



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Graduação em Engenharia de Minas

**PADRONIZAÇÃO DE DADOS E GESTÃO DA QUALIDADE NO PROCESSO
DE CARREGAMENTO DE FUROS COM EXPLOSIVOS NO DESMONTE DE
ROCHAS: ESTUDO DE CASO NA MINA ARIPUANÃ**

JOSÉ ROBERTO COSTA BARROS

Ouro Preto - MG
2025

JOSÉ ROBERTO COSTA BARROS

PADRONIZAÇÃO DE DADOS E GESTÃO DA QUALIDADE NO PROCESSO DE
CARREGAMENTO DE FUROS COM EXPLOSIVOS NO DESMONTE DE ROCHAS:
ESTUDO DE CASO NA MINA ARIPUANÃ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas / Desmonte de Rochas

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro
(DEMIN/EM/UFOP)

Ouro Preto - MG
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B277p Barros, José Roberto Costa.

Padronização de dados e gestão da qualidade no processo de carregamento de furos com explosivos no desmonte de rochas [manuscrito]: estudo de caso na Mina Aripuanã. / José Roberto Costa Barros. - 2025.

69 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Lavra subterrânea. 2. Desmonte de rochas. 3. Explosivos - Minas e mineração. 4. Gestão da qualidade total. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.235

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor

José Roberto Costa Barros

Título

Padronização de dados e gestão da qualidade no processo de carregamento de furos com explosivos no desmonte de rochas:
Estudo de caso na Mina Aripuanã

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em 08 de setembro de 2025.

Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. José Margarida da Silva (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)

Eng^o. de Minas Arildo de Oliveira da Silva Filho (Orica Brasil)

Elton Destro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/10/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2025, às 16:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0993700** e o código CRC **6080C3B1**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, Regiane, por todo amor, apoio e sacrifício ao longo da minha caminhada. Sua força e dedicação foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha avó Dulce, exemplo de sabedoria, carinho e fé, sou imensamente grato por sempre acreditar em mim e me acolher com tanto amor.

Ao meu tio Ronaldo, obrigado por estar presente em todos os momentos importantes, me incentivando e torcendo por mim com tanto entusiasmo.

Agradeço também à Nexa Resources pela oportunidade de realizar meu estágio e por proporcionar um ambiente de aprendizado e desenvolvimento.

À UFOP e ao DEMIN, minha gratidão pelo ensino público, gratuito e de excelência. À inesquecível Escola de Minas e aos seus professores, agradeço pelos valiosos ensinamentos e pela formação que levarei para toda a vida.

RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidas atividades conjuntas entre as áreas de planejamento e operação da Nexa Resources, na unidade de Aripuanã, e a equipe da Enaex, com foco em garantir a máxima aderência ao plano de lavra subterrânea mantendo a qualidade do carregamento de furo com explosivos. Um dos principais marcos da iniciativa foi a criação de um banco de dados centralizado, estruturado para consolidar informações operacionais e físico-químicas dos explosivos, como densidade, temperatura e pressão. Por meio dele, tornou-se possível monitorar desvios entre o plano e a execução, identificar oportunidades de ajuste e reforçar o controle da qualidade do material extraído. Com planilhas de controle de desmonte e painéis visuais de controle integrados, as equipes puderam agir com maior agilidade para manter a aderência ao plano, principalmente na questão da massa de emulsão planejada *versus* realizada. O projeto também incluiu treinamentos e alinhamentos operacionais para garantir eficiência no processo de carregamento de furo. Como resultado, houve melhora significativa na aderência ao plano de lavra, na rastreabilidade dos explosivos usados para o desmonte e na redução de perdas e retrabalhos, fortalecendo a eficiência e a previsibilidade do processo produtivo.

Palavras-chave: Mina subterrânea; Desmonte de rochas; Emulsão; Mina Aripuanã; Gestão de qualidade

ABSTRACT

A joint effort was carried out between the planning and operations teams of Nexa Resources at the Aripuanã unit, in partnership with the Enaex team, with a focus on ensuring maximum adherence to the mine plan while maintaining the quality of the blasting operations. One of the key milestones of the initiative was the creation of a centralized and structured database designed to consolidate operational and physicochemical information on explosives, such as density, temperature, and pressure. This system made it possible to monitor deviations between the planned and executed operations, identify improvement opportunities, and enhance quality control of the extracted material. By blasting control spreadsheets and integrated dashboards, the teams were able to respond more quickly to deviations, particularly concerning the gap between planned and actual emulsion usage. The project also included training sessions and operational alignments to ensure efficiency throughout the loading process. As a result, there was a significant improvement in adherence to the mine plan, traceability of loaded material, and a reduction in losses and rework ultimately strengthening the efficiency and predictability of the production process.

Keywords: Underground mine; Rock blasting; Emulsion; Aripuanã Mine; Quality management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prills porosos de nitrato de amônio (porção granulada típica usada na preparação de ANFO).....	22
Figura 2. Emulsão explosiva bulk (Ibemux® SS) sendo preparada em mineração subterrânea.	23
Figura 3. Emulsão Encartuchada.....	24
Figura 4. Espoleta Eletrônica utilizada em operações de detonação em mina subterrânea..	25
Figura 5. Booster explosivo. Fonte: NITRO SIBIR [s.d.]. Blast Products Underground - Nitro Sibir Australia.	26
Figura 6. Cordel detonante flexível com núcleo PETN e revestimento plástico. ...	27
Figura 7. Perfuração de furos longos com padrão de perfuração radial..	29
Figura 8. Perfuração de furos longos com padrão de perfuração paralelo	30
Figura 9. Esquematização da geometria dos furos por Vertical Crater Retreat Method..	31
Figura 10. Esquematização do overbreak em uma galeria subterrânea.....	33
Figura 11. Esquematização do underbreak em uma galeria subterrânea.....	34
Figura 12. Diluição planejada e não planejada.	37
Figura 13. Localização do empreendimento.	38
Figura 14. Visão geral da Mina Aripuanã.....	39
Figura 15. Vista em planta do VRM.	42
Figura 16. Visão geral das minas e o método de lavra.....	43
Figura 17. Antiga nota de controle de consumo de explosivo.....	45

Figura 18. Nova nota de controle de consumo (lavra).	46
Figura 19. Nota de controle de consumo ao lado do plano de desmonte (BS) recortado.	49
Figura 20. Nota de controle de consumo ao lado do plano de desmonte (VRM) recortado.	49
Figura 21. Caminhão de carregamento de emulsão.	51
Figura 22. Plataforma de elevação contida no caminhão de emulsão.	52
Figura 23. Painel de controle dos parâmetros da emulsão bombeada.	53
Figura 24. Monitoramento do carregamento com utilização do plano de desmonte.	54
Figura 25. Dashboard da Visão Geral dos desmontes.	56
Figura 26. Dashboard para análises semanais para identificação de desvios.	57
Figura 27. Dashboard dos Dados da Emulsão. Fonte: Elaborado pelo autor.	58
Figura 28. Dashboard do Quadro Geral relacionado a equipe de desmonte.	59
Figura 29. Sequência de desmonte na Frente LI2_N3.4_AC2D_SEC1.	61
Figura 30. Visualização da sessão do leque 03.	63
Figura 31. Resultado final do realce lavrado comparado ao planejado.	64
Figura 32. Gráfico da diferença percentual da massa de emulsão planejada (kg) x massa realizada (kg).	66

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AC = Acessos

ANFO = *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

AR = Arex

BS = *Bench Stopping*

LD = Lado

LI = *Link*

SEC = Secundário

VCR = *Vertical Crater Retreat Method*

VHMS = *Volcanic-Hosted Massive Sulfide*

VOD = Velocidade de detonação

VRM = *Vertical Retreat Mining*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS	16
3.1.1	<i>Velocidade de detonação (VOD)</i>	16
3.1.2	<i>Densidade</i>	16
3.1.3	<i>Temperatura</i>	18
3.1.4	<i>Sensibilidade</i>	19
3.1.5	<i>Resistencia à água</i>	19
3.1.6	<i>Estabilidade</i>	20
3.2	CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE EXPLOSIVOS	20
3.2.1	<i>Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO)</i>	21
3.2.2	<i>Emulsão</i>	22
3.2.3	<i>Espoletas eletrônicas, boosters e cordéis detonantes</i>	24
3.3	MÉTODOS DE LAVRA EM MINAS SUBTERRÂNEAS	28
3.4	PARÂMETROS AVALIADOS DO DESMONTE DE ROCHA	31
3.4.1	<i>Sobreescavação (Overbreak)</i>	31
3.4.2	<i>Subescavação (Underbreak)</i>	33
3.4.3	<i>Recuperação e Diluição de lavra</i>	35
4	ESTUDO DE CASO: MINA ARIPUANÃ	38
4.1	GEOLOGIA LOCAL	40

4.2 MÉTODOS DE LAVRA DA MINA DE ARIPUANÃ.....	40
5 METODOLOGIA	44
5.1 PADRONIZAÇÃO DAS NOTAS DE CONTROLE DE DESMONTE	44
5.2 TREINAMENTO DA EQUIPE DE OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO DE EXPLOSIVO	47
5.3 ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO EM CAMPO.....	50
5.4 MONITORAMENTO DOS TAMPÕES DE FURO	53
5.5 CRIAÇÃO DO <i>POWER BI</i> PARA MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1 CONTROLE DE QUALIDADE: LI2_N3.4_AC2D_SEC1.....	60
6.2 CONSUMO DE EMULSÃO	64
7 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, de forma detalhada, os índices operacionais relacionados às atividades de perfuração e desmonte em uma mina subterrânea, com ênfase especial no controle e no monitoramento dos parâmetros dos explosivos utilizados. A análise parte do pressuposto de que a eficiência no processo de lavra depende diretamente da precisão na execução dessas etapas, sendo essencial compreender e otimizar cada variável envolvida (JIMENO *et al.*, 1997).

No contexto da mineração subterrânea, a padronização dos procedimentos operacionais constitui um pilar fundamental para garantir segurança, produtividade e qualidade no desmonte de rochas. Segundo De Souza (2010), a adoção de padrões bem definidos, aliada a uma gestão rigorosa das atividades de detonação, possibilita reduzir variações indesejadas, manter a conformidade com o plano de lavra e minimizar impactos adversos no sequenciamento operacional.

Ao longo do processo produtivo, falhas no carregamento dos furos com explosivos, na escolha dos parâmetros de detonação ou na execução da perfuração podem resultar em problemas recorrentes, como *underbreak* (insuficiente avanço ou desmonte incompleto) e *overbreak* (excesso de desmonte que ultrapassa os limites projetados). Esses desvios acarretam retrabalhos, aumentam os custos operacionais e podem comprometer frentes de lavra subsequentes, gerando atrasos no cronograma, interferências em outras atividades críticas da mina e também no aumento dos custos operacionais (RICARDO e CATALANI, 2007).

A justificativa para este estudo baseia-se na necessidade de promover uma maior eficiência operacional, reduzindo desperdícios e garantindo a segurança no ambiente subterrâneo, que apresenta riscos elevados e margens operacionais estreitas (SILVA, 2006). A relevância do tema também se apoia na busca contínua por melhorias nos índices de recuperação de minério e na mitigação de perdas e diluição operacional, aspectos diretamente relacionados à sustentabilidade econômica e ambiental da mineração moderna.

Assim, este trabalho busca não apenas identificar e quantificar desvios operacionais, mas também propor medidas preventivas e corretivas que contribuam para a melhoria contínua do processo. Ao integrar o controle dos parâmetros de explosivos com práticas padronizadas e uma gestão técnica eficiente, pretende-se promover maior aderência ao plano de lavra, elevar a qualidade do desmonte e otimizar o uso dos recursos disponíveis. Essa abordagem visa, em última análise, fortalecer a confiabilidade operacional e aumentar a competitividade da operação no cenário minerário atual.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Destacar a importância da padronização e do controle rigoroso dos parâmetros operacionais no processo de detonação em uma mina subterrânea de polimetálicos. Além disso, a gestão adequada das variáveis físico-químicas dos explosivos é essencial para garantir resultados compatíveis com o plano de lavra, assegurando eficiência, segurança e aderência às metas de produção estabelecidas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar falhas no processo de desmonte de rochas;
- Padronizar as planilhas de coleta de dados do plano de desmonte;
- Realizar treinamentos com a equipe de desmonte para estabelecer critérios aplicáveis a todo o processo;
- Criar *dashboards* no *software* Power BI para identificar falhas e desvios ocorridos no desmonte;
- Monitorar a frente de serviço desmontada por meio da análise dos dados coletados para corrigir falhas operacionais e possíveis desvios do desmonte.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por finalidade apresentar, de forma concisa, os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste estudo.

3.1 PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

Os explosivos possuem características próprias que influenciam diretamente seu desempenho na lavra subterrânea, dependendo das condições em que são aplicados. Essas propriedades são determinantes para garantir uma aplicação eficiente e adequada às exigências operacionais, especialmente considerando a variedade de tipos de explosivos disponíveis atualmente no mercado (SILVA, 2010).

3.1.1 *Velocidade de detonação (VOD)*

A velocidade de detonação, também conhecida como velocidade da reação de combustão, representa a taxa com que a energia é liberada e se propaga ao longo da coluna de explosivo. Essa taxa é influenciada por diversos fatores, como o diâmetro da carga, a densidade e a composição química do explosivo, bem como pelo seu grau de confinamento e pela forma de iniciação (RICARDO e CATALANI, 2007).

De acordo com Silva (2006), essa é a propriedade mais acessível para ser determinada diretamente nos furos. Além disso, sua medição permite estimar a pressão gerada durante a detonação, avaliar o desempenho de diferentes sistemas iniciadores e verificar a coerência dos valores informados pelos fabricantes, tanto dos explosivos quanto de seus acessórios.

3.1.2 *Massa específica ou Densidade*

A densidade é uma das propriedades físico-químicas mais relevantes dos explosivos utilizados em operações de lavra subterrânea, pois influencia diretamente

o desempenho do desmonte. Trata-se da relação entre a massa e o volume do explosivo, normalmente expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 , sendo um fator decisivo na geração de energia, velocidade de detonação e pressão de detonação (SILVA, 2010).

Em minas subterrâneas, os valores de densidade dos explosivos variam, em geral, entre 0,9 e 1,3 g/cm^3 , dependendo do tipo de explosivo empregado (como emulsões, ANFO, *slurries* ou encartuchados). Explosivos de baixa densidade, como o ANFO (aproximadamente 0,85 g/cm^3), tendem a ter desempenho insatisfatório em ambientes úmidos ou submersos, já que absorvem facilmente água e perdem eficiência. Por isso, seu uso é limitado a furos secos e bem confinados (RICARDO e CATALANI, 2007).

Por outro lado, emulsões explosivas apresentam densidades mais altas, que podem ser ajustadas conforme a necessidade da aplicação, variando entre 1,0 e 1,3 g/cm^3 . Esse tipo de explosivo é mais resistente à água e pode ser bombeado diretamente para o fundo dos furos, sendo altamente recomendado para furos com presença de água. Em situações de alagamento parcial ou total dos furos, a aplicação de emulsões de maior densidade e com maior resistência à segregação é fundamental para garantir o desempenho esperado da detonação (CHAVES, 2012).

O controle da densidade no momento do carregamento é essencial, pois densidades inadequadas podem comprometer a energia gerada, a fragmentação da rocha e até a segurança da operação. Além disso, nos fundos dos furos, especialmente em lavra subterrânea, é comum a prática de ajustar a concentração de explosivo para compensar perdas de energia em zonas úmidas ou instáveis. Nesses casos, utiliza-se geralmente uma carga concentrada no fundo (*booster zone*) com maior densidade e sensibilidade, seguida por colunas de explosivo com densidade ajustada ao perfil do furo (SILVA, 2010).

Algumas minas trabalham, no desenvolvimento com emulsão, modelo de mais energia e, na lavra, utilizam explosivo de baixa densidade para menor energia (SILVA, 2024).

Portanto, a escolha da densidade ideal deve considerar o tipo de rocha, as condições dos furos (secos ou molhados), o tipo de explosivo utilizado e os objetivos

da detonação, como fragmentação, deslocamento e controle de vibração, pois parte da energia produz fragmentação e outra parte percorre o maciço.

3.1.3 Temperatura

A temperatura é um fator ambiental crítico que pode afetar significativamente o comportamento dos explosivos durante o carregamento e o armazenamento em lavra subterrânea. As reações químicas envolvidas na detonação são sensíveis às variações térmicas, e qualquer desvio fora da faixa recomendada pode comprometer tanto a segurança operacional quanto a eficiência do desmonte (RICARDO e CATALANI, 2007).

Cada tipo de explosivo possui uma faixa ideal de temperatura de aplicação, geralmente entre -20 °C e +60 °C, dependendo da sua composição. Temperaturas elevadas podem acelerar reações químicas indesejadas, diminuir a estabilidade do explosivo e até levar à degradação térmica de componentes sensíveis, como emulsões sensíveis e *boosters*. Já temperaturas muito baixas podem reduzir a sensibilidade à iniciação e aumentar a rigidez ou cristalização de certos componentes, dificultando o bombeamento ou o encartuchamento (SILVA, 2010).

Em ambientes subterrâneos, onde as condições térmicas podem variar conforme a profundidade e a ventilação, é essencial monitorar a temperatura tanto do explosivo quanto da frente de lavra. Especialmente durante o carregamento de furos, deve-se evitar o contato direto com superfícies aquecidas por equipamentos ou áreas com ventilação insuficiente, pois isso pode elevar a temperatura local e afetar a estabilidade térmica dos explosivos (CHAVES, 2012).

Além disso, em minas com temperaturas elevadas, como em escavações profundas ou regiões tropicais, recomenda-se o uso de explosivos termicamente mais estáveis, como emulsões bombeáveis, que suportam variações térmicas maiores sem comprometer sua integridade. É também uma boa prática armazenar os explosivos em locais ventilados e protegidos do calor, evitando a exposição direta ao sol ou ao calor gerado por máquinas próximas.

O controle da temperatura é, portanto, uma medida preventiva essencial para garantir a segurança da operação e a eficiência da detonação. O descuido com esse parâmetro pode resultar em falhas na iniciação, redução do rendimento energético, instabilidade química e até acidentes graves.

3.1.4 Sensibilidade

A sensibilidade é uma das propriedades mais críticas dos explosivos e diz respeito à facilidade com que um material reage a estímulos externos, como choque, calor, atrito ou impacto. No contexto da mineração subterrânea, esse parâmetro está diretamente relacionado à forma como o explosivo será iniciado, sendo essencial para garantir a eficiência do desmonte e a segurança operacional (SILVA, 2010).

Explosivos mais sensíveis, como as dinamites encartuchadas, podem ser iniciados diretamente com espoletas comuns ou cordel detonante de menor energia. Já materiais menos sensíveis, como emulsões e *ANFO*, requerem sistemas iniciadores mais potentes, geralmente compostos por um conjunto de acessórios como *booster* (carga de reforço), cordel de alta gramatura e espoletas reforçadas (como as do tipo NPED ou eletrônicas) para garantir a iniciação eficaz (RICARDO e CATALANI, 2007).

3.1.5 Resistência à água

A resistência à água é uma propriedade crítica dos explosivos utilizados em minas subterrâneas, pois muitos ambientes de lavra estão sujeitos à presença de umidade ou furos alagados. Explosivos com baixa resistência à água, como o *ANFO* convencional, tendem a perder eficácia por lixiviação de componentes, o que pode comprometer a detonação e aumentar o risco de falhas (CATALANI, 2014).

Para superar esse desafio, utilizam-se emulsões encartuchadas, emulsões bombeáveis e *slurries*, que oferecem excelente resistência à água devido à sua formulação química e estrutura física. Esses explosivos mantêm sua integridade mesmo em furos molhados, garantindo maior confiabilidade operacional e segurança

no processo de desmonte (CATALANI, 2014).

3.1.6 Estabilidade

A estabilidade dos explosivos está diretamente ligada ao tempo seguro de armazenamento dos materiais que os compõem, sendo um fator determinante no desempenho eficiente e seguro do desmonte. Quanto mais estável o explosivo, maior sua confiabilidade ao longo do tempo e menor o risco de degradação durante o uso.

Um dos métodos clássicos para avaliação dessa propriedade é o método de Abel, descrito por Jimeno *et al.*, 1997. Esse procedimento consiste em submeter uma amostra do explosivo a uma temperatura específica durante um período determinado, observando-se o momento em que ocorre a sua decomposição. Tal técnica permite avaliar a resistência térmica e a durabilidade do explosivo sob condições controladas.

3.2 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE EXPLOSIVOS

Os explosivos podem ser classificados por sua sensibilidade. Os primários são altamente sensíveis e usados em detonadores; os secundários possuem sensibilidade moderada, necessitando de iniciadores, sendo exemplos o TNT e o RDX; e os terciários, como o *ANFO*, são pouco sensíveis e requerem *boosters* para iniciar a detonação (SILVA, 2006; RICARDO e CATALANI, 2007).

Outra classificação considera a velocidade de reação. Baixos explosivos apresentam deflagração lenta, geralmente abaixo de 1.500 m/s, sendo utilizados como propelentes. Já os altos explosivos apresentam velocidades de detonação entre 1.800 e 9.000 m/s, liberando ondas de choque intensas e pressões que podem ultrapassar 150 GPa, resultando em fragmentações mais eficientes (JUNIOR, 2017; KOPPE, 2012). Enquanto os baixos explosivos apenas deflagram, queimando rapidamente, os altos explosivos detonam, liberando ondas de choque autossustentadas.

Portanto, a escolha do explosivo adequado deve levar em conta tanto sua

classificação quanto a geologia local. Explosivos do tipo emulsão e *slurries*, por exemplo, oferecem maior eficiência em ambientes com presença de água, devido à sua resistência à umidade, enquanto o *ANFO*, de menor custo, é mais indicado em condições secas. A seleção correta permite otimizar a energia aplicada ao maciço, reduzindo custos, melhorando a recuperação do minério e aumentando a segurança das operações (DOTTO *et al.*, 2024).

3.2.1 Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO)

O *ANFO* (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*) é um dos explosivos mais utilizados em mineração devido ao seu baixo custo e facilidade de preparo. Trata-se de uma mistura formada, em geral, por 94 a 96% de nitrato de amônio e 4 a 6% de óleo combustível, que juntos promovem a reação explosiva. O nitrato de amônio atua como agente oxidante, enquanto o óleo combustível é o agente redutor, liberando grande quantidade de gases em curto intervalo de tempo (KOPPE, 2012).

Apesar de apresentar boa eficiência em desmontes a seco, o *ANFO* possui como limitação a alta sensibilidade à água, devido à solubilidade do nitrato de amônio, o que compromete sua performance em furos úmidos (RICARDO e CATALANI, 2007). Nesses casos, sua substituição por emulsões ou *slurries* é recomendada, já que estes apresentam maior resistência à umidade.

A velocidade de detonação (VOD) do *ANFO* varia em torno de 3.200 m/s, dependendo da densidade e do grau de confinamento, sendo considerado um explosivo de baixa brisância, mas eficiente para fragmentações em rochas pouco resistentes e em condições secas (SANSHIDRIÁN, 2007).

A figura 1 ilustra os *prills* de nitrato de amônio porosos, forma granulada essencial na composição do explosivo *ANFO*. Esses grânulos, geralmente com diâmetro entre 0,8 e 3 mm, são caracterizados por elevada porosidade interna (até aproximadamente 20 %), o que lhes confere a capacidade de absorver cerca de 15 % em peso de óleo combustível. Essa estrutura porosa é determinante para a sensibilidade e a eficiência da mistura explosiva (LÉONARD *et al.*, 2020).



Figura 1. *Prills* porosos de nitrato de amônio (porção granulada típica usada na preparação de ANFO). **Fonte:** adaptado de LÉONARD *et al.*, 2020.

3.2.2 Emulsão

As emulsões explosivas são amplamente utilizadas na mineração moderna devido à sua alta eficiência e resistência à água. Diferentemente do *ANFO*, que apresenta limitações em ambientes úmidos, as emulsões são compostas por uma mistura heterogênea de uma fase oxidante, normalmente nitrato de amônio em solução aquosa, e uma fase combustível, geralmente constituída por óleos minerais ou derivados do petróleo, estabilizadas por surfactantes que conferem consistência pastosa ao produto (KOPPE, 2012).

A figura 2 ilustra uma emulsão explosiva *bulk* do tipo Ibemux® SS, caracterizada por sua consistência pastosa e alta densidade energética, ideal para aplicações em mineração subterrânea. Esse produto, projetado para aderir à parede interna do poço e resistir à presença de água, apresenta alta velocidade de detonação e excelente desempenho em ambientes confinados (ENAEX, 2025).

As emulsões *bulk* como o Ibemux® SS combinam uma fase aquosa de nitrato de amônio com uma fase oleosa estabilizada por surfactantes, resultando em emulsões densas (aproximadamente 1,10 a 1,25 g/cm³) e VOD entre 4.400 e 6.000 m/s, conforme o grau de confinamento (ENAEX, 2025; KRAMARCZYK *et al.*, 2022).

Essas características tornam o Ibemux® SS especialmente adequado para desmontes em túneis, galerias e perfurações ascendentes em mineração subterrânea, superando limitações de produtos sólidos como o ANFO e garantindo maior controle operacional e eficiência fragmentatória (ENAEX, 2025).



Figura 2. Emulsão explosiva *bulk* (Ibemux® SS) sendo preparada em mineração subterrânea.
Fonte: Adaptado de ENAEX (2025).

A emulsão encartuchada, conforme representado na figura 3, caracteriza-se por sua elevada resistência à água e significativa potência de detonação, tornando-se uma alternativa versátil e eficiente em diversas aplicações na mineração e na construção civil. Esse tipo de explosivo é acondicionado em filmes plásticos, disponibilizando-se em diferentes comprimentos e diâmetros, o que permite sua adequação a variados tipos de operação e condições geológicas.



Figura 3. Emulsão Encartuchada. **Fonte:** Adaptado de ENAEX (2025).

3.2.3 Espoletas eletrônicas, boosters e cordéis detonantes

As espoletas eletrônicas constituem um dos sistemas de iniciação mais avançados empregados na mineração subterrânea, permitindo um controle altamente preciso dos tempos de retardo de detonação. Diferentemente dos sistemas convencionais, sua estrutura incorpora um circuito eletrônico programável que possibilita o ajuste do tempo de retardo em uma ampla faixa, que pode variar, por exemplo, de 1 até 8.000 milissegundos, dependendo do fabricante e da aplicação (DEXPLO, 2025).

O funcionamento se baseia na programação individual de cada espoleta por meio de dispositivos específicos, como o *logger* (programador) e o *blaster* (iniciador), que estabelecem comunicação bidirecional com a unidade, garantindo a confiabilidade da programação e permitindo conferência antes da detonação. Essa característica reduz substancialmente a probabilidade de falhas, além de proporcionar maior segurança operacional (RENATBAR, 2014).

A aplicação desse tipo de espoleta é especialmente indicada em operações subterrâneas que demandam elevado controle de vibrações, fragmentação adequada do maciço rochoso e minimização de problemas como *overbreak* e *underbreak*.

Adicionalmente, a flexibilidade na configuração dos tempos de retardo favorece o sequenciamento otimizado dos desmontes, reduzindo retrabalhos e melhorando o aproveitamento das frentes de lavra (RENATBAR, 2014).

Na figura 4, apresenta-se um exemplo de espoleta eletrônica utilizada em mineração subterrânea, destacando seu cabo de conexão e conector específico, componentes característicos dos sistemas modernos de iniciação.



Figura 4. Espoleta Eletrônica utilizada em operações de detonação em mina subterrânea.

Fonte: DEXPLO, 2025.

Os *boosters* explosivos desempenham papel essencial nas operações de detonação subterrânea, atuando como elemento intermediário entre o detonador como as espoletas eletrônicas e a carga principal de explosivo. Sua função consiste em amplificar a energia inicial gerada pela espoleta, garantindo a iniciação confiável de explosivos de menor sensibilidade, como emulsões encartuchadas, *ANFO* ou

outros compostos de baixa reatividade (ORICA, 2025).

No contexto da mineração subterrânea, *boosters* como os modelos Pentex™, da Orica, são projetados para oferecer alta resistência mecânica e estabilidade química, além de permitir uso em diferentes condições ambientais, incluindo presença de umidade. A integração com espoletas eletrônicas possibilita maior controle dos tempos de retardo e assegura que toda a coluna de carga principal seja detonada de forma uniforme, evitando falhas parciais e promovendo fragmentação adequada do maciço rochoso (ORICA, 2025).

Na figura 5, observa-se um exemplo de *booster* utilizado em minas subterrâneas, destacando o invólucro e o orifício destinado à inserção do detonador eletrônico.



Figura 5. *Booster* explosivo. **Fonte:** NITRO SIBIR [s.d.]. *Blast Products | Underground - Nitro Sibir Australia.*

O cordel detonante é um acessório de iniciação amplamente utilizado em operações de desmonte subterrâneo, caracterizando-se como um cordão flexível que contém, em seu núcleo, um explosivo de alta velocidade, geralmente o pentaeritritol tetranitrato (PETN). Esse núcleo é protegido por um revestimento resistente, que pode

ser de fibras sintéticas, plásticos ou materiais similares, projetado para oferecer elevada resistência mecânica e proteção contra umidade (DEXPLO, [s.d.]).

A principal função do cordel detonante é transmitir a onda de choque gerada pela iniciação, seja por um detonador elétrico, eletrônico ou não elétrico, até outros pontos da malha de detonação. Essa característica permite sua utilização tanto como linha mestra de iniciação quanto como carga auxiliar, capaz de iniciar *boosters*, emulsões encartuchadas ou outros explosivos de baixa sensibilidade (DEXPLO, [s.d.]; ORICA, 2025).

Sua velocidade de detonação, que varia entre 7.000 e 7.500 m/s, garante uma propagação confiável e uniforme da detonação, minimizando falhas parciais. Além disso, a resistência à água e à abrasão fazem com que o cordel seja amplamente empregado em minas subterrâneas, onde a presença de umidade e as condições de confinamento podem comprometer outros sistemas de iniciação (ORICA, 2025).

Na figura 6, observa-se um exemplo de cordel detonante com revestimento plástico e coloração característica, destacando o núcleo explosivo e a flexibilidade do material, essenciais para sua adaptação à malha de detonação em diferentes geometrias de lavra subterrânea.



Figura 6. Cordel detonante flexível com núcleo PETN e revestimento plástico. **Fonte:** EBAD, [s.d.].

3.3 MÉTODOS DE LAVRA EM MINAS SUBTERRÂNEAS

O método *Sublevel Stopping* é uma técnica de lavra subterrânea utilizada, predominantemente, em corpos de minério com mergulho acentuado, geometria regular e alta competência do maciço rochoso e da rocha encaixante. Caracteriza-se pela abertura de subníveis horizontais em intervalos verticais pré-determinados, a partir dos quais são realizadas as operações de perfuração de grande diâmetro, carregamento de explosivos e detonação (Hustrulid e Bullock, 2001).

O minério fragmentado é removido por gravidade através de passagens ou chutes localizados no subnível inferior, reduzindo a necessidade de carregamento mecanizado direto. Essa característica favorece elevada produtividade e custos operacionais relativamente baixos, quando comparado a outros métodos subterrâneos (Hartman e Mutmanský, 2002).

A aplicação do *Sublevel Stopping* requer condições geomecânicas favoráveis, especialmente alta resistência das rochas encaixantes, uma vez que grandes vãos podem permanecer abertos durante o processo de lavra. Em casos onde a estabilidade é um fator crítico, o método pode ser adaptado com o uso de *backfill* para preencher o vão lavrado (Atlas Copco, 2010).

Segundo Villaescusa (2014) e Oliveira (2012), o método *Sublevel Stopping* apresenta três variações principais, cuja distinção fundamental está na metodologia utilizada para a perfuração e o desmonte do realce. Essas variações são descritas a seguir:

- *Blasthole Method* (perfuração radial) – consiste na execução de furos convergentes em direção a um ponto central no realce, formando um padrão radial. Essa configuração, mostrada na figura 7, favorece a concentração da energia de detonação no núcleo do bloco, permitindo um desmonte eficiente e fragmentação adequada. É indicada para situações em que o acesso e a geometria do corpo mineral favorecem a perfuração a partir de um único ponto ou galeria.

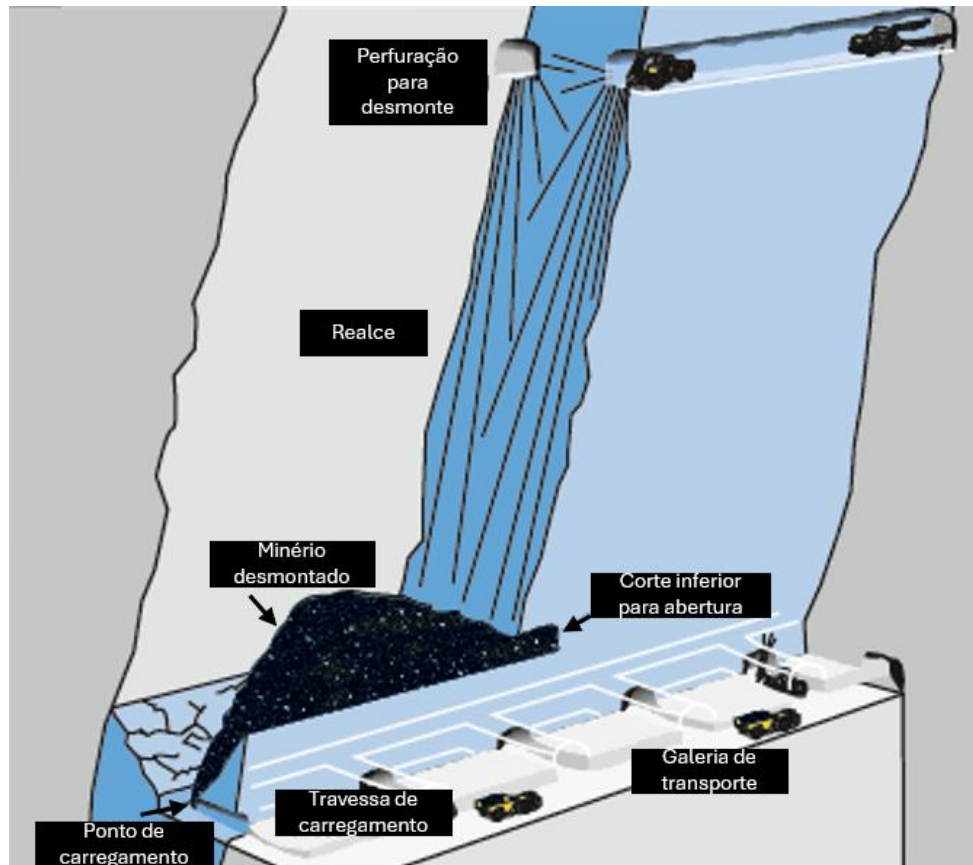


Figura 7. Perfuração de furos longos com padrão de perfuração radial. **Fonte:** Adaptado de Atlas Copco, 2007.

- *Open-Ending Method* (perfuração de furos longos) – caracteriza-se pela perfuração de furos paralelos, geralmente de grande diâmetro, ao longo de todo o comprimento do painel. Esse método proporciona elevada produtividade e redução do tempo de ciclo, sendo aplicado em corpos minerais extensos e com bom controle geomecânico, em que se deseja minimizar a necessidade de desenvolvimento adicional. (Figura 8)

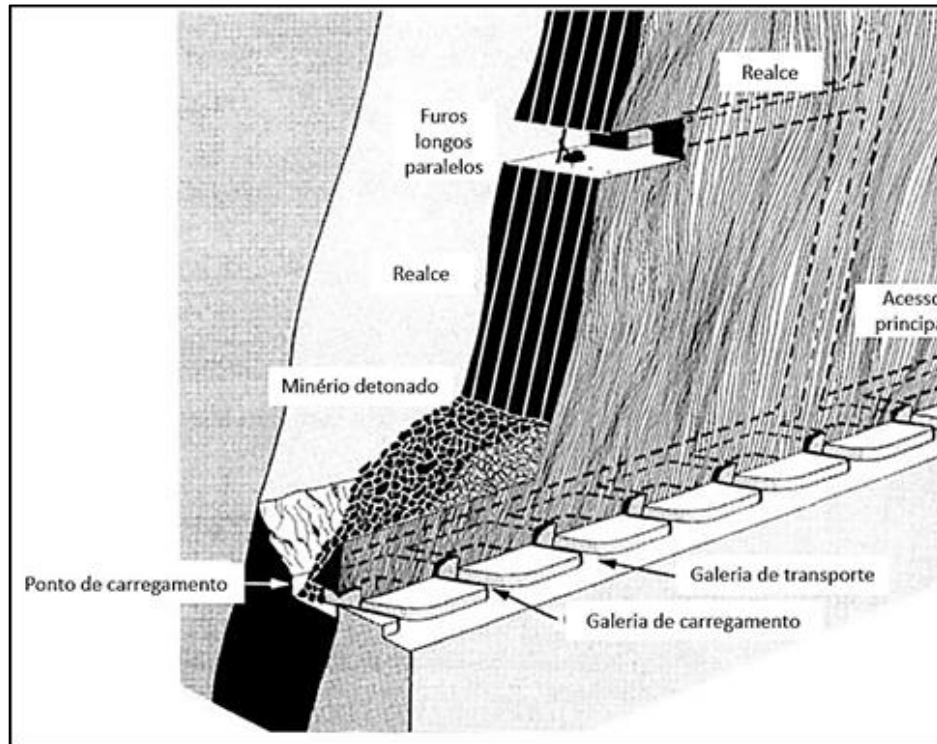


Figura 8. Perfuração de furos longos com padrão de perfuração paralelo.

Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

- *Vertical Crater Retreat Method (VCR)* – neste método, a lavra avança verticalmente a partir de furos de grande diâmetro inclinados para baixo, carregados com explosivo de alta potência no fundo. Ao serem detonados, formam crateras que vão desmontando progressivamente o minério de cima para baixo. O *VCR* é especialmente indicado para corpos de minério com mergulho elevado e para situações em que o controle de diluição e a segurança operacional são prioritários. (Figura 9)

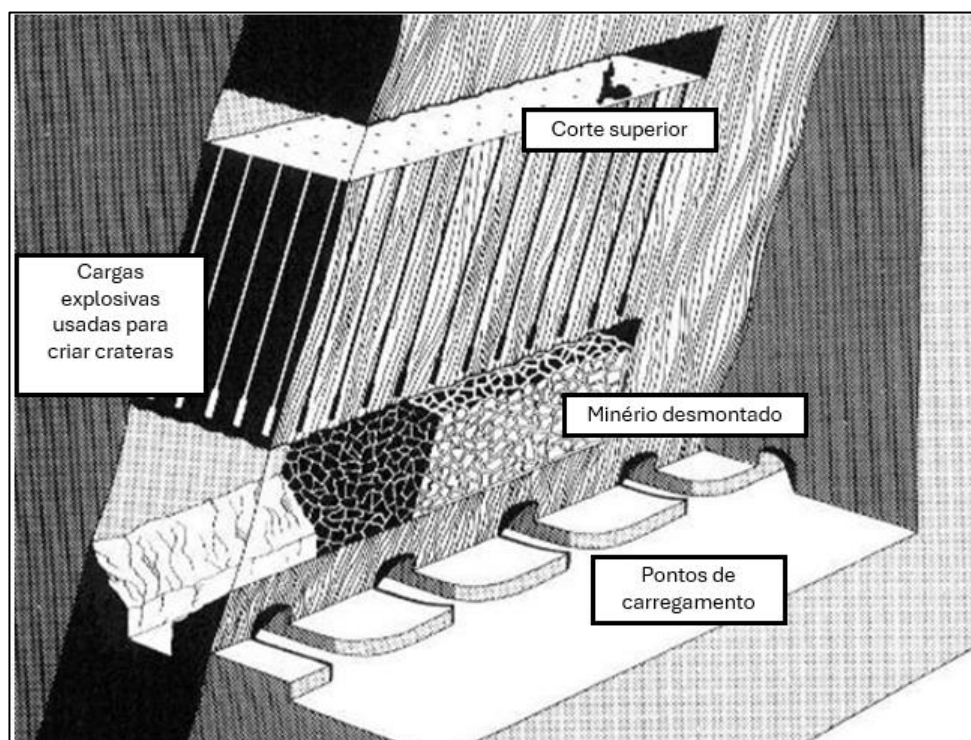


Figura 9. Esquematização da geometria dos furos por *Vertical Crater Retreat Method*. Fonte: Adaptado de Hustrulid, 2001.

3.4 PARÂMETROS AVALIADOS NO DESMONTE DE ROCHA

Neste trabalho, os principais parâmetros avaliados no desmonte de rocha foram o *overbreak*, *underbreak*, recuperação e diluição, aspectos diretamente relacionados à qualidade operacional da lavra subterrânea.

3.4.1 Sobreescavação (*Overbreak*)

A sobreescavação, também conhecida pelo termo em inglês *overbreak*, corresponde à remoção de material além dos limites projetados para o avanço da frente de lavra ou para a escavação subterrânea. Esse fenômeno representa um desvio geométrico indesejado em relação ao contorno teórico definido no projeto, resultando em aumento de volume escavado e, conseqüentemente, em maiores custos de operação (ZHU *et al.*, 2012).

A ocorrência de *overbreak* pode estar associada a diversos fatores técnicos e operacionais, entre eles:

- parâmetros inadequados de perfuração – furos fora de alinhamento, espaçamento incorreto ou profundidade excessiva
- dosagem e tipo de explosivo – utilização de cargas excessivas ou de alto poder energético sem controle de confinamento.
- condições geomecânicas – presença de descontinuidades, fraturas ou zonas de baixa resistência que facilitam a propagação da energia de detonação além da área desejada (HUSTRULID e BULLOCK, 2001).
- sequência de detonação – tempos de retardo inadequados, causando liberação de energia de forma descontrolada.
- ausência ou falhas no pré-corte (*pre-splitting*) – técnica projetada para limitar a propagação de fraturas e preservar o contorno da escavação.

A figura 10 ilustra a ocorrência de sobreescavação (*overbreak*) em uma galeria subterrânea, evidenciando a diferença entre o contorno projetado e o volume real escavado. Na representação, observa-se que o limite planejado de lavra, delimitado pela linha azul, foi ultrapassado durante o desmonte, resultando na remoção não intencional de material estéril adjacente. Essa situação exemplifica o impacto do *overbreak* na diluição do minério, no aumento de custos operacionais e na necessidade de reforço estrutural adicional para garantir a estabilidade da escavação.

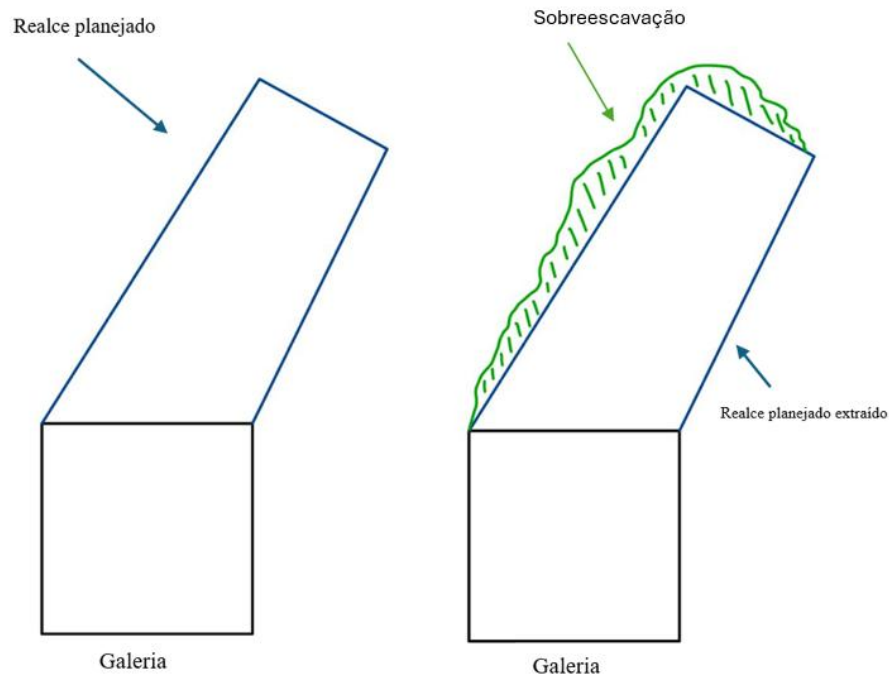


Figura 10. Esquematização do overbreak em uma galeria subterrânea. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

3.4.2 Subescavação (*Underbreak*)

A subescavação, ou *underbreak*, corresponde à remoção de material em quantidade inferior àquela definida no projeto, resultando em uma escavação menor do que o contorno teórico planejado. Esse fenômeno caracteriza-se pela presença de volumes remanescentes de rocha não desmontada, comprometendo o avanço planejado da frente de lavra ou a seção útil da escavação subterrânea (ZHU *et al.*, 2012).

A ocorrência de *underbreak* pode estar relacionada a diversos fatores técnicos e operacionais, como:

- perfuração incorreta – furos mal posicionados, desalinhados, com profundidade insuficiente ou distribuição inadequada.
- carregamento inadequado de explosivos – uso de cargas subdimensionadas ou explosivos de baixa potência que não transmitem energia suficiente para

fragmentar toda a seção projetada.

- condições geomecânicas desfavoráveis – maciços muito competentes ou com estruturas que dificultam a propagação da onda de choque (HUSTRULID e BULLOCK, 2001).
- sequência de detonação inadequada – tempos de retardo incorretos que resultam em falhas de fragmentação em determinadas áreas.
- falhas no confinamento – perda de energia devido à presença de descontinuidades ou vazios que reduzem a eficácia da detonação.

A figura 11 representa a ocorrência de subescavação (*underbreak*) em uma galeria subterrânea, evidenciando a diferença entre o contorno projetado e o volume efetivamente desmontado. Na ilustração, observa-se que parte do minério planejado, delimitado pela linha azul, permaneceu intacta após o desmonte, resultando em uma seção menor do que a projetada (região delimitada pela linha vermelha). Essa situação exemplifica o impacto do *underbreak* na redução da produtividade, na necessidade de retrabalho e no aumento de custos operacionais devido à execução de operações adicionais para atingir o avanço previsto no projeto.

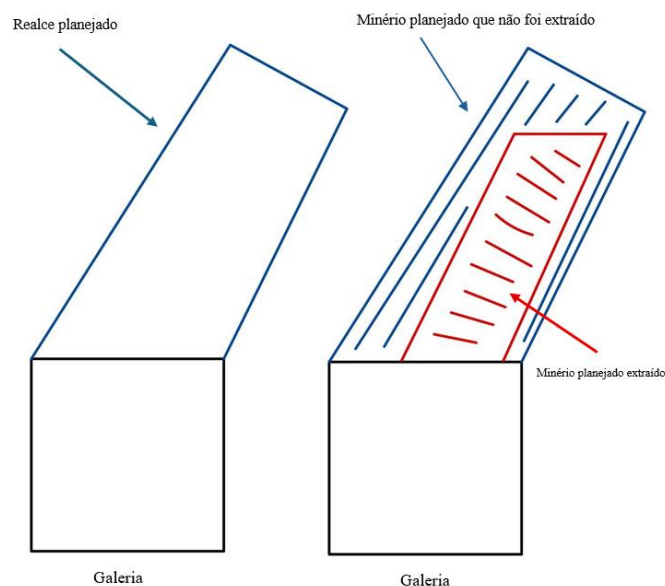


Figura 11. Esquematisação do *underbreak* em uma galeria subterrânea. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

3.4.3 Recuperação e Diluição de lavra

Os índices de diluição e recuperação de um realce constituem importantes parâmetros para avaliar a qualidade da lavra, pois indicam o grau de conformidade da execução em relação à geometria prevista no projeto. Segundo Clark (1998), um desenho de lavra eficiente é aquele desenvolvido de forma a otimizar simultaneamente a recuperação do minério e a minimização da diluição.

A recuperação em lavra subterrânea é definida como a proporção entre o volume ou a massa de minério efetivamente extraído e o total originalmente contido no bloco ou realce planejado para ser lavrado. Trata-se de um indicador de eficiência operacional, diretamente relacionado à capacidade de executar o projeto com mínima perda de minério.

De forma geral, a recuperação pode ser classificada em:

- recuperação geométrica – é determinada pela relação entre o volume ou massa de minério efetivamente extraído e o volume ou massa total contido no bloco ou realce conforme o projeto de lavra (equação 1). Esse cálculo baseia-se em levantamentos topográficos ou geoespaciais, comparando as dimensões reais lavradas com as previstas, sendo um indicador direto de aderência ao plano de lavra (PITBLADO, 1989).

$$\text{Recuperação Geométrica} = \frac{\text{Volume ou massa de minério planejado extraído (MPE)}}{\text{Volume ou massa de minério planejado (MP)}} \quad (1)$$

- recuperação metálica – é obtida comparando-se o teor e a massa de metal contidos no minério extraído com aqueles estimados no bloco ou realce no momento do projeto conforme a equação 2. Para esse cálculo, é necessário conhecer tanto os teores reais obtidos após o beneficiamento quanto os teores teóricos estimados no planejamento. Essa abordagem permite avaliar a eficiência da lavra não apenas em termos volumétricos, mas também em termos de aproveitamento do conteúdo metálico (PITBLADO, 1989).

$$Recuperação\ Metálica = \frac{MPE \times t_2}{MP \times t_1} \quad (2)$$

sendo t_1 a porcentagem (%) de metal de interesse presente no realce planejado e t_2 a porcentagem (%) de metal de interesse presente no realce que foi extraído.

A análise dos dois tipos de recuperação é fundamental, pois a recuperação geométrica está relacionada à eficiência física da operação, enquanto a recuperação metálica reflete a efetividade da lavra no aproveitamento do conteúdo metálico e no cumprimento das metas de produção estabelecidas.

A diluição é um dos principais parâmetros de controle da qualidade da lavra, sendo definida como a inclusão de material estéril ou de baixo teor ao minério extraído, o que reduz o teor médio de alimentação da usina e impacta negativamente o valor econômico do produto final (MITCHELL *et al.*, 1999). Esse fenômeno pode ocorrer por razões técnicas, operacionais ou geomecânicas, estando diretamente ligado à precisão na execução do plano de lavra e ao controle das operações de perfuração e desmonte.

De forma geral, a diluição pode ser classificada em planejada e não planejada. A diluição planejada (*planned dilution*) é aquela prevista no projeto de lavra e considerada nos cálculos de viabilidade, ocorrendo de maneira controlada para garantir a segurança da escavação, viabilizar o acesso de equipamentos ou atender a restrições geomecânicas. Por outro lado, a diluição não planejada (*unplanned dilution*) esquematizada na figura 12, resulta de desvios operacionais em relação ao projeto, sendo causada por fatores como sobreescavação (*overbreak*), erros de perfuração, instabilidades no maciço rochoso ou uso inadequado de explosivos (SANDVIK, 2010).

O controle da diluição é essencial para otimizar o aproveitamento econômico do depósito e manter a aderência da operação aos limites estabelecidos no projeto. Estratégias como monitoramento contínuo das operações, aplicação de técnicas de pré-corte e suavização, e uso de sistemas de medição geoespacial de alta precisão contribuem para reduzir os impactos da diluição não planejada e melhorar os

resultados globais da lavra (HUSTRULID e BULLOCK, 2001).

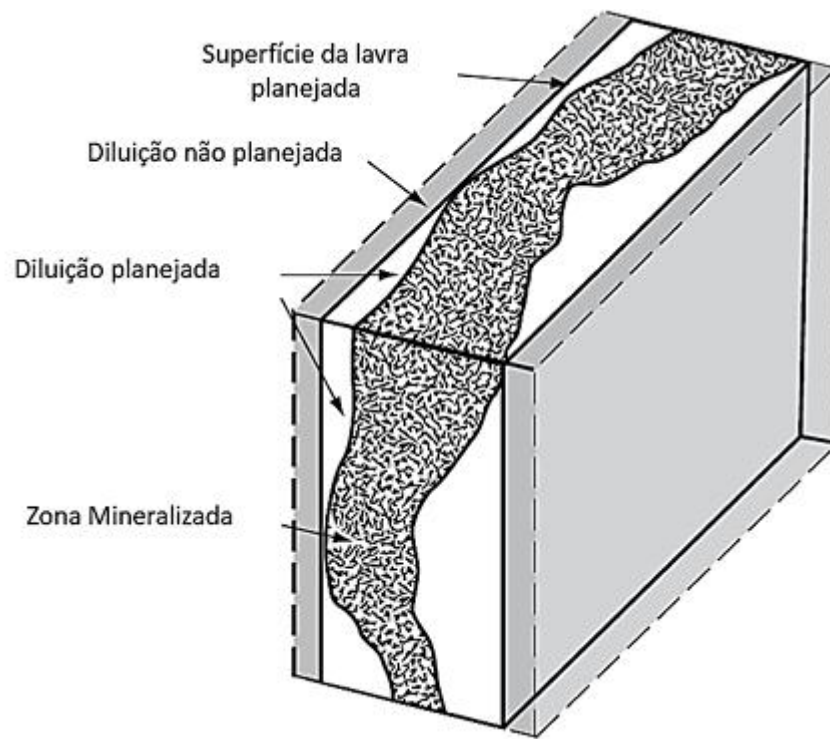


Figura 12. Diluição planejada e não planejada. **Fonte:** Adaptada de Scoble e Moss, 1994.

4 ESTUDO DE CASO: MINA ARIPUANÃ

O projeto mineral da Mina Aripuanã está situado na região Centro-Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso, a cerca de 700 km ao noroeste da cidade de Cuiabá e a aproximadamente 1.200 km da capital federal, Brasília. A Figura 133 apresenta a localização geográfica do empreendimento.

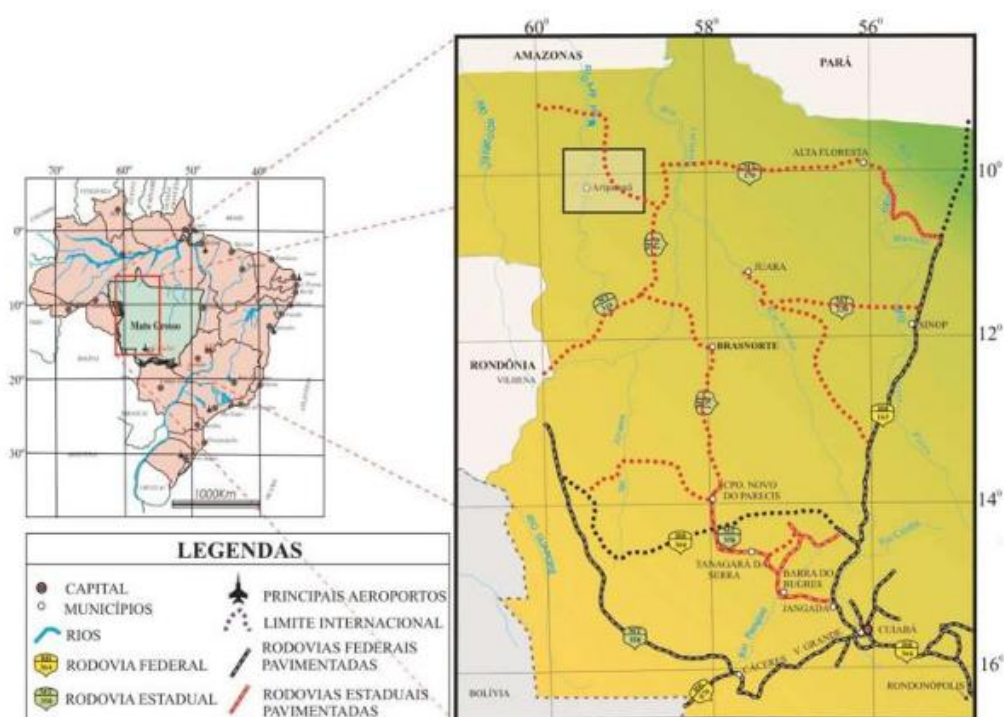


Figura 13. Localização do empreendimento. **Fonte:** Leite *et al.*, 2005.

A Mina Aripuanã possui vida útil projetada superior a duas décadas. Atualmente, encontram-se em operação os corpos Arex e Link, cada um contando com sua própria rampa de acesso à superfície (figura 14). Para os próximos anos, está previsto o aproveitamento de pelo menos outros dois corpos de minério: Ambrex e Babaçu, representado pelo retângulo na cor laranja na extremidade direita da figura 14 (corpo de minério que ainda não foi projetado).

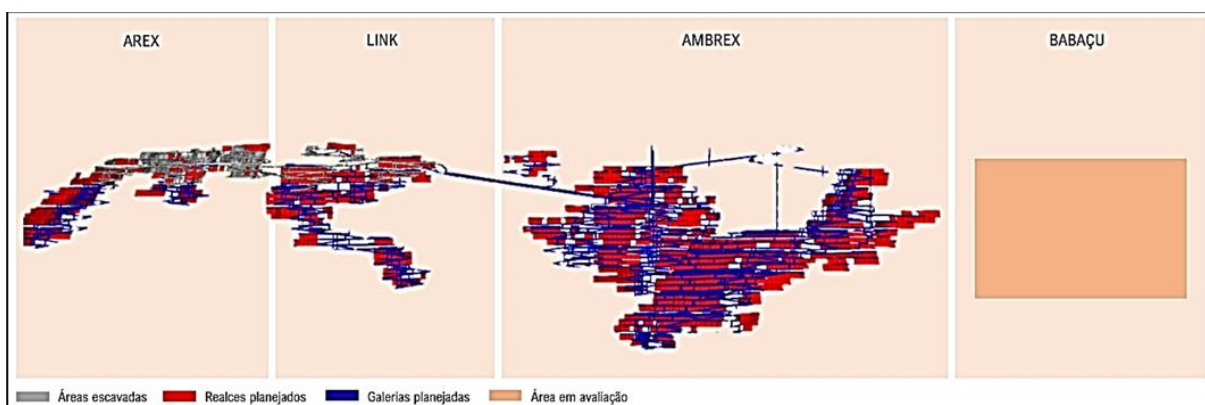


Figura 14. Visão geral da Mina Aripuanã. **Fonte:** Lincoln, 2023.

Na Mina Aripuanã, a produção é organizada em subníveis, espaçados a cada 20 metros na vertical. Em termos gerais, cada nível produtivo corresponde a um painel de aproximadamente 60 metros de altura, composto por 3 a 4 subníveis. A numeração dos níveis segue uma sequência de inteiros, iniciando no nível 2 (mais próximo da superfície) e aumentando progressivamente à medida que a lavra se aprofunda. Já os subníveis representam subdivisões desses níveis (a tabela 1 apresenta como é feita a nomenclatura de nível e subnível da Mina Aripuanã).

Tabela 1. Exemplo de nomenclatura de níveis e subníveis da Mina Aripuanã.

Altura Vertical	Nível	Subnível
60	3	3.4
40		3.3
20		3.2
0		3.1
60	4	4.4
40		4.3
20		4.2
0		4.1

Fonte: Adaptado de Lincoln, 2023.

4.1 GEOLOGIA LOCAL

O Distrito de Aripuanã é caracterizado como um depósito polimetálico do tipo sulfeto maciço hospedado em rochas vulcânicas (VHMS – *Volcanic-Hosted Massive Sulfide*), associado a litotipos de composição bimodal félsica. Os fluidos hidrotermais que originaram a mineralização têm origem predominantemente marinha (GALLEY *et al.*, 2007). As zonas mineralizadas podem ser divididas em dois principais domínios de minério:

- minério estratiforme (*stratabound*) – apresenta teores elevados de Zn, Pb e Ag, composto majoritariamente por esfalerita (Sp) e galena (Gn). Pode ocorrer de forma maciça (*MASS* > 60% em proporção mineralógica) ou disseminada (*DISS* entre 10% e 60%). Este tipo de minério está associado a alterações carbonáticas, que podem evoluir para mármore, além de alterações sericíticas, tremolíticas e talcíticas. Ocorre junto ao contato fértil, definido pelo *hangwall* (metassedimentos, com presença de arsenopirita e pirita) e pelo *footwall* (rochas metavulcânicas e fácies metapiroclásticas), sempre dentro da Zona Hidrotermal (ZHDT).
- minério do tipo *stringer* (STRG) – enriquecido em Cu e Au, é constituído principalmente por calcopirita (Cpy), pirrotita (Po) e pirita (Py). Apresenta disposição irregular e discordante, com ocorrência em veios estreitos que podem exibir textura *stockwork*, também na ZHDT. Está relacionado a alterações cloríticas, biotíticas, fluoríticas, sericíticas e processos de silicificação.

4.2 MÉTODOS DE LAVRA DA MINA DE ARIPUANÃ

Durante o planejamento do projeto, as análises técnicas e econômicas do depósito indicaram a adoção de duas principais metodologias de lavra: Subníveis Paralelos (BS) e Recuo Vertical (VRM). As siglas BS e VRM são derivadas do inglês, significando, respectivamente, *Bench Stoping* e *Vertical Retreat Mining*.

- ***Sublevel Stopping (Bench Stopping)***

Esse método foi aplicado nos corpos com menor potência, geralmente inferiores a 15 metros. Caracteriza-se por permitir uma lavra ascendente, com escavações sequenciais que formam bancadas. Normalmente, não se utiliza enchimento cimentado nessas regiões, sendo o enchimento não cimentado o mais empregado. A lavra ocorre de forma sistemática entre subníveis, e cada painel é dimensionado com base em critérios geotécnicos de estabilidade (ALVES, 2023).

- ***Vertical retreat mining (VRM)***

O método *VRM* foi utilizado majoritariamente nos corpos de maior potência, variando de 20 a mais de 90 metros de altura. Nele, os realces são divididos em blocos primários e secundários, e a lavra é realizada verticalmente por recuo, com desmonte controlado e sequencial de fatias superiores para inferiores. A extração é feita por gravidade, a partir de subníveis que interligam galerias de transporte no *footwall* ao *hangingwall*.

A estratégia de lavra adotada segue uma sequência definida, na qual as áreas mineráveis são subdivididas em blocos primários e secundários. Na figura 15, os blocos primários são representados por tonalidades mais claras, enquanto os secundários aparecem em cores mais intensas.

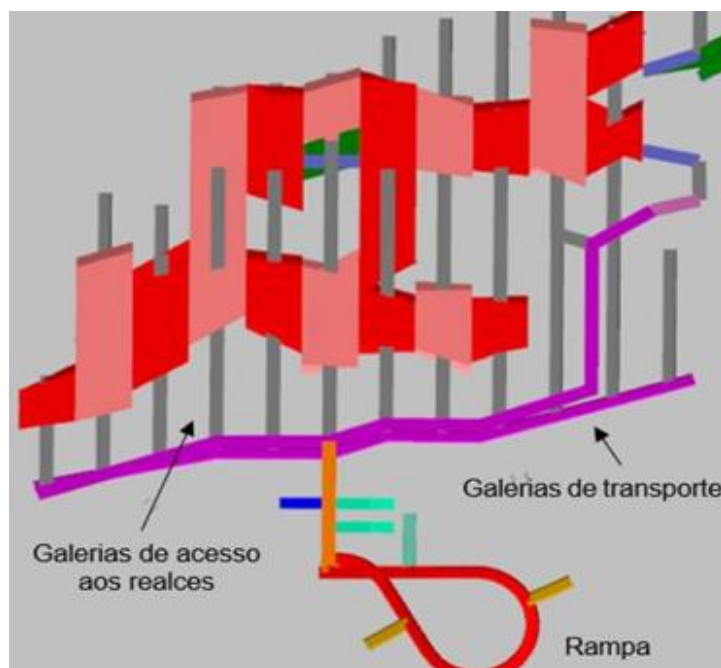


Figura 15. Vista em planta do VRM. **Fonte:** Alves (2023).

Segundo Alves (2023), o *VRM* apresenta elevada produtividade e permite o aproveitamento eficiente do minério, mas exige atenção especial à estabilidade das paredes lavradas. Por isso, utiliza-se enchimento cimentado (*pastefill*) nas áreas lavradas por esse método, com resistência adequada para suportar a exposição das faces dos realces, principalmente durante o ciclo de lavra dos blocos secundários.

A lavra é conduzida no sentido ascendente, com *pastefill* aplicado após a extração de cada bloco. A sequência de lavra evita a exposição simultânea de mais de uma face, garantindo estabilidade e segurança operacional. O dimensionamento dos blocos leva em conta o raio hidráulico e a qualidade geomecânica do maciço, que no caso da mina estudada apresenta comportamento complexo devido à presença de zonas de alteração hidrotermal e estruturas como falhas e dobras (ALVES, 2023).

A Figura 16 apresenta a distribuição das reservas por depósito. As regiões destinadas ao método *bench stoping* estão destacadas em verde, enquanto as áreas planejadas para lavra por *VRM* são representadas em tons de rosa. As rampas principais, responsáveis por interligar os corpos mineralizados à superfície, estão indicadas em vermelho.

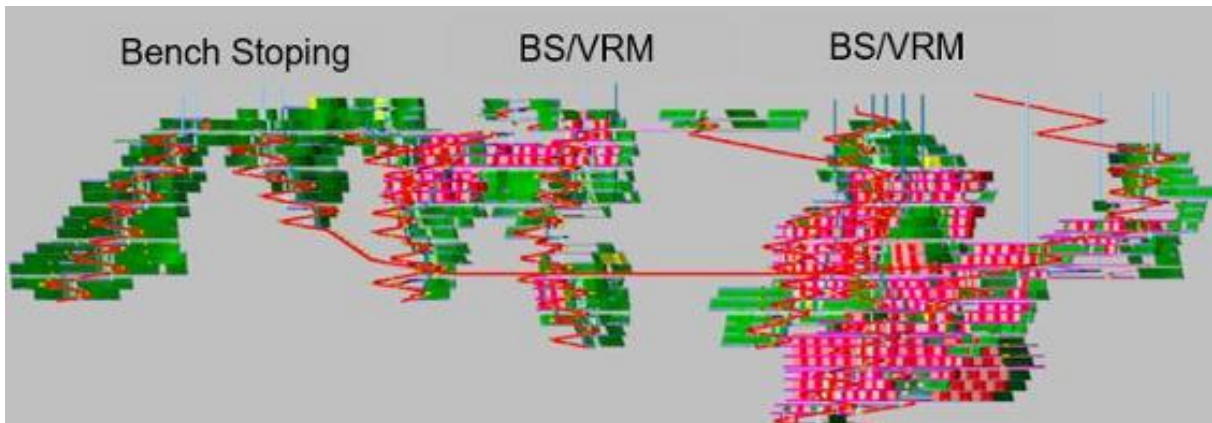


Figura 16. Visão geral das minas e o método de lavra. **Fonte:** Alves, 2023.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrito o processo aplicado para a padronização dos parâmetros de desmonte de lavra na Mina Aripuanã.

5.1 PADRONIZAÇÃO DAS NOTAS DE CONTROLE DE DESMONTE

A etapa inicial deste estudo consistiu na identificação de falhas operacionais e da ausência de padronização nos procedimentos de desmonte de rocha. A partir desse diagnóstico, promoveu-se a revisão do documento de controle das detonações, que passou a reunir de forma estruturada todas as informações relacionadas às frentes de lavra, incluindo os tipos de materiais empregados e as respectivas quantidades de explosivos utilizadas em cada operação.

As notas de controle de desmonte mostravam-se limitadas, uma vez que registravam apenas informações referentes ao tipo e à quantidade de explosivos empregados em cada frente de lavra. A ausência de dados sobre parâmetros de perfuração, condições geotécnicas, sequência de iniciação, detalhes de carregamento e procedimentos de tamponamento dificultava uma análise completa do processo. Essa limitação comprometia a rastreabilidade, restringia a avaliação da eficiência operacional e reduzia a capacidade de identificar oportunidades de melhoria no desempenho das detonações.

A figura 17 representa uma nota de controle de consumo antes do processo de revisão.

Enaex		CONTROLE DE CONSUMO					nexa	
Frente de Serviço:		Mina:	Turno:	Letra:	Data:	Horário Inicial	Horário Final	
AR2N2.2RS-3LD-1		AREX	03	C	27/10/2014	91:30	93:50	
Plano de fogo:		Temperatura da Emulsão:						
231		388						
UMB:		Número de furos carregados:						
1110								
Tipo Carregamento:		Lavra ☒		Desenvolvimento ☐				
Tipo de Fogo:		Normal ☐		Altoado ☐		Ambrax ☐		Desancho ☐
Tipo de seção:		5,0m x 5,5m		5m x 6,5m		5,80m x 5,5m		4 A 12 Linhas
								2,4m x 2,5m
MATERIAL		IIS do material		Recebimento		Assinatura		Consumo
BRITACORD NP 05 BR								Devolução
								Assinatura
BRITACORD NP 40 BR								
BRITACORD NP 40 BR								
X-BOOSTER SS BR								
X-BOOSTER 150 BR				50		35		15
IBEGEL 1 1/2" X 24" BR								
IBEGEL 2 1/2" X 24" BR								
BRINEL								
BRITAPIM								
ESPOLETA ELETRÔNICA				50		35		15
EMULSÃO (kg):								
DENS. DA EMULSÃO		Densidade 1:		1.29		Densidade 2:		1.13
Observação:								
LISTA DE PRESENÇA								
Todos que estiverem nem que seja por um breve momento no local de carregamento com explosivos, deverão assinar esta lista de presença.								
Nome		Função		Matrícula		Empresa		

Figura 17. Antiga nota de controle de consumo de explosivo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

O documento anteriormente utilizado registrava informações básicas, como a frente de serviço carregada com explosivos (frequentemente identificada com nomenclaturas incorretas), o turno de operação, a letra correspondente aos operadores responsáveis, além da data e dos horários de início e término do carregamento. As notas de controle de consumo, elaboradas para a lavra, eram igualmente aplicadas no desenvolvimento, o que por vezes comprometia a rastreabilidade das frentes de serviço. Quanto aos parâmetros de explosivos, o único dado efetivamente registrado correspondia à densidade da emulsão, medida antes do

preenchimento dos furos e após a finalização do processo.

A partir dessa necessidade, elaborou-se um novo modelo de documento, estruturado de forma a incluir um detalhamento mais preciso das frentes de serviço, minimizando a ocorrência de inconsistências relacionadas à nomenclatura. Além disso, foram incorporados novos parâmetros de registro, ampliando o nível de controle e rastreabilidade do processo de desmonte. A figura 18 apresenta a nova planilha de controle desenvolvida.

Enaex		CONTROLE DE CONSUMO LAVRA				nexa	
Plano de fogo:	Turno	Letra	Data	Horário Inicial	Horário Final	UMB:	
511	1 2 3 4	A B C D E	25/12/24	09:05	02:35	1110	
MINA		REGIÃO		NÍVEL		SUBNÍVEL	
AREX ☒		LINK ☐		AMBREX ☐		1 2 3 4	
QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO BS				QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO VRM			
BS1 BS2 BS3 BS4 BS5 BS6 BS7				ACDD AC1 AC2D AC3D AC4D AC5D			
BS1A BS1B BS2A BS2B				ACDE AC1E AC2E AC3E AC4E AC5E			
SENTIDO (BS)		BLOCO (EX: LD1,LE1,LE2,LD2,LD1.5)		TIPO DE LAVRA		SENTIDO DA PERFURAÇÃO	
1 LE		1 1.5 2 3 4 5		MARELA CEGA		ASCENDENTE DESCENDENTE	
TIPO DE CARREGAMENTO =		SLOT LEQUE		RAISES		ACERTO FACE MATACO	
QUANTIDADE LEQUES/LINHAS CARREGADAS		COMPRIMENTO DO MAIOR FURO CARREGADO (m)		QUANTIDADE DE FUROS CARREGADOS		COMPRIMENTO DO MAIOR FURO SLOT	
9		23 MTS		79		0/40 09	
MATERIAL		IT'S DO MATERIAL		RECEBIMENTO		ASSINATURA	
BRITACORD NP 05 BR							
X-BOOSTER SS BR							
X-BOOSTER 150 BR				90		79 11	
IBEGEL 2 1/2" X 24" BR							
BRINEL							
BRITAPIM							
ESPOLETA ELETRÔNICA				90		79 11	
EMULSÃO (kg) =		4540		TEMPERATURA DO PRODUTO:		PRESSÃO DO PRODUTO:	
				342		13	
DENSIDADE DA EMULSÃO (g/cm³)		DENSIDADE INICIAL:		DENSIDADE FINAL:		MATERIAL PARA TAMPÃO:	
		1.96		1.14		CONE MONTADA	
						TALHA DE MADEIRA	
LISTA DE PRESEÇA							
Todos que estiverem nem que seja por um breve momento no local de carregamento com explosivos, deverão assinar esta lista de presença.							
NOME		MATRÍCULA		FUNÇÃO		EMPRESA	

Figura 18. Nova nota de controle de consumo (lavra). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A nova nota de controle de consumo passou a ser utilizada exclusivamente para os carregamentos de frentes de lavra, contemplando todos os parâmetros necessários para garantir a rastreabilidade do processo. Esse aprimoramento possibilitou tanto a identificação de possíveis causas de desmontes mal sucedidos quanto a detecção de falhas operacionais passíveis de melhoria.

O documento passou a conter os seguintes registros:

- quantidade de leques carregados;
- comprimento do maior furo carregado (m);
- número total de furos carregados;
- descrição detalhada dos leques carregados;
- tipo e quantidade de material utilizado para o desmonte;
- temperatura da emulsão no momento do carregamento;
- pressão da emulsão;
- densidade inicial e final da emulsão;
- material empregado no tamponamento dos furos;
- sentido da perfuração (ascendente ou descendente);
- tipo de lavra (cega ou varada).

Além desses parâmetros, o novo modelo também passou a registrar, de forma precisa, o bloco específico onde ocorreu o carregamento de explosivos, assegurando maior detalhamento e confiabilidade na rastreabilidade da frente de serviço.

5.2 TREINAMENTO DA EQUIPE DE OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO DE EXPLOSIVO

A etapa subsequente consistiu na capacitação dos operadores responsáveis pelos carregamentos de explosivos. Foram realizados treinamentos específicos voltados à correta execução do preenchimento da planilha de consumo, que era feita diretamente em campo, durante o próprio processo de carregamento. Essa medida

assegurou maior padronização e confiabilidade nos dados coletados, reduzindo inconsistências e falhas de registro.

Um dos principais objetivos do treinamento foi garantir a correta compreensão dos operadores quanto à identificação do tipo de lavra a ser carregada, especialmente nos casos de *Bench Stoping* (BS) ou *Vertical Retreat Mining* (VRM). Essa era uma das etapas em que mais ocorriam erros no preenchimento da nota de controle de desmonte.

Para facilitar o entendimento, foi adotado um plano de desmonte de exemplo, no qual constava a frente de serviço a ser carregada. Durante as instruções, reforçou-se a obrigatoriedade de manter o plano de carregamento em mãos no momento da operação, de modo que o preenchimento da nota fosse realizado diretamente a partir dele.

O procedimento orientava que:

- quando o plano de carregamento apresentasse indicação de *BS*, o operador deveria registrar a lavra como *Bench Stoping*;
- quando o plano indicasse *AC* (*acessos*), o preenchimento deveria sinalizar que se tratava de lavra pelo método VRM.

Na figura 19, observa-se o recorte do plano de desmonte referente à região AR3_N2.3_BS5_LD2, em que a sigla BS indica que a lavra corresponde ao método *Bench Stoping*. Já na figura 20, está representada a frente de serviço LI2_N3.4_AC4E_SEC1, cuja nomenclatura aponta para o Acesso 04, lado esquerdo, caracterizando-se, portanto, como lavra pelo método VRM (*Vertical Retreat Mining*).

nexa		Código:	
Documentos de dados		Revisão:	
Título:		Área:	
		Páginas:	

CONTROLE DE CONSUMO LAVRA									
Plano de fogo:	Turno	Letra	Data	Horário Inicial	Horário Final	UMB:			
	1 2 3 4	A B C D E	/ /	:	:				
MINA			REGIÃO	NÍVEL	SUBNÍVEL				
AREX	LINK	AMBREX	1 2 3	N1 N2 N3 N4	1 2 3 4				
QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO BS			QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO VRM						
BS1 BS2 BS3 BS4 BS5 BS6 BS7	AC0D AC1D AC2 AC3D AC4D AC5D								
BS1A BS1B BS2A BS2B	AC0E AC1E AC2E AC3E AC4E AC5E								
SENTIDO (BS)	BLOCO (EX: LD1,LE1,LE2,LD2,LD1.5)	TIPO DE LAVRA		SENTIDO DA PERFURAÇÃO					
LD LE	1 1.5 2 3 4 5	VARADA CEGA		ASCENDENTE DESCENDENTE					
TIPO DE CARREGAMENTO =	SLOT LEQUE	FACE LIVRE	CONTRA RECUIO	RAISES		ACERTO FACE MATAÇO			
QUANTIDADE LEQUES/LINHAS CARREGADAS	COMPRIMENTO DO MAIOR FURO CARREGADO (m)	QUANTIDADE DE FUIROS CARREGADOS	COMPRIMENTO DO MAIOR FURO SLOT	DESCRIÇÃO DOS LEQUES CARREGADOS:					
				Exemplo: Leque 01 até 03, Slot 01 até 09					

PREENCHIMENTO PARA LAVRAS TIPO BS

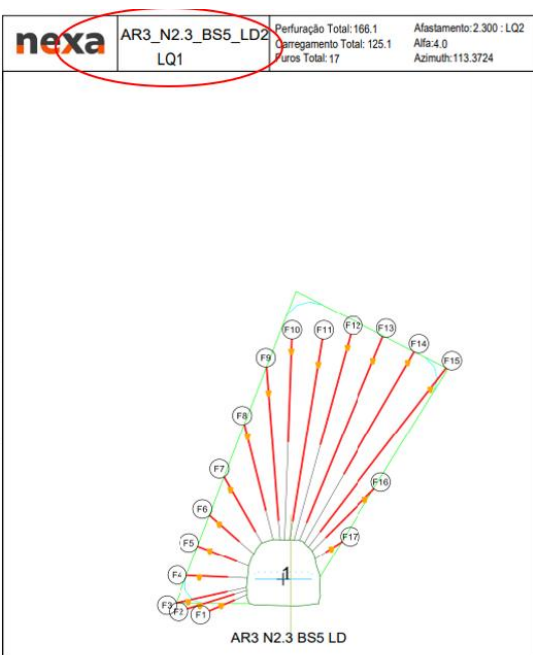


Figura 19. Nota de controle de consumo ao lado do plano de desmonte (BS) recortado. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

nexa		Código:	
Documentos de dados		Revisão:	
Título:		Área:	
		Páginas:	

CONTROLE DE CONSUMO LAVRA									
Plano de fogo:	Turno	Letra	Data	Horário Inicial	Horário Final	UMB:			
	1 2 3 4	A B C D E	/ /	:	:				
MINA			REGIÃO	NÍVEL	SUBNÍVEL				
AREX	LINK	AMBREX	1 2 3	N1 N2 N3 N4	1 2 3 4				
QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO BS			QUANDO HOUVER LAVRA DO TIPO VRM						
BS1 BS2 BS3 BS4 BS5 BS6 BS7	AC0D AC1D AC2 AC3D AC4D AC5D								
BS1A BS1B BS2A BS2B	AC0E AC1E AC2E AC3E AC4E AC5E								
SENTIDO (BS)	BLOCO (EX: LD1,LE1,LE2,LD2,LD1.5)	TIPO DE LAVRA		SENTIDO DA PERFURAÇÃO					
LD LE	1 1.5 2 3 4 5	VARADA CEGA		ASCENDENTE DESCENDENTE					
TIPO DE CARREGAMENTO =	SLOT LEQUE	FACE LIVRE	CONTRA RECUIO	RAISES		ACERTO FACE MATAÇO			
QUANTIDADE LEQUES/LINHAS CARREGADAS	COMPRIMENTO DO MAIOR FURO CARREGADO (m)	QUANTIDADE DE FUIROS CARREGADOS	COMPRIMENTO DO MAIOR FURO SLOT	DESCRIÇÃO DOS LEQUES CARREGADOS:					
				Exemplo: Leque 01 até 03, Slot 01 até 09					

PREENCHIMENTO PARA LAVRAS TIPO VRM

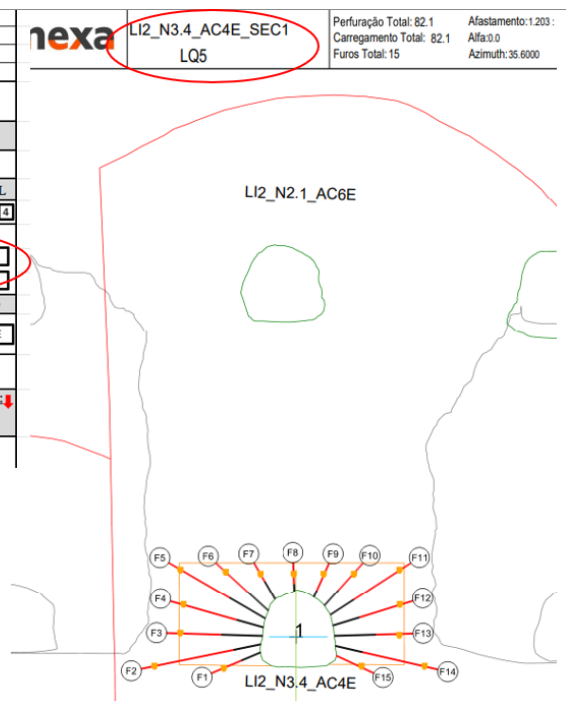


Figura 20. Nota de controle de consumo ao lado do plano de desmonte (VRM) recortado. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A distinção entre os métodos de lavra diretamente no plano de desmonte é fundamental, pois orienta os operadores quanto ao correto preenchimento da nota de controle de desmonte. Essa identificação garante a rastreabilidade das frentes de serviço, evita erros de classificação durante o registro dos carregamentos e assegura maior aderência ao plano de lavra, reduzindo falhas que poderiam comprometer tanto a eficiência operacional quanto a confiabilidade dos dados.

5.3 ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO EM CAMPO

A etapa seguinte consistiu no acompanhamento em campo das operações de carregamento, com o objetivo de aplicar de forma prática os conteúdos transmitidos durante o treinamento. Essa atividade permitiu observar a execução real dos procedimentos, identificar eventuais falhas operacionais e corrigir desvios ainda durante o processo. Além disso, essa prática teve como finalidade garantir que, na análise pós-desmonte, os parâmetros rastreados não apresentassem inconsistências relacionadas a causas operacionais, assegurando maior confiabilidade aos dados.

A figura 21 apresenta o caminhão de carregamento de emulsão utilizado nas operações da mina subterrânea de Aripuanã. Esse equipamento era deslocado até a frente de serviço, onde realizava o bombeamento da emulsão diretamente nos furos de detonação.



Figura 21. Caminhão de carregamento de emulsão. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

O carregamento dos furos é realizado a partir de uma plataforma acoplada ao caminhão de emulsão, a qual pode ser posicionada até a altura do furo a ser carregado. A operação é conduzida por meio de uma mangueira graduada com ranhuras, que permite controlar com precisão a metragem de carregamento. A emulsão é bombeada até o fundo do furo, preenchendo-o progressivamente até o ponto definido para a instalação do tampão. Esse procedimento é repetido em cada furo de cada leque, garantindo padronização, segurança e maior controle sobre o processo de desmonte.

A figura 22 apresenta a plataforma instalada no caminhão de carregamento,

utilizada em campo para a execução do bombeamento da emulsão nos furos. Esse dispositivo possibilita o posicionamento adequado do operador na altura desejada.



Figura 22. Plataforma de elevação contida no caminhão de emulsão. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Durante o processo de carregamento dos furos, os parâmetros da emulsão, como temperatura e pressão, posteriormente registrados nas notas de controle de desmonte, são obtidos a partir de um painel localizado na lateral do caminhão de carregamento. Esse painel permite ao operador monitorar em tempo real as condições do bombeamento, assegurando maior precisão no controle de cada furo e garantindo a conformidade dos dados registrados com as condições operacionais de campo (figura 23).



Figura 23. Painel de controle dos parâmetros da emulsão bombeada. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

5.4 MONITORAMENTO DOS TAMPÕES DE FURO

Uma das atividades de maior relevância no monitoramento foi o tamponamento dos furos, etapa essencial para assegurar o confinamento adequado da carga explosiva. A correta execução dessa prática evita que haja liberação de energia insuficiente ou excessiva durante a sequência de detonação da frente de serviço.

A figura 24 apresenta o detalhamento das observações realizadas em campo com

base no plano de desmonte. Na coluna “Tamp. (m)”, está indicada a metragem correspondente ao trecho do furo que não deve ser carregado com emulsão. Observa-se a existência de furos com valores significativos de tamponamento, evidenciando a importância de se respeitar essas metragens. O não cumprimento desse parâmetro, com o consequente carregamento total do furo, pode comprometer o confinamento da carga explosiva, gerar consumo excessivo de emulsão e resultar em problemas operacionais relevantes no pós-desmonte, como *overbreak* elevado e formação de matacões.



nexa		CARREGAMENTO			DIAGRAMA DE DESMONTE			
Furo	Comprimento(m)	Diam(Ø)	Tamp.(m)	Emulsão(kg)	Carreg(m)	Booster 150g	Espoleta Eletrônica	Encartuchad
F1	1.86	3.5 in	0.50	9.14	1.36	1	1	0.00
F2	5.04	3.5 in	1.50	23.73	3.54	1	1	0.00
F3	11.53	3.5 in	3.51	53.73	8.01	1	1	0.00
F4	21.69	3.5 in	1.50	135.37	20.19	2	2	0.00
F5	21.65	3.5 in	9.85	80.41	11.99	1	1	0.00
F6	21.67	3.5 in	1.50	135.25	20.17	2	2	0.00
F7	21.74	3.5 in	11.29	70.06	10.45	1	1	0.00
F8	21.87	3.5 in	1.50	136.57	20.37	2	2	0.00
F9	9.56	3.5 in	1.50	54.03	8.06	1	1	0.00
F10	3.63	3.5 in	1.00	17.64	2.63	1	1	0.00
	140.25			715.92	106.79	13	13	0.00

Figura 24. Monitoramento do carregamento com utilização do plano de desmonte. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

5.5 CRIAÇÃO DO *POWER BI* PARA MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS

A última etapa, e também uma das mais relevantes, consistiu no desenvolvimento de *dashboards* no *software Power BI*. Essa iniciativa foi fundamental para o monitoramento sistemático dos desmontes em uma frequência semanal, permitindo não apenas a análise consolidada dos dados, mas também a identificação da causa raiz de eventuais problemas pós-desmonte. A ferramenta possibilitou verificar se as não conformidades estavam relacionadas a falhas no carregamento ou a outros fatores operacionais, fornecendo subsídios objetivos para a tomada de decisão e para a implementação de ações corretivas.

A figura 25 apresenta o *dashboard* denominado “Visão Geral”, que consolida todas as detonações realizadas até o momento. Nesse painel, é possível acompanhar indicadores como a quantidade de desmontes efetuados por mês, os diferentes tipos de perfuração e sua proporção em relação ao total, bem como a classificação do *stope* (varado ou cego). Também são exibidos o sentido da perfuração (ascendente ou descendente) e o método de lavra empregado, distinguindo-se entre *Bench Stoping* (BS) e *Vertical Retreat Mining* (VRM).

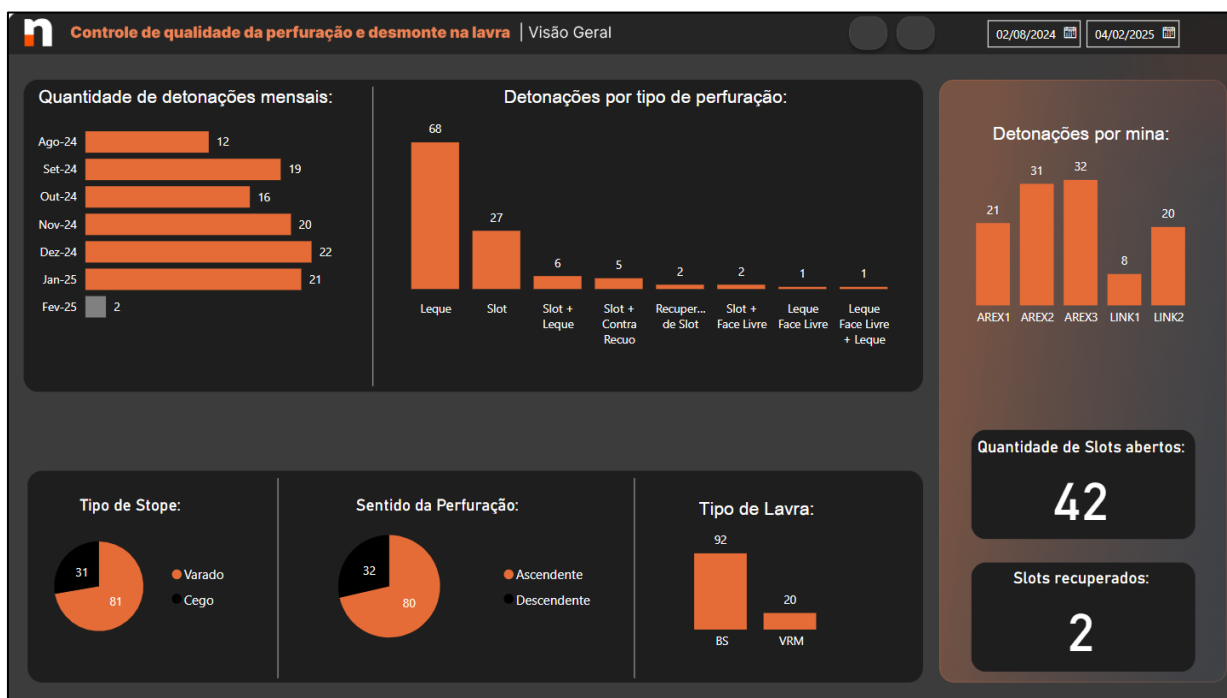


Figura 25. *Dashboard* da Visão Geral dos desmontes. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, o *dashboard* disponibiliza informações referentes ao número de detonações por mina, à quantidade de slots abertos e àqueles que necessitaram de outra detonação pois não houve total recuperação da altura de desmonte planejada. Todos esses dados são alimentados a partir das planilhas de controle de consumo preenchidas em campo pelos operadores responsáveis pelo carregamento, sendo complementados com informações provenientes dos projetos elaborados pela área de planejamento.

Diversos *dashboards* foram desenvolvidos para diferentes finalidades de análise, acompanhados também da implementação de relatórios mensais. Entretanto, alguns se destacaram por sua relevância no monitoramento detalhado dos desmontes e na avaliação de parâmetros essenciais à rastreabilidade de falhas e à adoção de ações corretivas mais ágeis.

Entre esses, destaca-se o *dashboard* criado para acompanhamento em conjunto com a equipe de desmonte da Enaex, no qual, semanalmente, era avaliada a aderência entre os valores planejados e executados. Nesse painel, eram analisadas

informações como:

- quantidade de furos carregados em comparação com os furos previstos em projeto;
- volume de emulsão realizado em relação ao planejado;
- razões de carga aplicadas.

Na figura 26, painel visual usado para as análises semanais, exemplifica-se a análise referente à última semana de janeiro de 2025, em que foram identificados desvios significativos entre os furos projetados e aqueles efetivamente carregados, permitindo verificar se a divergência estava associada a falhas de perfuração ou a furos que não haviam sido carregados. Além disso, constatou-se um desvio médio de 14,82% a mais de emulsão utilizada (em kg) em relação ao planejado para os desmontes da semana.

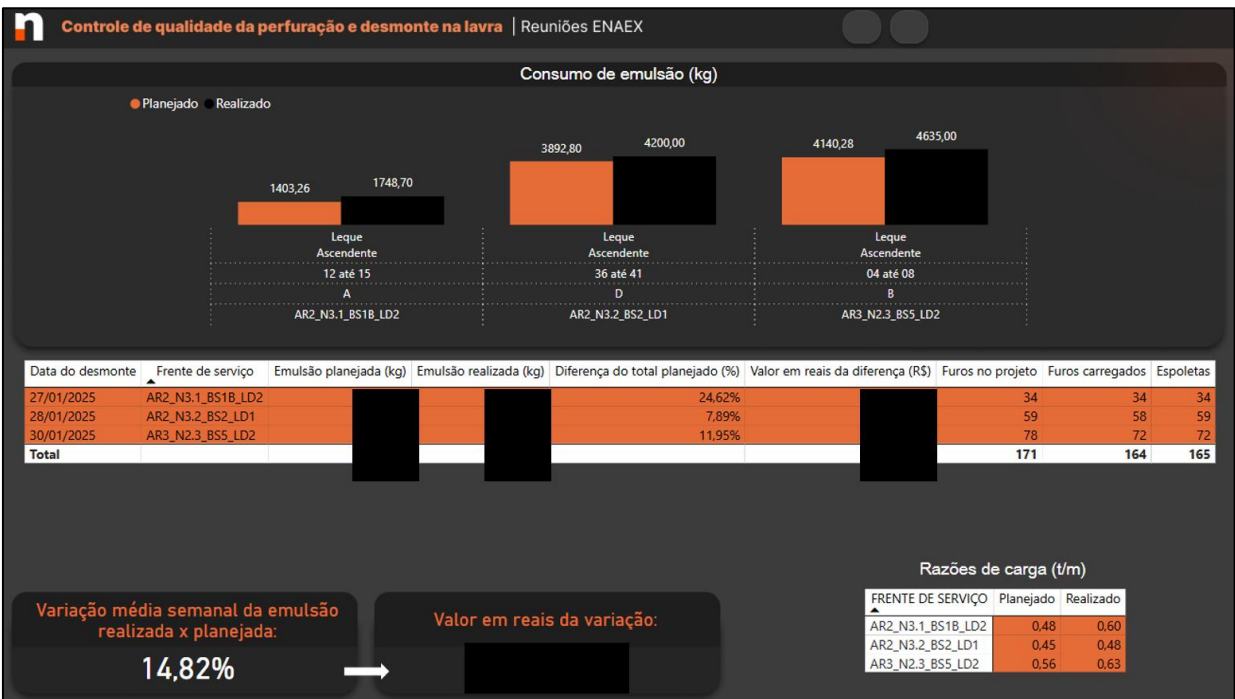


Figura 26. *Dashboard* para análises semanais para identificação de desvios. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Também foram desenvolvidos *dashboards* específicos para análise da qualidade da emulsão, permitindo o monitoramento contínuo de parâmetros críticos do processo.

A figura 27, ilustra um recorte referente ao mês de janeiro de 2025, no qual foram registrados os seguintes valores médios: temperatura de 37,4 °C, densidade final de 1,09 g/cm³ e pressão de 9,5 bar.

Esse tipo de *dashboard* tem papel fundamental na identificação de possíveis anomalias associadas à qualidade da emulsão, possibilitando a detecção precoce de desvios que poderiam comprometer a eficiência do desmonte.

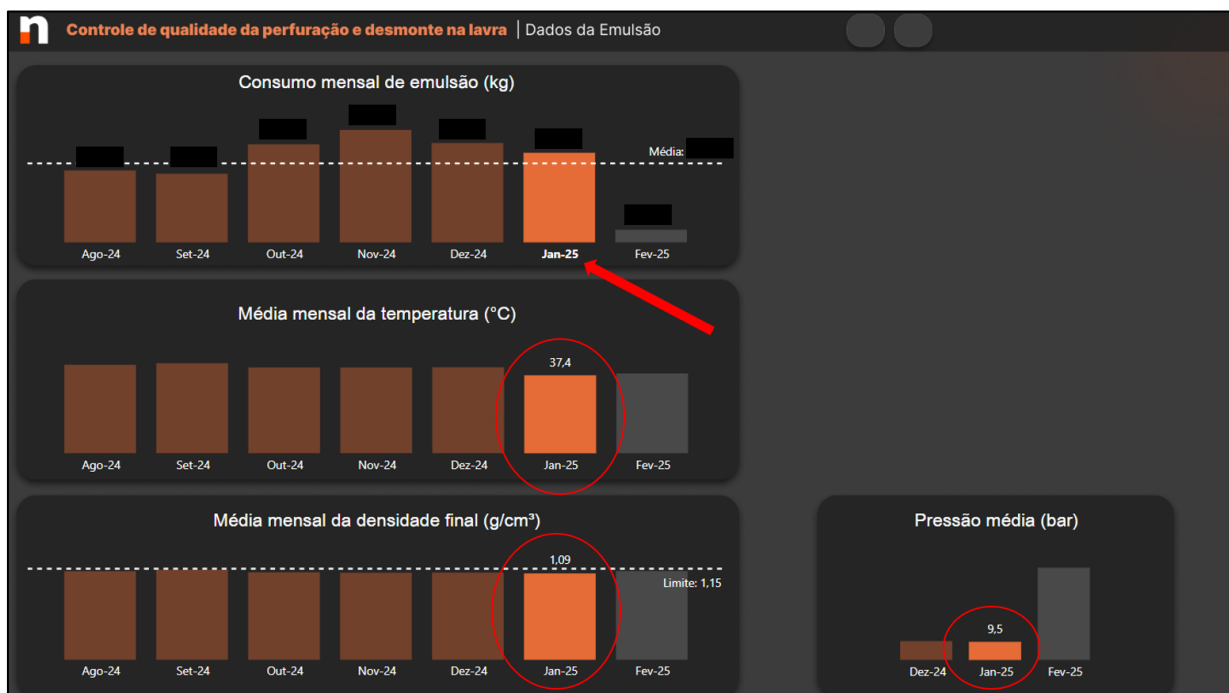


Figura 27. *Dashboard* dos Dados da Emulsão. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Por fim, com o novo nível de detalhamento e a maior precisão no preenchimento das informações, tornou-se possível rastrear a equipe responsável pelo carregamento, assim como o turno em que a atividade foi realizada. Essa rastreabilidade permitiu, em casos de erros discrepantes, identificar a equipe envolvida e investigar a causa do problema de forma mais direcionada.

A figura 28 exemplifica essa aplicação, apresentando todas as detonações realizadas entre agosto de 2024 e o início de fevereiro de 2025, além da consolidação do número total de desmontes por turno e por letra correspondente às equipes. Esse recurso fortaleceu o controle operacional, proporcionando maior transparência,

responsabilização e eficiência na implementação de ações corretivas.

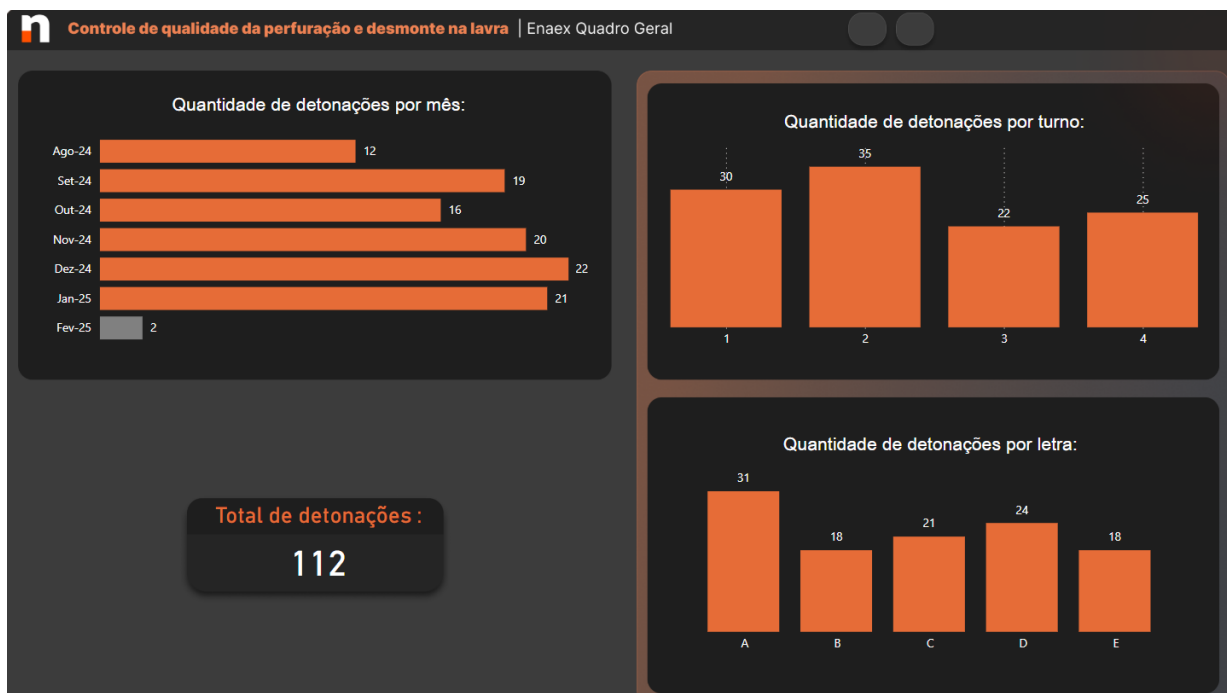


Figura 28. *Dashboard* do Quadro Geral relacionado a equipe de desmonte. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Cabe ressaltar que todos esses painéis foram desenvolvidos no *software Power BI*, o que possibilitou a utilização de filtros dinâmicos disponibilizados pela própria ferramenta. Por meio desses recursos, tornou-se viável rastrear individualmente os dados de cada desmonte com elevado grau de precisão, assegurando maior confiabilidade na análise e facilitando a identificação de desvios ou inconformidades específicas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do monitoramento integral da lavra, conduzido sob os novos padrões aplicados ao processo de desmonte de rochas. A análise contempla tanto os indicadores de qualidade operacional quanto os impactos econômicos, evidenciados pela redução no consumo de materiais empregados no desmonte. Entre os principais resultados, destaca-se o ganho obtido na maior aderência entre a quantidade de emulsão planejada e a efetivamente utilizada, refletindo avanços significativos na eficiência e no controle do processo.

6.1 CONTROLE DE QUALIDADE: FRENTE LI2_N3.4_AC2D_SEC1

Um dos melhores resultados de qualidade foi obtido na lavra da frente de serviço LI2_N3.4_AC2D_SEC1, localizada no Link 02, nível 03, subnível 04, acesso 02, lado direito. Trata-se de uma operação de *VRM* secundário, executada em uma região que se destacou pelo planejamento minucioso. O corpo do realce apresentava 17 m de comprimento, 20 m de espessura e 19 m de altura, dimensões que demandaram um controle operacional rigoroso. Inicialmente, o método de lavra adotado foi o *Bench Stopping* (BS), sendo posteriormente introduzido o *Vertical Retreat Mining* (VRM), o que possibilitou maior eficiência no aproveitamento do maciço rochoso e melhor controle sobre os parâmetros de desmonte. A sequência de lavra executada nesta frente de serviço ocorreu da seguinte forma:

1. Slot (LI2_N3.4_BS2_LD1);
2. Leques 01 à 05 (LI2_N3.4_BS2_LD1);
3. Slot (LI2_N3.4_AC2D_SEC1);
4. Leques 06 e 07 (LI2_N3.4_BS2_LD1) mais Faces livres (região exposta da rocha) 01 à 08 (LI2_N3.4_AC2D_SEC1);
5. Leques 01 a 04 (LI2_N3.4_AC2D_SEC1).

O primeiro e o segundo desmontes foram executados utilizando o método de lavra *Bench Stopping (BS)*, embora se observe uma variação na nomenclatura adotada nos registros. Na terceira detonação, foi realizado o slot de lavra já sob o método *Vertical Retreat Mining (VRM)*. Em seguida, detonaram-se, juntamente com as faces livres, os leques 06 e 07 ainda pelo método *BS*, permitindo a continuidade do avanço pelo *VRM*. Finalmente, os leques 01 a 04 foram desmontados integralmente pelo método *VRM*, consolidando a transição entre as duas metodologias de lavra. Na figura 29, ilustra-se o desmonte realizado, evidenciando a sequência aplicada.

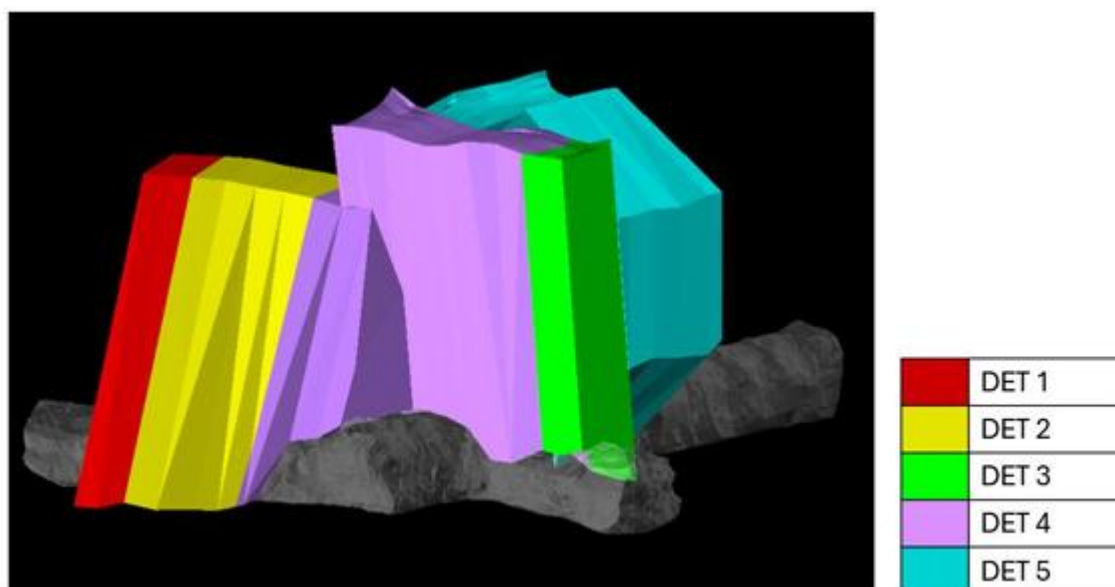


Figura 29. Sequência de desmonte na Frente LI2_N3.4_AC2D_SEC1. **Fonte:** Relatório interno.

Esse *stope* foi monitorado desde o primeiro desmonte, aplicando integralmente a nova metodologia do processo de desmonte, que contemplou desde a padronização da coleta de dados até o acompanhamento detalhado da frente de serviço após cada detonação. Os resultados obtidos foram altamente satisfatórios, uma vez que nenhum parâmetro apresentou desvios significativos e todas as etapas do processo foram rigorosamente cumpridas, com destaque para o correto tamponamento dos furos.

Como marco relevante, registrou-se uma elevada aderência entre a emulsão

planejada e a efetivamente utilizada, com variação de apenas 0,56% abaixo do previsto. Essa diferença corresponde a um total de 12.546 kg de emulsão planejada para a frente a 12.569 kg efetivamente consumidos, o que evidencia o elevado nível de controle operacional alcançado e a consistência do processo de carregamento.

Na tabela 2 apresenta-se a análise consolidada após todos os desmontes realizados neste *stope*, onde se verificam resultados satisfatórios. Em termos de produção, registrou-se um *overbreak* de aproximadamente 6%, correspondente a 1.172 toneladas além do previsto. Quanto à massa não recuperada, o valor obtido foi de 13%, equivalente a 2.312 toneladas.

Valores ideais de *underbreak* e *overbreak* podem variar conforme o tipo de escavação e as características do maciço rochoso. De modo geral, em operações subterrâneas bem controladas, o *underbreak* aceitável situa-se entre 3% e 5%, enquanto o *overbreak* deve ser mantido abaixo de 10% do volume projetado (ATLAS COPCO, 2010; SANDVIK MINING, 2015).

Embora esses percentuais avaliados no processo de desmonte do realce estejam ligeiramente acima do padrão de referência, observa-se uma tendência de melhoria progressiva. Para uma lavra desse porte, tais indicadores podem ser considerados aceitáveis, refletindo um bom desempenho global do processo de desmonte.

Tabela 2. Valores de *underbreak* e *overbreak* do *stope* desmontado e de teores lavrados.

	Volume (m ³)	Massa (t)	NSR24 (US\$/t)	ZN	CU	PB	AG	AU
<i>Overbreak</i>	388,77	1172,20	100,11	2,34	0,51	0,83	0,72	0,48
<i>Underbreak</i>	760,53	2311,83	77,23	1,67	0,42	0,60	0,52	0,50
<i>DesignedAndMined</i>	5170,81	15803,39	118,42	2,42	0,70	0,81	0,73	0,73
<i>Design Total</i>	5931,33	18115,22	113,16	2,32	0,66	0,78	0,71	0,70
<i>As-Built Total</i>	5559,58	16975,59	117,15	2,41	0,68	0,81	0,73	0,71

Fonte: Relatório interno.

O “*AS-Built Total*”, presente na tabela 2, corresponde ao volume efetivamente lavrado do realce, refletindo as condições reais da operação frente ao planejado. Nessa análise, observa-se uma massa total de 16.975,59 toneladas lavradas,

associada a um NSR (*Net Smelter Return*) de 117,15, indicador que evidencia um desempenho econômico bastante favorável para o bloco em questão.

Na figura 30, apresenta-se uma seção do leque 03 referente ao último desmante realizado na região. As linhas de contorno em verde representam o *design* planejado, enquanto as linhas em vermelho indicam o que foi realmente lavrado. Já as linhas brancas correspondem aos furos de perfuração, nos quais foi realizado o carregamento da emulsão. A análise permite observar uma elevada aderência entre o planejamento e a execução no “corte”, fato corroborado pelos resultados obtidos de *overbreak* e *underbreak*, que se mantiveram dentro de limites aceitáveis.

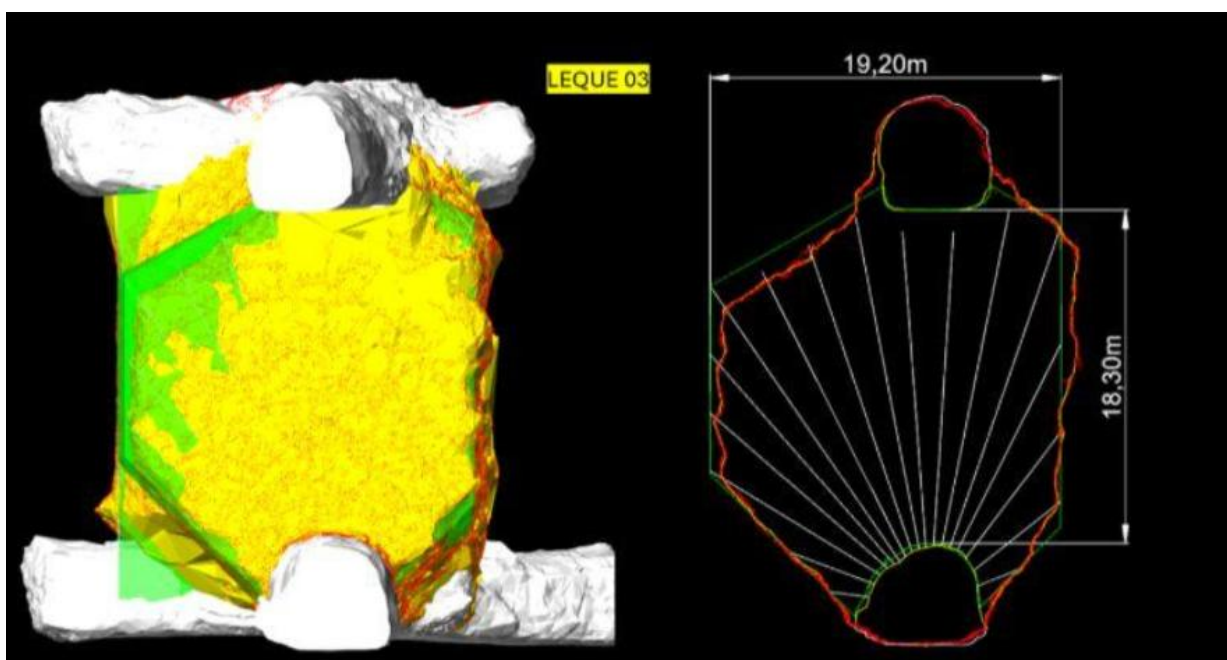


Figura 30. Visualização da sessão do leque 03. **Fonte:** Relatório interno.

A figura 31 apresenta o resultado final do *stope* lavrado. Na ilustração, a região em amarelo corresponde ao volume efetivamente desmontado, enquanto a área em verde representa o projeto originalmente planejado. A comparação entre ambas as áreas evidencia uma elevada aderência entre o planejado e o executado, confirmando a eficiência do processo de desmante adotado.

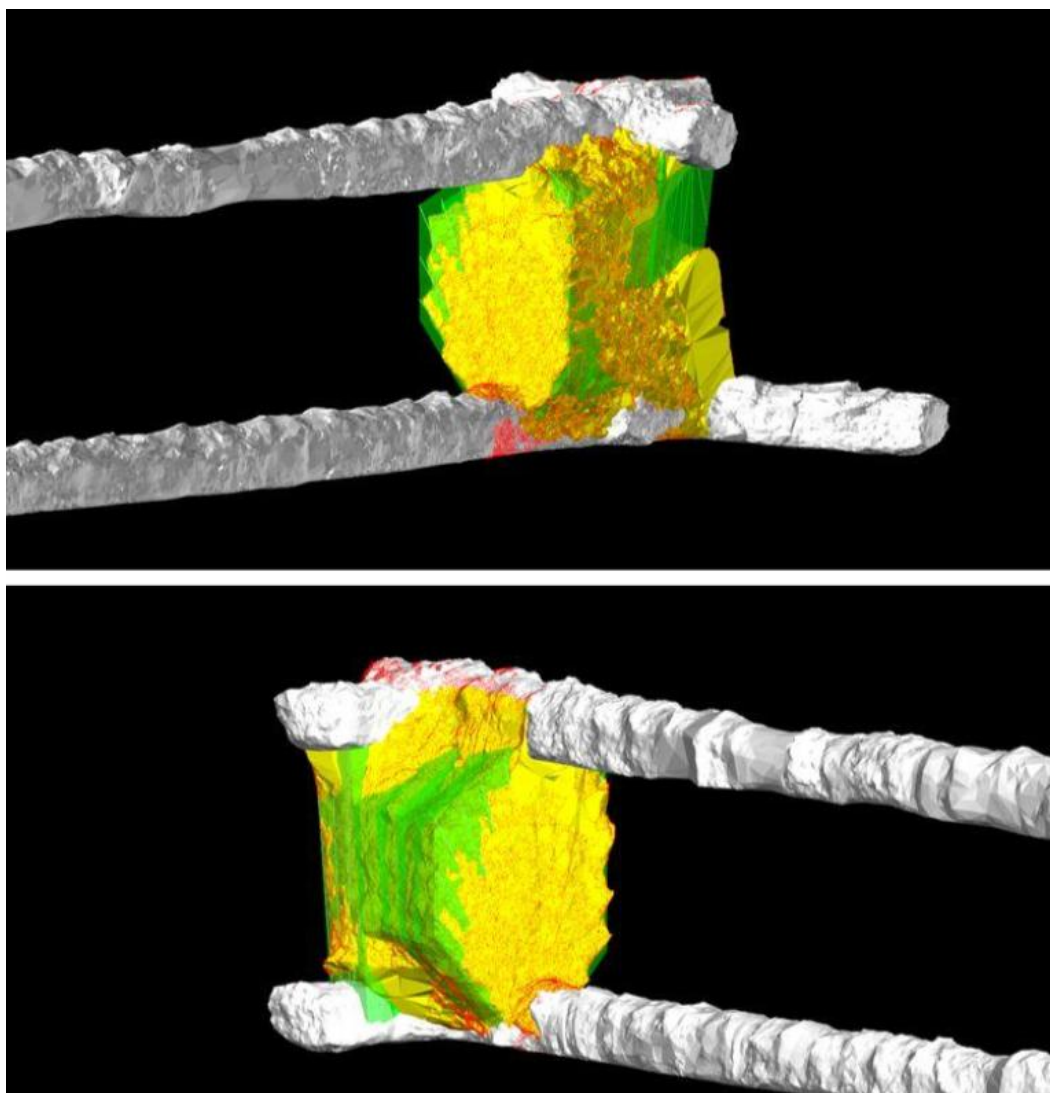


Figura 31. Resultado final do realce lavrado comparado ao planejado. **Fonte:** Relatório interno.

6.2 CONSUMO DE EMULSÃO

O consumo de emulsão constituiu um dos principais focos deste trabalho, uma vez que historicamente os desmontes apresentavam baixa aderência entre o planejado e o executado. Essa discrepância era frequentemente ocasionada pela ausência de orientações adequadas, pela insuficiência de treinamentos específicos ou, em alguns casos, por práticas negligenciadas durante as etapas de carregamento e detonação, resultando em desvios significativos no processo.

O desenvolvimento deste trabalho teve início em novembro de 2024,

contemplando todas as etapas que o compuseram, desde a elaboração de uma nova planilha de controle de consumo até a implementação de *dashboards* destinados a análises mais precisas e à adoção de ações corretivas imediatas. Naturalmente, houve um período de adaptação até que todos os envolvidos estivessem devidamente treinados e as novas rotinas implementadas de forma efetiva. Embora essa fase inicial não tenha apresentado resultados plenamente satisfatórios, é importante destacar que qualquer mudança metodológica exige tempo para consolidação.

Ainda assim, já no primeiro mês de aplicação foram observados avanços relevantes. A diferença percentual entre a massa de emulsão realizada e a planejada, que em novembro de 2024 estava 18% acima do previsto, reduziu-se para 12% em dezembro de 2024, evidenciando a evolução do processo e o impacto positivo das medidas adotadas.

O trabalho teve continuidade com a adoção de ações corretivas voltadas à identificação e mitigação das principais falhas do processo, tais como a negligência na metragem aplicada aos tampões, a falta de calibração adequada dos caminhões de bombeamento, entre outros fatores que impactavam diretamente os resultados. A partir da implementação da nova metodologia e da realização de reuniões semanais para acompanhamento, foi possível manter uma evolução consistente nos indicadores de aderência.

Nos meses subsequentes, a diferença percentual entre a massa de emulsão planejada e a realizada manteve-se em patamares significativamente melhores quando comparados ao início do projeto: 13% acima do previsto em janeiro e 12% em fevereiro. Esses valores, embora ainda superiores ao planejado, já representavam resultados expressivos considerando o curto período de aplicação da metodologia.

No entanto, foi em março de 2025 que se obteve um resultado especialmente satisfatório, com a diferença reduzida para apenas 4% acima do planejado, consolidando assim o êxito do trabalho desenvolvido. Na figura 32 pode se observar a evolução dessa diferença percentual.

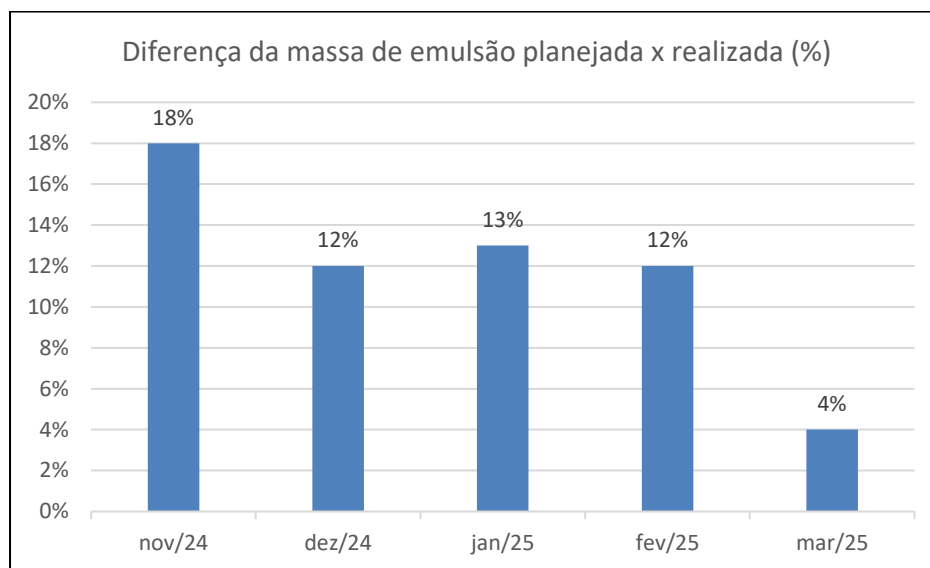


Figura 32. Gráfico da diferença percentual da massa de emulsão planejada (kg) x massa realizada (kg). Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse marco evidencia não apenas a eficácia da gestão e padronização do processo, mas também a relevância do monitoramento contínuo e das ações corretivas sistemáticas para alcançar elevados níveis de eficiência operacional.

7 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou demonstrar a relevância da padronização de dados e da gestão da qualidade no processo de carregamento de lavra subterrânea, tomando como referência as operações realizadas na Mina Aripuanã. A análise dos resultados obtidos, associada às etapas metodológicas propostas, permitiu atender de forma consistente aos objetivos estabelecidos.

O monitoramento sistemático evidenciou falhas recorrentes no processo de desmonte, principalmente relacionadas à ausência de padronização das notas de controle, negligência na metragem de tampões e falta de calibração dos caminhões de emulsão. A identificação desses pontos críticos permitiu a implementação de ações corretivas direcionadas, reduzindo desvios e aumentando a confiabilidade dos registros.

A criação de um novo modelo de planilha de controle representou um avanço significativo. O documento passou a registrar parâmetros essenciais, como comprimento máximo de furos, temperatura, pressão e densidade da emulsão, além da descrição detalhada das frentes de lavra. Essa mudança garantiu maior rastreabilidade e possibilitou análises mais robustas do desempenho operacional.

Os treinamentos realizados com a equipe operacional foram fundamentais para garantir a correta compreensão das informações contidas nos planos de fogo e seu devido preenchimento. O alinhamento entre teoria e prática reduziu inconsistências, assegurou maior aderência ao plano de lavra e promoveu maior integração entre planejamento e execução.

A implementação dos *dashboards* no *Power BI* consolidou-se como um marco do trabalho. Os painéis criados permitiram análises semanais e mensais, oferecendo visão clara sobre desvios de consumo de emulsão, qualidade da emulsão bombeada (densidade, pressão e temperatura) e desempenho das equipes de operação. Essa ferramenta tornou-se um instrumento de gestão proativa, possibilitando a tomada de decisão em tempo real e elevando o nível de controle sobre o processo.

O acompanhamento em campo e a análise pós-desmonte mostraram resultados

expressivos, com significativa redução da diferença entre massa de emulsão planejada e realizada, de 18% em novembro de 2024 para 4% em março de 2025. Além disso, os indicadores de *overbreak* e *underbreak* permaneceram em níveis aceitáveis, confirmando que o monitoramento contínuo contribuiu para maior aderência ao plano de lavra e para a redução de perdas.

De forma geral, este trabalho evidenciou que a padronização das rotinas, aliada ao treinamento da equipe e ao uso de ferramentas digitais de gestão, promove ganhos relevantes em eficiência, rastreabilidade e segurança operacional. O caso da Mina Aripuanã demonstrou que a integração entre planejamento e execução, sustentada por dados confiáveis, é capaz de impactar índices operacionais importantes, como reduzir custos, aumentar a recuperação de minério e minimizar a diluição. Assim, conclui-se que a metodologia aplicada pode servir de referência para outras operações subterrâneas que busquem otimizar seus processos de carregamento e desmonte de rochas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. M. Caracterização física do rejeito de mina polimetálica visando sua aplicação como pastefill em operações de Vertical Retreat Mining. 2023. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2023.

ATLAS COPCO. Blasting and Rock Excavation Handbook. Atlas Copco Rock Drills AB, 2010. Disponível em: <https://www.atlascopcogroup.com>. Acesso em: 24 ago. 2025.

ATLAS COPCO. *Underground Blasting Techniques*. 2. ed. Stockholm: Atlas Copco Rock Drills AB, 2010.

CATALANI, R. Explosivos e desmonte de rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CHAVES, A. P. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais, etapa de desmonte. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CLARK, L. M. Mine design for optimization of recovery and dilution. In: CANADIAN MINING CONGRESS, 30., 1998, Sudbury. Proceedings. Ottawa: CIM, 1998. p. 225-234.

DE SOUZA, E. M. Perfuração e desmonte de rochas. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

DEXPLO. Espoleta Eletrônica. 2025. Disponível em: <https://www.dexplosivos.com>. Acesso em: 11 ago. 2025.

DOTTO, M. Numerical investigation of rock breakage under blasting load. Applied Sciences, v. 13, n. 12, p. 7090, 2024.

EBAD. PRIMACORD® detonating cord. [s.d.]. Disponível em: <https://www.enersys.com/ebad/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

ENAEX. Ibemux® SS – Explosivos a Granel com alta VOD e resistência à água. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/ibemux-ss-2/>. Acesso em: 05 ago. 2025.

GALLEY, A. G.; HANNINGTON, M. D.; JONASSON, I. R. VHMS deposits in submarine volcanic environments. *Ore Geology Reviews*, v. 32, n. 1-2, p. 1–38, 2007.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. Introductory Mining Engineering. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2002.

HUSTRULID, W.; BULLOCK, R. L. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Littleton: SME, 2001.

JIMENO, C. L.; LIZASO, J. M.; CARRERAS, A. Drilling and Blasting of Rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997.

JIMENO, C.; JIMENO, E.; FRANCO, F. J. Desmonte de rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 1997.

JUNIOR, P. C. Técnicas de perfuração e desmonte. Belo Horizonte: Oficina de Textos, 2017.

KOPPE, J. C. Explosivos e desmonte de rochas. Apostila do Curso de Engenharia de Minas. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

KRAMARCZYK, S.; NOWAK, M.; PIOTROWSKI, A. Application of emulsion explosives in underground mining: stability and performance. Journal of Mining Science, v. 58, n. 4, p.

LEITE, D. R.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C.; XAVIER, R. P.; MONTEIRO, L. V. S.; LADEIRA, E. A. Caracterização do Depósito Polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu, Au) de Aripuanã, Mato Grosso. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 2005. Anais [...]. p. 459-462.

LÉONARD, F.; ZHANG, Z.; KREBS, H.; BRUNO, G. Structural and morphological quantitative 3D characterisation of ammonium nitrate prills by X-Ray computed tomography. Materials, v. 13, n. 5, p. 1230, 2020.

MITCHELL, A.; SCOTT, P.; SCOBLE, M. Dilution in underground mining: causes and control. Mining Technology, v. 81, p. 35-48, 1999.

NEXA RESOURCES. Projeto Aripuanã: relatório técnico. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.nexaresources.com>. Acesso em: 29 jul. 2025.

NITRO SIBIR AUSTRALIA. Blast Products | Underground – Nitro Sibir. [s.d.]. Disponível em: <https://www.nitrosibir.com.au/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

OLIVEIRA, P. L. Dimensionamento dos parâmetros de escavação para implementação do método VRM na Mina Aripuanã. 2023. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2023.

ORICA MINING SERVICES. Pentex™ Boosters: Technical Data Sheet. 2025. Disponível em: <https://www.orica.com>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PITBLADO, R. H. Recovery and dilution in sublevel stoping. Transactions of the CIM, v. 82, p. 69-76, 1989.

RENATBAR. A aplicação de espoleta eletrônica na detonação de rochas com explosivos. Slideshare, 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Renatbar/a-aplicacao-de-espoleta-eletrnica-de-rochas-com-explosivos>. Acesso em: 11 ago. 2025.

RICARDO, E.; CATALANI, R. Princípios de detonação e aplicações dos explosivos industriais. São Paulo: CETEM, 2007.

SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION. Drilling and Blasting Handbook. Sandvik AB, 2010. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

SANDVIK MINING. *Drilling and Blasting Optimization Manual*. Tampere: Sandvik Mining and Construction, 2015.

SANSHIDRIÁN, J. A. A review of explosive energy in rock fragmentation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 44, n. 6, p. 709-722, 2007.

SCOBLE, M.; MOSS, A. Dilution in underground mining: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINING, 1994, Austrália. Proceedings. Austrália: AusIMM, 1994. p. 25-32.

SILVA, C. F. Explosivos e acessórios de detonação: fundamentos e aplicações. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

SILVA, V. C. Explosivos na Engenharia de Minas. Apostila Didática. Ouro Preto: UFOP, 2006.

SILVA, R. C. da. Perfuração e desmonte de rochas. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

ZHU, W.; XIE, H.; CHEN, H.; ZHOU, H. Experimental study on water-resistant emulsion explosives. Journal of Hazardous Materials, v. 192, n. 3, p. 1260–1267, 2012.