrica, impactando diretamente o bem-estar humano e a estabilidade econômica (Argaw, Abe e Abate, 2023).

Os levantamentos topográficos constituem a base para a representação precisa do terreno, detalhando suas formas, altitudes e características superficiais. Esses levantamentos são cruciais para a compreensão do comportamento da água na paisagem, desde a delimitação de bacias e

sub-bacias até o planejamento de infraestruturas hídricas (Bacellar, 2023). Eles fornecem informações essenciais para entender a infiltração da água e a formação de cursos d'água, bem como a interação entre o relevo e a dinâmica hídrica (Argaw, Abe e Abate, 2023).

A precisão desses dados topográficos é a espinha dorsal espacial de todas as análises hidrológicas e geomorfológicas, possibilitando uma transição de observações pontuais para uma compreensão sistêmica da bacia. Sem levantamentos topográficos precisos, qualquer modelo hidrológico ou ambiental careceria de um contexto espacial fundamental, comprometendo a confiabilidade das análises e das decisões de gestão (Hilário *et al.*, 2024).

Santana *et al.* (2017) afirma que o método de classificação e codificação de bacias hidrográficas de Otto é natural e hierárquico, ele se inicia pela identificação do rio principal, e posteriormente dos maiores rios de uma determinada bacia, abaixando em nível de detalhe a cada etapa, até que todos os trechos da bacia, sendo eles áreas de drenagem individual, sejam codificados.

As bacias delimitadas pelo método de Otto são amplamente utilizadas em diversos estudos e consideradas ferramentas cruciais no planejamento e na gestão dos recursos hídricos (Santana *et al.*, 2017). A designação das ottobacias como "base oficial" para a gestão de recursos hídricos no Brasil sublinha um compromisso nacional com a padronização das unidades hidrológicas georreferenciadas.

Essa padronização é de suma importância para garantir a consistência na coleta de dados, na análise e na implementação de políticas em diferentes regiões do país. Ao estabelecer um *framework* unificado, o sistema permite que os esforços de gestão da água sejam mais eficientes e comparáveis, superando as dificuldades inerentes a abordagens locais e fragmentadas (IGAM, 2021).

A evolução das tecnologias de levantamento topográfico revolucionou a capacidade de caracterizar e gerenciar bacias hidrográficas, fornecendo dados cada vez mais precisos e detalhados. Modelos Digitais de Elevação (MDEs), também conhecidos como Modelos Digitais de Terreno (MDTs) quando representam a superfície do solo sem vegetação ou construções, são representações digitais da superfície terrestre (INPE, 2009). Eles são essenciais para derivar uma vasta gama de informações topográficas, incluindo declividade, orientação de vertentes e, crucialmente, a delimitação precisa de bacias hidrográficas (Latuf, Almeida e Araújo, 2010). A delimitação apropriada de bacias é um ponto primordial para quaisquer estudos sobre recursos hídricos, pois define a unidade territorial para o planejamento e a gestão (Yogi e Stanganini, 2023).

As curvas de nível, por sua vez, são linhas que conectam pontos de mesma altitude, oferecendo uma visualização intuitiva da topografia do terreno (China, 2024). Elas são fundamentais para compreender o fluxo da água, a formação de bacias e sub-bacias, e para o planejamento de infraestruturas hídricas. A altimetria de bacias é frequentemente gerada a partir de restituição aerofotogramétrica e dados de projetos existentes, com as curvas de nível sendo indispensáveis para a análise hidrológica. A disponibilidade de MDEs com diferentes resoluções, como o TopoData de 30 metros, permite a delimitação precisa de bacias hidrográficas, o que é um passo crítico para a confiabilidade de todos os estudos de gestão hídrica (INPE, 2008). A acurácia e a resolução dos MDEs influenciam diretamente a precisão da delimitação das bacias e a modelagem hidrológica subsequente. Uma baixa resolução ou imprecisão no MDE pode levar a erros nas fronteiras da bacia e nos caminhos de fluxo, comprometendo a validade de análises e decisões de manejo (INPE, 2008).

3.2 TECNOLOGIAS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E SUAS APLICAÇÕES:

3.2.1 LiDAR (Light Detection and Ranging)

O LiDAR é uma tecnologia avançada que utiliza pulsos de laser para gerar dados de elevação de alta precisão (Castro e Pereira, 2019) como pode ser observado na Figura 1. Sua capacidade de penetrar a vegetação densa permite a criação de MDEs detalhados da superfície do solo, mesmo em áreas florestadas. Apesar de as fontes fornecidas não detalhem exaustivamente as vantagens específicas do LiDAR para mapeamento de bacias em Minas Gerais, sua aplicação em estudos na região é um indicativo de seu valor. A capacidade do LiDAR de gerar modelos de terreno de alta resolução, mesmo sob cobertura vegetal densa, é crucial para regiões como Minas Gerais, que possuem vasta área de floresta e relevo complexo (Castro, 2022). Isso permite uma caracterização topográfica mais fidedigna e, consequentemente, modelos hidrológicos mais precisos, superando as limitações da fotogrametria tradicional em ambientes vegetados.

Figura 1- Imagem produzida pela tecnologia LiDAR



Fonte: INPE (2021)

3.2.2 Fotogrametria com Drones (VANTs)

A fotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, envolve a aquisição de imagens aéreas de alta resolução e a posterior criação de MDEs e ortomosaicos utilizando técnicas fotogramétricas (Barcelos *et al*, 2017). Os drones (Figura 2) oferecem vantagens significativas, como baixo custo, flexibilidade operacional e agilidade na coleta de dados.

Figura 2- Exemplo de aplicação de VANT



Fonte: Castela (2023)

De acordo com Barcelos *et al.* (2017), eles são capazes de gerar dados com resolução espacial e temporal sem precedentes para áreas menores, superando as limitações dos métodos

tradicionais e tornando a aquisição de imagens aéreas de alta resolução mais acessível. No contexto de Minas Gerais, a aplicação de drones tem sido observada em estudos de monitoramento ambiental e áreas degradadas em bacias hidrográficas, como no Córrego do Glória, em Uberlândia, onde foram utilizados para avaliar impactos de extração de cascalho (Barcelos *et al*, 2017).

A combinação de baixo custo, alta resolução e flexibilidade dos drones democratiza o acesso a dados topográficos detalhados, permitindo que estudos e monitoramentos em bacias hidrográficas, antes restritos a grandes projetos, sejam realizados em escalas locais e com maior frequência. Essa capacidade é vital para a gestão adaptativa e sustentável, permitindo respostas rápidas a mudanças ambientais e a implementação de intervenções localizadas.

As tecnologias modernas de levantamento topográfico oferecem uma precisão e detalhe que superam largamente os métodos convencionais. Por exemplo, imagens obtidas por VANTs a 100 metros de altitude podem atingir uma resolução de 3 cm por pixel, em contraste com as imagens de satélite do Google Earth, que possuem uma resolução de 15 metros por pixel (Barcelos *et al*, 2017). Ainda de acordo com Barcelos *et al*. (2017) Essa superioridade na resolução torna os dados de drones ideais para mapeamentos detalhados e atualizações cartográficas, essenciais para a gestão de bacias. Para Barcelos *et al*. (2017) a precisão dos dados pode ser ainda mais aprimorada com o uso de pontos de controle em campo, embora os softwares modernos também permitam operações automáticas.

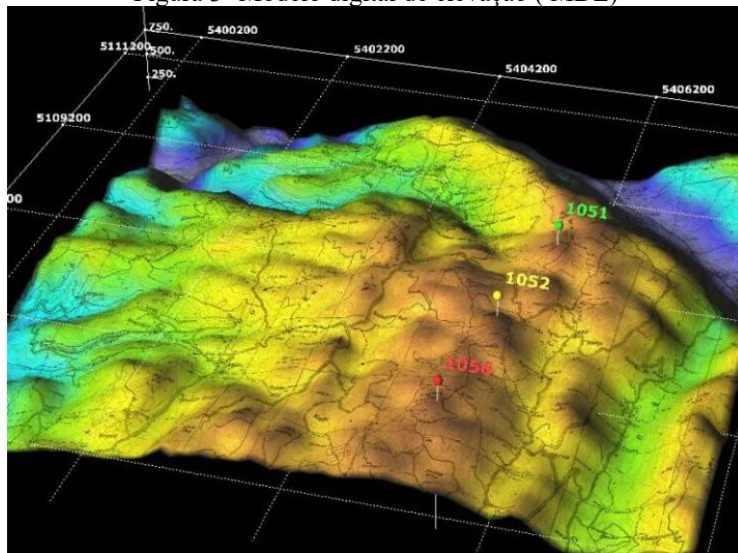
A transição de métodos topográficos tradicionais para tecnologias de sensoriamento remoto avançadas representa um salto qualitativo na gestão de bacias (INPE, 2025). Essas tecnologias fornecem dados mais densos, precisos e atualizados, que são cruciais para a construção de modelos preditivos e para a tomada de decisões mais eficazes, especialmente em um cenário de rápidas mudanças ambientais. A capacidade de adquirir dados com alta resolução espacial e temporal permite uma compreensão mais aprofundada dos processos que ocorrem na bacia, facilitando a identificação de problemas e a formulação de soluções direcionadas (INPE, 2025).

3.2.3 Modelos Digitais de Elevação e aplicações em bacias hidrográficas

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), como pode ser observado na figura 3, são ferramentas primordiais para a delimitação precisa de bacias e sub-bacias, que são as unidades básicas de planejamento para estudos sobre recursos hídricos (Cagas *et al.*, 2010). Essa

delimitação é um passo fundamental, pois define a área de influência e interconexão dos processos hidrológicos (Yogi e Stanganini, 2023).

Figura 3- Modelo digital de elevação (MDE)



Fonte: Giovanini (2019)

Para Lopes *et al.* (2020), além da delimitação, o mapeamento geomorfológico, intrinsecamente ligado à topografia, permite identificar as unidades de relevo de uma bacia, como chapadas, planaltos, serras, planícies, inselbergues e terraços fluviais. Essa caracterização detalhada é essencial para compreender os processos que moldam a paisagem e influenciam diretamente os fluxos hídricos (Hilário *et al.*, 2024). O mapeamento geomorfológico, quando associado aos fluxos hídricos e aos materiais da área de estudo, oferece informações relevantes para o planejamento e o ordenamento territorial (Hilário *et al.*, 2024). A caracterização geomorfológica baseada em dados topográficos de alta qualidade é a primeira etapa crítica para qualquer plano de gestão de bacias, pois revela as vulnerabilidades naturais e as áreas de maior potencial para intervenções. Isso direciona o planejamento de forma mais estratégica e eficiente, permitindo, por exemplo, a identificação de áreas propensas a inundações ou erosão, e a subsequente implementação de medidas preventivas.

Os MDEs são amplamente utilizados na modelagem hidrológica para simular o escoamento superficial, a infiltração e o fluxo de água dentro das bacias (Viola *et al.*, 2009). A topografia, em particular a declividade do terreno, exerce uma influência direta e significativa na velocidade do fluxo da água e no tempo de concentração, afetando o balanço hídrico e a resposta hidrológica da bacia (Latuf, Almeida e Araújo, 2010). Por exemplo, fatores topográficos como a inclinação podem fazer com que a água seja retida por mais tempo em certos pontos ou

acelere seu escoamento, impactando a dinâmica de inundação e a disponibilidade hídrica (Dias, 2021).

A aplicação de MDEs na modelagem hidrológica tem sido demonstrada em diversas bacias de Minas Gerais, como na bacia do Rio Aiuruoca (Viola *et al.*, 2009). A integração de dados topográficos precisos em modelos hidrológicos permite prever com maior acurácia os padrões de inundação, a disponibilidade hídrica e os impactos de eventos extremos. Essa capacidade preditiva é fundamental para que os gestores possam desenvolver estratégias de mitigação e adaptação mais robustas, garantindo a segurança hídrica e a resiliência das comunidades frente às mudanças climáticas e ao uso da terra (Viola *et al.*, 2009).

Os dados topográficos são cruciais para a estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica. Em modelos como o RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), o fator topográfico (LS) é obtido diretamente do Modelo Digital de Elevação, sendo um componente essencial para o cálculo da perda de solo (Bacellar, 2023).

Bacellar (2023) afirma que existe uma relação recíproca complexa entre o relevo, a água e o desenvolvimento de voçorocas. A topografia, com suas formas de relevo anfiteátricas e declividades específicas, condiciona o surgimento e a evolução dessas feições erosivas por sua vez, as voçorocas modificam a dinâmica hídrica local e regional, atuando como drenos que rebaixam o aquífero freático e alteram o regime hidrológico, aumentando as vazões e o transporte de sedimentos durante as chuvas e reduzindo o fluxo de base na estiagem. No Complexo Bação, em Minas Gerais, mapas topográficos derivados de modelos digitais de relevo obtidos por imagens de radar foram cruciais para caracterizar as áreas propensas a voçorocas (Bacellar, 2023). A análise topográfica detalhada é, portanto, indispensável para a identificação de áreas de alto risco de erosão e voçorocamento (Costa *et al.*, 2022). Isso permite a implementação de práticas conservacionistas e de engenharia do solo de forma preventiva e localizada, otimizando recursos e maximizando a eficácia das intervenções para proteger a qualidade do solo e da água.

Para Lopes *et al.* (2020), embora os levantamentos topográficos não meçam diretamente a qualidade da água, eles exercem uma influência indireta fundamental ao condicionar o fluxo de sedimentos e poluentes. O relevo, por exemplo, afeta a velocidade do fluxo de água, o que, por sua vez, impacta a dispersão e a concentração de contaminantes. No caso do desastre da barragem de Fundão no Rio Doce, em Minas Gerais, fatores topográficos do terreno, como a inclinação, influenciaram diretamente a velocidade do fluxo de água e a propagação dos rejeitos, justificando variações na qualidade da água em diferentes pontos da bacia.

Estudos que utilizam sensoriamento remoto para monitorar parâmetros de qualidade da água, como turbidez e clorofila-a, frequentemente utilizam a topografia como um fator

explicativo para a propagação e a distribuição espacial dos impactos (Costa *et al.*, 2022). A topografia atua como um fator de controle fundamental na dinâmica de transporte de poluentes e sedimentos dentro de uma bacia. Isso significa que levantamentos topográficos precisos são essenciais para modelar e prever a dispersão de impactos ambientais na água, permitindo uma resposta mais eficaz a eventos de contaminação e o planejamento de medidas de recuperação ambiental (Lopes *et al.*, 2020).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2014) em um trabalho em conjunto com o Banco Mundial, os levantamentos topográficos são de importância crítica em todas as fases do planejamento e da segurança de barragens e açudes. Desde os estudos preliminares e de viabilidade até a delimitação de áreas de inundação, os planos topográficos do local da barragem e da bacia hidrográfica, incluindo o contorno do reservatório, são elementos cruciais do projeto (Banco Mundial e ANA, 2014). Mapas topográficos detalhados são necessários para estimar os volumes dos reservatórios, as áreas a serem inundadas e para caracterizar as condições topográficas, geológicas, geotécnicas, hidrológicas e sismológicas do local. Para barragens de menor porte ou em situações em que a topografia detalhada é escassa, Modelos Digitais de Elevação como os da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) podem ser utilizados para estudos simplificados de inundação. A precisão dos levantamentos topográficos é um fator determinante para a segurança e a viabilidade econômica de projetos de infraestrutura hídrica (Banco Mundial e ANA, 2014). A minimização de riscos de falhas estruturais e de impactos socioambientais imprevistos depende diretamente da acurácia desses dados, tornando-os vitais para a gestão sustentável e a segurança hídrica. Erros na topografia podem levar a cálculos incorretos de capacidade, dimensionamento inadequado e, em casos extremos, a colapsos com consequências catastróficas.

O Potencial de Uso Conservacionista (PUC) é uma ferramenta de zoneamento que emprega técnicas de geoprocessamento para investigar as potencialidades e limitações do meio físico, subsidiando o ordenamento e o planejamento do uso do solo em bacias hidrográficas (China, 2024). O PUC é derivado da combinação de mapas de solos, litologia e, fundamentalmente, da declividade do terreno, que é obtida a partir de levantamentos topográficos. Essa abordagem permite estratificar as áreas da bacia quanto ao seu potencial natural de uso de forma sustentável. A equação 1 mostra o cálculo necessário para definição do valor do PUC:

$$\text{PUC: } \Sigma [(Si \times Ps) + (Li \times Pl) + (Di \times Pd)] \quad (1)$$

A aplicação da equação é baseada nas seguintes definições: Si representa os solos da classe, Li representa a litologia da classe, Di representa a declividade da classe, Ps é o peso relativo dos solos, Pl é o peso relativo da litologia. Pd é o peso relativo da declividade e PUC é o Potencial de Uso Conservacionista

China (2024) afirma que a declividade, um fator topográfico, possui um peso significativo de 50% no cálculo do PUC, dada sua influência direta na recarga hídrica (maior declividade resulta em menor infiltração de água), na aptidão agrícola (dificulta o manejo agropecuário) e na suscetibilidade a processos erosivos (favorece a erosão). No estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Araçuaí, em Minas Gerais, China (2024) observa que áreas com relevo forte ondulado e solos pouco desenvolvidos são associadas a um PUC Médio, enquanto áreas de relevo suave ondulado apresentam um PUC Alto, demonstrando a influência direta da topografia na sustentabilidade do uso da terra. O zoneamento baseado em dados topográficos permite uma alocação mais eficiente e sustentável do uso da terra dentro de uma bacia. Isso otimiza a produtividade agrícola em áreas de menor declividade e prioriza a conservação e restauração em áreas mais vulneráveis, promovendo um equilíbrio essencial entre o desenvolvimento e a proteção ambiental (China, 2024).

3.3 ESTUDOS DE CASO COM FOCO NO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Minas Gerais, com sua vasta extensão territorial e complexidade hidrológica, tem sido palco de inúmeras pesquisas e estudos de caso que demonstram a aplicação prática dos levantamentos topográficos na gestão de bacias hidrográficas. O foco no Norte de Minas Gerais é particularmente relevante devido aos desafios hídricos específicos da região, como a semiaridez em algumas áreas e a necessidade de gestão integrada de grandes sistemas fluviais (ANA, 2018).

Instituições de ensino superior e pesquisa em Minas Gerais, como a UFMG, UFV, UFVJM, Unimontes e UFU, têm contribuído significativamente para o corpo de conhecimento sobre gestão de bacias hidrográficas (China, 2024). A UFMG, por exemplo, possui estudos sobre mapeamento geomorfológico e potencial de uso conservacionista (Costa e Pereira, 2019). O trabalho de Isabela Saldanha China (2024), defendida na UFMG Montes Claros, é um exemplo direto da aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a análise integrada e espacial de bacias hidrográficas, com foco na Bacia Hidrográfica do Rio Araçuaí, que se localiza no Vale do Jequitinhonha (China, 2024). A concentração de pesquisas e teses nessas universidades, especialmente aquelas com campi em regiões como o Norte de Minas, indica uma base de conhecimento robusta e um compromisso com a resolução de problemas hídricos

específicos do estado. Essas instituições são, portanto, fontes valiosas para a pesquisa e o desenvolvimento de soluções aplicadas à gestão de bacias (Filho, Antunes e Vettorazzi, 2012).

3.4. LIMITAÇÕES E DESAFIOS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Apesar dos avanços significativos nas tecnologias de levantamento topográfico, a gestão sustentável de bacias hidrográficas ainda enfrenta desafios e apresenta vastas perspectivas para o futuro.

Uma das principais limitações atuais é a heterogeneidade na disponibilidade de dados topográficos de alta resolução em certas regiões do Brasil, incluindo partes de Minas Gerais (Castro, 2022). Áreas remotas ou de difícil acesso frequentemente carecem de levantamentos detalhados, o que pode comprometer a precisão dos estudos e a eficácia das intervenções. Por exemplo, a distribuição geográfica das estações hidrometeorológicas é heterogênea, com algumas regiões apresentando maior densidade de dados do que outras. Essa lacuna de dados topográficos de alta resolução representa um desafio para a implementação de uma gestão hídrica verdadeiramente integrada e sustentável em todas as escalas, especialmente em um país de dimensões continentais como o Brasil. Isso reforça a importância de políticas públicas que incentivem a aquisição sistemática e a disponibilização desses dados em nível nacional e regional (Castro, 2022).

Além disso, há uma necessidade contínua de mais estudos de caso regionalizados, particularmente no Norte de Minas Gerais. A adaptação de metodologias e tecnologias às características específicas de cada região é crucial para garantir a relevância e a aplicabilidade das soluções propostas.

A verdadeira potência dos levantamentos topográficos é liberada quando seus dados são integrados a um ecossistema de informações geoespaciais mais amplo. A combinação de dados topográficos com outras camadas de informação, como uso do solo, geologia, dados climáticos e socioeconômicos, em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permite uma análise holística e uma tomada de decisão mais informada (Bacellar, 2023).

O PUC, por exemplo, é um método que demonstra essa integração, combinando mapas de solos, litologia e declividade para uma análise espacial integrada (China, 2024). Essa abordagem permite a criação de modelos mais complexos e a identificação de relações multifatoriais, como a interdependência entre a declividade, o tipo de solo e o potencial de uso conservacionista (China, 2024). A integração transforma dados brutos em inteligência espacial acionável, capacitando os gestores a compreenderem as complexas interações dentro da bacia e a desenvolverem estratégias de manejo mais eficazes e adaptadas às realidades locais.

O futuro da gestão de bacias hidrográficas será cada vez mais moldado pela evolução contínua das tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento. O potencial de tecnologias como lidar e drones para aprimorar a precisão e a frequência dos levantamentos topográficos é imenso, permitindo um monitoramento mais dinâmico e responsivo. A capacidade de obter dados de alta resolução espacial e temporal, como os 3 cm/pixel oferecidos pelos VANTs., permite o desenvolvimento de modelos e simulações mais realistas e cenários preditivos.

A evolução contínua dessas tecnologias aponta para um futuro onde a gestão de bacias hidrográficas poderá ser baseada em "gêmeos digitais" do ambiente. Essas representações virtuais de alta fidelidade permitirão simulações em tempo real e tomadas de decisão proativas para enfrentar os desafios complexos das mudanças climáticas, da variabilidade hídrica e das dinâmicas de uso da terra. A capacidade de modelar e prever com precisão as respostas da bacia a diferentes cenários permitirá uma gestão mais resiliente e adaptativa.

4 METODOLOGIA

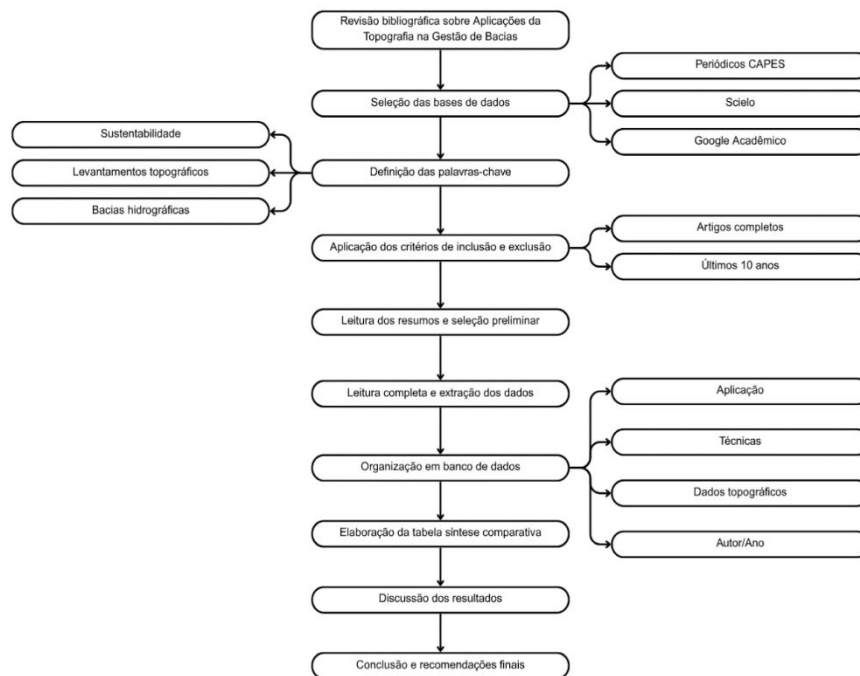
Com o intuito de alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram consultadas publicações científicas, como artigos e dissertações, disponíveis no Google Acadêmico, periódicos Capes e na plataforma SciELO. As buscas foram realizadas com o uso das palavras-chave “levantamentos topográficos”, “bacias hidrográficas” e “sustentabilidade”, considerando produções publicadas na última década.

Foram priorizados os materiais que apresentavam maior relevância e principalmente com aplicação em bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais. Isso foi determinante como critério de inclusão e exclusão para a composição da tabela síntese comparativa dos artigos pesquisados. Os critérios de inclusão e exclusão também foram definidos considerando a disponibilidade do texto completo, publicado com revisão por pares, dentro do período estabelecido. Dessa forma, foram excluídos os estudos duplicados, bem como aqueles que apresentavam apenas o resumo, sem o artigo completo.

Por fim foram extraídos os dados de sete publicações dos últimos 10 anos selecionadas com base nos critérios supracitados. Estes foram organizadas em um banco de dados, com a finalidade de compor a tabela síntese contendo: as principais técnicas de levantamento topográfico utilizadas, dados topográficos, a aplicação principal do dado para o estudo de bacias hidrográficas e o respectivo ano/autor, que serviu de base para a análise comparativa e discussão dos resultados.

A seguir, na figura 5, apresenta-se um fluxograma de atividades com a metodologia da presente pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Próprio autor (2025)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversos estudos de caso em Minas Gerais ilustram a importância dos levantamentos topográficos e dados espaciais na gestão hídrica como apontado anteriormente. A seguir a Figura 4 representa a delimitação das bacias hidrográficas mineiras como instrumento de gestão de recursos hídricos (ANA, 2019).

[illegible]

5.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

5.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAÇUAÍ

**TECNOLOGIAS INOVADORAS DA ENGENHARIA DE MINAS:
EFICIÊNCIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE - VOLUME 2**

zoneamento de uso do solo que equilibra a produtividade com a conservação, sendo um modelo aplicável a outras bacias do Norte de Minas.

5.3 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS MORTES

Na bacia hidrográfica do Rio das Mortes, no sul de Minas Gerais, o modelo RUSLE foi empregado para estimar a vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica. Neste contexto, o fator topográfico, obtido diretamente do Modelo Digital de Elevação, é crucial para o mapeamento e a combinação de mapas por álgebra de mapas. Os resultados do estudo indicaram que 50,28% da área da bacia apresentou uma perda de solo superior a 10 toneladas por hectare por ano, sinalizando a presença de áreas altamente suscetíveis à erosão hídrica. A aplicação do RUSLE na bacia do Rio das Mortes demonstra que os levantamentos topográficos não são apenas para descrição, mas para o diagnóstico preditivo de problemas ambientais. Isso permite a identificação proativa de áreas vulneráveis à erosão e a implementação de medidas preventivas antes que a degradação se agrave, otimizando a alocação de recursos para a conservação do solo (SILVA *et al*, 2021).

5.4 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

O estudo do Rio Doce, após o desastre da barragem de Fundão, ilustra como os levantamentos topográficos são indiretamente relevantes no monitoramento da qualidade da água (Lopes *et al.*, 2020). A pesquisa utilizou sensoriamento remoto para monitorar parâmetros de qualidade da água, e os fatores topográficos do terreno, como a inclinação, foram identificados como influenciadores da velocidade do fluxo de água e da propagação dos rejeitos (Brito *et al.*, 2022). A distância do local do rompimento e o percurso da água no rio justificaram as variações na qualidade da água observadas (Brito *et al.*, 2022). O caso do Rio Doce demonstra que a topografia, mesmo em desastres ambientais, desempenha um papel crítico na dinâmica de dispersão de contaminantes. Isso sublinha a necessidade de incorporar dados topográficos em modelos de risco e planos de resposta a emergências, permitindo uma compreensão mais completa da propagação dos impactos e uma resposta mais eficaz.

5.5 BACIA DO RIBEIRÃO MARCELA

Na bacia do Ribeirão Marcela, no sul de Minas Gerais, foi realizado um mapeamento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K0) utilizando Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) (Santos *et al.*, 2025). A heterogeneidade do K0 na bacia foi atribuída a fatores como tipos de solo, uso e ocupação do solo, densidade e textura. Embora o estudo não

detalhe a influência direta da topografia na condutividade hidráulica do solo, a variabilidade espacial do solo e do uso da terra é fortemente influenciada pela topografia, sugerindo uma conexão indireta. O SSG provou ser uma ferramenta eficaz para entender a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial do K₀, de grande valor para a gestão de solo e água (Santos *et al.*, 2025). Isso indica a necessidade de futuras investigações sobre essa inter-relação para uma gestão hídrica mais completa, explorando como a topografia influencia a distribuição das propriedades do solo que afetam a infiltração e o escoamento da água.

5.6 COMPLEXO BAÇÃO

O Complexo Bação, em Minas Gerais, foi objeto de um estudo sobre as interações recíprocas entre relevo, água e voçorocas (Bacellar, 2023). Levantamentos topográficos, utilizando modelos digitais de relevo obtidos a partir de imagens orbitais de radar, foram cruciais para a caracterização geomorfológica e a compreensão dos condicionantes do desenvolvimento das voçorocas.

O relevo e a água condicionam o surgimento e a evolução das voçorocas, que, por sua vez, modificam a dinâmica hídrica local e regional, contribuindo para o rebaixamento do aquífero e alterações no regime hidrológico. O caso do Complexo Bação demonstra que a topografia não é um elemento estático, mas sim um componente dinâmico que interage com a hidrologia, influenciando — e sendo influenciada por — processos erosivos severos, como as voçorocas (Bacellar, 2023).

De acordo com Bacellar (2023), isso reforça a necessidade de um monitoramento topográfico contínuo para compreender a evolução da paisagem e planejar intervenções eficazes.

5.7 CÓRREGO DO GLÓRIA (UBERLÂNDIA)

No Córrego do Glória, em Uberlândia, Minas Gerais, drones (VANTs) foram aplicados para mapeamento e monitoramento de áreas degradadas por extração de cascalho dentro da bacia (Barcelos, 2017). Este estudo demonstrou a capacidade dos drones de gerar ortomosaicos e MDEs/MDTs de alta resolução para avaliação ambiental e identificação de processos erosivos, como voçorocas. O estudo do Córrego do Glória ilustra o potencial dos drones para o monitoramento de microbacias e áreas específicas dentro de bacias maiores, permitindo uma gestão mais granular e responsiva a impactos localizados (Barcelos, 2017). Barcelos (2017) afirma também que essa capacidade é particularmente relevante para a recuperação de áreas degradadas e a manutenção da saúde da bacia, ao possibilitar a aquisição de dados de alta qualidade e resolução em áreas de difícil acesso e com custos reduzidos.

A Tabela 1 apresenta o resultado da pesquisa bibliográfica realizada no presente estudo, mostrando as principais técnicas empregadas para levantamentos topográficos aplicados em bacias hidrográficas de acordo com a leitura em bibliografia. Salienta-se as vantagens na gestão de bacias hidrográficas, assim como as aplicações-chave.

Tabela 1: Tecnologias de Levantamento Topográfico e suas Aplicações na Gestão de Bacias Hidrográficas.

Tecnologia	Princípio Básico	Vantagens na Gestão de Bacias Hidrográficas	Aplicações -chave
Levantamento Topográfico Convencional (Estações Totais, GNSS)	Medição direta de pontos no terreno.	Alta precisão pontual, ideal para áreas pequenas e projetos de engenharia.	Levantamentos de campo para projetos de infraestrutura.
Modelos Digitais de Elevação (MDE/DEM) a partir de imagens de satélite	Representação digital da superfície do terreno.	Base para análises de declividade, orientação e delimitação de bacias.	Delimitação de bacias e sub-bacias, modelagem hidrológica.
LiDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>)	Emissão de pulsos de laser para medição de distância.	Alta precisão, penetração de vegetação, geração de MDEs detalhados.	Mapeamento de terreno em áreas florestadas, estudos de bacias hidrográficas de difícil acesso.
Fotogrametria com Drones (VANTs)	Aquisição de imagens aéreas para criação de modelos 3D.	Baixo custo, alta resolução espacial e temporal, flexibilidade, agilidade.	Monitoramento de áreas degradadas, mapeamento geomorfológico, produção de ortomosaicos e MDEs/MDTs.

Fonte: Próprio autor (2025)

De acordo com a tabela, percebe-se que cada técnica de levantamento topográfico pode ser mais ou menos vantajosa dependendo do tipo de área estudada, do objetivo do trabalho e dos recursos disponíveis. O interessante é notar como essas ferramentas, mesmo tão diferentes entre si, se complementam e ajudam a entender melhor o espaço geográfico e os desafios da gestão ambiental.

O levantamento convencional, feito com estação total ou GNSS, ainda é muito utilizado quando se busca precisão máxima em locais pontuais, como áreas de obras ou projetos muito específicos. Ele demanda bastante tempo e esforço de campo, o que pode não ser viável em áreas maiores. Em áreas de menores áreas este levantamento convencional pode ser indicado e obter um menor custo.

Já os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) têm ganhado espaço por permitirem uma sinoptica da paisagem, ajudando a identificar o relevo, delimitar bacias hidrográficas e simular o comportamento da água na superfície. Eles podem não ter a mesma precisão de uma medição em campo, mas oferecem agilidade e custo reduzido em levantamentos de áreas maiores.

A tecnologia LiDAR é aquela que impressiona pela riqueza de detalhes. Ela consegue detalhar até mesmo sob a vegetação e fornecer dados bastante precisos. Por isso, é muito útil em áreas florestadas de difícil acesso. Embora o custo elevado limite seu uso em alguns projetos, deve-se avaliar a demanda e os objetivos.

Por outro lado, os drones (VANTS) têm se popularizado justamente pelo equilíbrio que oferecem entre resolução, mobilidade e custo. São ideais para mapear áreas degradadas, acompanhar o avanço de voçorocas e produzir imagens de altíssima qualidade em um curto espaço de tempo.

A Tabela 2 é a síntese dos artigos pesquisados com as palavras-chave propostas na metodologia nos últimos 10 anos para a discussão do tema.

Tabela 2- Análise comparativa de técnicas.					
Bacia	Hidrográfica	Técnicas Principais Utilizadas	Dados Topográficos	Saída/Aplicação Principal	Autor (Ano)
Rio São Francisco		Levantamentos topográficos e dados espaciais em planejamento de grande escala.	Fundamentais para o planejamento de infraestruturas hídricas e controle de erosão em uma bacia de grande magnitude.	Revitalização e gestão da bacia hidrográfica do Rio São Francisco	Castro e Pereira (2019)
Rio Araçuaí		Potencial de Uso Conservacionista (PUC) utilizando geoprocessamento, álgebra de mapas, e combinação de mapas de solos, litologia e declividade.	A declividade (fator topográfico) é o componente principal, com 50% de peso no cálculo do PUC, influenciando recarga hídrica, aptidão agrícola e suscetibilidade à erosão.	Zoneamento de uso do solo para gestão sustentável bacia hidrográfica do Rio Araçuaí	China (2024)
Rio das Mortes		Modelo RUSLE (<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>) implementado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), combinando fatores de erosividade da chuva, cobertura e manejo do solo, erodibilidade do solo e fator topográfico (LS).	O fator topográfico (LS) é obtido diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE) e é crucial para o cálculo da perda de solo.	Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica e identificação de áreas de alto risco da bacia hidrográfica do Rio das Mortes	Silva <i>et al</i> (2020)
Rio Doce		Sensoriamento remoto utilizando imagens de satélite <i>Landsat 8</i> (plataforma <i>Google Earth Engine</i>) para monitoramento de parâmetros de qualidade da água (turbidez, clorofila-a, profundidade do disco de Secchi).	Fatores topográficos (inclinação do terreno) influenciaram indiretamente a velocidade do fluxo de água e a propagação dos rejeitos, justificando variações na qualidade da água.	Monitoramento dos impactos ambientais de desastres (rompimento de barragem) na qualidade da água e compreensão da dispersão de contaminantes.	Brito <i>et al</i> (2022)
		Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) para mapeamento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica	A heterogeneidade do K0 é atribuída a fatores como tipos de solo, uso e ocupação do solo, densidade e textura, que	Compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial do K0 para gestão de solo e água.	Santos <i>et al</i> (2025)

Ribeirão Marcela	do solo saturado (K0). Coleta de amostras de solo em grade.	são influenciados pela topografia.		
Complexo Bação	Utilização de mapas topográficos derivados de modelos digitais de relevo (obtidos por imagens de Radar) para caracterização geomorfológica. Análise de formas de relevo, declividades e controle estrutural.	Crucial para identificar formas de relevo anfiteátricas, declividades específicas e lineamentos estruturais que condicionam o surgimento e a evolução de voçorocas.	Compreensão das interações recíprocas entre relevo, água e voçorocas, e identificação de áreas propensas a erosão.	Bacellar (2023)
Córrego do Glória (Uberlândia)	Drones (VANTs) para aquisição de imagens aéreas de alta resolução. Fotogrametria para geração de ortomosaicos, Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e Modelos Digitais de Terreno (MDTs) usando software como <i>Agisoft PhotoScan</i> .	Geração de MDEs e MDTs de alta resolução para avaliação ambiental e identificação de processos erosivos (voçorocas).	Mapeamento e monitoramento de áreas degradadas por extração de cascalho e processos erosivos.	Barcelos (2017)

Fonte: Próprio autor (2025)

A tabela apresentada mostra as diferentes técnicas topográficas utilizadas em diversas bacias hidrográficas, destacando como elas se adaptam às características de cada região, aos objetivos dos estudos e aos recursos disponíveis. Isso deixa claro que os levantamentos topográficos, combinados com tecnologias como sensoriamento remoto, geoprocessamento e fotogrametria, são fundamentais para entender e gerenciar essas bacias de forma eficiente.

Na bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais, foram utilizados levantamentos topográficos e espaciais tradicionais em grande escala, por meio de estações totais, GPS de alta precisão e imagens de satélite. Esses métodos são fundamentais para planejar grandes obras de infraestrutura hídrica, delimitar áreas de preservação e controlar processos erosivos em regiões amplas.

Na bacia do Rio Araçuaí, foi aplicado o Potencial de Uso Conservacionista (PUC) com apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Foram integrados mapas de solos, litologia e declividade, sendo que a declividade foi obtida a partir de curvas de nível e levantamentos de campo, sem o uso direto do MDE. Para combinar esses dados, foi empregada a técnica de álgebra de mapas, disponível em softwares como *ArcGIS* e *QGIS*. Essa escolha foi feita porque o objetivo foi gerar um zoneamento detalhado do uso do solo, priorizando a sustentabilidade e a recarga hídrica.

No caso do Ribeirão Marcela, foi utilizada a técnica de Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), uma metodologia de geoestatística que permite mapear a variabilidade espacial de uma propriedade, no caso, a condutividade hidráulica do solo saturado (K0). Os dados foram

coletados em campo a partir de amostragens em grade regular. Em seguida, esses dados foram processados em softwares de geoestatística (como o SGeMS ou variogramas feitos em ambientes SIG), sem a utilização de MDE. A escolha dessa técnica se deve ao objetivo específico de compreender a variabilidade da condutividade do solo para fins de manejo hídrico e conservação, sem foco principal no relevo.

Na bacia do Rio das Mortes, foi utilizado o modelo RUSLE em ambiente SIG, com o fator topográfico (LS) derivado do MDE, permitindo identificar áreas com maior risco de erosão e orientar medidas de conservação.

No Rio Doce, utilizaram-se imagens do satélite Landsat 8, processadas no Google Earth Engine, para monitorar a propagação dos rejeitos da barragem e a qualidade da água. O MDE foi essencial para entender como a inclinação do terreno influenciou a dispersão dos contaminantes.

No Complexo Bação, foram empregados modelos digitais derivados de radar, processados em softwares como *ENVI* e *ArcGIS*, para gerar mapas detalhados de relevo, analisar declividades e identificar estruturas que favorecem processos erosivos como voçorocas.

No Córrego do Glória, foram usados drones (VANTs) para capturar imagens aéreas de alta resolução e o software *Agisoft PhotoScan* (atual *Agisoft Metashape*) para gerar ortomosaicos, Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Terreno (MDT). Esses produtos permitiram identificar processos erosivos e monitorar áreas degradadas.

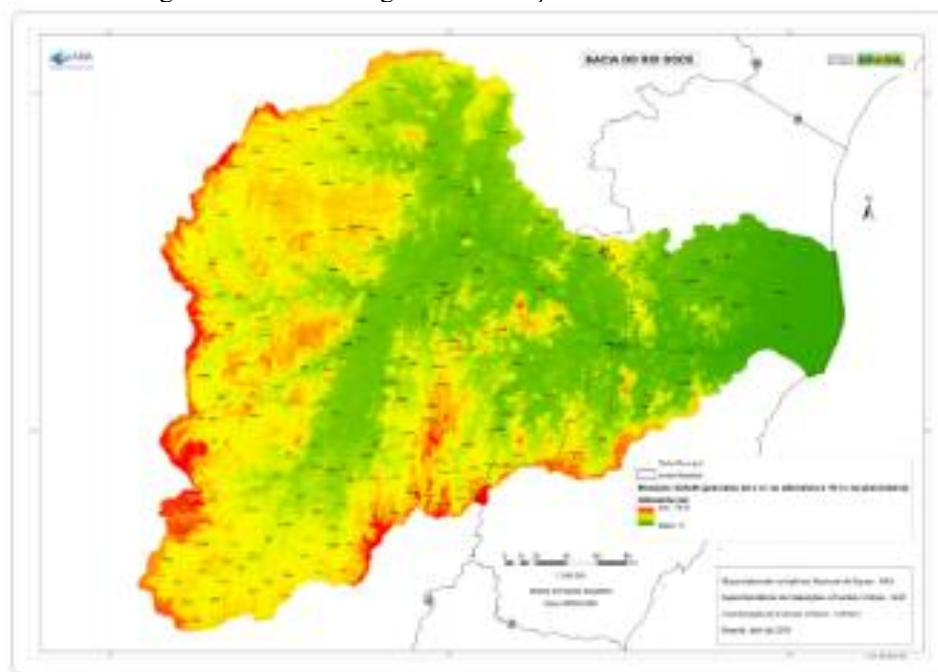
Quando os sete estudos são analisados, percebe-se que cinco deles utilizaram diretamente o MDE ou produtos derivados, mostrando a importância dessa ferramenta para analisar o relevo e planejar ações de manejo em bacias hidrográficas. Já os outros dois estudos o do Rio Araçuaí e o do Ribeirão Marcela não usaram MDE diretamente. O Rio Araçuaí utilizou mapas derivados de levantamentos de campo e curvas de nível, combinados em SIG, enquanto o Ribeirão Marcela baseou-se em dados de campo detalhados e técnicas geoestatísticas, sem apoio de modelos digitais de elevação.

A escolha da técnica a ser aplicada em cada bacia hidrográfica depende de diversos fatores. Um dos principais é o objetivo do estudo: por exemplo, se a intenção é entender a erosão, o MDE e o RUSLE são mais indicados; se o foco for na variabilidade do solo, técnicas estatísticas e amostragens de campo são prioritárias. Além disso, a escala da bacia interfere diretamente: bacias grandes exigem métodos mais generalizados e integrados, enquanto bacias pequenas permitem levantamentos mais detalhados, como drones ou medições em campo. Outro fator determinante é o orçamento disponível, pois métodos que envolvem drones, radar ou imagens de satélite de alta resolução têm custo elevado.

A seguir um texto síntese comparativo:

- Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e SIG: A maioria dos estudos analisados, como no Rio das Mortes, utilizou os MDEs como base fundamental para extrair informações topográficas, como declividade e formas do relevo. Esses dados foram integrados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitindo análises espaciais detalhadas, identificação de áreas com maior risco de erosão e aplicação de modelos, como o RUSLE, para estimar perdas de solo. Já no caso do Rio Araçuaí, mesmo sem usar diretamente o MDE, foram empregadas curvas de nível e dados coletados em campo, integrados ao SIG, para calcular o Potencial de Uso Conservacionista (PUC) e definir as melhores zonas para conservação ou uso agrícola, sempre com foco na sustentabilidade. Pode-se perceber a partir da figura 6:

Figura 6 – Modelo Digital de Elevação da bacia do Rio Doce



Fonte: ANA (2016)

- Sensoriamento Remoto: O estudo do Rio Doce é um bom exemplo de como as imagens de satélite (Landsat 8), processadas no *Google Earth Engine*, ajudam a monitorar grandes áreas e acompanhar os impactos ambientais após eventos extremos, como o rompimento da barragem, como visto na figura 7. Nesse caso, a topografia, especialmente a inclinação do terreno, foi essencial para entender como os rejeitos se espalharam pela bacia. Já no Complexo Bação, os pesquisadores usaram MDEs derivados de dados de radar para

detalhar o relevo, identificar formas anfiteátricas e mapear áreas vulneráveis à formação de voçorocas e à intensificação de processos erosivos.

- Drones (VANTs) e Fotogrametria: O caso do Córrego do Glória mostra como o uso de drones combinado à fotogrametria vem revolucionando os levantamentos em bacias hidrográficas. Essa tecnologia possibilita gerar ortomosaicos, MDEs e Modelos Digitais de Terreno (MDTs) com alta resolução e riqueza de detalhes. Além de ser uma opção mais acessível e ágil em comparação a métodos tradicionais, ela permite monitorar áreas menores com grande precisão, sendo muito útil para identificar processos erosivos ativos e mapear áreas degradadas. Apesar de ser questionada a autonomia dos drones comuns, os modelos de asas fixas poder resolver tal problema pois possuem maior estabilidade e autonomia em comparação aos modelos utilizados.
- Simulação Geoestatística: No Ribeirão Marcela, foi aplicada a técnica de Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) para mapear a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K0). Apesar de não ser uma técnica topográfica em sentido estrito, os resultados obtidos estão fortemente ligados à influência do relevo. A topografia pode afetar diretamente a distribuição dessa propriedade, interferindo no comportamento da água no solo e na dinâmica hídrica geral da bacia. Essa abordagem ajuda a compreender melhor como as características do terreno e do solo se relacionam, contribuindo para um manejo mais eficiente e sustentável. A figura 8 ilustra uma das possíveis aparências do modelo geoestatístico.

Dito isto, cabe destacar que, ao longo da revisão bibliográfica realizada, verificou-se uma escassez significativa de estudos focados em bacias hidrográficas localizadas no Norte de Minas Gerais. A maior parte dos trabalhos identificados concentra-se em regiões centrais ou sul do estado, onde há maior disponibilidade de infraestrutura de pesquisa e monitoramento.

No total, foram encontrados sete artigos principais que abordam diretamente o uso de técnicas topográficas e dados espaciais na análise de bacias hidrográficas em Minas Gerais, os quais foram utilizados para compor a tabela comparativa apresentada. Entretanto, destes, apenas um apresenta relação indireta com o norte do estado de Minas Gerais.

Essa lacuna evidencia a necessidade de incentivo a novos estudos voltados para o Norte de Minas Gerais, uma região que apresenta alta vulnerabilidade ambiental, desafios relacionados à escassez hídrica e forte dependência da agricultura. A ampliação do número de pesquisas nesta região poderia contribuir de maneira decisiva para o planejamento hídrico, a conservação dos

recursos naturais e o desenvolvimento sustentável local, oferecendo suporte técnico para políticas públicas e ações de manejo mais eficazes.

6 CONCLUSÃO

A metodologia aplicada neste trabalho se mostrou eficiente para atingir os objetivos além de ter evidenciado a relevância estratégica dos levantamentos topográficos para a gestão sustentável das bacias hidrográficas, com ênfase na realidade do estado de Minas Gerais.

Verificou-se que esses levantamentos são fundamentais para diversas aplicações, como a revitalização e gestão da bacia do Rio São Francisco, o zoneamento de uso do solo visando à gestão sustentável da bacia do Rio Araçuaí, a estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica e a identificação de áreas de alto risco na bacia do Rio das Mortes, o monitoramento dos impactos ambientais decorrentes de desastres, como o rompimento de barragens, na qualidade da água e na dispersão de contaminantes na bacia do Rio Doce, a análise da magnitude e da estrutura da variabilidade espacial do coeficiente de permeabilidade (K_0), essencial para a gestão do solo e da água no Ribeirão Marcela, a compreensão das interações entre relevo, dinâmica hídrica e formação de voçorocas no complexo do Bação, contribuindo para a identificação de áreas suscetíveis à erosão, além do mapeamento e monitoramento de áreas degradadas pela extração de cascalho e processos erosivos na região do Córrego da Glória.

Também se conclui que o método mais aplicado em bacias hidrográficas mineiras nos últimos 10 anos foi o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) integrados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O estudo mostrou que esta combinação tem sido, a principal base para análises hidrológicas e ambientais, permitindo a delimitação precisa das bacias, o cálculo de declividades, a identificação de áreas suscetíveis à erosão e o planejamento de estratégias de conservação.

Em regiões de difícil acesso ou com vegetação densa, como áreas montanhosas e florestadas, o método lidar se mostra especialmente eficaz, devido à sua alta precisão e à capacidade de gerar dados detalhados mesmo sob cobertura vegetal.

Já em áreas menores ou em projetos com restrições orçamentárias, a fotogrametria com drones (VANTs) surge como uma alternativa vantajosa, combinando alta resolução, agilidade operacional e menor custo, além de possibilitar um monitoramento frequente e detalhado.

Estudos de caso em diferentes bacias hidrográficas mineiras demonstraram que essas ferramentas tecnológicas superam muitas limitações dos métodos convencionais. No entanto, foi identificada uma carência de estudos aplicados ao Norte de Minas Gerais uma região que enfrenta sérios desafios hídricos e elevada vulnerabilidade socioambiental. Essa lacuna revela a

necessidade de incentivar pesquisas e projetos voltados especificamente para essa área, a fim de subsidiar políticas públicas e estratégias de gestão regional mais adequadas.

Verifica-se abundância de trabalhos e artigos para este tema relacionado à topografia nos últimos 10 anos, entretanto ocorreu dificuldade ao relacioná-lo à aplicação com o termo de bacias hidrográficas e sustentabilidade. Conclui-se que o tema é relevante e atual sob o ponto de vista tecnológico, porém precisa se aprimorado sob o ponto de vista ambiental e hidrológico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento das análises na região Norte de Minas e a aplicação prática dessas ferramentas em projetos de manejo integrado das bacias hidrográficas, visando conciliar o desenvolvimento territorial com a preservação dos recursos naturais.

Mais especificamente, como perspectiva de pesquisa futura, destaca-se a relevância de aprofundar os estudos na bacia hidrográfica do Rio Gorutuba, no Norte de Minas Gerais, região onde está localizado o IECT-UFVJM Campus Janaúba. Recomenda-se a aplicação do Potencial de Uso Conservacionista (PUC), integrando dados de declividade, solos e litologia obtidos por levantamentos topográficos, para realizar um zoneamento detalhado. Essa abordagem permitirá identificar áreas prioritárias para conservação, uso agrícola e recuperação ambiental, fortalecendo a gestão hídrica e contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento sustentável regional.

REFERÊNCIAS

ABRHidro - ANAIS - ANÁLISE COMPARATIVA DE OTTOBACIAS NA REGIÃO AMAZÔNICA. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/works/2161>. Acesso em: 6 jul. 2025.

ALMEIDA, Cláudia; ARAGÃO, Luiz; KAMPEL, Milton; et al. LIDAR — Divisão de Sensoriamento Remoto. www.dsr.inpe.br. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar>.

ANA (Agência Nacional de Águas). Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Final – Volume I - Diagnóstico Dos Meios Físico E Socioeconômico / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. Brasília, 2018.

ANA. O PROGESTÃO EM MINAS GERAIS SÍNTESE DO PRIMEIRO CICLO DO PROGRAMA. [s.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ANA, Modelo Digital de Elevação (MDE) de moderada resolução espacial (células de 10m) da Bacia do Rio Doce, Catálogo de Metadados da ANA, disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b4cfe37d-467c-4b67-8aaa-841b4081925b>.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas de segurança hídrica: segurança hídrica e desenvolvimento sustentável. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 29 abr. 2025.

ARGAW, M.; ABE, M.; ABATE, T. Watershed development and management practices and their impacts on rural livelihoods in Ethiopia. *Environmental Systems Research*, v. 12, n. 1, p. 1–15, 2023. Disponível em: SpringerLink. Acesso em: 18 jul. 2025.

BACELLAR, LAP. Interações recíprocas entre relevo, água e voçorocas: estudo de caso da região do Complexo Bação – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 00, 5 dez. 2023.

BANCO MUNDIAL; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Serviços Analíticos E Consultivos Em Segurança De Barragens Produto 8 Manual De Orientação Ao Empreendedores Tomo I Guia Para A Elaboração De Projetos De Barragens Relatório Final. [s.l.: s.n.], 2014.

BARCELOS, Anna Carolina et al. O uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) em monitoramentos de campo: aplicabilidades e viabilidades. 2017.

BRITO, Higor Costa; VASCONCELOS, Rochele Sheila; RUFINO, Iana Alexandra Alves; et al. Uso De Sensoriamento Remoto Para Monitoramento De Parâmetros De Qualidade De Água No Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 23, n. 90, p. 108–119, 2022.

CASTELA. Aerofotogrametria. Disponível em: <https://castela.com.br/portfolio/aerofotogrametria/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

CASTRO, CN. Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica. Livros, n. Água, problemas complexos - Brasília: IPEA, 31 mar. 2022.

CASTRO, CN; PEREIRA, CN. Revitalização Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco Histórico, Diagnóstico E Desafios - Brasília: IPEA,2019

CHAGAS, C. S. et al. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 2, p. 218–226, fev. 2010.

CHINA, Isabela Saldanha. Potencialidades E Usos Na Bacia Hidrográfica Do Rio Araçuaí, Minas Gerais. 2024.

COSTA, Cristiane Mouzinho. Risco De Inundações No Alto Curso Da Bacia Hidrográfica Do Rio Anil, São Luís -Maranhão São Luís-MA. Universidade Estadual Do Maranhão-Uema. São Luís, MA: [s.n.], 2018.

COSTA, Higor; VASCONCELOS, Rochele Sheila; ALVES, Alexandra; et al. Uso De Sensoriamento Remoto Para Monitoramento De Parâmetros De Qualidade De Água No Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. Caminhos de Geografia, v. 23, n. 90, p. 108–119, 2022.

Curso Técnico de Levantamento Aerofotogramétrico com Vant/Drone Aplicado à Topografia - Educação Continuada - UNIFOR. Educação Continuada. Disponível em: <https://unifor.br/web/educacao-continuada/curso-t%C3%A9cnico-de-levantamento-aerofotogram%C3%A9trico-com-vant/drone-aplicado-%C3%A0-topografia>. Acesso em: 4 jul. 2025.

DIAS, Rennan Mendes de Moraes dos Santos. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o plugin MGB. Volta Redonda, 2021.

FILHO, Décio Tubbs; ANTUNES, Julio Cesar Oliveira, VETTORAZZI, Janaina Silva. Bacia Hidrográfica dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim Experiências para a gestão dos recursos hídricos Edição. [s.l.: s.n.], 2012.

GEOVANINI, Adenilson. Modelo digital de elevação e modelo digital do terreno. Adenilson Giovanini. Disponível em: <https://adenilsongiovanini.com.br/blog/modelo-digital-de-elevacao/modelo-digital-de-elevacao-e-modelo-digital-do-terreno/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

GIOVANINI, Adenilson, Geoestatística: o que é e para que serve?, Adenilson Giovanini, disponível em: <https://adenilsongiovanini.com.br/blog/geoestatistica-o-que-e-e-para-que-serve/>. acesso em: 17 jul. 2025.

GOUVEIA, PNA. Caracterização Morfométrica E Hidrológica Da Bacia Hidrográfica Do Rio Pirapama, em Pernambuco. Geoconexões, v. 1, n. 15, p. 253–274, 31 jul. 2023.

HILÁRIO, D. DOS S. et al. Caracterização e mapeamento geomorfológico da sub-bacia do rio Seridó, no semiárido brasileiro. Revista Geografias, v. 20, n. 1, p. 60–79, 2024.
Igam apresenta nova base de dados hidrográficos. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/sala-de-imprensa/igam-apresenta-nova-base-de-dados-hidrograficos>. Acesso em: 6 jul. 2025.

INPE. LIDAR — Divisão de Sensoriamento Remoto. Inpe.br. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar/capa-lidar>. Acesso em: 7 jul. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

NAJI, TA, TEKA, MA E ALEMU, EA (2023). Nível de participação das comunidades nas práticas de desenvolvimento e gestão de bacias hidrográficas nas Terras Altas Centrais da Etiópia. Revisão de Estudos de Pesquisa e Desenvolvimento Socioeconômico, 7(2), 36-60. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10858921>

NETO, Amaury; SILVA, Simone; BARBOSA, Ioná. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Duas Unas, em Pernambuco. Revista Brasileira de Geografia Física, v.16, n.1, p. 123–135, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/258933>.

SÁEZ-ARDURA, F. et al. Exploring the Socio-Environmental Regulation of Water — A Systematic Review of Sustainable Watershed Management. Sustainability, v. 17, n. 4, p. 1588, 14 fev. 2025.

SANTOS, Rodrigo César de Vasconcelos dos; OLIVEIRA, Alisson Souza de; MELLO, Carlos Rogério de; et al. Simulação Sequencial Gaussiana para mapeamento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em uma bacia hidrográfica de Minas Gerais – Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, n. 1, p. 771–785, 2025.

SGB, Novo sistema disponibiliza dados de monitoramento por satélites de rios da Amazônia e Pantanal - SGB, SGB, disponível em: https://www.sgb.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/ujyx/content/novo-sistema-disponibiliza-dados-de-monitoramento-por-satelites-de-rios-da-amazonia-e-pantanal-1. acesso em: 17 jul. 2025.

Serviços Analíticos E Consultivos Em Segurança De Barragens. Manual De Políticas E Práticas De Segurança De Barragens. Manual Para A Ana E Entidades Fiscalizadoras- Relatório Final. [S.L.: S.N., S.D.].

SILVA et al. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 1, p. e007659– e007659, 31 jan. 2021.

SILVA, M. R. F. da; DIAS, N. da S.; ARAÚJO, D. E. P. de; ALMEIDA, R. D. de. A Importância Da Gestão De Bacias Hidrográficas No Semiárido Brasileiro: Um Olhar Para Bacia Do Rio Apodi-Mossoró (Rn). Revista Territorium Terram, [S.l.], v.7,n.11, p.102–119, 2024. Disponível em: https://seer.ufsj.edu.br/territorium_terram/article/view/5388. Acesso em: 29 abr. 2025.

TEMESGEN, Argaw, MESKEREM, Abi; ABATE, E. The impact of watershed development and management practices on rural livelihoods: A structural equation modeling approach. Cogent food & agriculture, v. 9, n. 1, 1 ago. 2023.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 29 abr. 2025.

UN-WATER. Integrated Water Resources Management. 2018. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/integrated-water-resources-management>. Acesso em: 29 abr. 2025.

VIOLA, MR; MELLO, CR; ACERBI JR, FW; SILVA,AM. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 5, p. 581–590, 1 out. 2009.

REALIZAÇÃO:



ACESSE NOSSO CATÁLOGO!



WWW.SEVENPUBLI.COM

CONECTANDO O **PESQUISADOR** E A **CIÊNCIA** EM UM SÓ CLIQUE.