

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M)

REVOLUÇÃO DIGITAL NAS OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHAS

**VITOR FONSECA DE BARCELOS**

Porto Alegre

2023

## REVOLUÇÃO DIGITAL NAS OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas. Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia extrativa.

Orientador: Prof. Titular Jair Carlos Koppe

Porto Alegre

2023

VITOR FONSECA DE BARCELOS

## REVOLUÇÃO DIGITAL NAS OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHAS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Titular Jair Carlos Koppe, UFRGS.

Doutor pela UFRGS, Porto Alegre – Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski (PPGE3M/UFRGS),

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Dr. Vitor Luconi Rosenhein (COPELMI Mineração),

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Iure Borges de Moura Aquino (UFCG),

Doutor pela Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, Brasil.

Coordenador do PPGE3M: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre, agosto/2023.

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, por nos guiar por caminhos desafiadores e inicialmente incompreensíveis, porém de simples entendimento para aqueles que possuem fé.

Dedico este trabalho aos meus pais, avós e demais familiares e amigos, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as oportunidades que me foram dadas, sem Ele, eu nada seria.

À minha família, em especial a minha mãe, Berenice Pinto da Fonseca Barcelos, que sempre me incentivou a seguir com os estudos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos meus professores, pela orientação e pelos conhecimentos a mim transmitidos durante estes anos, que possibilitaram chegar à realização deste trabalho. Em especial ao meu orientador, Jair Carlos Koppe.

Aos colegas do PPGE3M pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

À Orica e Vale por todo apoio e incentivos na condução dos projetos.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, que mesmo nos momentos mais difíceis me incentivaram a continuar e a me dedicar aos projetos do mestrado.

## RESUMO

A Revolução Digital tem transformado a sociedade com o desenvolvimento constante de novas tecnologias e soluções que são aplicadas com os mais diversos objetivos. Na indústria da mineração já é comum encontrar equipamentos autônomos, drones e sistemas de controle inteligentes. A indústria da mineração está mudando, e para atingir seus objetivos e se tornar mais integrada, eficiente, rentável, e sobretudo mais segura e sustentável, investimentos em tecnologia são fundamentais. Alguns dos principais focos da implementação dessas novas tecnologias são a redução da exposição ao risco, o incremento de performance operacional e a redução do impacto ambiental da mineração. Essa dissertação tem por objetivo propor e avaliar a implementação de novas tecnologias em uma mina de cobre a céu aberto e os resultados obtidos decorrentes de sua aplicação no desmonte de rochas. O estudo de caso foi feito na mina do Salobo, onde uma série de tecnologias e soluções digitais foram introduzidas nos processos de perfuração e desmonte de rochas. As iniciativas de implantação de tecnologias desenvolvidas no estudo compreendem Sistema de Iniciação Wireless, Plataforma de Gestão de Dados, Ferramentas de Controle de Teores e Diluição, e de Análise de Fragmentação. Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e operacional da implantação desses projetos, foi estabelecida um processo de validação das iniciativas, aplicando-se essas tecnologias na rotina da mina durante períodos pré-determinados. Os resultados obtidos durante essa etapa foram avaliados sob diversos aspectos de interesse, comuns ou específicos para cada uma das iniciativas. Os dados obtidos durante a etapa de validação também foram comparados com os resultados históricos dos processos aplicados tradicionalmente. Essas informações foram utilizadas para identificar e mensurar os benefícios da aplicação de cada uma dessas novas tecnologias no ambiente operacional. Após a etapa de validação, foi demonstrado que, para o caso de estudo analisado, todas as iniciativas aplicadas tiveram impacto real positivo, atendendo às expectativas de projeto e gerando benefícios quantificáveis e não quantificáveis para a operação. Com a aplicação dessas tecnologias foram identificados e mensurados ganhos em produtividade, segurança operacional, qualidade, confiabilidade, e redução de custos. Diante desses resultados positivos, as iniciativas de implantação dessas novas tecnologias seguem para a operacionalização definitiva, passando a integrar os processos de rotina da mina, agregando valor a toda cadeia de produção mineral.

Palavras-chaves: Desmonte de Rochas. Tecnologia. Digitalização. Segurança. Eficiência. Produtividade. Qualidade. Softwares e Ferramentas de Controle. Otimização de Processos.

## **ABSTRACT**

The Digital Revolution has transformed society through the constant development of new technologies and solutions that are applied with the most diverse objectives. In the mining industry, it is already common to find autonomous equipment, drones, and intelligent control systems. The mining industry is changing, and to achieve its goals and become more integrated, efficient, profitable, and above all safer and more sustainable, investments in technology are essential. Some of the main focuses of the implementation of these new technologies are the reduction of exposure to risk, the increase in operational performance and the reduction of the environmental impact of mining. This work aims to evaluate the implementation of new technologies in an open pit copper mine and the results obtained from its application in rock blasting. The case study was carried out at the Salobo mine, where a series of technologies and digital solutions were introduced in the drilling and rock blasting processes. The technologies initiatives developed in the study include Wireless Initiation System, Data Management Platform, Ore Control Modelling, and Fragmentation Analysis tools. With the objective of evaluating the technical and operational viability of implementing these projects, a validation process for initiatives was established, applying these technologies in the mine's routine during predetermined periods. The results obtained during this stage were evaluated under different aspects of interest, common or specific to each of the initiatives. The data obtained during the validation stage were also compared with the historical results of traditionally applied methods. This information was used to identify and measure the benefits of applying each of these new technologies in the operational environment. After the validation stage, it was demonstrated that, for the analyzed case study, all the initiatives applied had a real positive impact, meeting the project expectations and generating quantifiable and non-quantifiable benefits for the operation. With the application of these technologies, gains in productivity, operational safety, quality, reliability, and cost reduction were identified and measured. Due to these positive results, initiatives to implement these new technologies move on to operational stage, becoming part of the mine's routine processes, adding value to the entire mineral production chain.

**Keywords:** Rock Blasting. Technology. Digitization. Safety. Efficiency. Productivity. Quality. Control Software and Tools. Optimization.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	OBJETIVOS .....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	14
2.1	A REVOLUÇÃO DIGITAL E A MINERAÇÃO .....	14
2.2	OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHAS .....	16
2.3	APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS NO DESMONTE DE ROCHAS .....	18
2.3.1	Plataformas de Digitalização na Perfuração e Desmonte .....	18
2.3.2	Sistemas de Iniciação Sem Fio .....	21
2.3.3	Aplicação de Drones e Automação na Análise de Fragmentação .....	25
2.3.4	Aplicação de Modelos Computacionais para Controle de Teores.....	29
3	CASO DE ESTUDO: MINA DO SALOBO .....	32
3.1	APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....	32
3.2	PRINCIPAIS DESAFIOS .....	34
3.3	SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PROPOSTAS .....	36
4	PLANEJAMENTO E CONTROLE OPERACIONAL .....	38
4.1	PLATAFORMA DE GESTÃO DE DADOS.....	38
4.2	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS .....	40
5	CARREGAMENTO COM EXPLOSIVOS E INICIAÇÃO.....	43
5.1	SISTEMA DE INICIAÇÃO WIRELESS .....	46
5.2	METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS .....	48
6	ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO .....	52
6.1	SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO.....	54
6.1.1	Análise de Fragmentação na Pilha .....	55
6.1.2	Análise de Fragmentação nas Correias Transportadoras .....	57
6.2	METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	59
7	LAVRA DE ÁREAS DESMONTADAS.....	65
7.1	FERRAMENTA DE CONTROLE DE DILUIÇÃO OPERACIONAL .....	66
7.2	METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	69
8	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS .....	77



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Dashboards</i> utilizados em plataforma de controle de dados de P&D. ....	19
Figura 2 - Fluxo das Atividades do Processo de Digitalização de P&D. ....	20
Figura 3 - A evolução dos sistemas de iniciação. ....	21
Figura 4 - Comunicação por indução magnética para acionamento de iniciadores sem fio. ...	22
Figura 5 - Aplicação de detonadores sem fio na flexibilização da operação de mina à céu aberto. ....	23
Figura 6 – Esquema de furo carregado com acessório sem fio (esquerda), a ausência de aumenta a segurança durante tempestades com raios (direita). ....	24
Figura 7 - Plano de voo para levantamento de pilha com drone (esquerda) e modelo 3D gerado com o processamento das imagens em software (direita). ....	25
Figura 8 - Modelo 3D da pilha com fragmentados classificados por tamanho (esquerda) e exemplo de curva granulométrica gerada (direita). ....	26
Figura 9 - Estrutura de coleta e transferência de dados proposta por SAMETI et al. (2013). .	27
Figura 10 - Exemplo de montagem de câmera em escadeira elétrica a cabos (esquerda) e das imagens coletadas e analisadas (direita). ....	28
Figura 11 - Polígonos de qualidade gerados em ferramenta computacional. ....	29
Figura 12 - Método de deslocamento horizontal (2D) de polígonos de qualidade. ....	30
Figura 13 - Localização da mina do Salobo. ....	32
Figura 14 - Imagem área do complexo da mina do Salobo. ....	33
Figura 15 – Fluxograma de atividades com as áreas de interesse do estudo. ....	35
Figura 16 - Fluxo de dados operacionais e principais pontos de falha. ....	39
Figura 17 - Interface da plataforma de controle de dados de P&D. ....	39
Figura 18 - Tablet usado para cadastro digital de dados do carregamento com explosivos. ....	40
Figura 19 – Esquema de fluxo de dados de P&D com o uso da plataforma digital. ....	41
Figura 20 – Material de tamponamento contaminado por blocos (esquerda) e blocos soltos no colar de um furo (direita). ....	44
Figura 21 – Mapa de densidade de eventos de descarga atmosférica. ....	45
Figura 22 - Programação do detonador wireless, colocação do acessório no furo, montagem de antena e preparação dos equipamentos para envio de sinal. ....	46
Figura 23 – Exemplos de oportunidades para aplicação de detonadores sem fio. ....	47
Figura 24 - Imagem de uma das áreas dos testes, antes e depois da detonação. ....	49
Figura 25 - Aplicação de tecnologia (BlastVision™) para identificação de minas falhadas. ...	49
Figura 26 - Fluxograma de atividades de carregamento com explosivos e detonação. ....	50
Figura 27 - Caminhões trafegam sobre área já carregada com explosivos. ....	51
Figura 28 - Exemplo de imagem coletada manualmente para análise de fragmentação, e resumo geral dos resultados da análise de um desmonte. ....	52
Figura 29 - Drones usados no aerolevanteamento da pilha. ....	56
Figura 30 - Plano de voo para drone. ....	56
Figura 31 - Vista geral da área de britagem. ....	58
Figura 32 - Detalhe da câmera e unidade de processamento (esquerda), e esquema de instalação. ....	59
Figura 33 - Análise de fragmentação superficial obtida com o Fragmenter™ (3GSM). ....	60
Figura 34 - Curva granulométrica gerada pelo Fragmenter – 3GSM. ....	61
Figura 35 - Imagens automaticamente capturadas e processadas pela Fragtrack™ e disponíveis na página do BlastIQ™ Insights. ....	63
Figura 36 - Resultados da análise de fragmentação gerados pela Fragtrack™. ....	63
Figura 37 - Comportamento do movimento em uma sessão do desmonte. ....	65
Figura 38 - Mudança na disposição do corpo mineral induzida pelo desmonte. ....	66

Figura 39 - Modelo em blocos in-situ (esquerda) e o deslocado pelo desmonte usando a ferramenta de modelamento computacional (direita). .....	67
Figura 40 - Produtos gerados pela ferramenta de controle de teores: Modelo de blocos deslocado (esquerda) e polígonos de escavação otimizados (direita).....	68
Figura 41 - Dados de P&D e topografia importados para o software. ....	69
Figura 42 - Modelo de blocos pré-detonação. ....	70
Figura 43 – Modelo de blocos deslocado pela ferramenta de modelamento.....	70
Figura 44 – Polígonos de escavação obtidos pela metodologia computacional (3D). ....	71
Figura 45 - Polígonos de gerados pela metodologia 2D.....	71
Figura 46 – Modelo <i>in-situ</i> e deslocado pela detonação. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Iniciativas analisadas e seus principais objetivos.....	13
Tabela 2 - Resultados de estudo realizado na mina de Tasiast.....	31
Tabela 3 – Consolidado dos desafios e soluções propostas. ....	36
Tabela 4 - Taxas de dano nos cabos do acessório eletrônico e de falha de iniciação do furo..	45
Tabela 5 - Variação no tempo médio de tamponamento por furo. ....	50
Tabela 6 - Análise de desempenho de metodologias para análise de fragmentação. ....	64
Tabela 7 - Variações nos índices de controle de teores no L6_307_013. ....	72
Tabela 8 - Variações nos índices de controle de teores no L5_292_001. ....	73
Tabela 9 - Variações nos índices de controle de teores no L4_082_009. ....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

2D: Bidimensional.

3D: Tridimensional.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

*IN-SITU*: Material rochoso na posição original (pré-detonação);

P&D: Perfuração e desmonte;

P80: Representa a dimensão a qual 80% dos fragmentos medidos são inferiores.

PPGE3M: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

QA/QC: Quality Assurance/Quality Control, ou Controle e Garantia da Qualidade.

TRP: Temporary Rib Pillars

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas nossa sociedade tem passado por uma profunda transformação, que tem impactado não só a maneira em que trabalhamos e produzimos, mas o nosso modo de vida como um todo. Esse processo tem sido chamado de Quarta Revolução Industrial, ou mesmo Revolução Digital. As tecnologias inovadoras desenvolvidas ao longo desse processo de transformação estão modificando a sociedade e abrindo novas fronteiras para a indústria.

Inserida nesse contexto de transformação, a indústria da mineração tem encontrado na Revolução Digital a chave para ajudar a resolver muitos dos seus problemas históricos. A necessidade de explorar depósitos com teores cada vez mais baixos - muitas vezes localizados em áreas remotas, a falta de mão-de-obra especializada nas proximidades das minas, a volatilidade dos preços das commodities, e a necessidade de operações cada vez mais seguras e sustentáveis, são exemplos de desafios que o setor de mineração historicamente enfrenta. Nesse contexto complexo, a tecnologia tem um papel central na transformação da indústria mineral.

Neste trabalho, foi avaliada a aplicação de iniciativas envolvendo tecnologias e soluções digitais relacionadas ao desmonte de rochas na mina do Salobo. Considerado como uma operação crítica, o desmonte tem grande importância para a segurança e performance de toda a cadeia de produção mineral. Pois os resultados dessa operação têm grande impacto sobre as etapas subsequentes, como carregamento, transporte, britagem e moagem. Portanto, os benefícios de projetos de melhoria no desmonte podem gerar impactos positivos mesmo em outras operações.

Diante da sua significância para o processo de produção mineral, e dos riscos inerentes relacionados às atividades de desmonte de rochas, a aplicação de novas tecnologias é uma alternativa para tornar a operação mais segura e eficiente.

Os projetos analisados nesta dissertação compreendem a aplicação de tecnologias como Sistema de Iniciação Wireless, Plataforma de Gestão de Dados, Ferramentas de Controle de Teores e Diluição, e de Análise de Fragmentação. Com a aplicação dessas tecnologias é esperada uma mudança significativa na maneira em que as atividades são executadas, visando ganhos em produtividade, qualidade, confiabilidade e segurança, especialmente através da digitalização e automação.

### 1.1. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é de propor e avaliar técnica e operacionalmente, a implantação de novas tecnologias e soluções relacionadas ao desmontes de rochas, buscando a identificação e quantificação de benefícios referentes a essas iniciativas.

As soluções que serão estudadas estão listadas na Tabela 1, juntamente com os benefícios esperados com a aplicação dessas iniciativas.

Tabela 1 - Iniciativas analisadas e seus principais objetivos.

INICIATIVA	PRINCIPAIS OBJETIVOS
1 Implantação de plataforma de gestão de dados de Perfuração e Desmonte (P&D)	Otimização do fluxo de dados entre as diferentes etapas das atividades de perfuração e desmonte. Permitindo o aproveitamento adequado dos dados e sua transformação em informação de modo ágil e confiável.
2 Utilização de sistema eletrônico de iniciação sem fio em substituição ao sistema convencional (com fios).	Eliminação de riscos e restrições operacionais associados a presença aos cabos dos acessórios nas bancadas, dentro e fora do furo, aumentando a segurança e a produtividade das operações.
3 Substituição de metodologia convencional por sistemas automatizados para análise de fragmentação.	Reduzir a exposição de colaboradores ao risco, e aumentar a qualidade e representatividade das análises de fragmentação.
4 Aplicação de ferramenta de modelamento de movimentação do desmonte para controle de diluição operacional	Maximização dos resultados obtidos na lavra de material desmontado através de melhor controle da diluição e da perda de minério.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A REVOLUÇÃO DIGITAL E A MINERAÇÃO

Nossa sociedade está passando por uma transformação, diferente de qualquer outra vista antes. Estamos vivenciando uma revolução digital que está reformulando a maneira como vivemos, trabalhamos e fazemos negócios. Essa transformação tem sido referenciada como a Quarta Revolução Industrial, ou mesmo Revolução Digital. Caracterizado por uma fusão de tecnologias que está dissolvendo as fronteiras entre as esferas física, digital e biológica (SCHWAB, 2016).

Essa transformação intensa e disruptiva tem sido impulsionada em grande parte por mudanças tecnológicas, como *big data* e análises avançadas, manufatura aditiva, internet das coisas, robótica e inteligência artificial (GOENAGA et al., 2017). Juntas, essas tecnologias têm o potencial de mudar a indústria e sua relação com a sociedade e o meio ambiente em uma escala nunca experimentada.

De acordo com DURRANT-WHYTE (2015), a disrupção digital – análise de dados, computação, automação e robótica – está transformando o mundo em que vivemos, desafiando e desmantelando modelos de negócios convencionais. No entanto, essa onda digital está proporcionando oportunidades inéditas para as indústrias, e um momento de profunda mudança social e econômica.

Os impactos da Revolução Digital já são evidentes em muitos setores. Combinando análise de dados, inteligência artificial, aprendizado de máquina e automação em suas operações, muitos setores estão se tornando mais seguros, eficientes e lucrativos. Os perfis dos trabalhadores também estão mudando, à medida que as máquinas os substituem em tarefas de rotina difíceis e as tecnologias digitais permitem o controle remoto de cada vez mais atividades.

A mineração está entre as diversas indústrias com alto potencial de transformação considerando o aumento da disponibilidade de tecnologias digitais. Os aspectos naturais diretamente relacionados a mineração, fazem dela uma indústria única, que constantemente precisa lidar com a incerteza das características do depósito mineral e a impossibilidade de definir livremente sua localização. A princípio, fatores como esses podem representar obstáculos para alcançar a excelência operacional, mas por meio da tecnologia, essas barreiras podem ser superadas.

Atualmente, a indústria de mineração está enfrentando tempos desafiadores em todo o mundo. Muitas minas operacionais estão se tornando menos lucrativas, pois as áreas com teores de minério mais altos já foram lavradas, ao mesmo tempo as distâncias de transporte e a profundidade da mina estão aumentando. Além disso, a demanda global instável e as tendências futuras incertas contribuem para a volatilidade dos preços de muitas commodities.

Para muitos especialistas do setor, essas condições podem persistir e até se intensificar nos anos seguintes. Diferentemente das correções cíclicas experimentadas antes dos booms de mineração, esse contexto pode ser tornar um conjunto de condições permanentes.

O volátil mercado de commodities dificulta a expansão da indústria de mineração para projetos *greenfield*. Muitos dos depósitos de alta qualidade estão situados em áreas remotas, onde a falta de mão de obra qualificada, infraestrutura e, às vezes, instabilidade econômica e política, contribuem para o aumento do risco do negócio. Portanto, em um cenário de preços instáveis, a maioria desses novos projetos permanece inviável.

Além disso, as preocupações sobre impactos ambientais e condições de segurança acerca da indústria da mineração estão aumentando. O setor está sendo pressionado a se tornar mais sustentável e seguro, reduzindo seu impacto na comunidade e no meio ambiente. Tudo isso em um contexto de crise global, acentuada pela pandemia do COVID-19, que afetou diretamente a indústria de mineração e metalurgia.

Porém esse cenário de crise deixou mais evidente a importância da tecnologia para assegurar o desempenho das operações de mineração mesmo diante de situações desafiadoras. Viabilizando diversos avanços e principalmente, deixando clara a necessidade imediata de transformar a mineração através das novas tecnologias.

As soluções digitais podem apoiar o setor de mineração a enfrentar e superar seus principais desafios, e a transformar alguns de seus aspectos mais marcantes. A aplicação eficaz da tecnologia tornou-se uma questão central para o setor de mineração, pois tem o potencial de colocar o setor no caminho do desenvolvimento, fornecendo valor extraordinário em segurança, lucratividade e sustentabilidade.



## 2.2 OPERAÇÕES DE DESMONTE DE ROCHAS

Os explosivos e os métodos de desmonte aplicados atualmente são o resultado de um processo gradual de desenvolvimento que se iniciou há mais de 600 anos. A pólvora negra começou a ser utilizada em armamentos ainda no século 14, porém só a partir do século 17 que começou a ser aplicada para a fragmentação de rochas. Até então, o método aplicado consistia no enfraquecimento da rocha através de um choque térmico, e na posterior fragmentação mecânica do maciço rochoso.

Apesar de eficiente em relação aos outros métodos disponíveis na época, a pólvora se mostrou um produto perigoso, causando acidentes e mortes. A necessidade de um produto mais seguro e eficiente levou ao desenvolvimento de novos explosivos e dos acessórios de iniciação (ORICA, 2022).

A aplicação da pólvora negra marcou o início do uso de explosivos como principal método para a fragmentação de rochas, e desde então pesquisadores tem se dedicado a desenvolver produtos e tecnologias que contribuam para a segurança e eficiência do desmonte de rochas. Atualmente, uma grande variedade de produtos cada vez mais seguros e com custos competitivos, está disponível para o desmonte de rochas. Além disso, novas soluções são apresentadas constantemente, contribuindo para o desenvolvimento constante das operações de desmonte.

Na mineração, a detonação pode ser considerada como o processo primário de fragmentação. Portanto, tem forte influência no desempenho das operações subsequentes na cadeia de extração e processamento mineral.

A detonação geralmente é necessária para fragmentar grandes volumes de rocha, especialmente se a rocha for de média a alta resistência (LUSK e WORSEY, 2011). Principalmente através do uso de explosivos, o maciço rochoso é quebrado, tornando mais fácil escavar, carregar, transportar, britar e moer.

Quando adequadamente iniciados, os explosivos comerciais são rapidamente convertidos em gases, em uma reação que também resulta em calor e pressão. Por exemplo, um litro de emulsão explosiva a base de nitrato gera cerca de 1.000 litros de gases em uma reação que ocorre em milésimos de segundo. Quando o explosivo se encontra confinado pelo maciço rochoso, essa reação de detonação gera tensões extremamente altas na rocha, levando a sua fragmentação (ORICA, 2022). Essa energia gerada durante o processo de detonação age em todas as direções, porém tende a escapar por caminhos que apresentem menor resistência, assim

como a água escorre na direção de maior inclinação. Por isso, é extremamente importante haver um planejamento da distribuição do explosivo no maciço rochoso, e um bom confinamento do produto dentro dos furos, que é obtido através do tamponamento. Com o explosivo adequadamente confinado e distribuído, o resultado é a ótima fragmentação da rocha.

Esses fatores evidenciam a relação intrínseca da perfuração com o desmonte, pois, os resultados dependem diretamente da qualidade e correta distribuição dos furos. Em conjunto, as operações de perfuração e desmonte podem fornecer a fragmentação de rocha requerida para garantir o desempenho apropriado das operações seguintes. No entanto, resultados inadequados de perfuração e detonação são comumente relacionados à maioria das ineficiências das operações a jusante.

Nas últimas décadas, as técnicas de detonação evoluíram significativamente - sistemas eletrônicos de detonação, explosivos a granel e caminhões com sistemas inteligentes de carregamento são bons exemplos de seu desenvolvimento, trazendo mais precisão, segurança e qualidade.

Apesar do grande desenvolvimento dos explosivos e dos métodos de desmonte, essa operação continua sendo uma atividade de trabalho intensivo, exigindo muitos trabalhadores envolvidos na operação de equipamentos, no carregamento dos furos com explosivos, na preparação e manuseio de sistemas de iniciação e na execução de análises de qualidade e performance.

É consenso entre a academia e a indústria que a tecnologia é a chave para quebrar as barreiras restantes e alcançar o próximo nível de desenvolvimento no desmonte de rochas. Soluções digitais e tecnologias inovadoras podem aumentar a mecanização por meio da automação, reduzir a quantidade demandada de colaboradores e a exposição ao risco, melhorar a precisão operacional e permitir o monitoramento do desempenho em tempo real, garantindo uma operação mais eficiente, sustentável e segura.

## 2.3 APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS NO DESMONTE DE ROCHAS

A aplicação de novas tecnologias em operações relacionadas ao desmonte de rochas já é uma realidade em diversas minas ao redor do mundo todo. As empresas de mineração, cada vez mais têm demonstrado interesse em utilizar essas novas soluções e ferramentas, desenvolvidas no âmbito da revolução digital, para otimizar processos que por muito tempo se mantiveram estagnados, seja pela ausência de soluções adequadas ou mesmo pela complexidade e custo elevado das opções disponíveis mercado em um passado bem recente.

Com o desenvolvimento tecnológico experimentado ao longo dos últimos anos, produtos e soluções cada vez mais eficientes, acessíveis e confiáveis surgiram no mercado. Diversas dessas tecnologias já disponíveis no mercado, tem contribuído diretamente com os recentes avanços em segurança, produtividade e eficiência das operações de desmonte de rochas.

### 2.3.1 Plataformas de Digitalização na Perfuração e Desmonte

Perfuração e desmonte são operações essenciais em uma mina. Elas impactam todas as operações *downstream*, e conseqüentemente seus custos e qualidade. Soluções para otimizar tanto a perfuração quanto o desmonte, já existem há bastante tempo. No entanto, essas tecnologias têm sido em grande parte não integradas e não em tempo real. Essa lacuna resulta em operações de perfuração e desmonte com performance abaixo do ideal (SUSHIL e BHANDARI, 2020).

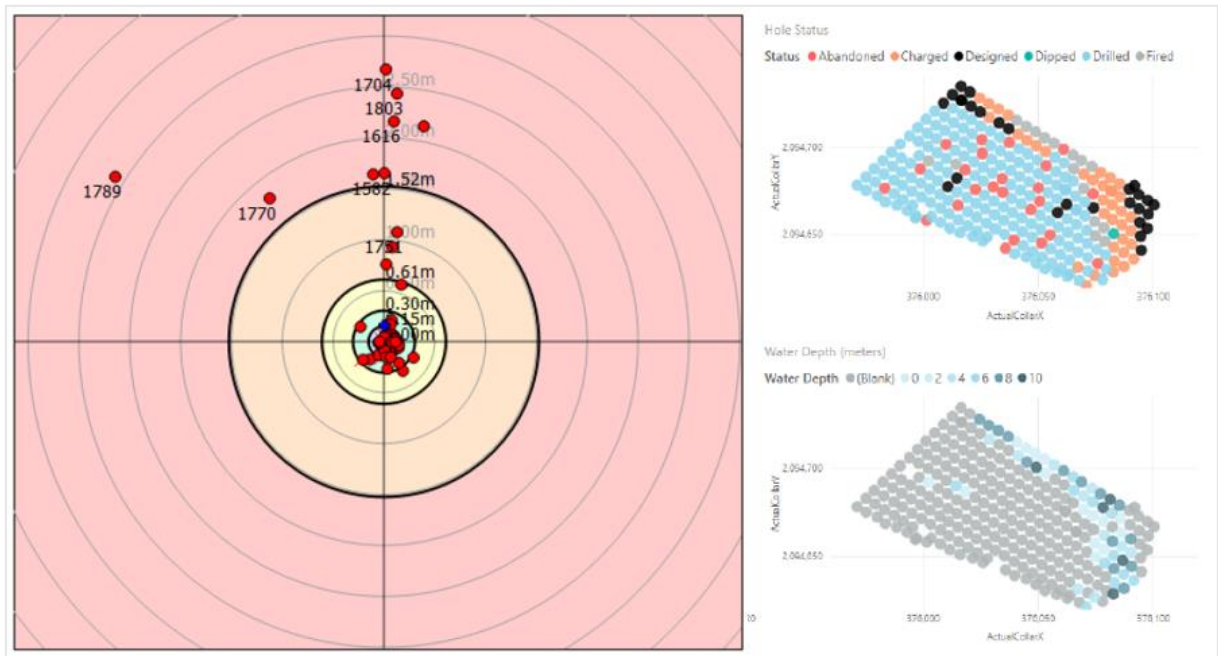
Um projeto de perfuração e desmonte de rochas com utilização de explosivos mal elaborado ou mal executado gera problemas no resultado do desmonte, como fragmentação grosseira da rocha, *flyrock*, vibração do terreno, ruído/deslocamento excessivo de ar, dificuldades na etapa de escavação e aumento de custos gerais. Sushil e Bhandari (2020), recomendam o uso de softwares, para o melhor planejamento do desmonte, e de uma plataforma de gestão de dados para controle da execução em tempo real, bem como para garantir o fluxo adequado da informação entre as partes envolvidas nas atividades.

A digitalização pode ser aplicada para armazenamento de dados, projeto, análise e previsão de resultados, auxiliando no melhor controle e otimização das operações de mineração. No mercado já existem soluções específicas para esse tipo de aplicação, como o *Blastlogic*

(Maptek) e o *BlastIQ Control* (Orica). Por meio da aplicação dessas tecnologias, todo o processo de planejamento e execução passa a ser digitalizado, permitindo que os dados sejam transformados em tempo real em informações que contribuem com a tomada de decisões mais assertivas. Com a digitalização, as minerações podem mitigar impactos e melhorar a sua eficiência.

Na mina de Pueblo Viejo na República Dominicana, a aplicação de uma plataforma integrada para controle de P&D gerou benefícios como redução de 5% dos custos de perfuração e desmonte. Essa iniciativa, também, reduziu o tempo dedicado a análise de dados e preparação de relatórios por meio da digitalização e automação de processos, liberando a mão-de-obra especializada para atividades mais estratégicas. Com dados sendo transformados em informações em tempo real, a tomada de decisão por parte dos engenheiros e gestores passou a ser mais assertiva, contribuindo com o bom desempenho operacional (ROSARIO e GONZALEZ, 2019). A Figura 1 apresenta alguns exemplos de *dashboards* utilizados pela equipe da mina de Pueblo Viejo para controle de QA/QC de Perfuração e Desmonte.

Figura 1 - *Dashboards* utilizados em plataforma de controle de dados de P&D.



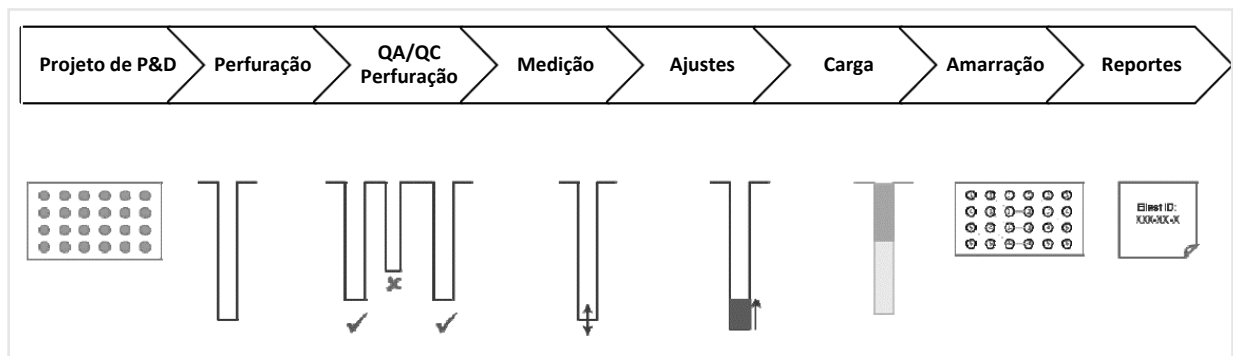
Fonte: Adaptado de Rosario e Gonzales (2019).

Em importante empresa de mineração, com minas ao redor do mundo todo, também foi identificado um grande gargalo nas suas atividades de perfuração e desmonte. Apesar de

entenderem a importância dessas operações para o resultado final dos processos, a reconciliação entre o planejado e o executado estava sendo realizada de maneira inadequada em suas minas, impossibilitando o controle da qualidade das atividades e causando impactos negativos em toda a cadeia de produção.

Diante desse cenário, essa companhia mineradora instituiu um projeto de melhoria em 6 de suas minas à céu aberto simultaneamente. Esse projeto baseou-se no estabelecimento de uma abordagem integrada das operações de P&D através da digitalização dos processos. Plataformas digitais e softwares foram então aplicadas para integrar o fluxo de atividades apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxo das Atividades do Processo de Digitalização de P&D.



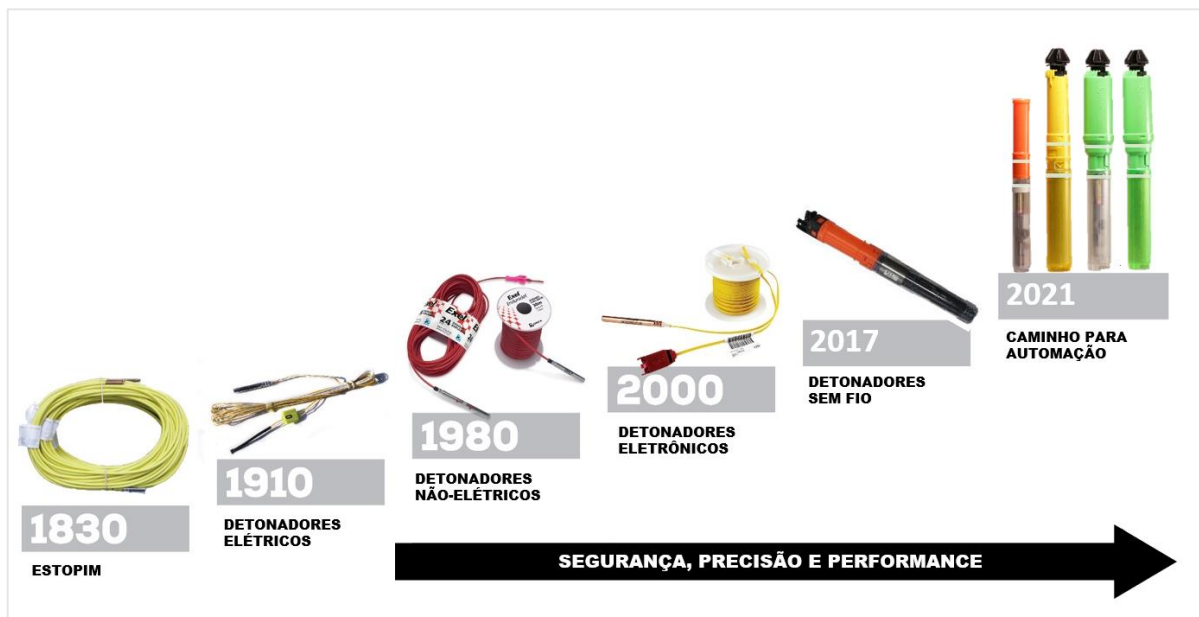
Fonte: Adaptado de Tordoir e Roberts (2019).

Durante a implantação desse projeto, foram avaliados resultados registrados quanto aos índices de segurança, qualidade do desmonte, conformidade do executado em relação ao planejado e oportunidades de redução de custos. Após seis meses de aplicação dessa rotina de digitalização de processos de P&D, a taxa de aderência do executado comparado ao planejado aumentou 23%, contribuindo diretamente para segurança, performance e qualidade da operação (TORDOIR e ROBERTS, 2019). Esse resultado positivo foi alcançando principalmente através do melhor controle e gestão de processos com a aplicação da digitalização, e abriu oportunidades para que tecnologias desse tipo fossem implantadas em outras unidades da companhia.

### 2.3.2 Sistemas de Iniciação Sem Fio

Um bom exemplo desse avanço em tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas são os sistemas de iniciação sem fio (*wireless*). A Figura 3 apresenta um breve histórico do desenvolvimento dos sistemas de iniciação, que mais do que nunca apontam para a direção da automação.

Figura 3 - A evolução dos sistemas de iniciação.



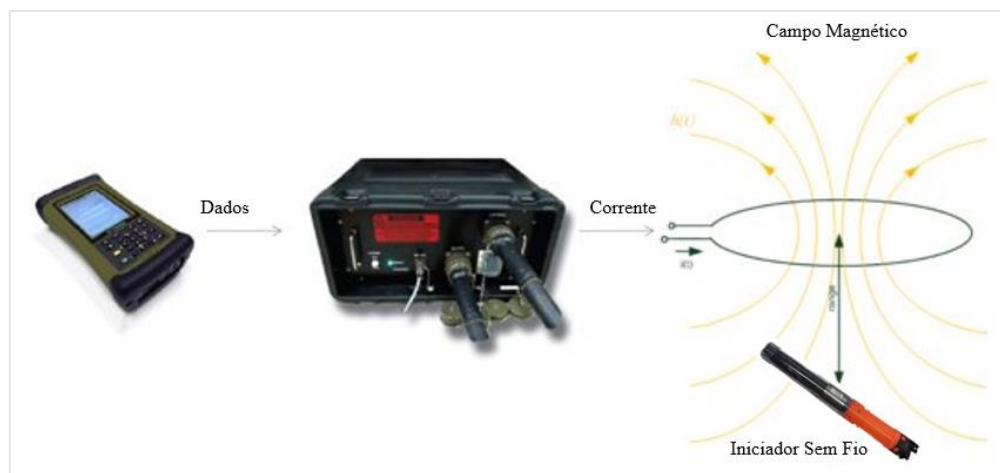
Fonte: Adaptado de Orica (2021).

Há uma década era difícil acreditar que na possibilidade de iniciar um furo carregado com explosivos sem a necessidade de cabos. No entanto, após anos de pesquisa e desenvolvimento, uma tecnologia até então aplicada pelas forças armadas para a comunicação com submarinos, foi adaptada para a comunicação com acessórios eletrônicos de iniciação, permitindo a iniciação dos detonadores sem a necessidade de quaisquer tipos de cabos conectados às cargas explosivas, seja dentro ou fora dos furos, conforme descrito por MALLETTTE et al. (2016).

Essa tecnologia é baseada no uso de ondas eletromagnéticas de baixa frequência - que são capazes de viajar através do meio sólido, líquido ou gasoso. Essas ondas de indução magnética são geradas por um transmissor e são dissipadas pelo meio até os receptores de cada um dos acessórios iniciadores posicionados dentro dos furos, permitindo a comunicação e o recebimento de comandos para iniciação sem a necessidade de fios (MALLETTTE et al., 2016).

A Figura 4 mostra de forma esquemática o arranjo físico dessa tecnologia, onde os dados originalmente gerados no controlador são transmitidos através de um campo magnético oscilante para o receptor no interior do furo. Por ser uma tecnologia relativamente recente, ainda não há muitos produtos desse tipo disponíveis no mercado, sendo o *Webgen™ (Orica)*, o primeiro a ser desenvolvido e o mais amplamente utilizado.

Figura 4 - Comunicação por indução magnética para acionamento de iniciadores sem fio.



Fonte: Adaptado de Mallette et al. (2016).

A iniciação totalmente sem cabos não apenas remove as limitações impostas por uma conexão com fios, mas também permite que os usuários eliminem certos paradigmas das técnicas convencionais de mineração para aumentar a produtividade operacional e reduzir a exposição do pessoal a atividades de alto risco (ECKROADE e PEREIRA, 2020). Essa tecnologia representa uma verdadeira virada de jogo para o desmonte de rochas, sendo considerada pela indústria da mineração como uma das soluções mais revolucionárias aplicadas para o desmonte de rochas nesse século.

A iniciação sem fio tem sido amplamente aplicada tanto em mineração à céu aberto quanto no subterrâneo, onde já permitiu até mesmo o desenvolvimento de novos métodos de lavra. Um desses novos métodos de lavra para subterrâneo foi desenvolvido na mina de ouro de Musselwhite em Ontário, Canadá. Nesse exemplo, a tecnologia de iniciação sem fio permitiu o desenvolvimento do método de lavra chamado TRP (*Temporary Rib Pillars*), resultando em maior segurança, produtividade e melhor recuperação durante a lavra (ORICA, 2018).

Na mina subterrânea de Boliden Tara na Irlanda, o uso de detonadores sem fio também tem mostrado bons resultados. Com a aplicação desse tipo de acessórios de iniciação a

exposição dos trabalhadores ao risco foi reduzida, e a recuperação dos *stopes* passou de 86% para 92.2% (KREIVI e BARNETT, 2023).

A aplicação da tecnologia de iniciação sem fio tem ganhado bastante espaço também na mineração a céu aberto. Na mina de Boddington na Austrália Ocidental, os detonadores sem fio têm sido utilizados para conferir maior flexibilidade ao planejamento e operação de mina. Historicamente, a restrição de acesso em praças de perfuração e de carregamento com explosivos acabava gerando impactos na produtividade da mina devido a limitação de áreas para tráfego de equipamentos, especialmente em áreas mais estreitas da cava. Contudo, através da aplicação dos detonadores *wireless* foi possível liberar áreas já perfuradas e carregadas com explosivos para o tráfego de equipamentos, inclusive caminhões fora de estrada, reduzindo a área restrita e melhorando os índices de produtividade da mina (HEPBURN, 2022).

Figura 5 - Aplicação de detonadores sem fio na flexibilização da operação de mina à céu aberto.



Fonte: Adaptado de Hepburn (2022) e Orica (2018).

A Figura 5 apresenta de forma esquemática o conceito de trafegar com equipamentos sobre áreas carregadas com iniciadores sem fio, e também mostra a aplicação dessa metodologia para a flexibilização da operação na mina de Boddington, onde a via em que os equipamentos leves e pesados trafegam nas imagens foi construída sobre uma área já perfurada e carregada com explosivos.

Além da flexibilização de operações, o uso da tecnologia de iniciação sem fio também tem mostrado benefícios relacionados a produtividade das etapas de carregamento com



explosivos e detonação. Em alguns estudos desenvolvidos em minas de cobre e ouro à céu aberto, o tempo de ciclo das atividades de carregamento e detonação teve uma redução de 22% a 51%. Com a eliminação dos cabos, as atividades na bancada foram desenvolvidas de maneira mais ágil, já que restrições de movimentação foram eliminadas e o próprio fluxo das atividades foi otimizado com a ausência do cabeamento (ECKROADE e PEREIRA, 2020).

Ainda sobre os benefícios da aplicação de detonadores sem fio em minas à céu aberto, cabe destacar a segurança desse tipo de tecnologia em relação ao risco de iniciação não planejada devido a descargas atmosféricas. Como os detonadores ficam protegidos dentro do furo, sem nenhum tipo de conexão com cabos até a superfície da bancada, eles estão isolados da energia proveniente de uma descarga atmosférica potencial. Como a rocha é um bom isolante, a energia da descarga elétrica tende a se dissipar e ser atenuada conforme a profundidade aumenta, logo ainda na zona de tampão, onde não há explosivos, a energia tende a cair até níveis que não representam riscos de iniciação não planejada (ADAM, 2023).

Figura 6 – Esquema de furo carregado com acessório sem fio (esquerda), a ausência de aumenta a segurança durante tempestades com raios (direita).



Fonte: Website Orica (2023).

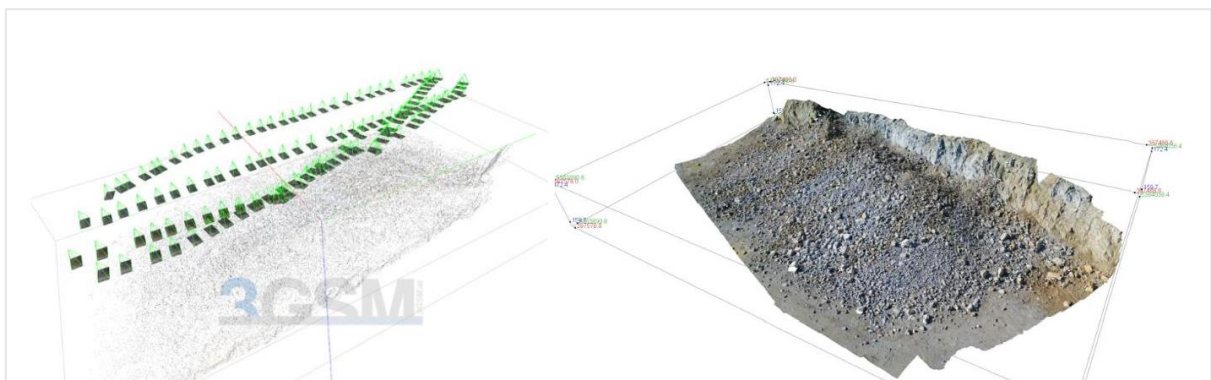
A não exposição de cabos e condutores em superfície é apontada como um dos principais benefícios dos detonares sem fio, principalmente para minas localizadas em regiões com alta incidência de raios, que através da aplicação dessa tecnologia de iniciação *wireless*, podem manter com segurança atividades de escavação e tráfego de equipamentos em regiões próximas a áreas já carregadas com explosivos (ECKROADE e PEREIRA, 2020).

### 2.3.3 Aplicação de Drones e Automação na Análise de Fragmentação

A fragmentação é uma das medidas mais importantes na otimização de projetos mineiros. O processo de mineração em rochas competentes depende fortemente da fragmentação da rocha em tamanhos adequados para a extração mineral. Esse processo começa com o desmonte de rochas, e é seguido pela britagem e moagem. À medida que as rochas são transferidas de um estágio para outro, o desempenho dos estágios anteriores afeta o desempenho dos estágios posteriores. Conseqüentemente, a capacidade de monitorar e controlar a fragmentação em cada um dos estágios é crítica para a otimização completa (CHOW e TAFAZOLI, 2011).

Com uma oferta cada vez mais ampla de drones no mercado, novas metodologias para análise de fragmentação também foram desenvolvidas se apropriando da flexibilidade e segurança do uso desse tipo de equipamento para levantamentos de pilhas de material desmontado. Atualmente drones podem ser usados para tomada de imagens para análise em softwares como o *Fragmenter (3GSM)* e *Wipfrag (WipeWare)*. Uma dessas novas abordagens para determinar a distribuição de tamanho de partículas em pilhas é apresentada por GAICH e PÖTSCH (2015). Na Figura 7 é apresentado um plano de voo de drone para levantamento de pilha, bem como o modelo tridimensional gerado a partir do processamento das imagens obtidas.

Figura 7 - Plano de voo para levantamento de pilha com drone (esquerda) e modelo 3D gerado com o processamento das imagens em software (direita).



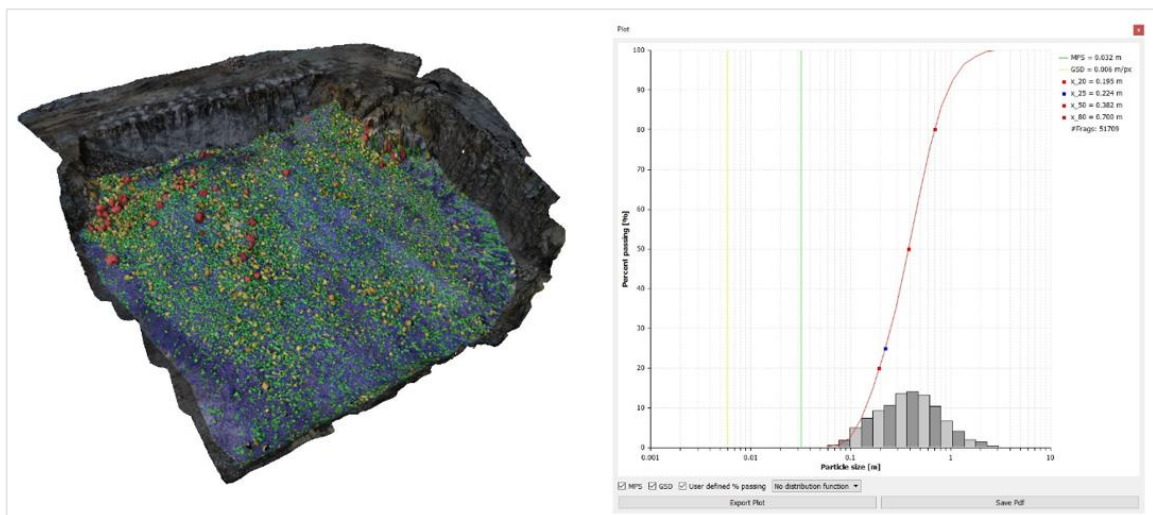
Fonte: Adaptado de GAICH e PÖTSCH (2015).

Essa metodologia utiliza imagens de drones e uma abordagem 3D - 2D combinada para delineamento e dimensionamento de fragmentos de rocha. Com a análise 3D são identificadas

as partículas individuais, que tem então seu delineamento melhorando através da combinação com uma análise 2D. Esse procedimento é menos propenso a ambiguidades relacionadas a sombras, estrutura rochosa ou diferentes condições de luz, o que é principalmente o motivo de delineamentos errôneos de partículas em 2D puro, geralmente aplicados pelas metodologias tradicionais de análise de fragmentação. O método proposto também permite a análise de toda a superfície da pilha de material desmontado em uma única execução, fornecendo centenas de milhares de medições individuais, o que leva a resultados estatisticamente muito fortes e altamente robustos contra potenciais erros pontuais de medição (GAICH e PÖTSCH, 2015).

A partir dessa metodologia, GAICH e PÖTSCH (2015) desenvolveram uma ferramenta computacional capaz de processar as imagens obtidas com o levantamento de drone, gerando um modelo tridimensional da pilha de material fragmentado, e posteriormente realizando a análise de fragmentação com a combinação de abordagens 2D e 3D. Essa ferramenta foi validada através de consecutivos testes em escala de laboratório, onde as dimensões dos blocos eram conhecidas, e em testes de campo, avaliando os resultados em desmontes, tanto em pedreiras quanto em minerações.

Figura 8 - Modelo 3D da pilha com fragmentados classificados por tamanho (esquerda) e exemplo de curva granulométrica gerada (direita).



Fonte: Website 3GSM - Fragmenter. Disponível em: <https://3gsm.at/produkte/bmx-fragmenter/>

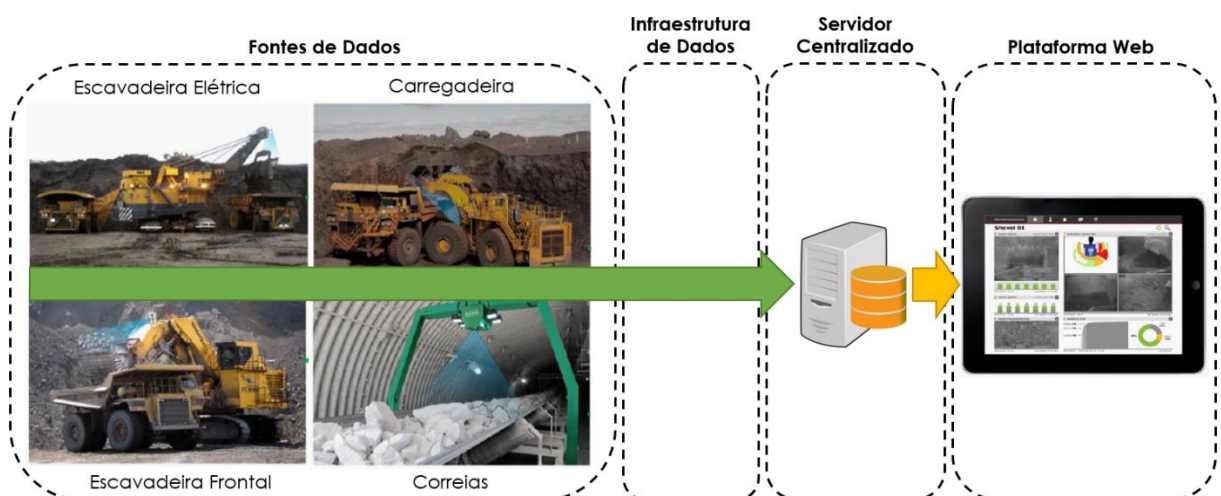
As curvas de distribuição granulométrica resultantes dessas análises contêm várias centenas de milhares de medições individuais, o que significa que os valores de passantes registrados (P20, P50, P80) são bastante robustos contra erros de medição pontuais. Com isso,

pode-se dizer que a qualidade geral da fragmentação da pilha (Figura 8) pode ser avaliada de maneira precisa, objetiva e automatizada, através do uso desse *software*.

Como comentado anteriormente, a medição da fragmentação da rocha tem evoluído de um método completamente subjetivo e manual para um processo estatisticamente objetivo e semiautomatizado. No entanto, em última análise, a visão da indústria é alcançar um processo estatisticamente representativo e totalmente automatizado. Pela perspectiva de otimização do desmonte de rochas, é fundamental receber dados confiáveis de fragmentação rapidamente para incorporar no planejamento de detonações subsequentes, buscando a otimização dos resultados. Porém, considerando que os métodos de análise manual de medição da fragmentação tendem a ser demorados, um método totalmente automatizado seria a maneira prática para atender a essa necessidade (CHOW et al, 2012). Mesmo a metodologia apresentada por GAICH e PÖTSCH (2015) ainda envolve a presença de um colaborador para a realização do levantamento com drone e para a execução do processo usando uma ferramenta computacional.

De acordo com SAMETI et al. (2013), um sistema de análise de fragmentação de rocha automatizado, centralizado e baseado em imagem, como apresentado na Figura 9, pode fornecer aos engenheiros de desmonte o benefício de minimizar o trabalho tedioso e demorado, e permitir que eles se concentrem sua atenção e experiência na otimização dos processos de perfuração e desmonte. Na típica análise de fragmentação de rocha baseada em imagem e operada manualmente, muito tempo é gasto na coleta de imagens adequadas, manuseio e transferência de dados, e processamento para geração de relatório de fragmentação.

Figura 9 - Estrutura de coleta e transferência de dados proposta por SAMETI et al. (2013).

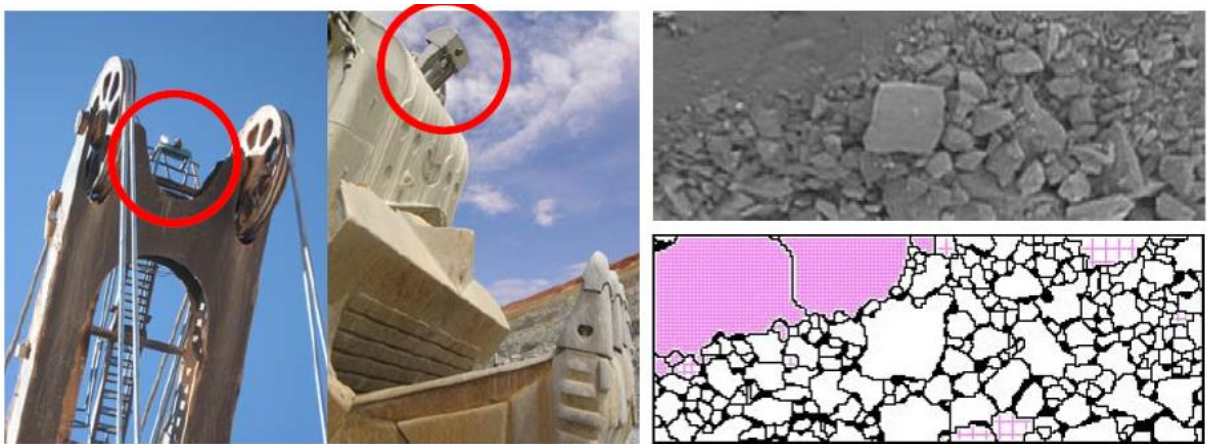


Fonte: Adaptado de SAMETI et al. (2013).

SAMETI et al. (2013) sugere a instalação de equipamentos para coleta de imagens em diversos pontos de interesse como escavadeiras e correias transportadoras, permitindo o acompanhamento contínuo da fragmentação ao longo dessas fases da operação. As imagens coletadas seriam então enviadas para um centro de dados, onde seriam processadas automaticamente, gerando os relatórios de análise de fragmentação.

Em um estudo realizado por CHOW e TAFAZOLI (2011) em minas de cobre nas Américas, foram instaladas câmeras nas escadeiras para coleta de imagens da pilha durante o processo de escavação (Figura 10). A baixa interferência humana no processo, o alto número de amostras coletadas e analisadas de maneira precisa e automatizada, além da agilidade na disponibilização dos dados via plataforma digital, evidenciam o potencial desse tipo de solução para a melhoria da performance e segurança do desmonte de rochas.

Figura 10 - Exemplo de montagem de câmera em escadeira elétrica a cabos (esquerda) e das imagens coletadas e analisadas (direita).



Fonte: Adaptado de CHOW e TAFAZOLI (2011).

### 2.3.4 Aplicação de Modelos Computacionais para Controle de Teores

Muitas minas ao redor do mundo têm passado por um processo de redução dos teores médios conforme suas operações no sentido do final de sua vida útil. Além disso, a necessidade de maximizar o aproveitamento dos recursos minerais, gerando receita e margens para sustentar a operação e garantir investimentos, tem tornado o controle de teores uma questão crítica para essas operações.

Na mina de *Peñasquito*, localizada no México, uma iniciativa para padronização dos processos de definição de polígonos de qualidade de material, foi estabelecido com o objetivo de assegurar a geração de dados confiáveis para controle de teores. Através da aplicação de ferramentas computacionais, foi possível modelar e definir com maior precisão os limites das regiões com qualidades geológicas distintas no modelo de blocos *in-situ*, além de possibilitar a geração ágil de reportes padronizados. Permitindo a tomada de decisões assertivas, e melhorando o processo de reconciliação ao gerar dados de teores mais precisos e coerentes com a realidade (CALDERON-ARTEAGA et al., 2018, Figura 11).

Figura 11 - Polígonos de qualidade gerados em ferramenta computacional.



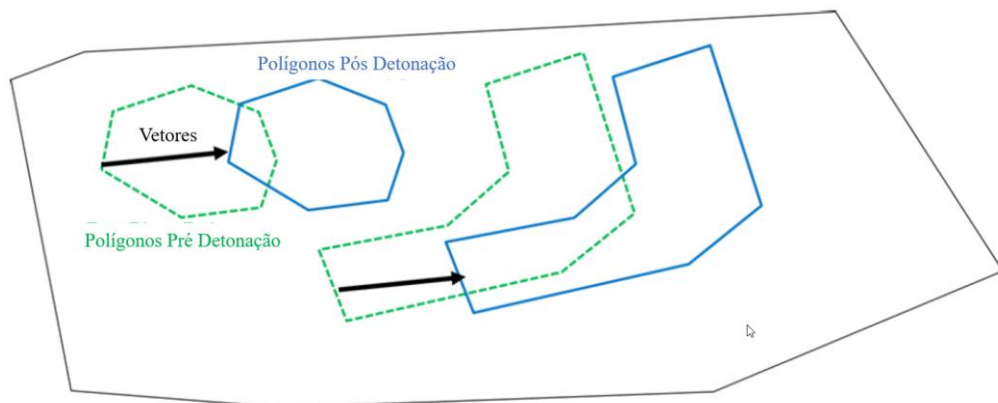
Fonte: Adaptado de CALDERON-ARTEAGA et al. (2018).

Embora a geração de um modelo de blocos *in-situ* confiável e representativo, bem como a adequada definição de limites de qualidade, sejam essenciais para o controle de teores, é necessária uma abordagem mais ampla para garantir um processo de fato adequado. Isso se deve ao fato de que o controle de teores pode estar associado a diversos fatores, desde a qualidade dos dados usados na construção do modelo geológico até fatores de gestão operacional, como a seleção do equipamento mais adequado para a lavra do minério. Além

disso, em minas onde o minério é desmontado com o uso de explosivos, o desmonte tem uma influência significativa sobre o controle de teores. Devido ao processo de movimentação, e consequentemente mudança na distribuição espacial do material durante a detonação, fatores como diluição e recuperação de minério passam a ser afetados diretamente pelo desmonte, e caso esse movimento não seja adequadamente entendido e considerado, pode acarretar prejuízos significativos, como a aumento da perda de minério e da diluição.

De acordo com JULIAN et al. (2023), devido a indisponibilidade de ferramentas para o modelamento da movimentação do desmonte, as empresas do setor de mineração passaram a aplicar metodologias que envolvem a criação de polígonos de controle de teores no modelo geológico *in-situ*, e em posteriormente transladam os nós do polígono horizontalmente para contabilizar o movimento da explosão, cobrindo a área da pilha de material fragmentado (Figura 12). Em muitos casos, os objetos são colocados no corpo a ser desmontado, e ao terem sua posição identificada após o desmonte fornecem vetores locais para essas translações de nó.

Figura 12 - Método de deslocamento horizontal (2D) de polígonos de qualidade.



Fonte: Adaptado de POUPEAU et al. (2019).

Apesar das conhecidas distorções geradas ao mover os polígonos na horizontal (2D), ao passo que o movimento da detonação é um fenômeno 3D, essa era a única solução viável que correspondia às necessidades das operações, e apesar das distorções na reconciliação, passou a ser aplicada como forma de mitigar os efeitos da movimentação do desmonte sobre o controle de teores. Porém, além da distorção, outros fatores relacionados a essa metodologia também eram motivos de preocupação, como a exposição de trabalhadores ao risco de queda ao caminhar sobre pilhas de material desmontado em busca do registro da localização dos objetos de referência para geração dos vetores de deslocamento.

Dada a criticidade desse tema, desde o início dos anos 1980, as empresas de mineração a céu aberto em rocha dura têm buscado algum método para modelar o movimento causado pela detonação, e assim otimizar seus índices de assertividade no âmbito do controle de teores. Apesar de quase 40 anos de esforço, os modelos práticos de movimento de desmonte permaneceram elusivos até que recentemente o desenvolvimento da computação atingiu níveis que tornam possível a simulação dessa complexa movimentação e seus efeitos em tempo real (JULIAN et al., 2023).

Como descrito por POPEAU et al. (2019), na mina de ouro de Tasiast, na África, uma ferramenta computacional passou a ser aplicada para modelar tridimensionalmente a movimentação do desmonte. O *software* descrito é capaz de gerar um modelo de blocos pós-detonação, considerando os efeitos do movimento da detonação. Esse modelo é construído a partir de um campo de vetores, resultante dos dados do plano de perfuração e desmonte e da topografia pós-detonação. Após o deslocamento do modelo de blocos para o estado pós-detonação, essa ferramenta computacional é capaz de gerar polígonos de escavação otimizados de acordo com os critérios de classificação do material, por exemplo, otimizando os limites entre estéril e minério. Até mesmo condições operacionais, como direção de escavação e polígonos mínimos de seletividade podem ser incluídas como parâmetros de otimização, ajudando a controlar a diluição e a recuperação de minério, maximizando o valor obtido com a lavra, e melhorando a reconciliação.

Esse modelo de modelamento tridimensional foi validado através de um estudo com duração de 3 meses, onde foram gerados polígonos de controle de teores diretamente no modelo in-situ, e com as metodologias de deslocamento 2D e 3D. Conforme apresentado na Tabela 2, os valores obtidos com a metodologia 3D foram os mais próximos do medido pela reconciliação, e maximizaram os resultados da operação.

Tabela 2 - Resultados de estudo realizado na mina de Tasiast.

<b>Polígonos</b>	<b>Polígonos <i>In-Situ</i></b>	<b>Valores Metodologia 2D</b>	<b>Valores Metodologia 3D</b>	<b>Reconciliação FMS</b>
Tonelagem (t)	962,088	880,647	1,035,838	1,030,994
Teor (g/t)	2.69	2.71	2.63	2.61
Onças (Oz)	83,254	76,795	87,688	86,435

Fonte: Adaptado de POPEAU et al. (2019).

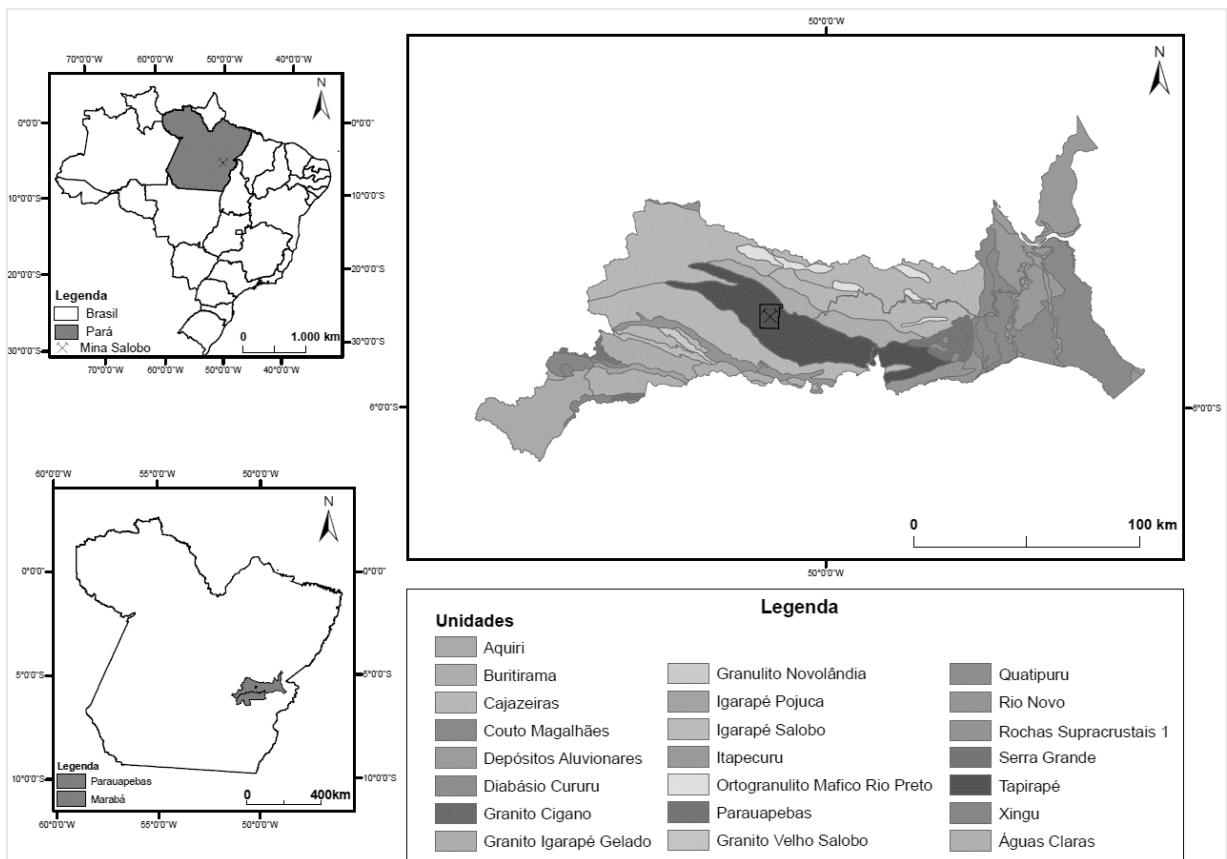


### 3 CASO DE ESTUDO: MINA DO SALOBO

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A Província Mineral de Carajás é uma das áreas de mineração mais importantes do mundo. Localizada no norte do Brasil, mais precisamente no estado do Pará, abriga jazidas de minério de ferro, cobre, ouro, níquel e muitos outros minerais. A Figura 13 mostra a localização da mina de cobre de Salobo, uma das várias minas em operação nessa tradicional área de mineração.

Figura 13 - Localização da mina do Salobo.



Fonte: CPRM. Serviço Geológico do Brasil (2021).

Situada em uma vasta e remota floresta nacional (Figura 14), Salobo é uma mina a céu aberto de grande porte de propriedade da mineradora Vale. Cerca de 4.000 pessoas trabalham neste projeto, incluindo mão-de-obra direta e contratada. Embora localizada no município de Marabá, a força de trabalho de Salobo está baseada em Parauapebas, que é o centro urbano mais próximo e fica localizado a aproximadamente 100 km da mina.

Atualmente, a mina de Salobo movimenta cerca de 100 milhões de toneladas de material por ano, incluindo minério e estéril. Parte do minério extraído alimenta uma planta de concentração com capacidade para processar 24 milhões de toneladas por ano, a outra parte segue para estoques projetados para abastecer outra planta de processamento, ainda em construção, e com capacidade de processar mais 12 milhões de toneladas por ano. Apesar de ser uma mina de cobre, o minério de Salobo também é rico em outros minerais, como ouro e prata. O produto final obtido nas plantas de processamento é um concentrado rico em cobre, ouro e prata.

Figura 14 - Imagem aérea do complexo da mina do Salobo.



Fonte: Google Earth (2022).

Embora haja considerável movimentação de solo e rochas friáveis, a maior parte da massa extraída é de rocha dura, exigindo detonação com explosivos. Portanto, para garantir o bom desempenho das operações subsequentes, o desmonte deve atender a rigorosos padrões de qualidade. Desde que a mina começou a operar há cerca de dez anos, vários projetos focados em operações de detonação estão constantemente em execução, reforçando o compromisso da equipe de Salobo em otimizar os processos e garantir a eficiência operacional na mina e nas plantas de processamento por meio da melhoria dos resultados do desmonte.

### 3.2 PRINCIPAIS DESAFIOS

Apesar do esforço contínuo em otimizar as operações de desmonte de rochas, alguns aspectos continuam sendo desafiadores, e ainda apresentam significativas oportunidades de melhoria.

Dentre os principais desafios identificados, alguns foram indicados para integrar o presente trabalho. Essa seleção foi feita com base na criticidade dos problemas para a mina, e no potencial que apresentam de serem solucionados e/ou mitigados com a adoção de novas tecnologias e soluções digitais. Esses desafios são apresentados na listagem a seguir.

- Ocorrência de danos nos cabos do acessório eletrônico que podem levar a eventos de furos falhados.
- Risco de iniciação não planejada de explosivos devido a existência de cabos expostos em superfície.
- Dificuldade em gerir os dados da operação de maneira ágil e confiável, garantindo o fluxo adequado da informação, reduzindo falhas operacionais e melhorando a qualidade das decisões.
- Dificuldade em controlar a diluição operacional durante a lavra de áreas detonadas.
- Natureza manual do processo de análise de fragmentação, limitando as áreas amostradas e gerando dados enviesados.

Diante deste cenário, o objetivo do trabalho é propor, implementar e avaliar os impactos da aplicação de novas tecnologias e soluções digitais no desmonte de rochas que visem o controle e mitigação desses, e de outros pontos, tidos como relevantes para a cadeia de produção mineral.

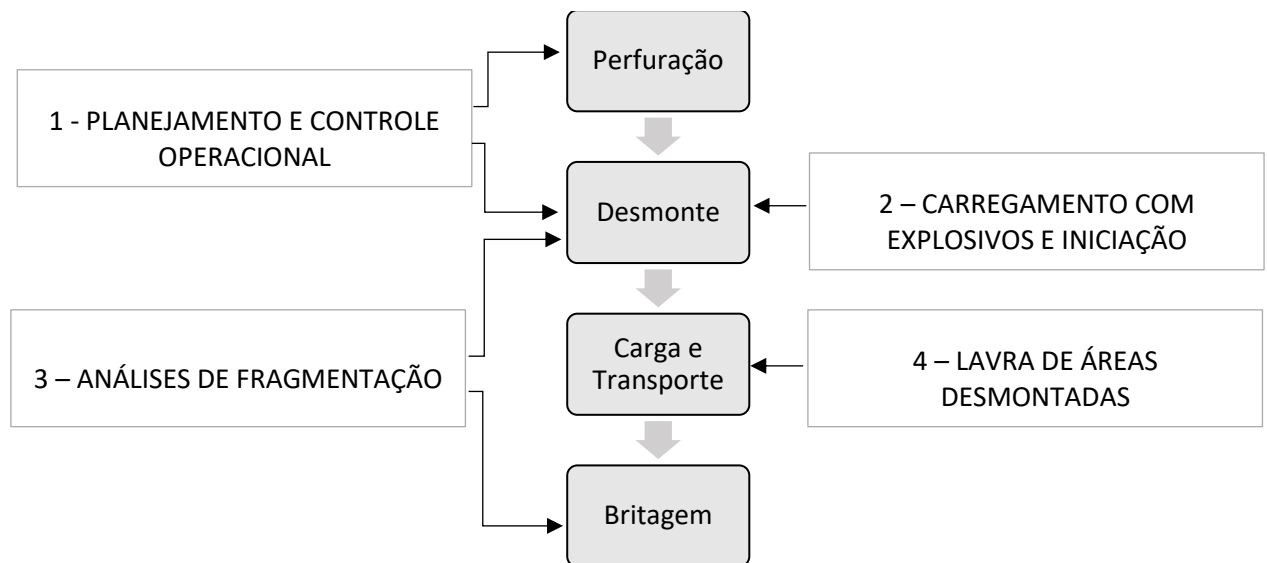
Os desafios a serem abordados se encontram distribuídos em diferentes fases do processo de desmonte de rochas, e inclusive possuem interface com outras operações mineiras, como perfuração, carga e transporte, e britagem. Como já foi comentado, o desmonte de rochas possui uma sinergia muito intensa com outras etapas da cadeia de produção mineral, portanto, ações relacionadas com a otimização do desmonte podem exceder as fronteiras dessa operação, e envolver outras etapas do processo.

Considerando os desafios apresentados e essa distribuição ao longo da cadeia de produção relacionada ao desmonte, as atividades foco para este trabalho foram definidas como:

- Planejamento e Controle Operacional.
- Carregamento com Explosivos e Iniciação.
- Análise de Fragmentação.
- Lavra de Áreas Desmontadas.

As soluções tecnológicas a serem implementadas estarão distribuídas entre essas atividades relacionadas ao desmonte, tendo como objetivo atuar sobre os desafios que foram apontados. O esquema apresentado na Figura 15 mostra como essas atividades estão distribuídas dentro do fluxo das operações mineiras, destacando as operações mineiras com as quais cada atividade foco possui maior correlação.

Figura 15 – Fluxograma de atividades com as áreas de interesse do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PROPOSTAS

As soluções tecnológicas apresentadas neste trabalho foram propostas considerando as necessidades da mina, e estão focadas em melhorias de eficiência e segurança, não apenas no desmonte, mas também nas operações subsequentes. Tendo em mente que através da digitalização e automação muitas questões relevantes poderiam ser mais bem gerenciadas e resolvidas. A Tabela 3 apresenta resumidamente as soluções planejadas, as principais questões relacionadas e os benefícios esperados.

Tabela 3 – Consolidado dos desafios e soluções propostas.

	Questões Relevantes	Proposta	Descrição	Benefícios
<b>Planejamento e Controle Operacional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldade em capturar, armazenar, analisar e reportar informações adequadamente.</li> <li>- Perda de dados nas operações e baixas taxas de conversão de dados para insights.</li> <li>- Dificuldade em integrar e correlacionar dados por meios acessíveis.</li> <li>- Dificuldade de monitorar em tempo real o executado em relação ao planejado.</li> <li>- Quantidade de tempo gasto na coleta de dados e preparação de relatórios.</li> </ul>	<b>Plataforma de gestão de dados</b>	Plataforma de integração utilizada para centralizar os dados gerados principalmente pelas operações de perfuração e desmonte. Por meio dessa plataforma, os dados são armazenados, analisados de forma automatizada, acessados e reportados, fornecendo insights poderosos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integração de dados de Perfuração e Desmonte em uma única plataforma.</li> <li>- Acompanhamento do desempenho em tempo real.</li> <li>- Melhor utilização e redução na perda de dados.</li> <li>- Análises automatizadas e insights acessíveis em tempo real.</li> <li>- Visão holística das operações e insights poderosos para fortalecer decisões, melhorar o desempenho operacional e reduzir custos.</li> </ul>
<b>Carregamento com Explosivos e Detonação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande quantidade de pessoas envolvidas nas operações de desmonte.</li> <li>- Riscos de qualidade e segurança relacionados à interação não planejada entre os cabos dos acessórios explosivos e o meio, equipamentos ou pessoas.</li> <li>- Restrições de planejamento e operação devido ao isolamento de áreas carregadas de explosivos.</li> </ul>	<b>Sistema de iniciação sem fio</b>	Sistema de iniciação baseado na emissão de ondas que se propagam através de rocha, ar e água para iniciar detonações de forma confiável e segura. Eliminando a necessidade de cabos e fios de conexão de superfície.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ganhos em segurança na bancada.</li> <li>- Eliminação de eventos relacionados a danos nos cabos do acessório.</li> <li>- Aumento da produtividade da desmonte e redução de custos.</li> <li>- Maior flexibilidade para o planejamento e operação da mina.</li> <li>- Possibilidade futura de automação com redução da quantidade de trabalhadores na bancada.</li> </ul>

<p><b>Análise de Fragmentação</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os métodos de amostragem manual são demorados e causam interrupções significativas nas operações em andamento.</li> <li>- Exposição do trabalhador a condições adversas.</li> <li>- Requer análise de dados e elaboração de relatórios.</li> <li>- Quantidade de dados limitada.</li> <li>- Dados tendenciosos.</li> <li>- Dificuldade em compartilhar as informações em tempo real.</li> </ul>	<p><b>Sistemas Automatizados de Análise de Fragmentação</b></p> <p>Amostragem de pilhas de material desmontado através de aerolevantamentos, e uso de câmeras automatizadas conectados à internet e para coletar e analisar a fragmentação do material, fornecendo análises imparciais, representativas e ágeis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminação da amostragem manual, sem exposição ao risco.</li> <li>- Amostragem mais representativas.</li> <li>- Análise de dados automatizada e contínua.</li> <li>- Nenhuma interrupção nas operações em andamento.</li> <li>- Dados imparciais e disponíveis com maior agilidade.</li> <li>- Informações em tempo real para apoiar decisões precisas.</li> </ul>
<p><b>Lavra de Áreas Desmontadas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O controle de teores durante a lavra é fator chave para o sucesso de operações de mineração.</li> <li>- Existe a necessidade de aumentar o porte dos desmontes e ao mesmo tempo melhorar o controle de teores e qualidade na lavra.</li> <li>- Os métodos tradicionais para definição de limites de lavra de áreas desmontadas são muito manuais e susceptíveis a erros.</li> </ul>	<p><b>Ferramenta de controle de diluição operacional</b></p> <p>Software capaz de modelar a movimentação do material durante o desmonte, gerando um modelo de teores pós-detonação e polígonos de escavação (liberações) otimizados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fontes de dados de fácil obtenção.</li> <li>- Eliminação de exposição ao risco de caminhar sobre pilha de material desmontado (geologia).</li> <li>- Agilidade no processamento e obtenção de resultados.</li> <li>- Cálculo de volume, densidade e teores por polígono no pós-desmonte;</li> <li>- Polígonos de escavação gerados automaticamente com base nas restrições operacionais.</li> <li>- Comunicação direta com sistema de gerenciamento de frotas;</li> </ul>

O projeto também propõe que as tecnologias a serem utilizadas sejam de simples aplicação e de fácil integração com outras ferramentas e processos já existentes na mina. Portanto, buscou-se por produtos e soluções que representem avanços operacionais positivos em segurança, produtividade e eficiência, que possam ser adequadamente absorvidas dentro dos processos operacionais já existentes, e que essas tecnologias se integrem entre si e com as soluções já em aplicação.

## 4 PLANEJAMENTO E CONTROLE OPERACIONAL

Garantir a circulação da informação é essencial para assegurar que a execução da operação de carregamento com explosivos e detonação ocorra conforme o planejado. Plano de perfuração, carregamento e temporizações devem ser disponibilizados de maneira ágil e confiável, e da mesma forma, os dados da execução devem retornar na forma de relatórios, permitindo um controle apropriado da operação e a tomada de decisões precisas e no tempo correto.

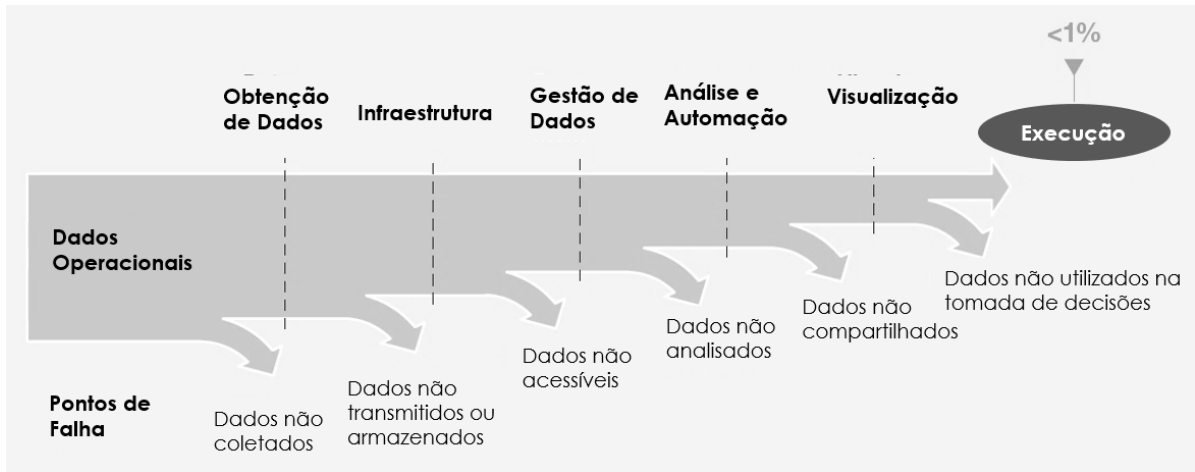
Um grande problema enfrentado pelas operações de desmonte é a perda, subutilização e incompreensão das informações. Embora esteja claro que garantir um fluxo adequado de informações entre engenheiros, operadores e outras partes interessadas seja um ponto chave para uma operação de desmonte bem-sucedida, muitas vezes isso não é executado corretamente ou demora muito para chegar à formatação necessária.

O corrompimento ou a ausência de informações podem levar a falhas como o carregamento inadequado de um furo, problemas na compreensão dos resultados de um evento de detonação e a tomada de decisões incorretas e tardias. Os dados devem fluir dos projetistas para a equipe de bancada e de volta para os engenheiros e partes interessadas em um caminho confiável e rápido. No entanto, o tradicional modelo com formulários, planos e relatórios em papel não é capaz de atingir o desempenho desejado. Eles devem ser impressos, enviados para a bancada, devem ser preenchidos e depois devolvidos ao escritório onde os dados são convertidos em relatórios. Esse processo pode levar muitas horas e até dias para ser concluído, e está exposto a muitas falhas em potencial.

### 4.1 PLATAFORMA DE GESTÃO DE DADOS

Embora as empresas de mineração geralmente colem grandes quantidades de dados de perfuratrizes, caminhões, plantas de processamento e trens, essas informações raramente são usadas para gerar *insights*; em alguns casos, os mineradores utilizam menos de 1% das informações coletadas de seus equipamentos (DURRANT-WHYTE, 2015), conforme apresentado na Figura 16. Incluindo, também, as operações de desmonte, onde boa parte dos dados não é utilizada adequadamente ou nem mesmo coletada.

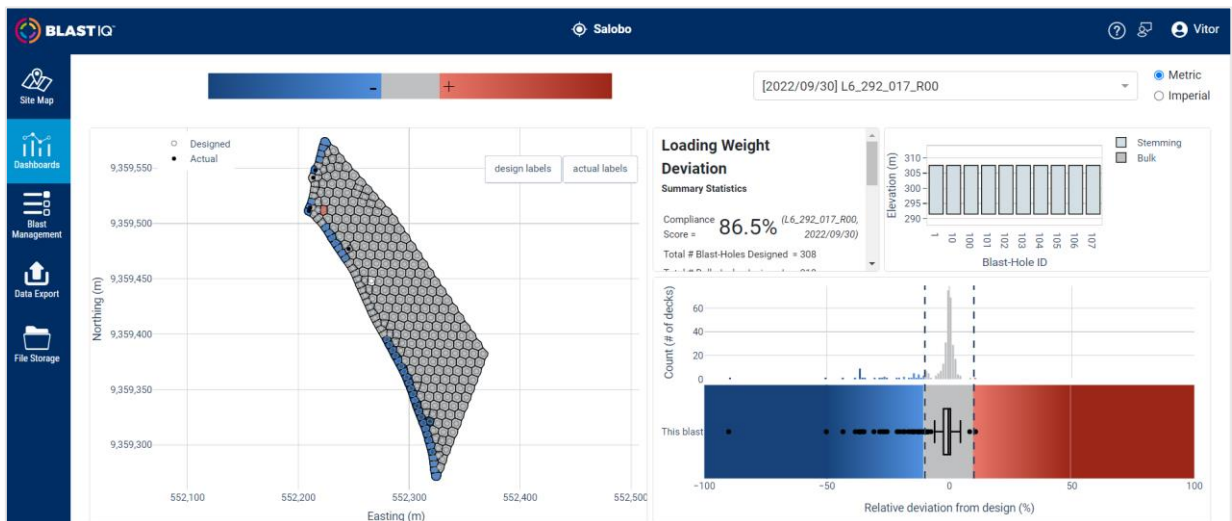
Figura 16 - Fluxo de dados operacionais e principais pontos de falha.



Fonte: Adaptado de DURRANT-WHYTE (2015).

Nesse cenário, uma plataforma digital pode auxiliar a garantir o correto manuseio e gerenciamento de dados, integrando soluções de tecnologia para extrair todo o potencial dos dados e fornecer insights valiosos e precisos. A plataforma proposta pode fornecer uma gama de soluções tecnológicas para melhorar a produtividade e reduzir o custo das operações de perfuração e desmonte (ORICA, 2020). A Figura 17 mostra um exemplo da interface digital da plataforma para controle e gestão dos dados de P&D.

Figura 17 - Interface da plataforma de controle de dados de P&D.



Fonte: Adaptado pelo autor - BlastIQ Insights – Orica (2022).



Por meio da integração digital com os sistemas das perfuratrizes, o andamento da perfuração também pode ser monitorado. Utilizando-se um dispositivo móvel conectado à internet, como o mostrado na Figura 18, todos os dados das operações de carregamento com explosivos podem ser registrados e acessados instantaneamente pela plataforma digital, eliminando a necessidade de anotações e relatórios em papel. Assim, mais dados podem ser capturados, armazenados, acessados, analisados e comunicados, fornecendo informações valiosas.

Figura 18 - Tablet usado para cadastro digital de dados do carregamento com explosivos.



Fonte: Adaptado pelo autor - Orica (2022).

A plataforma pode ser acessada facilmente de qualquer local e devido à sua abordagem integrada permite entendimentos sistêmicos. Minimizando a perda de dados e análises tendenciosas, apoiando assim decisões precisas, melhorando o desempenho operacional e consequentemente reduzindo os custos de mineração.

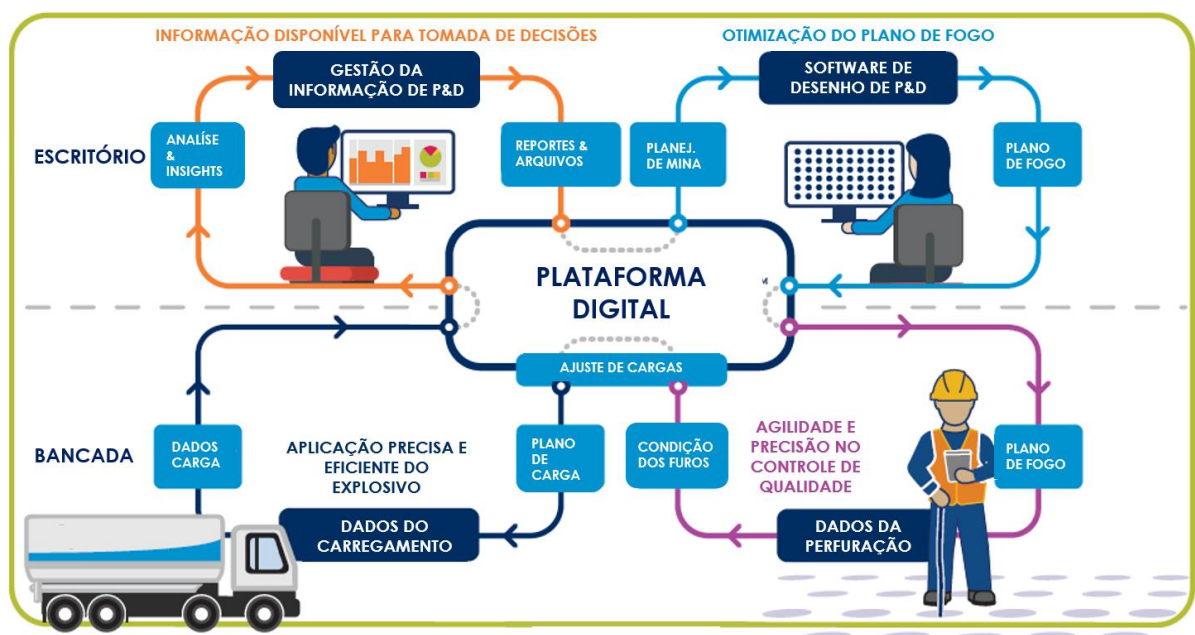
#### 4.2 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Para garantir um fluxo adequado de dados e informações em diferentes etapas das operações de desmonte, desde 2020 uma plataforma digital, o BlastIQ™ Control, fornecido pela Orica, e que substituiu os formulários de papel em Salobo. Por meio dessa plataforma, os planos de carregamento são disponibilizados em tempo real para a equipe operacional e ao

mesmo tempo dados referentes à execução são transformados em informações confiáveis e acessíveis.

Em uma mina de grande porte e remota como Salobo, o potencial de digitalização vai muito além do aspecto econômico e melhorias de qualidade. Tem um papel significativo na redução do número de pessoas envolvidas nas operações de bancada, minimizando a exposição ao risco tanto diretamente nas operações da mina quanto nas atividades de apoio.

Figura 19 – Esquema de fluxo de dados de P&D com o uso da plataforma digital.



Fonte: Adaptado de Orica (2020)

A Figura 19 apresenta de maneira esquemática como funciona o fluxo dos dados de P&D ao longo do processo com o uso da plataforma digital, que vai desde o recebimento dos dados do planejamento de mina, passa pela otimização do projeto de P&D (Plano de Fogo), pelo controle da qualidade da perfuração, onde automaticamente as cargas planejadas são ajustadas de acordo com a condição real dos furos e regras de carregamento implantadas, enviando dados já ajustados para os operadores que fazem o carregamento com explosivos, que por sua vez entram com os dados reais da aplicação, que retornam para a plataforma em tempo real, permitindo o acompanhamento do processo mesmo à distância, e gerando relatórios que podem embasar a tomada de decisões.

O desempenho da plataforma digital foi avaliado por meio da comparação com resultados obtidos quando o método de gestão de dados ainda era baseado em formulários de papel e relatórios manuais. Após dois anos desde a implantação, a plataforma de controle de dados os benefícios já são evidentes. Por exemplo, o uso dessa solução digital permitiu reduzir o intervalo de tempo entre a elaboração dos planos de carregamento e sua disponibilização para a equipe de detonação na bancada. Uma interface interativa e intuitiva ajudou a reduzir erros no carregamento com explosivos, melhorando a conformidade entre os planos de detonação e a execução.

Outro problema enfrentado com formulários em papel era o tempo necessário para transformar dados em relatórios e informações úteis. Usando formulários em papel, um relatório final de desmonte geralmente levava até 3 dias para ser concluído. Atualmente, esse mesmo relatório está disponível em uma plataforma digital imediatamente após o desmonte. Além disso, os dados já ficam prontos para serem importados para o software de projeto de detonação, dando agilidade e confiabilidade às análises mais complexas.

O uso da plataforma permitiu, também, um melhor aproveitamento da força de trabalho, uma vez que um técnico, que era responsável por carregar os dados dos formulários em papel para o computador e gerar os relatórios, foi realocado para tarefas mais técnicas. Ao invés de passar a maior parte do tempo lançando dados e preparando relatórios, esse técnico pode se concentrar em analisar os resultados e propor melhorias.

Além disso, as informações em tempo real contribuíram com aprimoramento de decisões estratégicas como mudanças nos padrões de carregamento, definição de cronogramas de detonação mais precisos e análises ágeis dos resultados da detonação. Em conjunto esses avanços contribuem com a redução de custos, com o uso mais inteligente dos recursos humanos e para uma melhor compreensão das operações de detonação.

Os resultados positivos alcançados nessa fase sustentaram um projeto de expansão do uso dessa tecnologia também nas operações de perfuração. A futura integração desta mesma plataforma com as perfuratrizes permitirá um entendimento ainda mais amplo das operações de perfuração e detonação, contribuindo com o desempenho dos projetos de perfuração e detonação, com a precisão dos cronogramas de desmonte e com a agilidade na avaliação das operações, resultando sobretudo em mais produtividade e redução de custos.

## 5 CARREGAMENTO COM EXPLOSIVOS E INICIAÇÃO

Um desmonte bem-sucedido depende de diversos fatores, além de um projeto adequado é necessário que todo o processo seja executado de maneira segura, técnica e produtiva. Somente dessa forma os resultados planejados para o desmonte podem ser atingidos, garantindo um material dentro da qualidade esperada, com o mínimo impacto ambiental, a um custo ótimo, e sempre assegurando a segurança de todos os diretos e indiretamente envolvidos na atividade. Portanto, a seleção dos métodos, produtos e equipamentos a serem utilizados devem sempre ser pautados por esses princípios.

De acordo com LURSK e WORSEY (2011) a maior parte das operações de mineração, tanto no subterrâneo quanto em céu aberto, migraram do uso de explosivos encartuchados para produtos a granel (explosivos bombeados/derramados). Dentre os fatores que motivaram essa mudança, LURSK e WORSEY (2011) destacam que os caminhões que aplicam explosivos a granel possuem um alto grau de automação e podem fabricar diversos tipos de mesclas (blends) de ANFO e Emulsão, atendendo a necessidades específicas de cada mina ou frente de serviço.

Além disso, vale destacar os benefícios em produtividade e segurança do uso de explosivos a granel. Os caminhões utilizados atualmente podem aplicar até 700 kg/min de explosivos, e requerem poucas pessoas envolvidas na atividade. Essas taxas de aplicação são inviáveis quando utilizados explosivos encartuchados, pois o processo de carregamento é feito manualmente e possui uma série de limitações operacionais.

Ainda de acordo com LURSK e WORSEY (2011), outro importante movimento de migração observado nos últimos anos está relacionado aos sistemas de iniciação, onde o uso do acessório do tipo eletrônico está cada vez mais comum. A tecnologia associada a esse tipo de acessório se desenvolveu bastante nos últimos anos, ao passo que o custo foi sendo reduzido, deixando o produto em condições de competir com os acessórios do tipo não-elétrico.

As vantagens da aplicação do acessório de iniciação eletrônico em fragmentação, controles de impactos ambientais e segurança, estão se tornando cada vez mais evidentes e muitas minerações estão quantificando esses benefícios para justificar a migração do acessório não-elétrico para o eletrônico (LURSK e WORSEY, 2011).

Desde o início de 2020, apenas sistemas de iniciação eletrônicos são usados para iniciar furos de produção na mina de Salobo. Esses furos são perfurados com um diâmetro de 349 mm e possuem uma profundidade média de 16 metros. Os furos são carregados com explosivos bombeado do tipo blendado (ANFO e Emulsão). O tamponamento é feito com brita 38 mm e o

comprimento do tampão varia de 5 a 8 metros. Por segurança, são usados dois detonadores. Essa formatação traz uma série de benefícios em termos de segurança, produtividade e qualidade. No entanto, danos nos cabos dos acessórios iniciadores ainda são uma causa relevante de incidentes na mina de Salobo.

Causados principalmente devido à queda de blocos da região do colar dos furos ou por frações excessivamente grosseiras do material de tamponamento, como mostrado na Figura 20. Esses danos podem aumentar a fuga de corrente e as oscilações na voltagem, e até mesmo levar à perda de comunicação com o detonador. Em uma situação mais crítica pode levar a uma falha de iniciação, quando a comunicação com ambos os acessórios eletrônicos de um furo é perdida em definitivo.

Figura 20 – Material de tamponamento contaminado por blocos (esquerda) e blocos soltos no colar de um furo (direita).



Fonte: Acervo do próprio autor.

Uma das ferramentas para a gestão desse tipo de risco é o acompanhamento da taxa de danos, que representa o percentual de peças do acessório eletrônico que tiveram algum tipo de avaria severa que levou a perda de comunicação com o detonador ou a níveis excessivos de fuga de corrente que obrigaram a exclusão da peça do sistema.

Como são utilizadas duas peças do acessório eletrônico por furo, a falha de iniciação só ocorre quando a comunicação com ambas as peças é perdida. Esse é um dos riscos mais críticos do processo de desmonte, pois leva a ocorrência de um furo falhado. A Tabela 4 apresenta as taxas de danos registradas desde a implementação do modelo atual de carregamento e iniciação. Embora ambas as taxas tenham caído, existe a necessidade de buscar uma redução ainda maior ou mesmo a eliminação dos danos que levam a perda de comunicação.

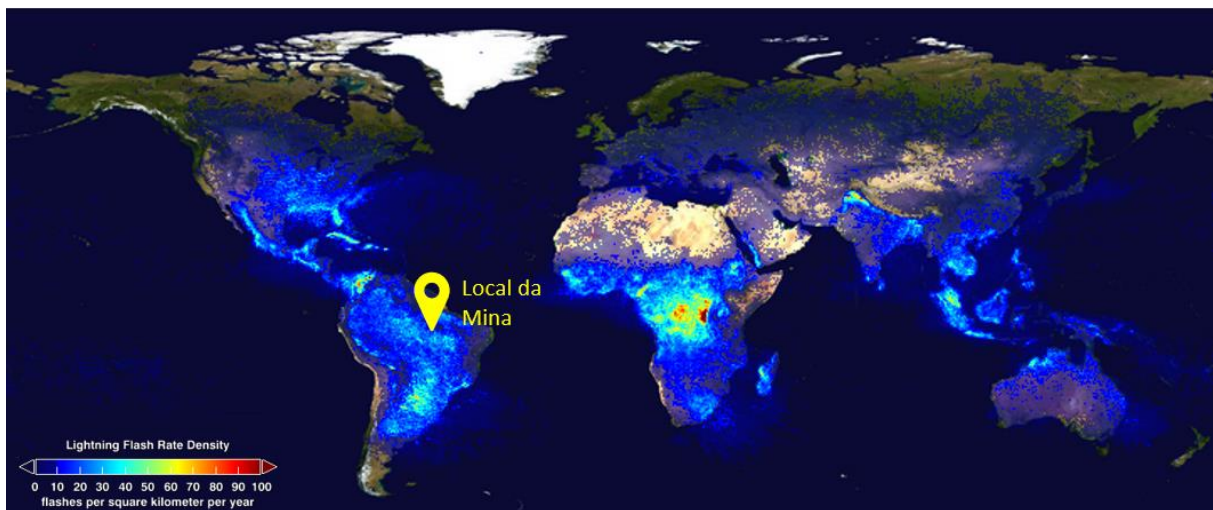
Tabela 4 - Taxas de dano nos cabos do acessório eletrônico e de falha de iniciação do furo.

Ano	Taxa de Danos	Taxa de Falha de Iniciação
2020	0,67%	0,010%
2021	0,34%	0,008%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Outro risco relacionado com cabos de acessórios expostos é a iniciação indesejada pela ação de descargas atmosféricas. Os detonadores eletrônicos, embora mais seguros, assim como outros sistemas de iniciação, são vulneráveis a incidência muito próxima ou direta de descargas atmosféricas (LOWNDS & LINDENAU, 2008). Esse tipo de risco exige que áreas próximas a polígonos carregados com explosivos sejam evacuadas durante tempestades com raios, por exemplo, gerando uma série de prejuízos a operação. Como mostrado na Figura 21, a mina do Salobo está localizada em uma área com alta incidência de raios, o que torna esse fator uma condição crítica para a segurança das operações, não só no desmonte, mas de todas as outras etapas do processo que ocorrem em regiões próximas a áreas carregadas com explosivos.

Figura 21 – Mapa de densidade de eventos de descarga atmosférica.



Fonte: NASA (2021).

Além disso, o risco de interação dos fios com equipamentos e pessoas exige que uma série de medidas preventivas sejam adotadas durante as operações de bancada. Essas ações demandam mão de obra adicional e aumentam o tempo de execução das tarefas, impactando

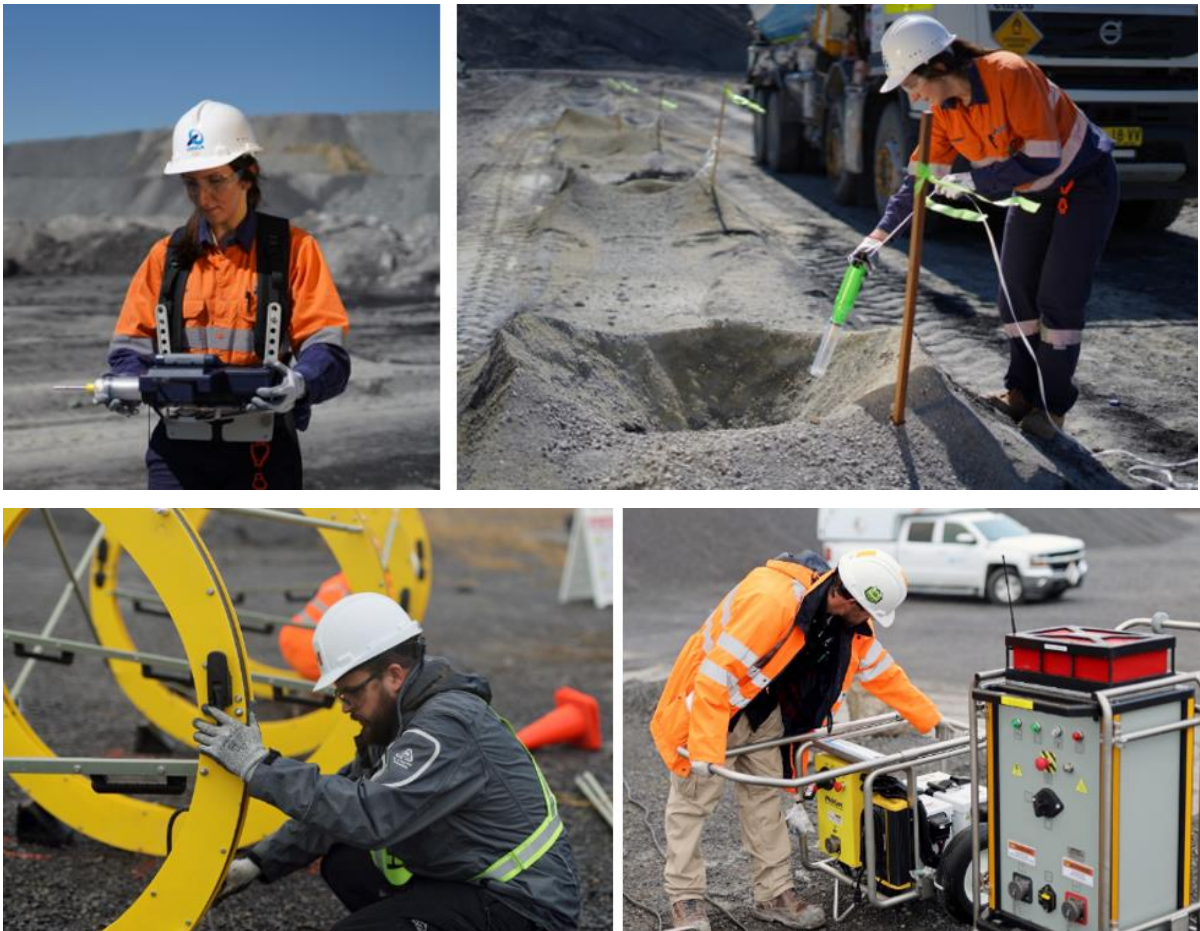
diretamente na produtividade. Esses cabos também impendem que áreas já carregadas sejam utilizadas para outras atividades, como por exemplo, vias de tráfego para equipamentos.

O uso de sistemas de iniciação sem fio é uma alternativa para reduzir os riscos e mitigar os impactos operacionais que o cabeamento representa no desmonte. Nesse trabalho os resultados obtidos com a aplicação dessa tecnologia, tanto em segurança quanto em produtividade, são apresentados e comparados com o método tradicionalmente aplicado.

### 5.1 SISTEMA DE INICIAÇÃO WIRELESS

O sistema de iniciação sem fio (wireless) é uma tecnologia inovadora que permite o acionamento das espoletas por ondas eletromagnéticas de baixa frequência que se propagam pelo meio, sem a necessidade de cabeamento.

Figura 22 - Programação do detonador wireless, colocação do acessório no furo, montagem de antena e preparação dos equipamentos para envio de sinal.

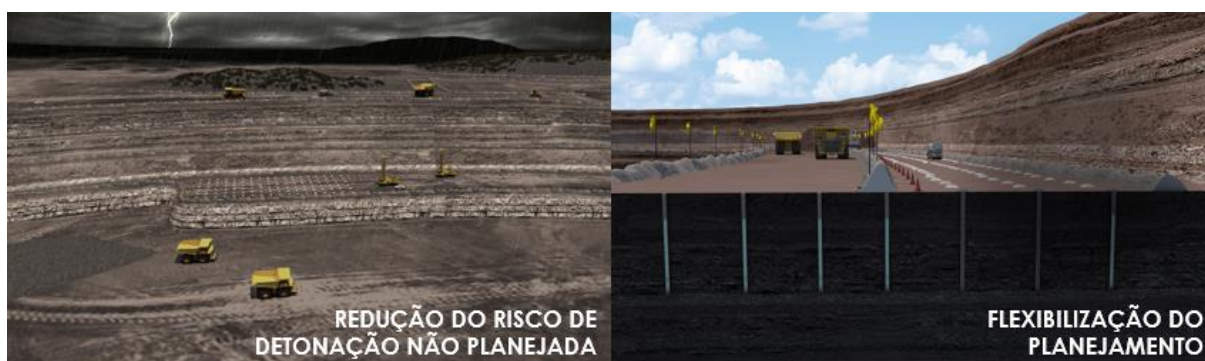


Fonte: Website Orica (2023).

A ausência de cabos tanto dentro do furo quanto na superfície elimina o risco de falhas de comunicação devido a danos nos cabos e elimina o risco de interação de equipamentos ou pessoas com esses cabos durante a operação de carregamento e tamponamento. Além disso, extingue qualquer possibilidade de iniciação não planejada causada por descargas atmosféricas.

Além disso, a inexistência de cabos espalhados pela bancada abre a possibilidade de utilização de áreas carregadas como vias de tráfego para equipamentos, trazendo mais flexibilidade ao planejamento de lavra e agilidade para as operações. O que pode representar um benefício financeiro significativo, reduzindo as distâncias de transporte, melhorando a disponibilidade e utilização dos equipamentos, e otimizando a operação da mina.

Figura 23 – Exemplos de oportunidades para aplicação de detonadores sem fio.



Fonte: Orica Website (2023).

Além de seu potencial para melhorar a segurança, eficiência e rentabilidade, este sistema traz a possibilidade de automatizar a tarefa de carregamento com explosivos. Uma vez que não há cabos envolvidos no processo, um caminhão autônomo pode facilmente posicionar o acessório de iniciação no fundo do furo e preenchê-lo com explosivos a granel.

Embora ainda haja um longo caminho a percorrer, essa tecnologia pode mudar radicalmente o carregamento com explosivos. No futuro, todos os processos poderão ser coordenados e monitorados a partir do escritório da mina ou até mesmo de um centro operacional inteligente a milhares de quilômetros de distância. Reduzindo o número de trabalhadores necessários na bancada e reduzindo drasticamente a exposição ao risco. Além disso, uma operação automatizada tende a ser mais precisa e fácil de controlar e monitorar, reduzindo a variabilidade e melhorando o desempenho e, conseqüentemente, aprimorando os resultados gerais.



## 5.2 METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Para avaliar o desempenho do sistema de iniciação sem fio foram realizados dois desmontes de produção aplicando essa tecnologia na mina do Salobo. O acessório eletrônico sem fio utilizado nesse estudo foi o *Webgen™ 100*, fabricado pela Orica. Nessa campanha foram avaliados tanto aspectos relacionados à segurança quanto a produtividade da operação de carregamento e desmonte. A partir dos resultados desses eventos também foi iniciado o debate sobre potenciais alternativas de flexibilização de planejamento e operação de mina.

Para a validação da tecnologia de iniciação sem fio foram avaliados os resultados diretos dos testes comparados aos índices obtidos em desmontes com o modelo tradicional nos seguintes itens:

- Taxa de Danos nos Cabos dos Acessórios.
- Tempo do Ciclo de Tamponamento.

Esses indicadores foram selecionados por oferecerem uma boa base de comparação para a mitigação/eliminação de riscos como falha de iniciação, e para ganhos de produtividade. Sendo boas referências para mensurar os benefícios em segurança e produtividade que a adoção dessa tecnologia pode significar.

Além desses índices também foram feitas avaliações qualitativas acerca dos ganhos com a eliminação do risco de iniciação não planejada por descargas atmosféricas, e sobre potenciais de flexibilização no planejamento e operação de mina com a possibilidade de que áreas carregadas com acessório sem fio sejam utilizadas como vias de tráfego para equipamentos.

O polígono L4\_322\_015, mostrado na Figura 24, foi a primeira detonação de produção iniciada com tecnologia sem fio na mina de Salobo, e com sucesso gerou uma massa desmontada de 730.000 toneladas de rocha. No segundo evento, mais 680.000 toneladas de rocha foram detonadas no polígono L4\_322\_014.

A ausência de cabos garantiu a eliminação de interações perigosas e indesejadas com o cabeamento dos acessórios do iniciador, reduzindo a zero a taxa de danos em cabos e eliminando o risco de ocorrência de falhas de iniciação (mina falhada) causadas por esse tipo de dano. O risco de detonação não planejada de furos devido a eventos de descarga atmosférica também foi controlado, visto que não há nenhum tipo de acessório exposto na superfície da bancada.

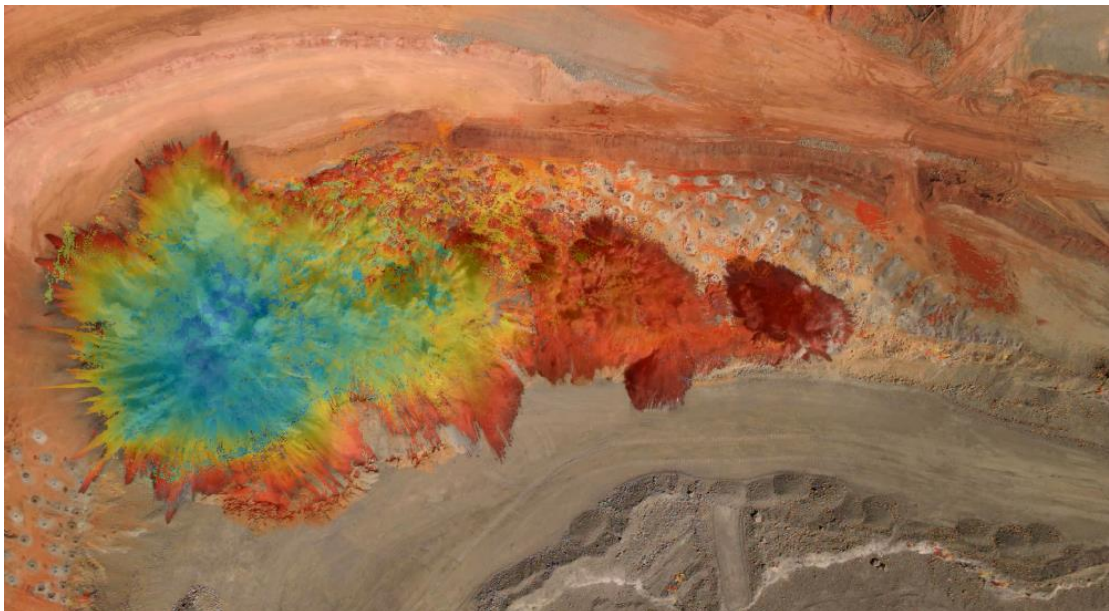
Figura 24 - Imagem de uma das áreas dos testes, antes e depois da detonação.



Fonte: Orica (2022).

Como medida adicional de controle de eficiência e segurança, as filmagens das detonações onde foram aplicados o acessório eletrônico sem fio, foram processadas em um software capaz de identificar falhas na detonação em desmontes à céu aberto através da análise visual, como mostrado na Figura 25. As análises feitas utilizando essa ferramenta atestaram a segurança e eficiência desse sistema de iniciação.

Figura 25 - Aplicação de tecnologia (BlastVision™) para identificação de minas falhadas.



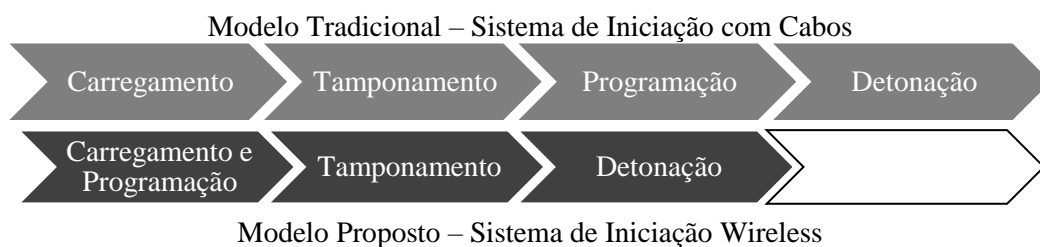
Fonte: Orica (2022).

Esses fatores contribuem significativamente para a segurança das operações, reduzindo a exposição ao risco de uma detonação não planejada, seja por uma possível mina falhada ou

pela iniciação indesejada de furos carregados durante tempestades. Além de eliminar a necessidade de que áreas no entorno dos polígonos já carregados sejam evacuadas durante tempestades com risco de queda de raios, mantendo a segurança da operação e gerando menos impactos negativos nas atividades da mina.

Os resultados também evidenciaram ganhos de produtividade. Nas áreas carregadas com iniciadores sem fio, houve mudança na sequência das atividades de carregamento. A fase de programação dos detonadores (logagem), que no modelo tradicional ocorre após a detonação pôde ser realizada de maneira definitiva e paralelamente ao carregamento, eliminando uma etapa do processo e reduzindo o tempo entre a conclusão do carregamento e a liberação da área detonada, já que ao final do carregamento e tamponamento, os acessórios já estão programados e prontos para serem iniciados. A Figura 26 mostra um fluxograma das atividades de carregamento com explosivos e detonação.

Figura 26 - Fluxograma de atividades de carregamento com explosivos e detonação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com a bancada livre da presença de cabos, registrou-se uma redução de 48,5% no tempo médio de tamponamento, conforme análise realizada com o software CyclePro 3™. Esses resultados são apresentados na Tabela 5. Além disso, eliminou-se a necessidade da presença do assistente de tamponamento, que é o responsável por garantir a proteção dos cabos durante o processo padrão, reduzindo a exposição das pessoas a riscos e trazendo ganhos de produtividade.

Tabela 5 - Variação no tempo médio de tamponamento por furo.

	<b>Tempo Médio do Ciclo de Tamponamento (s)</b>
Sistema de Iniciação com Cabos	113,1 s
Sistema de Iniciação Wireless	58,2 s
Variação (%)	- 48,5%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A ausência de cabos na bancada também permitiu que áreas já carregadas fossem transformadas em vias de acesso para os caminhões que aplicam os explosivos, como mostrado na Figura 27. Essa maior flexibilidade operacional contribuiu com a melhoria nas condições de tráfego na bancada, e trazendo ganhos em produtividade e segurança.

Figura 27 - Caminhões trafegam sobre área já carregada com explosivos.



Fonte: Acervo do autor.

O sucesso desses testes, também, abriu discussões para a possibilidade de transformar as bancadas carregadas em vias de acesso para outros equipamentos, como caminhões, perfuratrizes e escavadeiras, dando maior flexibilidade ao planejamento e agilidade para operação da mina. Embora esse tipo de processo ainda demande discussão do ponto de vista de legislação para que seja amplamente aplicado em uma mina e que caminhões convencionais e outros equipamentos circulem sobre furos já carregados, essa possibilidade técnica abre uma janela de oportunidades. Além disso, até mesmo avanços na automação de processos podem ser consideradas com menos restrições de movimentação em áreas carregadas com explosivos.

Com o avanço da aplicação dos acessórios de iniciação sem fio também é esperada uma redução no custo do produto, tanto pelo próprio desenvolvimento de novas versões dessa tecnologia quanto pela maior escala de produção, que permite a redução de custos de fabricação. Portanto, esse tipo de tecnologia e seus benefícios operacionais devem estar cada vez mais presentes nas minas ao redor de todo o mundo.


## 6 ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO

A fragmentação é um indicador chave para o desempenho das operações de mineração, sendo um dos principais índices para avaliar a qualidade do desmonte. Na mineração a céu aberto, o desmonte de rochas tem como principal objetivo fragmentar o material rochoso de maneira adequada, permitindo que sua movimentação e beneficiamento sejam realizados do modo mais econômico possível (DEMENEGAS, 2008). Pois uma fragmentação apropriada garante o desempenho ideal de operações como carregamento, transporte, britagem e moagem.

A análise de fragmentação é constantemente utilizada para avaliar a efetividade do desmonte, apoiando no processo de definição de projetos otimizados de perfuração e desmonte. Essas informações também são úteis na etapa de cominuição, que pode se valer da análise de fragmentação para o controle de eficiência e qualidade de processos (CHOW et al, 2012).

Apesar de sua importância, em muitas minas ainda são utilizados métodos de análise de fragmentação considerados como tendenciosos e limitados. A maioria dessas técnicas é baseada na análise de imagens tiradas manualmente na pilha de rocha desmontada. Essas técnicas de amostragem manual tendem a limitar a quantidade de dados coletados, além de expor o trabalhador a condições adversas, e sujeitando o resultado a falhas de amostragem. A Figura 28 mostra um exemplo de imagem coletada com esse método, e um resumo dos resultados da análise de fragmentação de um evento de desmonte de rochas. Vale destacar a presença do objeto usado como escala para a medição dos blocos.

Figura 28 - Exemplo de imagem coletada manualmente para análise de fragmentação, e resumo geral dos resultados da análise de um desmonte.

	<b>Project Data</b>		<b>Rosin-Rammler Fit</b>	
	Name:	L5_307_014	Xc:	0.170 m
	Total images:	12	n:	1.36
	Processed images:	12	80% Passing:	0.242 m
			% Fines:	n/a
	<b>Results Data</b>			
	Included images:	12		
	Total analysed area:	62.23 m <sup>2</sup>		
	Fines size:	Not specified		

Fonte: Acervo do próprio autor.

Por tais fatores, muitas vezes os resultados das análises de fragmentação podem não ser representativos, podendo levar a equívocos na avaliação da performance do desmonte. Além disso, esse processo de coleta de dados e análise manual consome um tempo considerável, ou seja, as informações podem percorrer uma longa jornada da mina até as mãos dos tomadores de decisão, dificultando ações em tempo real que impediriam eventos indesejáveis.

As técnicas manuais de amostragem, também, atrapalham as operações em andamento na frente de lavra, como o carregamento, uma vez que a escavação deve ser paralisada para que a tomada de fotos seja realizada, causando perdas significativas no processo.

Na mina de Salobo, o método usual de coleta e análise de imagens para elaboração de relatórios de fragmentação também é manual. Utilizando um drone, um técnico da equipe de desmonte realiza a tomada de fotos, porém há a necessidade de posicionar um objeto, que serve como referência para cada imagem coletada. Para isso, o técnico precisa do apoio de um auxiliar que coloca essa referência em diferentes pontos da pilha permitindo que as imagens sejam registradas e utilizadas para análise de fragmentação. Essa dinâmica limita as áreas que podem ser amostradas, pois nem toda a superfície da pilha oferece condições seguras para o acesso do auxiliar que posiciona o objeto de referência. De modo geral, as porções localizadas nas bordas da pilha acabam sendo mais amostradas do que o topo devido a essas limitações de acesso. Além disso, porções no meio da pilha acabam não sendo amostradas, pois quando a lavra é iniciada a operação não pode ser paralisada para que seja feita a coleta de imagens. Essas limitações acabam contribuindo para a geração de dados enviesados e que podem não corresponder de fato a realidade.

Uma vez coletadas, as imagens são processadas utilizando um software de análise de fragmentação. Embora de simples utilização, para que o resultado o mais fiel possível, é necessário que as imagens sejam tratadas manualmente, o que se torna a tarefa muito demorada quando há um grande volume de imagens para análise.

Portanto, se tratando da realização de análises de fragmentação, busca-se avanços nos seguintes aspectos:

- Redução da exposição de trabalhadores ao risco.
- Realização de uma amostragem mais representativa.
- Redução no tempo empregado em análises de fragmentação.

## 6.1 SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO

A análise de fragmentação de rochas evoluiu de um método completamente subjetivo e manual para um processo estatisticamente objetivo e semiautomatizado. Ou seja, a tendência é alcançar um processo estatisticamente representativo e totalmente automatizado. Considerando a perspectiva de otimização do desmonte de rochas, é fundamental receber rapidamente resultados confiáveis de fragmentação para incorporar melhorias no planejamento de desmontes subsequentes. Como os métodos manuais de análise de fragmentação tendem a ser demorados e sujeitos a erros, tanto na amostragem quanto na análise, um método totalmente automatizado é a maneira prática para atender os requisitos impostos pela mineração moderna (CHOW et al, 2012).

Nesse trabalho, foram propostas e avaliadas duas novas soluções tecnológicas para análise de fragmentação. A primeira se trata de um software que permite a análise de toda a superfície da pilha de material desmontado sem a necessidade de posicionar um objeto como referência nas imagens, e embora não seja totalmente automatizada, essa tecnologia permite um relativo avanço em relação ao método atual. Já a segunda solução consiste em um conjunto de câmeras posicionadas sobre as correias transportadoras da britagem primária, que são capazes de analisar a granulometria do material que passa por essas correias de maneira totalmente automatizada.

Esse mesmo sistema automatizado também pode ser instalado nas escavadeiras para medição dos fragmentos ainda na pilha, ou em portais estrategicamente posicionados na mina, para medição do material fragmentado na balança dos caminhões fora de estrada. Devido a importância de uma boa fragmentação para a performance da britagem e moagem no caso de estudo, a primeira fase de validação dessa tecnologia foi definida como as correias transportadoras da saída da britagem primária, com objetivo de avaliar o P80 e o percentual de finos do material que alimentará as etapas posteriores do processo.

Através da eliminação de métodos de amostragem manual, sistemas mais automatizados podem fornecer análises mais ágeis, precisas e imparciais, sem expor nenhum trabalhador a condições adversas ou interromper as operações. Melhorar a segurança, reduzir a variabilidade dos dados, otimizar processos e permitir decisões assertivas em tempo real, beneficiando toda a cadeia produtiva da mineração.

### 6.1.1 Análise de Fragmentação na Pilha

A geração de blocos de tamanho excessivo no desmonte é uma preocupação comum para minerações de todos os portes. Esses fragmentos de maior dimensão comprometem o desempenho das operações posteriores - carga, transporte e britagem, e geram prejuízos significativos. Portanto, de modo geral, a qualidade de um desmonte está diretamente relacionada a um baixo percentual de blocos.

Na mina do Salobo, historicamente a superfície da pilha é a região com maior concentração de blocos com tamanho excessivo. Essa porção superior da pilha coincide com a zona do tampão, que é a parte do furo que não é preenchida com explosivos. O tamponamento é essencial para o confinamento do explosivo durante a detonação, aumentando o aproveitamento da energia e controlando as projeções indesejadas. Porém, devido à ausência de explosivo essa região tende a ter uma qualidade de fragmentação inferior (DEMENEGAS, 2008). Portanto, a avaliação da granulometria superficial das pilhas de material detonado é fundamental para mensurar o percentual de blocos que podem impactar principalmente nas operações de carga, transporte e na britagem primária, e com isso permitir uma correta avaliação do resultado do desmonte.

Como comentado anteriormente, a exposição dos colaboradores ao risco e as limitações na amostragem são motivos de preocupação quando são utilizados métodos tradicionais para coleta de dados para análise granulométrica nas pilhas de material desmontado. Além do comprometimento da qualidade dos dados existe o risco de acidentes como quedas de mesmo nível quando o colaborador caminha sobre a pilha para posicionar o objeto que serve de escala nas imagens.

A potencial solução apresentada para essas questões foi o uso de um software de análise de fragmentação por aerolevanteamento. Esse método elimina a necessidade de posicionamento de objetos para referência de dimensão e possibilita a amostragem de toda a superfície da pilha, com uma maior área amostrada os resultados obtidos na análise tendem a ser mais representativos, além disso como não há necessidade de caminhar sobre a pilha para posicionar o objeto de referência, esse tipo de exposição ao risco é eliminado.

A coleta de amostras é realizada através de um voo automatizado com o drone sobre toda a superfície desmontada. A Figura 29 apresenta um exemplo de drone usado para essa finalidade. Com as câmeras de alta resolução disponíveis nos drones atuais, bem como o preciso



sistema de georreferenciamento presente nos equipamentos, é possível registrar imagens de alta resolução com referenciamento geográfico, que são usadas para construir um modelo digital da superfície. Além disso, o aerolevanteamento pode ser automatizado através da elaboração de um plano de voo, como o exemplo apresentado na Figura 30.

Figura 29 - Drones usados no aerolevanteamento da pilha.



Fonte: Website DJI Drones (2023).

Figura 30 - Plano de voo para drone.



Fonte: Website Esri Nerderland (2023)

Na fase de processamento de dados, embora nem todo o processo seja automatizado, também são esperados ganhos referentes a uma melhor utilização da mão-de-obra, pois o software utilizado (*Fragmenter - 3GSM*) exige menos interações manuais do que a ferramenta utilizada atualmente, portanto, menos horas de trabalho devem ser dedicadas a análise de dados e elaboração de relatórios.

Apesar de já representar um avanço significativo em relação ao método de amostragem manual, o uso do aerolevante para coleta de dados usados na análise de fragmentação possui algumas deficiências, principalmente por se restringir a região superficial, limitando a avaliação da porção interior da pilha. Uma alternativa seria amostrar a fração exposta da pilha conforme a lavra do material avança, porém, a lavra teria que ser paralisada durante o aerolevante, impactando no processo de produção.

Além disso, o material encontrado no meio da pilha tende a ser mais fino, justamente por haver uma maior interação da rocha com o explosivo nessa área. Esse material de granulometria mais fina (< 25mm) é difícil de ser corretamente medido com métodos que utilizam o aerolevante.

Portanto, o aerolevante pode ser considerado uma solução efetiva pra controle e avaliação da porção superficial e mais grosseira do desmonte, principalmente blocos que poderiam impactar negativamente as operações posteriores, como engaiolamento de britadores primários. Porém, existe a necessidade de avaliar a porção interior da pilha, principalmente em relação a geração de finos pelo desmonte.

### **6.1.2 Análise de Fragmentação nas Correias Transportadoras**

Uma tecnologia de análise de fragmentação que utiliza câmeras com processamento automatizado de imagens foi apresentada com o objetivo de fornecer uma avaliação precisa e representativa do desmonte, principalmente das frações mais finas de material. Para esse projeto a opção foi de posicionar as câmeras nas correias que saem dos britadores primários e abastecem a pilha pulmão da britagem secundária. Possibilitando, além da avaliação da performance do desmonte, o controle contínuo do material que passa pelas correias e que alimentará as etapas posteriores de cominuição.

A opção de instalar esses equipamentos nas correias da britagem primária e não nas escavadeiras da mina, por exemplo, foi feita tomando em conta que as frações mais finas do

material são de grande interesse para a equipe do processamento de minério. Instalando os equipamentos nesse local é possível acompanhar a performance do desmonte e da britagem primária, agregando ainda mais valor ao projeto. A Figura 31 mostra uma vista aérea da área da britagem, com destaque para as duas correias transportadoras (1 e 2) onde as câmeras serão instaladas, essas correias saem da britagem primária e seguem para a pilha pulmão, que por sua vez alimentará a britagem secundária.

Figura 31 - Vista geral da área de britagem.



Fonte: Acervo do autor.

A tecnologia proposta (*FRAGTrack™ Conveyor – Orica*) consiste em dispositivos capazes de coletar imagens de alta qualidade mesmo em ambientes hostis ou condições de pouca luz. A ferramenta coleta imagens em intervalos predefinidos de tempo, produzindo uma grande quantidade de dados imparciais. Como os dispositivos são conectados à internet e tem a capacidade de realizar automaticamente a análise de fragmentação, os resultados ficam disponíveis em tempo real, sem a necessidade de que sejam feitas análises manuais.

As câmeras utilizadas possuem lentes capazes de registrar imagens de alta definição, e cada equipamento possui duas câmeras integradas que permitem a geração de imagens tridimensionais. Graças a essa formatação o equipamento é capaz de analisar porções mais finas do material fragmentado, no caso partículas menores do que 1” (25 mm), o que é uma

dificuldade para a maioria dos métodos de análise granulométrica, incluindo o aerolevante citado nesse trabalho. A tipo de câmera e utilizado e o esquema de instalação proposto para as correias transportadoras são apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Detalhe da câmera e unidade de processamento (esquerda), e esquema de instalação.



Fonte: Website Orica (2023).

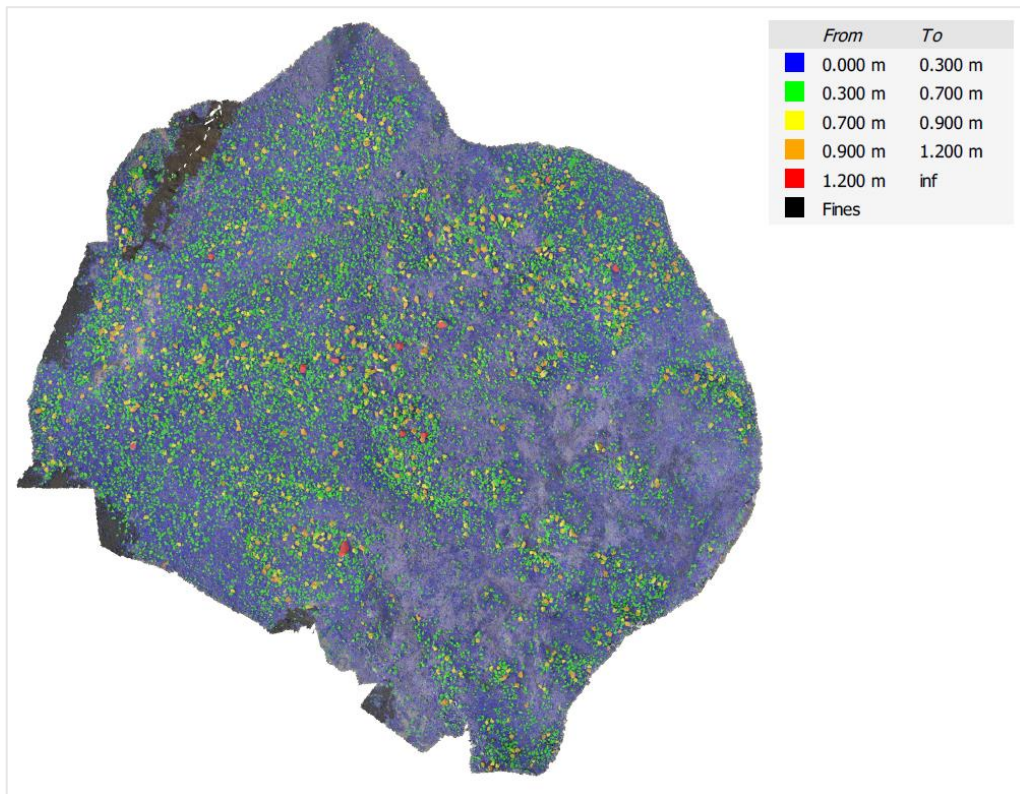
Os dados gerados podem então ser utilizados tanto pela equipe da mina, para avaliação de performance e definição de padrões ótimos de perfuração e desmonte, quanto pelo time da comunicação, para acompanhamento de qualidade e desempenho do processo de britagem.

## 6.2 METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS

O desempenho dos métodos de análise de fragmentação apresentados nesse trabalho (aerolevante e câmeras automatizadas) foi avaliado e comparado com o do método usual (manual). Para as análises com dados de aerolevante foram utilizados drones da DJI Mavic 2 em conjunto com o software Fragmenter, desenvolvido pela 3GSM. Já as câmeras automatizadas utilizadas nas correias transportadoras foram do tipo Fragtrack™ Conveyor, uma tecnologia desenvolvida pela Orica. O método de análise granulométrica usual, ou seja, o caso base, consiste na coleta manual de imagens com câmeras convencionais e na análise dessas imagens no software Powersieve™, também uma tecnologia Orica. A avaliação de performance dos métodos se baseia principalmente na representatividade da amostra, na agilidade e demanda por mão-de-obra no processo, e na segurança e produtividade das operações.

O aerolevanteamento foi aplicado como ferramenta de análise de fragmentação na mina, voltado para a avaliação da porção superficial, principalmente com foco na identificação de regiões com concentração de blocos. Com o uso de drones, foi possível realizar o levantamento de toda a superfície da pilha de maneira ágil e segura, ou seja, uma amostragem de 100% da área superficial. Por comparação, com o método tradicional são coletadas de 10 a 15 imagens na superfície da pilha para análise granulométrica, o que historicamente representa de 50 a 60 m<sup>2</sup> de área amostrada. Considerando a área média dos desmontes de 5.000 m<sup>2</sup>, o percentual amostrado com o método tradicional fica em torno de 1% da superfície total, deixando evidente a vantagem do aerolevanteamento em relação a representatividade da amostra. Como mostrado na Figura 33, o método de aerolevanteamento permite que toda a pilha de material desmontado seja levantada e analisada.

Figura 33 - Análise de fragmentação superficial obtida com o Fragmenter™ (3GSM).



Fonte: Elaborado pelo autor.

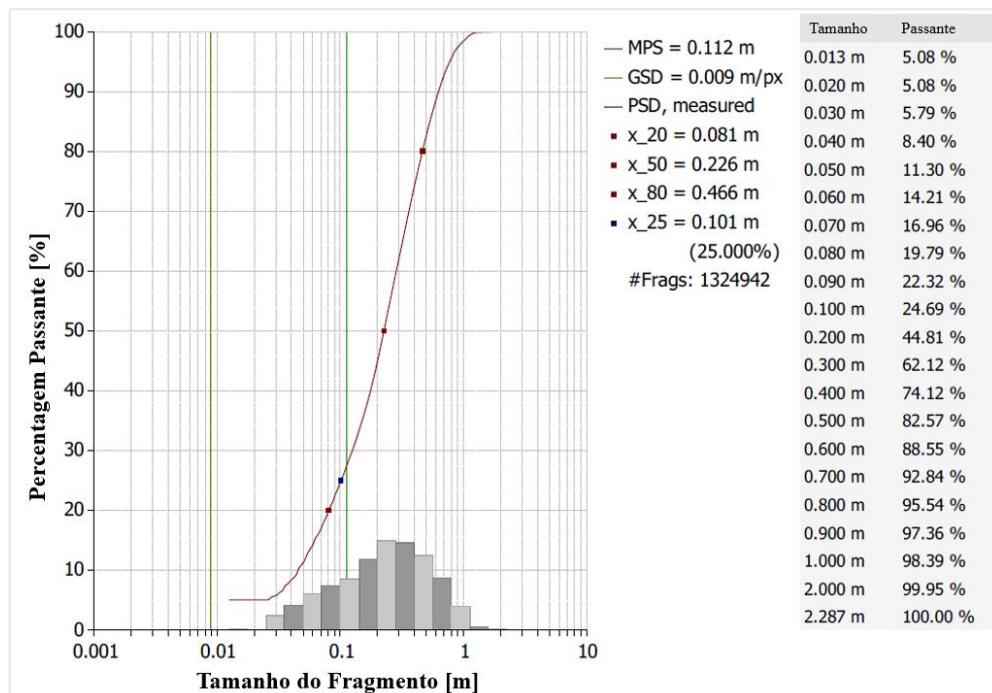
No campo operacional, o uso desse método eliminou a necessidade de que pessoas caminhassem sobre a pilha de material desmontado para realizar a coleta de imagens para

processamento, contribuindo com a segurança da operação. Além disso, a representatividade da amostra obtida se mostrou bem superior, já que toda a superfície pode ser amostrada.

Quanto a análise de dados, apesar de ainda não ser completamente automatizada, o método de fato necessita de menos interferência humana no processamento. O software usado requer alguns comandos manuais, porém o processamento da imagem da pilha e a geração do relatório de fragmentação são automáticos, e geram resultados coerentes sem a necessidade de muitos ajustes manuais.

Considerando a mão-de-obra requerida, para o aerolevamento apenas uma pessoa é capaz de realizar a coleta dos dados, enquanto com o método manual são necessárias pelo menos duas pessoas nessa fase de coleta de imagens. Já durante o processamento com o método tradicional uma pessoa deve estar focada na execução da análise, enquanto para processar os dados do aerolevamento, apesar de ser necessário que alguns dados sejam colocados manualmente, a análise é majoritariamente feita de modo automatizado, possibilitando que o colaborador execute outras tarefas enquanto a máquina realiza a análise de fragmentação. Ou seja, existe uma redução na mão-de-obra total e nas horas trabalhadas requeridas na atividade de análise de fragmentação.

Figura 34 - Curva granulométrica gerada pelo Fragmenter – 3GSM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra um exemplo de curva granulométrica gerada pelo software responsável pelo processamento dos dados do aerolevante. Quanto a qualidade dos dados obtidos, ambos os métodos podem ser considerados como confiáveis, principalmente quando o foco da análise está nas frações mais grosseiras do material. Contudo, como comentado anteriormente, o aerolevante tem a vantagem de cobrir toda a superfície da pilha, tomando uma amostra muito mais representativa do que as imagens pontuais coletadas com o método tradicional, fazendo com que o resultado final seja um panorama real e representativo da condição da superfície da pilha de material.

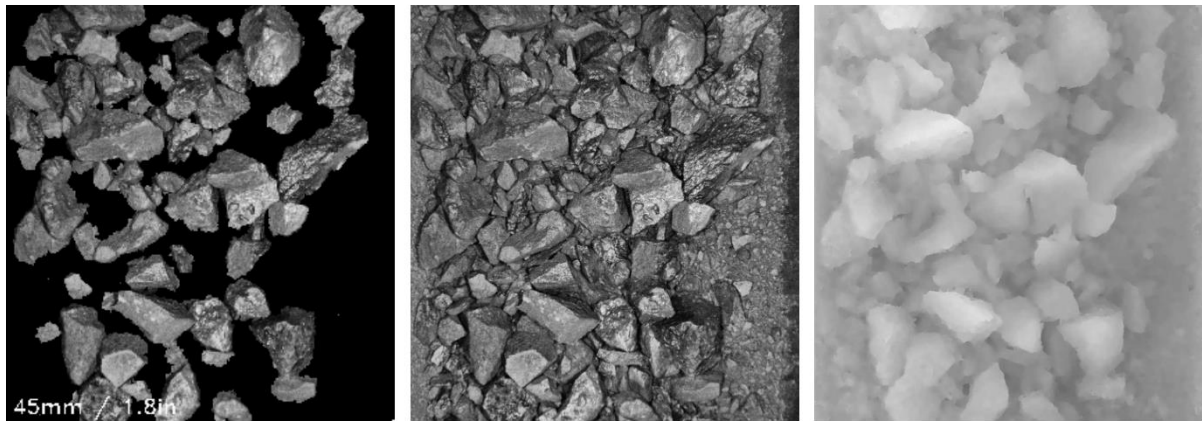
Quando partimos para a avaliação da performance das câmeras de análise automatizada de fragmentação os avanços em relação a metodologia tradicional são ainda mais significativos. O uso dessa tecnologia elimina a necessidade do envolvimento de colaboradores tanto na fase de amostragem quanto de processamento das imagens. A integração com um sistema de rastreamento de minério também permite a correlação entre a análise de fragmentação e o desmonte de origem do material.

As câmeras posicionadas nas correias transportadoras foram programadas para coletar uma imagem a cada minuto, processar e enviar a análise de fragmentação para uma plataforma de gestão de dados, tudo de maneira automática e instantânea. Considerando essa taxa de amostragem e a capacidade de britagem da linha, significa dizer que a taxa de amostragem seria de 1 imagem para cada 50 toneladas de material britado. Com o porte médio dos desmontes em 250.000 toneladas, pode-se dizer que seriam tomadas 5.000 imagens de cada desmonte de minério para a análise de fragmentação, número muito superior às cerca de 10 a 15 imagens coletadas com o método tradicional. Logo, o resultado da análise de fragmentação utilizando as câmeras automatizadas é muito mais representativo do que quando usado o método manual.

Na plataforma de gestão de dados, a mesma apresentada no item de Planejamento e Controle Operacional do presente trabalho, é possível visualizar e analisar os resultados de diversas maneiras, seja de modo individual, por período, por equipamento, por mina, entre outros. As fotos capturadas e processadas também podem ser visualizadas na plataforma, como o exemplo da Figura 35. Além disso, é possível criar filtros e opções personalizadas de visualização que destaquem os índices mais relevantes para cada operação ou usuário. A interpretação facilitada, os dados representativos e confiáveis e disponíveis em tempo real, contribuem com a correta avaliação da performance do desmonte e da britagem primária,

sustentando a tomada de decisões efetivas e no tempo correto, contribuindo com o desempenho total dos processos de produção mineral.

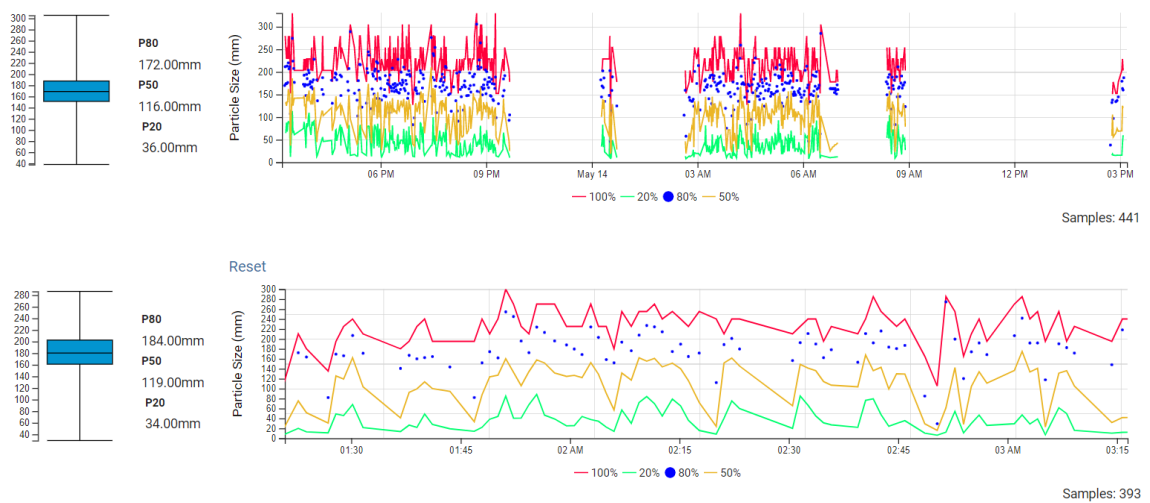
Figura 35 - Imagens automaticamente capturadas e processadas pela Fragtrack™ e disponíveis na página do BlastIQ™ Insights.



Fonte: Plataforma BlastIQ Insights – Orica (2023).

A qualidade e a precisão dos dados são outros pontos de destaque, as câmeras utilizadas permitem que sejam coletadas imagens de alta qualidade, e que mesmo as frações mais finas (< 25 mm) possam ser adequadamente mensuradas. Na Figura 36 são apresentados exemplos de como os dados de análise de fragmentação das câmeras automatizadas podem ser exibidos na plataforma digital.

Figura 36 - Resultados da análise de fragmentação gerados pela Fragtrack™.



Fonte: Plataforma BlastIQ™ Insights – Orica (2023).



Ainda cabe ressaltar o não envolvimento de colaboradores nesse processo de análise de fragmentação, eliminando qualquer tipo de exposição ao risco durante atividades de coleta de amostras para análise de fragmentação e liberando mão-de-obra especializada para outras tarefas chave ao não demandar nenhum tipo tratamento manual das imagens.

A Tabela 6 apresenta um resumo do desempenho dos métodos de análise granulométrica considerados no presente trabalho sobre alguns dos aspectos avaliados.

Tabela 6 - Análise de desempenho de metodologias para análise de fragmentação.

Método de Análise de Fragmentação	Mão-de-obra Requerida		Representatividade da Amostra	Agilidade da Análise	
	Coleta de Amostras	Processamento de Imagens		Coleta de Dados	Processamento
Tradicional (Manual)	2	1	Baixa 1% da superfície desmontada	30 - 40 min por desmonte	3 - 5 min por imagem
Aerolevanteamento	1	1*	Média 100% da superfície desmontada	20 - 30 min por desmonte	30 min por desmonte*
Câmeras Automatizadas	-	-	Alta Amostragem superfície e interior da pilha	Automática	Instantânea

*\*No método de aerolevanteamento a atividade de processamento de dados é semiautomatizada e não exige o envolvimento da mão-de-obra durante todo o processo.*

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Além dos pontos destacados na tabela acima, cabe ressaltar que com a aplicação dos métodos de aerolevanteamento e do uso de câmeras automatizadas houve uma redução na exposição de colaboradores ao risco, seja pela eliminação de tarefas como caminhar sobre pilhas de material desmontado ou pela eliminação do envolvimento de pessoas em atividades relacionadas a análise de fragmentação, no caso das câmeras automatizadas.

Cabe ressaltar também, que a qualidade das análises também melhorou com a aplicação desses novos métodos, tanto pela ampliação significativa da área amostrada quanto pelo emprego de equipamentos capazes de registrar imagens de maior qualidade, permitindo que até mesmo frações mais finas sejam adequadamente analisadas.

Portanto, ficou evidenciado que os métodos de aerolevanteamento e de câmeras automatizadas podem substituir o método tradicional de análise de fragmentação, trazendo uma série de benefícios para a operação e sem nenhum tipo de prejuízo registrado.

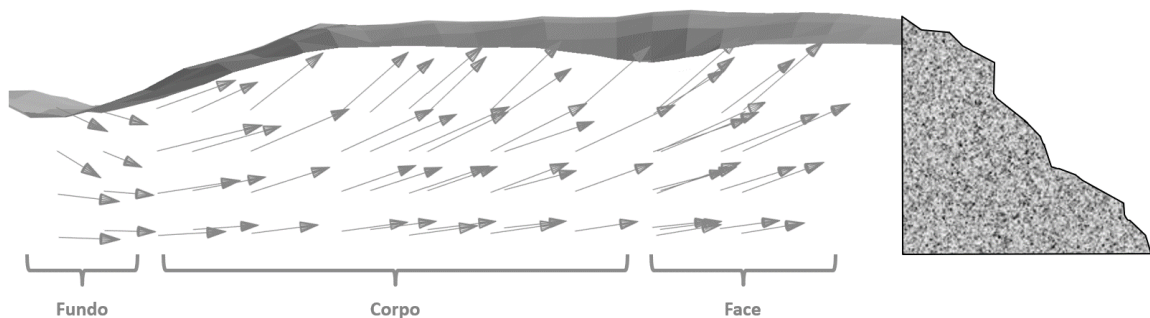
## 7 LAVRA DE ÁREAS DESMONTADAS

Os crescentes custos de produção, a queda nos teores médios dos depósitos minerais, e questões de saúde, segurança e meio ambiente são alguns dos principais desafios enfrentados atualmente pela mineração. Tais fatores reforçam a necessidade de otimizar os processos dentro da mineração, especialmente quando se trata de operações a céu aberto em grande escala (WETHERELT e VAN DER WIELEN, 2011).

Nesse contexto, o processo de lavra de material detonado muitas vezes é tido como uma operação de baixa seletividade, principalmente em operações de médio a grande porte, onde a própria dimensão dos equipamentos e a falta de conhecimento da distribuição das qualidades da rocha dificulta a correta separação do material durante a lavra. Em resumo, uma quantidade significativa de minério pode ser lavrada como estéril, resultando em altas taxas de perda de minério, assim como estéril pode ser classificado como minério durante a lavra, e conseqüentemente encaminhado para a planta de beneficiamento, aumentando a diluição e comprometendo os resultados do processo de concentração.

Mesmo quando um bom modelo de teores *in-situ* está disponível, a seletividade da lavra de áreas detonadas pode ser comprometida, pois a informação do modelo *in-situ* já não é mais representativa do real, uma vez que o desmonte pode alterar completamente o posicionamento e a distribuição do material (POUPEAU et al., 2019). Essa movimentação induzida pelo desmonte pode afetar diretamente a diluição e a recuperação do minério durante a atividade de lavra, impactando toda a cadeia de produção mineral. A Figura 37 mostra de maneira esquemática como a movimentação gerada pela desmonte tem efeitos diferentes a depender da região do ponto avaliado e da condição da bancada.

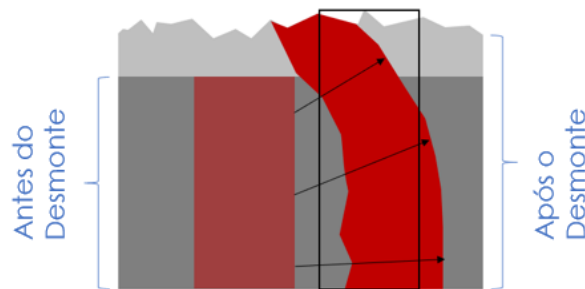
Figura 37 - Comportamento do movimento em uma sessão do desmonte.



Fonte: Adaptado de POUPEAU et al. (2019).

A Figura 38 apresenta de forma esquemática o impacto do desmonte na distribuição do material em relação ao modelo *in-situ* (pré-detonação). Como pode ser observado, o desmonte modifica a disposição física do material, e o modelo *in-situ* já não é uma referência adequada para a classificação do pós-detonação.

Figura 38 - Mudança na disposição do corpo mineral induzida pelo desmonte.



Fonte: Adaptado de JULIAN et al. (2023).

Conciliar o controle e seletividade do material desmontado e lavrado com o aumento do porte dos desmontes é fundamental para assegurar a viabilidade e a competitividade do minério, pois se trata de uma oportunidade de reduzir custos e maximizar receitas.

Com o objetivo de assegurar o controle de teores, mesmo em condições em que sua distribuição no maciço é heterogênea, e com grandes volumes de rocha desmontados a cada evento de detonação, foi aplicada uma ferramenta de modelamento tridimensional da movimentação induzida pelo desmonte. Nesse trabalho são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dessa tecnologia, bem como um comparativo entre essa nova metodologia e o modelo historicamente aplicado na mina do Salobo.

## 7.1 FERRAMENTA DE CONTROLE DE DILUIÇÃO OPERACIONAL

O presente trabalho consiste na aplicação de um software capaz de modelar tridimensionalmente o movimento induzido pelo desmonte, transformando o modelo de teores (modelo de blocos) “*in-situ*” ou pré-detonação em modelo pós-detonação, mais representativo da condição real da pilha de material desmontado. A partir desse modelo de teores ajustado para o pós-desmonte, esse mesmo software também é capaz de otimizar os limites de lavra, gerando geometrias de lavra que maximizam o valor obtido, otimizando diluição e recuperação.

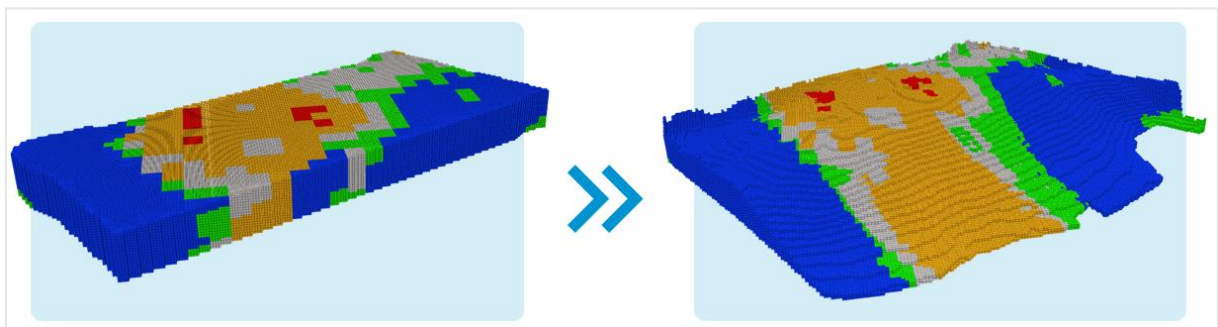
Para realizar o modelamento essa ferramenta computacional utiliza fontes de dados, que de maneira geral já estão prontamente disponíveis na maioria das minas, e que devem ser então importadas para o software. Os dados básicos necessário estão destacados a seguir.

- Modelo de teores “in-situ” (Modelo de blocos pré-detonação);
- Plano de perfuração e desmonte (Plano de fogo);
- Topografia pós-detonação;

O software utiliza a topografia pós-detonação como limite físico para, a partir do plano de perfuração e desmonte, criar um campo de vetores tridimensional que atribui direção, sentido e amplitude para o movimento do material, e conseqüentemente dos dados presentes no modelo de blocos pré-detonação, gerando o modelo pós-detonação aderente a topografia da pilha.

A Figura 39 mostra um exemplo de como a distribuição das diferentes qualidades de material é modificada pelo movimento induzido pelo desmonte, e como a ferramenta computacional pode auxiliar a modelar esse fenômeno e ajustar os dados para o estado real, o pós-detonação.

Figura 39 - Modelo em blocos in-situ (esquerda) e o deslocado pelo desmonte usando a ferramenta de modelamento computacional (direita).

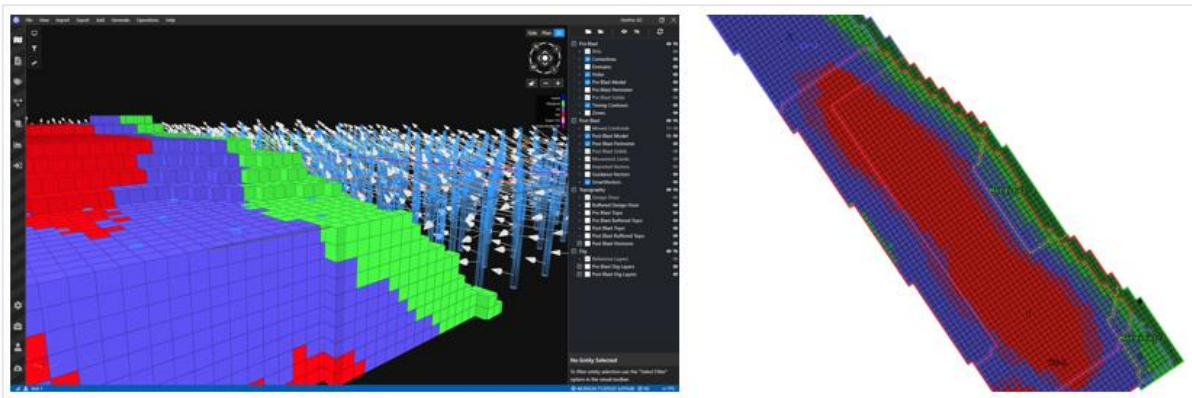


Fonte: Acervo do próprio autor.

No segundo momento, através de milhares de interações matemáticas, a ferramenta calcula os limites de escavação que maximizam o valor obtido com a lavra do material, segregando as diferentes classes minerais de maneira otimizada, como por exemplo, separando contatos de minério e estéril afim de reduzir a diluição e melhorar a recuperação. Nessa fase de otimização de limites de escavação as restrições operacionais relacionadas ao porte dos

equipamentos, condição da frente de lavra e condições de segurança e controle operacional devem ser consideradas, dessa forma o resultado será uma liberação de lavra otimizada e operacional. A Figura 40 apresenta os dois principais produtos gerados com essa ferramenta, o modelo de blocos deslocado, ou pós-detonação, e os polígonos de escavação, ou liberações de lavra, otimizadas.

Figura 40 - Produtos gerados pela ferramenta de controle de teores: Modelo de blocos deslocado (esquerda) e polígonos de escavação otimizados (direita).



Fonte: Website Orica (2022).

Além disso, antes do envio para a operação, diversos cenários de lavra podem ser simulados nesse software, como mudanças na direção de escavação e no porte do equipamento a ser utilizado. Os resultados referentes ao controle de qualidade obtidos para cada condição simulada podem ser facilmente comparados na plataforma, e a equipe da mina pode tomar uma decisão fundamentada em dados para definir qual opção deve ser executada.

Esses limites ótimos para escavação podem então ser exportados diretamente para os equipamentos de lavra através dos sistemas de gerenciamento de frota, garantindo que a equipe operacional terá pronto acesso à informação e assegurando a execução de uma lavra dentro dos parâmetros planejados. Além dos próprios limites de lavra, os dados referentes a volume de rocha, densidade real e teor médio de cada polígono de escavação também são calculados e podem ser exportados, aumentando a acurácia e dando mais agilidade ao processo de planejamento de lavra e reconciliação.

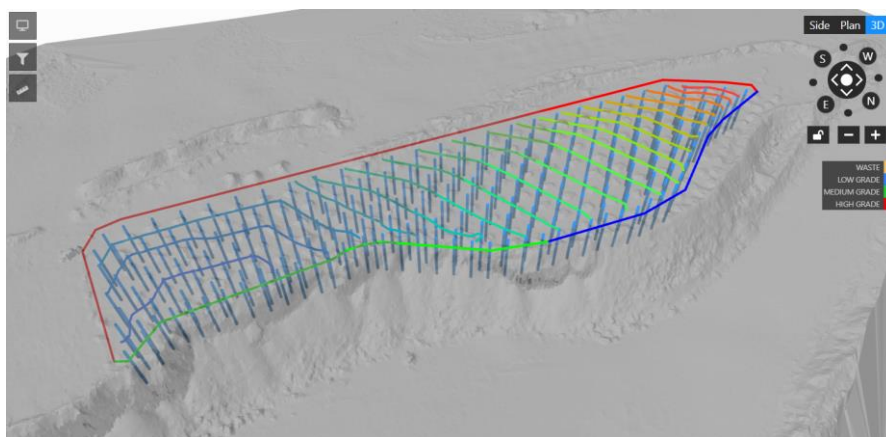
## 7.2 METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho da ferramenta computacional para o controle de teores em condições práticas. O software utilizado nesse estudo foi o OREPro™ 3D, uma tecnologia do portfólio da Orica, e essa tecnologia foi aplicada em três desmontes na mina do Salobo. Para esses eventos, os limites de escavação gerados pelo software foram comparados com os obtidos através do emprego da metodologia tradicional, que consiste em deslocar os limites de teores do modelo pré-detonação de maneira manual e bidimensional, com base em análises de campo feitas pela equipe de geologia e tendo como referência a direção do movimento, de modo que as geometrias de lavra ajustadas passem a cobrir toda a superfície da pilha de material desmontado.

Nesse estudo, são analisados os índices de diluição e perda de minério para ambas as metodologias consideradas. Em resumo, diluição é a quantidade de material estéril sendo lavrado como minério e perda de minério é a massa de material com valor econômico que foi lavrada como estéril. Além disso, será analisado o impacto no valor financeiro considerando as variações nos índices de diluição e perda de minério durante a lavra, preço de venda do metal, custos de processamento e taxa de recuperação do minério na planta.

Para que tais índices sejam calculados também para os limites de escavação gerados pela metodologia tradicional, esses polígonos de lavra foram importados para o software de modelamento, que com base no modelo pós-detonação é capaz de calcular os valores de cada índice para esses polígonos e compará-los com os resultados das opções de escavação geradas diretamente pela ferramenta.

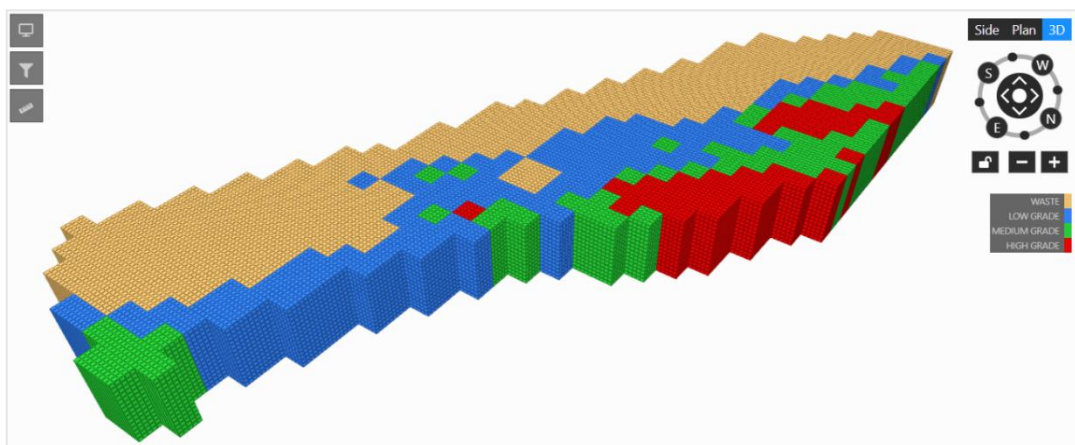
Figura 41 - Dados de P&D e topografia importados para o software.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

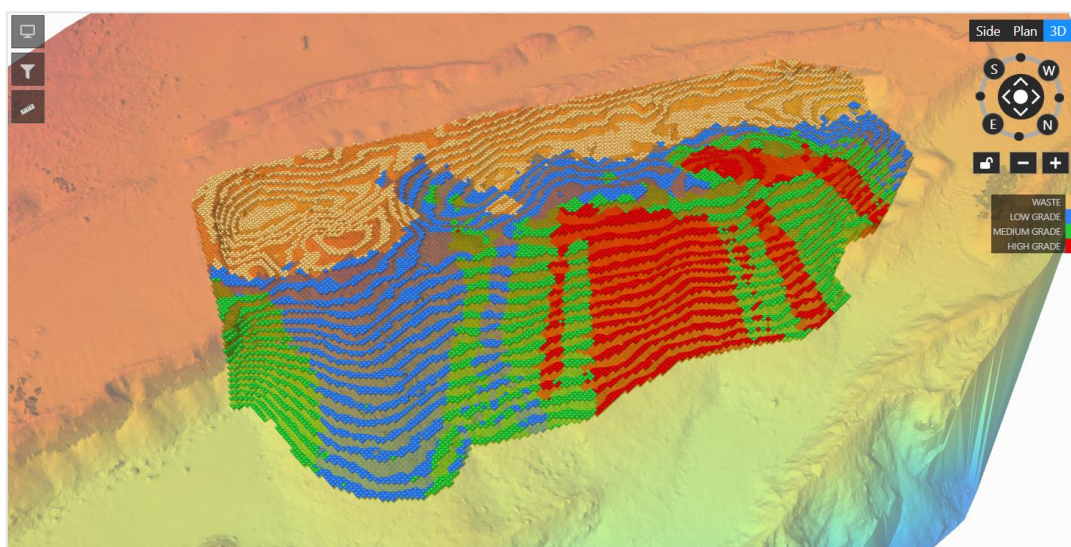
O polígono L6\_307\_013 foi a primeira área de avaliação do software. O plano de fogo e a topografia da área foram importados para o software, conforme apresentado na Figura 41. A região em questão é marcada por um contato entre estéril e minério de baixo a alto teor. Nesse caso, o controle de diluição e a recuperação são questões extremamente críticas, pois classes minerais distintas devem ser desmontadas em conjunto. A Figura 42 apresenta os modelos de teores dessa área antes do desmonte, já o modelo deslocado pelo *software* de modelamento tridimensional do movimento, já aderente à topografia pós-detonação, é mostrado na Figura 43.

Figura 42 - Modelo de blocos pré-detonação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 43 – Modelo de blocos deslocado pela ferramenta de modelamento.

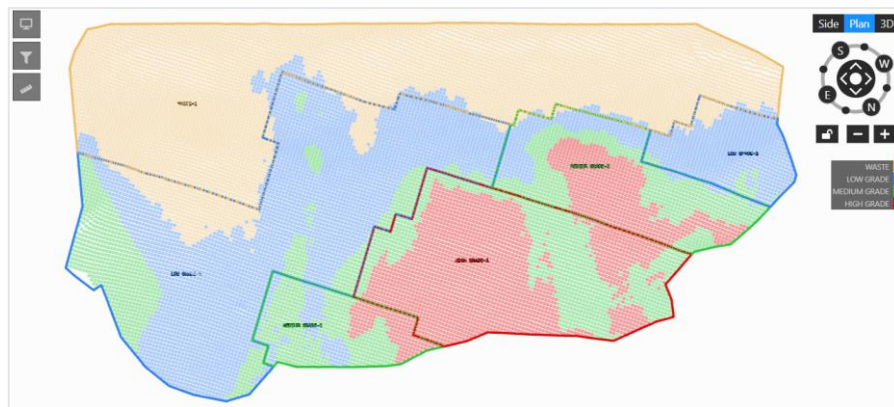


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os polígonos de escavação obtidos através de ambas as metodologias, tradicional (2D) e modelagem computacional (3D), são apresentadas nas figuras a seguir. Como comentado anteriormente, os polígonos obtidos pela metodologia tradicional foram importados para o software de modelamento para facilitar a visualização e assegurar que os dados pudessem ser calculados com a mesma base.

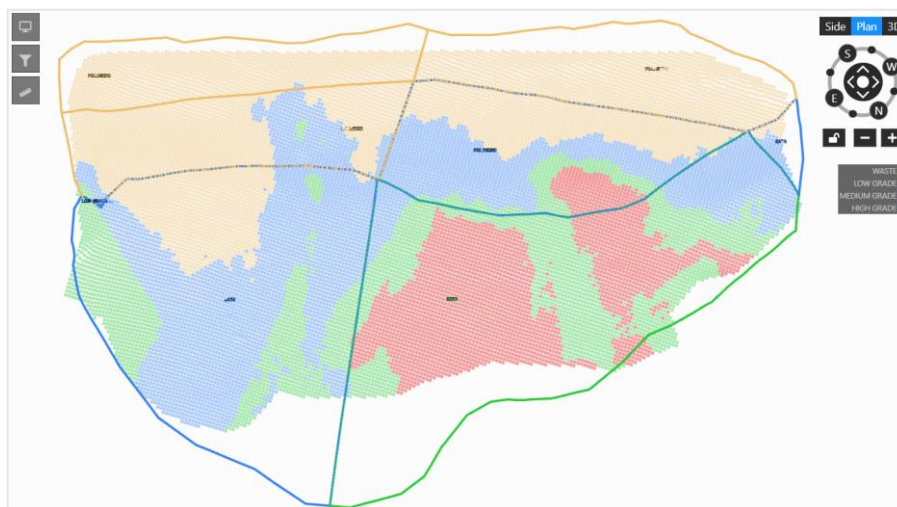
A Figura 44 mostra os polígonos de escavação otimizados pela ferramenta computacional, já gerados considerando a distribuição do material na pilha de material desmontado. Na Figura 45 são mostrados os polígonos gerados em outra ferramenta, pela metodologia 2D, porém importados para o software de modelamento da movimentação para avaliação de resultados com os dados do modelo de blocos deslocado.

Figura 44 – Polígonos de escavação obtidos pela metodologia computacional (3D).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 45 - Polígonos de gerados pela metodologia 2D.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Os resultados calculados para os índices em análise para cada uma das metodologias são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Variações nos índices de controle de teores no L6\_307\_013.

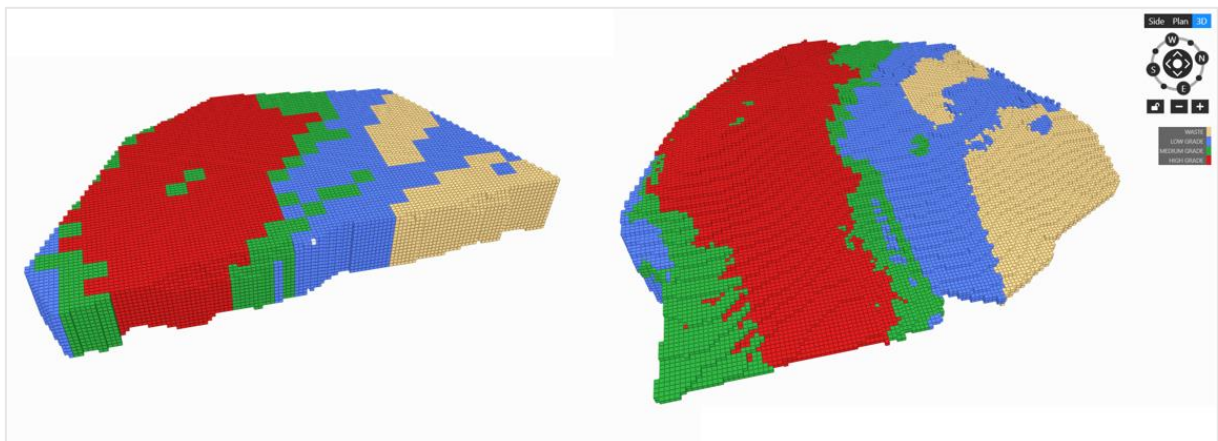
Metodologia	Diluição (%)	Perda de Minério (%)	$\Delta$ Valor (%)
Modelagem 3D	12.4%	2.6%	12.0%
Tradicional 2D	24.9%	7.9%	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme pode ser observado na tabela, com a aplicação da ferramenta computacional para o modelamento da movimentação do material e posterior otimização automática dos limites de escavação, tanto os índices de diluição quanto de perda de minério tiveram uma redução significativa em relação aos resultados obtidos com a metodologia tradicional. Além disso, usando o resultado da metodologia tradicional como linha base, foi calculado um potencial aumento de 12% no valor obtido com a lavra e posterior processamento do minério.

Com condição diferente, o segundo desmonte avaliado nesse estudo foi o L5\_292\_001. Nesse caso a área é majoritariamente de minério, porém com qualidades distintas, possuindo apenas algumas regiões de massa rochosa classificada como estéril. Da mesma forma do primeiro caso analisado, os polígonos de escavação foram obtidos através do modelamento com a ferramenta computacional e pela metodologia tradicional, que foram posteriormente importados para o software. O modelo de blocos antes e depois da detonação é apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Modelo *in-situ* e deslocado pela detonação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com o modelamento tridimensional e otimização de polígonos foi possível gerar limites de escavação que separam o minério dos corpos de estéril citados, contribuindo para a redução da diluição. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Variações nos índices de controle de teores no L5\_292\_001.

<b>Metodologia</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Perda de Minério (%)</b>	<b><math>\Delta</math> Valor (%)</b>
Modelagem 3D	2.6%	0.9%	2.1%
Tradicional 2D	13.8%	0.0%	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados apresentados evidenciam esse melhor controle de diluição, com uma redução significativa desse índice quando comparamos a metodologia de modelamento tridimensional com o tradicional deslocamento bidimensional. Embora a perda de minério tenha tido um ligeiro aumento nos polígonos gerados pela ferramenta computacional, a redução significativa da diluição implica em uma melhor seletividade, que conseqüentemente leva a redução de custos e otimização dos processos subsequentes. Esses fatores resultaram em um incremento de 2.1% no valor do material lavrado e beneficiado.

O desmonte L4\_082\_009, terceiro evento analisado nesse trabalho, se localiza em uma região da mina em que o material é majoritariamente minério, com ocorrências isoladas de corpos de estéril. Embora para esse exemplo toda a massa de material seja classificada como minério, o uso da ferramenta computacional para o modelamento tridimensional do movimento e geração dos limites de lavra ainda se mostra positivo, pois permite uma melhor segregação entre as diferentes classes de minério presentes nessa área.

Assim como nos outros casos analisados foram gerados polígonos de lavra com o uso da ferramenta computacional (3D), e também foram importados para o software as liberações emitidas conforme metodologia tradicional (2D).

Nesse caso, os valores de diluição e perda de minério são os mesmos para ambas as metodologias, fato esperado pois toda a massa desmontada é classificada como minério. Além disso, não há variação direta no valor, pois todo o material será enviado para o processamento em algum momento.

Porém, devido a presença de diferentes classes de minério, um outro índice que pode ser incluído na análise é o de “Classificação Equivocada”, que consiste em direcionar o material

para um polígono de lavra de classe diferente. Como exemplo, incluir uma massa de minério de alto teor em um polígono de lavra classificado como médio teor.

Evitar a contaminação do minério, mesmo que com outras classes ou teores do próprio minério, é importante para assegurar a qualidade do material que alimentará a planta de processamento. Portanto, mesmo em casos como esse o uso da ferramenta computacional se mostra vantajoso em relação a metodologia tradicional, pois aplicando o software o percentual de massa de minério a ser lavrado em um polígono de classificação diferente da sua foi reduzido de maneira considerável, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Variações nos índices de controle de teores no L4\_082\_009.

<b>Metodologia</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Perda de Minério (%)</b>	<b>Classificação Equivocada (%)</b>
Modelagem 3D	0%	0%	29.8%
Tradicional 2D	0%	0%	47.8%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados apresentados evidenciam os benefícios do método de modelamento tridimensional da movimentação para o controle de diluição e perda de minério. Foram registradas reduções expressivas na diluição e perda de minério nos três casos apresentados, gerando significativos benefícios financeiros.

Além disso a necessidade de que pessoas caminhassem sobre a pilha de material desmontado para identificar contatos de minério e estéril nos pós detonação também foi eliminada, contribuindo com a segurança da operação.

A aplicação dessa metodologia também se mostrou efetiva do ponto de vista operacional, sendo de simples implementação e operação. Além disso, ao permitir uma melhor seletividade do material através da geração de polígonos de lavra otimizados no modelo de teores pós detonação, a aplicação dessa metodologia também abre novas oportunidades, e pode contribuir com o aumento do porte dos desmontes mesmo quando a região possui uma geologia complexa.

## 8 CONCLUSÕES

Ao longo dos últimos anos, com o avanço da chamada revolução digital, novas tecnologias têm surgido em um ritmo jamais visto. Essas novas ferramentas e soluções se aplicam às mais variadas finalidades e tem modificado profundamente a sociedade e o ambiente de trabalho. O presente estudo buscou propor e avaliar de maneira integrada os resultados da aplicação de algumas tecnologias em operações relacionadas ao desmonte de rochas.

Com os avanços em digitalização, automação e de processamento computacional obtidos pela aplicação das tecnologias apresentadas nesse trabalho, foi possível identificar melhorias em relação a segurança, produtividade e eficiência das operações mineiras.

Com o uso de uma plataforma de gestão de dados, foi possível digitalizar todo o banco de dados relacionado ao desmonte de rochas, tornando o fluxo de informações mais eficiente. Todo o processo de planejamento, execução e verificação de um desmonte, se tornou mais ágil e preciso, e os dados obtidos passaram a ser mais bem aproveitados, gerando reportes instantâneos e capazes de fomentar decisões mais assertivas e que contribuem com a produtividade, segurança e redução de custos das operações. Além disso, a demanda por mão-de-obra foi reduzida, uma vez que toda a gestão e fluxo de dados é feita de maneira digital.

Já a implementação da disruptiva tecnologia de iniciação sem fio “wireless” se mostrou capaz de revolucionar as operações de carregamento com explosivos. Com a eliminação de todo o cabeamento dos acessórios, a perda de comunicação devido a corte ou dano de cabos, que é um dos principais problemas relacionado a iniciação dos furos, foi eliminada, reduzindo os riscos de furos falhados e tornando as operações na mina mais seguras. Por não haver nenhum tipo de contato entre o furo carregado e a superfície, o uso do acessório wireless confere total proteção contra a iniciação não planejada devido a descargas atmosféricas, outro grande benefício relacionado à segurança. Além disso, a ausência de cabos trouxe mais produtividade para as operações na bancada e deu mais flexibilidade ao próprio planejamento de mina.

A aplicação do aerolevante e o uso de dispositivos automatizados para a análise de fragmentação também se mostraram soluções muito efetivas. Com o aerolevante foi possível eliminar a exposição de colaboradores ao risco durante a coleta de imagens da pilha, além de ampliar a área amostrada e melhorar a qualidade dos resultados da análise. Já com o uso da tecnologia de análise automatizada de fragmentação usada nas correias transportadoras, foi possível analisar um volume muito maior de dados, com precisão superior e tudo de maneira automatizada. Os resultados dessas análises, além de mais representativos e precisos, ficam

disponíveis em tempo real em uma plataforma digital e podem ser relacionados com os desmontes, permitindo uma melhor avaliação da performance de cada detonação.

Por fim, com a aplicação de um software para o modelamento computacional da movimentação do desmonte, foi possível otimizar os polígonos de escavação considerando a real disposição do material na pilha, reduzindo a perda de minério e a diluição, e consequentemente aumentando o valor gerado na operação. Com o melhor controle de teores, a performance de toda a cadeia de processamento tende a ter melhores resultados, tanto financeiros quanto operacionais. Além disso, a exposição de risco de colabores é reduzida com a eliminação da necessidade de que os geólogos e topógrafos caminhem sobre pilhas para avaliar e demarcar contatos superficiais de material.

Os resultados desse trabalho evidenciaram na prática os benefícios que a adoção de novas tecnologias e soluções digitais podem trazer para a indústria da mineração. Os ganhos esperados com a aplicação desses projetos foram de fato atingidos, ou até mesmo superados, trazendo avanços em produtividade, qualidade, confiabilidade e segurança não somente para o desmonte, mas para inúmeras atividades relacionadas a essa importante operação mineira.

Esses impactos positivos foram percebidos e atestados pela equipe da mina, e como resultado todas as iniciativas apresentadas nesse trabalho foram implementadas de maneira contínua na mina.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.653**. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. São Paulo, 11 p., 2005.

ADAM, M. **Stay ahead of the storm**. Global mining review, 2023.

ATLAS COPCO. **Professional Diamond Driller's Handbook**. Publicado pela Atlas Copco Secoroc AB – Suécia, 2015.

CALDERON-ARTEAGA, C.; BARRIOS, J.; ALMOND, M.; RUIZ, R.; GERING, S. **Ore Control Technological Innovations at Goldcorp Peñasquito Mine**. SME Annual Meeting. Minneapolis, MN, EUA, 2018.

CHOW, E.; TAFAZOLI, S. **Application of Shovel Bucket Blast Fragmentation Analysis**. Innovations in Rock Engineering - In Mines without Borders, CIM Annual Meeting, Montreal, May 22-25, 2011.

CHOW, E.; ZENG, H.; BAUMANN, M.; TAFAZOLI, S. **Automation of Rock Fragmentation Analysis**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2012.

CHOW, E.; ZENG, H.; BAUMANN, M.; TAFAZOLI, S. **Automation of Rock Fragmentation Analysis**. International Society of Explosives Engineers, 2012.

CPRM. **Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/>. Acessado em 2021.

DELOITTE. **The Fourth Industrial Revolution is here — are you ready?** Deloitte Insights, 2018.

DEMENEGAS, V. **Fragmentation analysis of optimized blasting rounds in the Aitik mine: effect of specific charge**. Master Thesis, Luleå University of Technology, 2008.

DURRANT-WHYTE, H. et al. **How digital innovation can improve mining productivity**. Metals & Mining - McKinsey & Company, 2015.

DURRANT-WHYTE, H. **Rise of the machines**. Maurice Lubbock Memorial Lecture, Oxford University. Oxford - United Kingdom, 2015.

ECKROADE, N.; PEREIRA, N. **Changing the Landscape of Surface Mining through Fully Wireless Initiation Systems**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2020.

FREY, C., OSBORNE, M. **The Future of Employment**. Oxford Martin Programme on Technology and Employment. University of Oxford - United Kingdom, 2013.

GAICH, A.; PÖTSCH, M. **Automatic 3D Fragmentation Analysis from Drone Imagery**. International Society of Explosives Engineers, 2015.

GOENAGA, M et al. **Ops 4.0: Fueling the next 20 percent productivity rise with digital analytics**. McKinsey & Company, 2017.

GOKHALE, B. **Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines**. Publicado por CRC Press, 2011.

HEPBURN, D. **Accelerating Production with WebGen™ enabled Mine Schedule Flexibility (MSF)**. Orica, 2022.

HUSTRULID, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining Vol. 1 and 2**. Publicado por AA Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1999.

JULIAN, L.; ANGELES, A.; NANCHENGWA, D.; RUISECO, J. **Blast Movement – A Value-Based Evaluation of the Benefits and Comparison Between Blast Movement Modeling (3D) and In-Situ Polygon Node Translation (2D)**. CIM, 2023.

KREIVI, J.; BARNETT, S. **Wireless Blasting Techniques to Improve Ore Extraction and Remove People from High-Risk Areas in Secondary Stopes**. Orica, 2023.

LOWNDS, C.; LINDENAU, J. **Electronic Detonators and Lightning**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2008.

LUSK, B.; WORSEY, P. **Explosives and Blasting**. SME Mining Engineering Handbook – Chapter 7.3. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc – SME, 2011.

MALLETTE, D.; LOWNDS, C.; GOODRIDGE, R. **Wireless Electronic Blasting**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2016.

ORICA. **BlastIQ - Integrated technology solutions to optimize every blast**. Disponível em <https://www.blastiq.com/>. Acessado em 2022.

ORICA. **SEB – Safe and Efficient Blasting**. ORICA Technical Services, 2022.

ORICA. **Webgen™ the world's first wireless initiating system**. Publicado por Orica Group, 2018.

ORICA. **Wireless Blasting in Open Pit Mining – Case Study**. Disponível em: <https://www.orica.com/Products-Services/Resources/case-studies#.ZGDroXbMJPY>. Publicado por Orica Group, 2022.

ORICA. **Wireless initiation – Enabling new mining methods to reduce dilution**. Publicado por Orica Group, 2018.

PERNIA LLERA, J. et al. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas**. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 2008.

PERSON, P. et al. (1994). **Rocking Blasting and Explosives Engineering**. Publicado por CRC Press, 1993.

POUPEAU, B.; HUNT, W.; DE LA ROSA, D. **Blast induced Ore Movement: The missing step in achieving realistic reconciliations**. ISEE- International Society of Explosives Engineers, 2019.

ROSARIO, A.; GONZÁLEZ, R. **Drill and Blast Digitalization at Pueblo Viejo - Barrick Gold**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2019.

ROSTAMI, J.; HAMBLEY, D. **Rock Breaking Methods**. SME Mining Engineering Handbook – Part 7. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc - SME, 2011.

SAMETI, B.; CHOW, E.; BAUMANN, M.; ZENG, H.; TAFAZOLI, S. **Application of Automated and Centralized Rock Fragmentation Analysis**. International Society of Explosives Engineers, 2013.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond**. World Economic Forum, 2016.

SCOTT, A.; DJORDJEVIC, N.; HIGGINS, M.; LA ROSA, D.; SARMA, KS.; WEDMAIR, R. **Open Pit Blast Design-Analysis and Optimization**. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, University of Queensland, 1996.

SILVA, V. **Desmonte de Rochas**. [S.l]: Oficina de Textos, 2019. 352 p. ISBN 85-797-5336-8.

SUSHIL, B.; BHANDARI, A. **Digitized, Integrated and Optimized Drill and Blast**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2020.

TEIXEIRA, J. L. **Qualidade da Fragmentação no Desmonte de Rocha: Análise Preliminar**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2010.

TORDOIR, A.; ROBERTS, M. **Benchmarking Drill and Blast Compliance to Design, A Case Study**. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 2019.

VALE. **Conheça Salobo, o maior projeto de cobre da Vale**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/conheca-salobo-maior-projeto-cobre-vale.aspx>. Acessado em 2022.

WEC. **Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry**. Publicado pelo World Economic Forum (WEC) em colaboração com Accenture, 2017.

WETHERELT, A.; VAN DER WIELEN, K. **Introduction to Open-Pit Mining**. SME Mining Engineering Handbook – Chapter 10.1. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc – SME, 2011.

WOOD MACKENZIE. **Asset Report - Salobo Copper Mine**. Wood Mackenzie – A Verisk usiness, 2019.



YANG, R.; MCALLISTER, C.; BERENDZEN, J.; PREECE, D. **Fragmentation modeling using the Multiple Blasthole Fragmentation (MBF) model at an open pit mine.** Society for Mining, Metallurgy & Exploration – SME, 2016.