

ANÁLISE DO TAMPONAMENTO NÃO CONVENCIONAL DA JUNÇÃO DE GARRAFA PET E MATERIAL PÉTREO

ANALYSIS OF THE UNCONVENTIONAL BUFFERING OF THE PET BOTTLE JUNCTION AND STONE MATERIAL

Chaléu Eduardo Peters¹

Davi da Silva Apolinário²

Liércio Feital Motta Junior³

RESUMO

Este trabalho visa analisar a eficiência na fragmentação do desmorte de rochas, comparando dois tipos de tamponamento: o convencional, com brita de granulometria 9,5 mm, e o não convencional, utilizando garrafas PET de 510 ml preenchidas com 50% de água. Para isso, foram realizados três desmontes para cada tipo de tamponamento, avaliando a qualidade da fragmentação, o volume de material removido e a eficiência operacional geral. Os testes mediram diversos parâmetros, incluindo o tamanho das rochas fragmentadas e o impacto na produtividade. Os resultados indicaram que o tamponamento não convencional proporcionou maior produtividade e economia na produção de agregados, demonstrando uma redução significativa no desperdício de material. Conclui-se que o uso de garrafas PET preenchidas com água como tamponamento oferece uma alternativa mais eficiente e sustentável para as operações de desmorte de rochas, contribuindo positivamente para as considerações ambientais na indústria.

Palavras-chave: Desmorte de rochas. Tamponamento. Produtividade. Economia.

ABSTRACT

This study aims to analyze rock fragmentation efficiency in blasting, comparing two stemming types: conventional, using 9.5 mm aggregate, and non-conventional, using 510 ml PET bottles filled with 50% water. Three blasts were conducted for each stemming type, assessing fragmentation quality, material volume removed, and overall operational efficiency. The tests measured various parameters, including the size of fragmented rocks and their impact on productivity. Results indicated that non-conventional stemming provided greater productivity and cost savings in aggregate production, demonstrating a significant reduction in waste material. It is concluded that using water-filled PET bottles as stemming offers a more efficient and sustainable alternative for rock blasting operations, contributing positively to environmental considerations in the industry.

Keywords: Rock blasting. Stemming. Productivity. Cost savings.

¹ Graduando em engenharia civil, Rede de Ensino Doctum, Juiz de Fora – MG, charleueduardo@hotmail.com

² Graduando em engenharia civil, Rede de Ensino Doctum, Juiz de Fora – MG, daviapolina-[rio29@gmail.com](mailto:daviapolina-rio29@gmail.com)

³ Liércio Feital Motta Junior – Professor Orientador, Rede de Ensino Doctum, Juiz de Fora – MG, liercioengenhariajf@doctum.edu.br

Introdução

Desde o Paleolítico, observa-se que os humanos têm adotado inovações para melhorar suas condições de vida (CARDOSO, 2001). Esse processo de adaptação foi crucial para enfrentar desafios como o frio, a fome, a sede e os predadores, levando ao desenvolvimento de diversas estratégias de sobrevivência.

Com o passar do tempo, entende-se que a humanidade aprimorou seus conhecimentos para atender às necessidades, resultando em progresso e organização social. No entanto, notou-se que esse avanço também trouxe guerras como um dos primeiros efeitos. Conforme apontado por Atmore et al. (1978), com o surgimento de comunidades nos vales dos rios, a acumulação de riquezas tornou-se um alvo de cobiça, levando à necessidade de proteção e conquista de territórios.

Com o avanço da civilização, surgem os primeiros registros de atividades produtivas. Martins (1998) destaca que os artesãos foram os primeiros a organizar a produção, definindo prazos, prioridades, especificações e preços para suas encomendas. É válido supor que a produção artesanal cresceu em resposta ao aumento das demandas, mas a decadência da Era artesanal começou com a Revolução Industrial.

Gaither (2001) observa que a Revolução Industrial foi fundamentada na substituição da força de trabalho humano e da energia hidráulica por máquinas, além da implementação do sistema de fábricas. Este movimento inicial, que começou na Inglaterra, se espalhou rapidamente pela Europa e pelos Estados Unidos. O progresso continuou com inovações como o motor a gasolina e a eletricidade, impulsionando ainda mais a industrialização.

A necessidade de expandir a infraestrutura urbana levou ao desenvolvimento de novas técnicas de construção e à utilização de materiais mais resistentes, como o ferro e o aço, o que possibilitou a construção de grandes edifícios e pontes. Esses avanços também estimularam a criação de novos tipos de máquinas e equipamentos, como as perfuratrizes e as betoneiras, que aceleraram ainda mais o processo de construção (HERRMANN, 2010).

À medida que a produção aumentava e as pessoas se concentravam no processo fabril, compreende-se que se tornou necessário construir galpões, residências e vias para o trânsito de pessoas e mercadorias. Essa transformação na estrutura urbana foi fundamental para atender à crescente demanda por materiais de construção. Como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Vista aérea da Vila Maria Zélia, em direção ao sul, implantação do traçado urbano com a igreja ao fundo, em 1978.



Fonte: Santos, R. H. V. (Divisão de Preservação/DPH/SMC)

Nota-se que a vista aérea da Vila Maria Zélia, de 1978, evidencia a expansão das fábricas e o crescimento urbano, refletindo o uso de materiais de construção civil nas habitações da época. Essa imagem simboliza a interconexão entre o desenvolvimento industrial e a formação de vilas operárias, fundamentais para a história urbana e social da cidade.

Hobsbawm (1977) ressalta que “a Revolução Industrial não apenas alterou as formas de produção, mas também exigiu uma reconfiguração completa das infraestruturas urbanas, refletindo uma nova ordem econômica e social”. Percebe-se que a expansão da construção civil gerou uma demanda crescente por pedras e agregados, impulsionando a busca por novas fontes de matéria-prima e técnicas de exploração.

A lavra de minas, definida no artigo 36 do Código de Mineração, “é um conjunto de operações coordenadas com o objetivo de aproveitar industrialmente uma jazida. Isso inclui a extração de substâncias minerais úteis e seu beneficiamento” (HERRMANN et al., 2010). Pode-se afirmar que o material resultante da mineração, como brita e cascalho, tornou-se predominante na indústria da construção, atendendo às necessidades de edificações e obras de infraestrutura, refletindo a busca por maior

padronização e eficiência na utilização dos recursos.

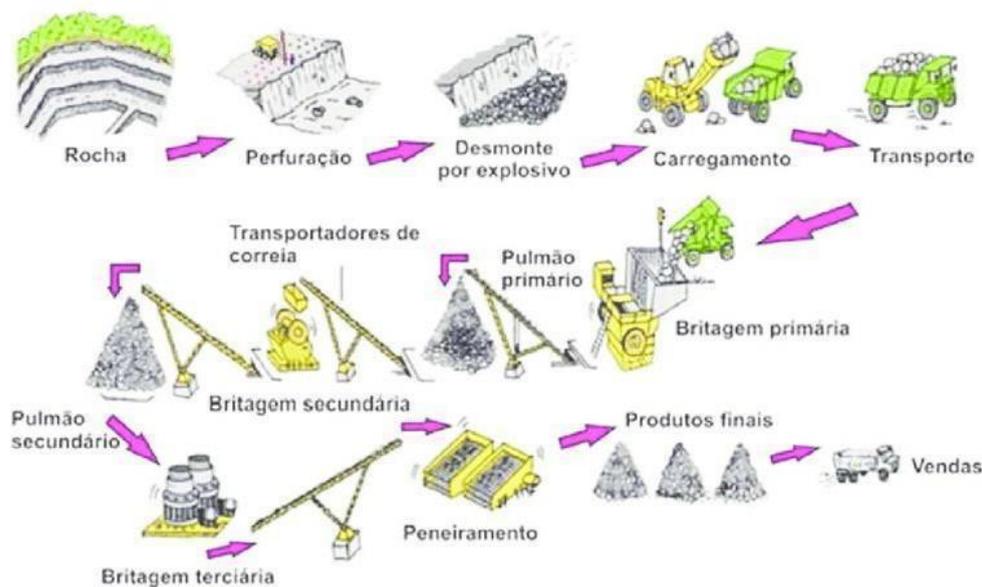
Esta pesquisa tem como objetivo verificar a eficácia de um novo método de tamponamento em operações de mineração, utilizando garrafas PET com água e brita. Parte-se da hipótese de que essa técnica inovadora contribua para a redução dos níveis de ruído e vibração, uma fragmentação mais controlada das rochas e um impacto ambiental minimizado. Assim, o estudo objetiva: Medir e comparar os níveis de ruído e vibração no novo processo de tamponamento; Analisar a fragmentação das rochas e comparar os resultados com o método tradicional; Avaliar o aumento da produtividade e o impacto ambiental da técnica proposta.

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho reside na relevância dos agregados pétreos na construção civil, abrangendo aplicações em ferrovias, portos, aeroportos e diversas outras infraestruturas essenciais. Com a crescente demanda por materiais pétreos, especialmente oriundos do desmonte de rochas por meio de explosivos, esta pesquisa se faz necessária. Identificou-se uma oportunidade de melhoria no sistema de tamponamento, propondo a inserção de uma garrafa PET preenchida com água, juntamente com agregado brita 0, que possui gramatura entre 4,8 mm e 9,5 mm. A adequação proposta neste trabalho irá verificar a eficácia no confinamento dos furos. Se a eficácia desse procedimento não convencional for comprovada, os benefícios incluem uma fragmentação mais eficiente, reduzindo o custo de produção e o impacto ambiental, uma vez que o plástico utilizado nessa operação tem origem na reciclagem.

Desmonte de rochas

O desmonte de rochas por meio de explosivos tem a função de romper a resistência da rocha e fragmentá-la, possibilitando o seu beneficiamento (BERNARDO, 2014). Conforme ainda Bernardo (2014), esse procedimento requer precisão técnica e controle, pois o objetivo é garantir que as rochas sejam fragmentadas de forma eficiente e segura, minimizando impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade nas operações de mineração. Nesse contexto, nota-se que o processo de detonação envolve algumas etapas, tais como: locação dos furos, perfuração e detonação, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo produtivo



Fonte: Iramina et al. (2009)

A figura 2 acima apresenta o fluxo do processo produtivo do desmonte de rochas, desde a rocha bruta até o produto final disponível para venda. Entende-se que as etapas essenciais, como perfuração, detonação, triagem e logística são fundamentais para a fragmentação da rocha. Este fluxograma oferece uma visão clara de como cada fase interage para transformar a rocha em um produto final.

O beneficiamento de rochas para a obtenção de materiais utilizados em vários setores, como construção civil, portos, aeroportos, ferrovias, etc., demanda algumas fases até que receba classificação e seja reconhecido como material pétreo (BERNARDO, 2014). Nesse contexto, percebe-se que estas fases são cruciais para o processo, como exemplificado na figura 3, demonstrando o lastro ferroviário com material agregado, brita 3, gramatura entre 28 mm à 75 mm. A adequada separação e classificação do material após a detonação são fundamentais para garantir que o produto final atenda às especificações exigidas para cada aplicação. Isso inclui a verificação do tamanho, qualidade e resistência dos fragmentos, fatores que influenciam diretamente a performance do material nas obras. A combinação eficaz de cada uma dessas etapas assegura a obtenção de um produto de alta qualidade, alinhado às normas técnicas e aos requisitos de segurança e durabilidade exigidos no mercado (BERNARDO, 2014).

Figura 3 – Lastro Ferroviário



Fonte: NEOBRITA.

Percebe-se que a figura 3 apresenta o lastro ferroviário feito com brita 3, essencial para garantir a estabilidade das vias. Compreende-se que o beneficiamento das rochas até sua classificação como material pétreo é crucial para a infraestrutura ferroviária.

Antes do início da exploração do material rochoso, uma série de atividades legais junto às autoridades competentes é necessária para a liberação de licenças de operação. Entre esses órgãos, incluem-se a prefeitura (Secretaria Municipal de Meio Ambiente), o estado (Instituto Estadual do Ambiente - INEA e Polícia Civil), a União; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA e Exército Brasileiro (ALONSO; GOMEZ; HERBERT, 2013).

Em consonância com todos os órgãos fiscalizadores, é traçado o Plano de Aproveitamento Econômico - PAE, que tem o objetivo de informar, mapear e abordar questões como a área de escoamento do material pétreo, a evolução da exploração da jazida mineral (BRASIL, 1967). Nesse sentido, a regulamentação especifica que:

Art. 39 - O plano de aproveitamento econômico da jazida será apresentado em duas vias e constará de:

I - Memorial explicativo;

II - Projetos ou anteprojetos referentes:

- a) ao método de mineração a ser adotado, fazendo referência à escala de produção prevista inicialmente e à sua projeção;
- b) à iluminação, ventilação, transporte, sinalização e segurança do trabalho, quando se tratar de lavra subterrânea;
- c) ao transporte na superfície e ao beneficiamento e aglomeração do minério;
- d) às instalações de energia, de abastecimento de água e condicionamento

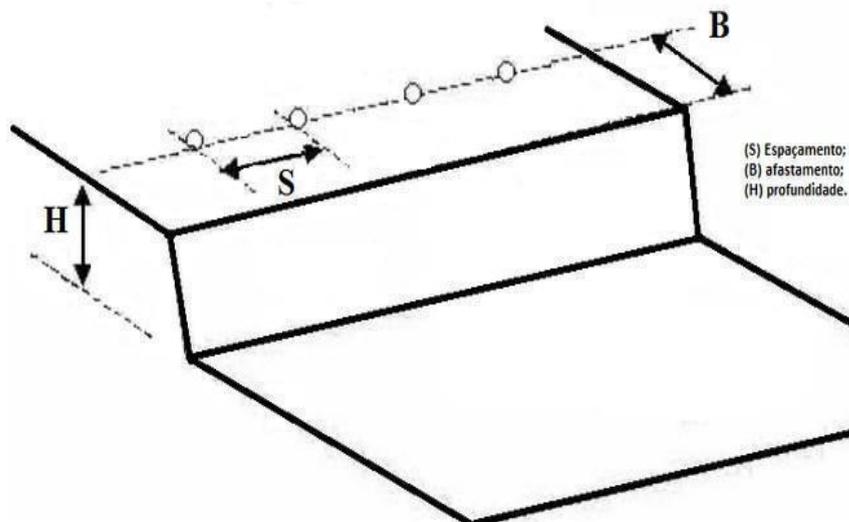
de ar;
 e) à higiene da mina e dos respectivos trabalhos;
 f) às moradias e suas condições de habitabilidade para todos os que residem no local da mineração;
 g) às instalações de captação e proteção das fontes, adução, distribuição e utilização de água, para as jazidas da Classe VIII.
 Art. 40 - O dimensionamento das instalações e equipamentos previstos no plano de aproveitamento econômico da jazida, deverá ser condizente com a produção justificada no Memorial Explicativo, e apresentar previsão das ampliações futuras.
 (BRASIL, 1967)

Pode-se concluir que o projeto de lavra é uma etapa inicial essencial na exploração de minerais, pois define as atividades necessárias para assegurar a viabilidade econômica da operação. Nesse projeto, são considerados serviços como o decapeamento de terra, a remoção da vegetação e a abertura de vias de acesso, todos fundamentais para dar início à extração mineral de forma eficiente

Com todas as atividades primárias executadas, inicia-se o processo de beneficiamento do material. Essa pesquisa constatou que esse processo conta com as seguintes fases.

Realização da topografia, nesta parte tem o objetivo de nivelar a lavra de acordo com o projeto. Todos os furos recebem uma identificação e têm altura em função do projeto. Uma planilha é levantada e ficará em posse do operador da máquina perfuratriz (SILVA, 2009), como ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Superfícies das bancadas



Fonte: VALCARENGHI et al. (2015).

Percebe-se que a figura 4 representa o desenho de uma bancada de mineração, evidenciando a importância da topografia no nivelamento da lavra. Nesta fase, cada furo é identificado e ajustado segundo as especificações do projeto.

Segundo Geraldi (2011), “a malha de perfuração é a área resultante do produto das distâncias, afastamento x espaçamento (em metros), adotadas para locação dos furos em uma frente de escavação de rocha”, ou seja, compreende-se que nesta etapa é realizada a marcação dos furos utilizando piquetes, tinta e linha.

Após todo mapeamento e marcação dos furos, a próxima etapa da lavra que envolve a utilização de explosivos, avança para uma etapa fundamental de perfuração da rocha, essencial para o carregamento dos furos que serão detonados. Conforme Silva (2009), esses furos consistem em aberturas cilíndricas criadas pela perfuratriz, que usa brocas específicas para penetrar a superfície rochosa. Compreende-se que este passo é crucial, pois permite a inserção dos explosivos na formação rochosa, facilitando o processo de fragmentação.

Gama (1977) afirma que a eficiência da perfuração é afetada por diversos fatores, incluindo a composição e as propriedades mecânicas da rocha. Ele destaca que a escolha da perfuratriz e a utilização de fluidos de limpeza são essenciais para a remoção eficaz dos fragmentos durante o processo. Conclui-se que essas variáveis, combinadas, são fundamentais para garantir que a perfuração ocorra de forma eficiente, otimizando os resultados na operação de desmonte. A figura 5 a seguir ilustra a perfuratriz hidráulica mencionada.

Figura 5 – Perfuratriz hidráulica



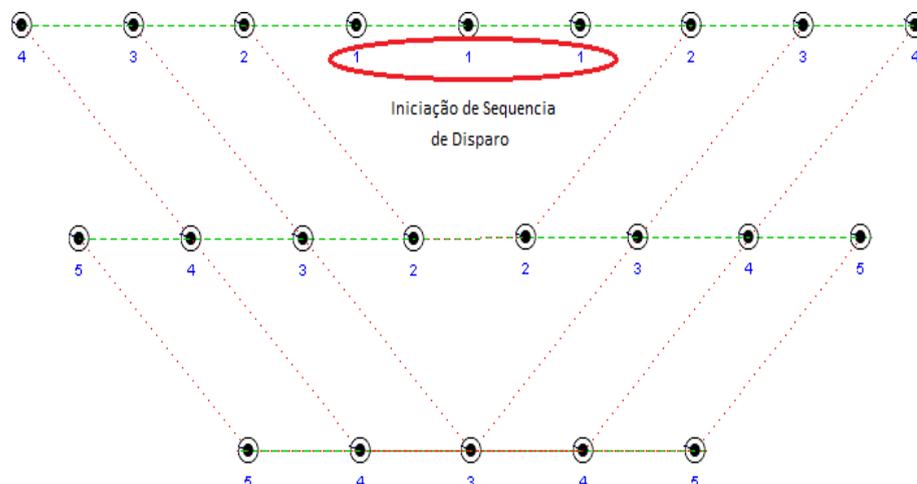
Fonte: Epiroc, Conexão Mineral (2023).

A figura 5 retrata uma perfuratriz hidráulica, uma máquina fundamental na mineração que realiza furos em rochas para a extração de minerais. Esse equipamento é projetado para operar em terrenos difíceis, utilizando pressão hidráulica para facilitar a perfuração e aumentar a eficiência. Com sua automação e tecnologia avançada, ela otimiza a operação, reduzindo o tempo de trabalho e melhorando a segurança nas minas.

Após a execução da marcação e perfuração das rochas, o próximo passo crucial no processo de desmonte é a elaboração do plano de fogo. Pode-se dizer que este plano é fundamental para garantir a eficácia e a segurança da detonação, adequando a razão de carga à quantidade e ao tipo de explosivo disponível. De acordo com Mendes (2015), o plano de fogo consiste em um conjunto estruturado de etapas para o desmonte de rochas com explosivos, incluindo o cálculo da quantidade necessária e o tipo de explosivo, além de especificações sobre a litologia da rocha. Esse plano detalha também a disposição dos furos, a montagem dos explosivos, o uso de lubrificantes na perfuração e uma estimativa dos custos totais envolvidos.

Entende-se que, após a obtenção dos quantitativos de materiais, é feita uma comunicação ao Exército Brasileiro para solicitar a autorização necessária à compra desses produtos controlados. Essa exigência remete-se à necessidade de seguir as regulamentações vigentes, conforme destacado por Silva (2009), assegurando a conformidade com as normas de segurança e controle. A figura 6 ilustra o design de um plano de fogo.

Figura 6 – Design plano de fogo



Fonte: VALCARENCHI et al. (2015).

Observa-se na figura 6 que o croqui do plano de fogo é essencial para o desmonte controlado de rochas, detalhando a disposição dos furos de explosão e a sequência de detonação. Essa representação visual ajuda a garantir a eficiência e a segurança durante a execução, minimizando impactos ambientais e riscos para os trabalhadores

Carregamento e desmonte da bancada, com todos os materiais previstos no plano de fogo adquiridos, inicia-se o carregamento. Primeiramente é realizada a escorva, logo após é realizado o carregamento do furo com nitrato de amônio, material explosivo, até a altura descrita no plano de fogo. Após o procedimento, temos o carregamento do furo atendendo as especificações do plano de fogo (JKMRC, 2000 apud MORAIS, 2004) .

Com o furo devidamente carregado, a próxima etapa é o tamponamento, cujo objetivo é confinar a carga explosiva a fim de garantir maior aproveitamento de sua energia, reduzir o ruído e evitar ultra lançamento de rochas oriundas da detonação (MORAIS, 2004).

Tamponamento

O tamponamento é uma etapa crucial no processo de desmonte de rochas. Muitas vezes, sua importância é subestimada, porém um tampão realizado corretamente garante um baixo custo de produção, mantendo a energia dentro do furo e potencializando a fragmentação (DOBRILOVIC ET AL., 2005).

De acordo com Dhekne (2015), apenas 20% da energia do explosivo é efetivamente utilizada no desmonte, enquanto os 80% restantes são dissipados na forma de ruído na atmosfera e vibração, propagando-se no maciço rochoso.

Entende-se que além do aspecto econômico, o sistema de tamponamento desempenha um papel crucial na segurança do desmonte. Como mencionado anteriormente, 80% da energia dos explosivos se dissipam, resultando em ruído e vibração. Um controle ineficiente da energia liberada pode resultar em ruído excessivo, alta vibração e lançamento excessivo de rochas, como ilustrado na figura 7. Portanto, a escolha do método adequado de tamponamento é essencial para minimizar esses impactos e garantir a integridade das operações e a segurança dos trabalhadores.

Figura 7 – Ultra lançamento de rochas



Fonte: Pontes, Julio & Lima, Vera & Silva, Valdenildo. (2020).

A figura 7 acima ilustra o fenômeno do ultra lançamento de rochas durante o processo de explosão, evidenciando a importância de um planejamento adequado para minimizar riscos. Esse fenômeno pode causar danos significativos às estruturas próximas e ao meio ambiente. A figura 8 a seguir, mostra um caso real, ocorrido na Bahia/BA em 2016, rachaduras resultantes da vibração, destacando como a pressão gerada nas explosões afeta a integridade das rochas circundantes e o impacto da mineração nas áreas adjacentes.

Figura 8 – Dano ocasionado por vibração de desmonte em Pedreira Odessa – Bahia/BA



Fonte: Foto leitor/Bahia.ba.

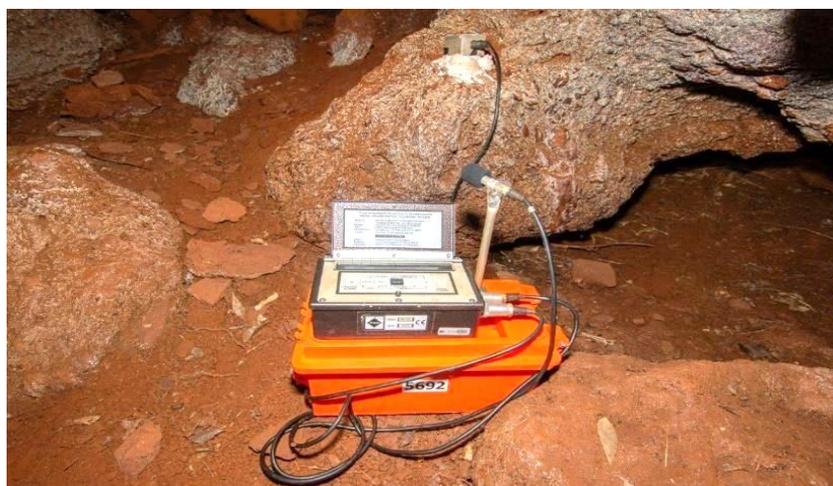
A figura 8 retrata uma detonação na pedreira Odessa, em Nazaré das Farinhas/BA, que causou sérios prejuízos aos moradores, com mais de dez casas atingidas e veículos danificados. Isso gerou um protesto, resultando no fechamento da BA-046 por cerca de duas horas, conforme relatado:

“...a explosão teria causado uma chuva de pedras que foram jogadas sobre as casas e, com o impacto, ficaram bastante danificadas. Alguns veículos também foram atingidos. Revoltados com o ocorrido, alguns moradores fizeram um protesto fechando um trecho da BA-046...” (BAHIA.BA, 2024)

Tendo enfoque no controle e normatização do desmonte com uso de explosivo, a NBR 9.653 (ABNT, 2015), estabelece limites de velocidades de partículas de vibração (PPV) podendo ser igual ou inferior a 15 mm/s nos arredores das mineradoras. Ainda no texto da referida norma, fica estabelecido que em nenhuma hipótese poderá ocorrer ultra lançamento, sob pressões atmosféricas e onda de baixa frequência (ressonância).

Para medir e comprovar a conformidade com a NBR 9.653, é necessário instalar um sismógrafo, figura 9. De acordo com a Sociedade Internacional dos Engenheiros de Explosivos (ISEE, 2015), a sismografia no desmonte de rochas não apenas assegura que as regulamentações federais, estaduais e locais sejam atendidas, mas também permite avaliar a eficácia da detonação. A precisão na leitura dos níveis de vibração do solo e da pressão atmosférica é fundamental para ajustar os processos às normas vigentes e verificar o desempenho dos explosivos.

Figura 9 – Dano ocasionado por vibração de desmonte em Pedreira Odessa – Bahia/BA



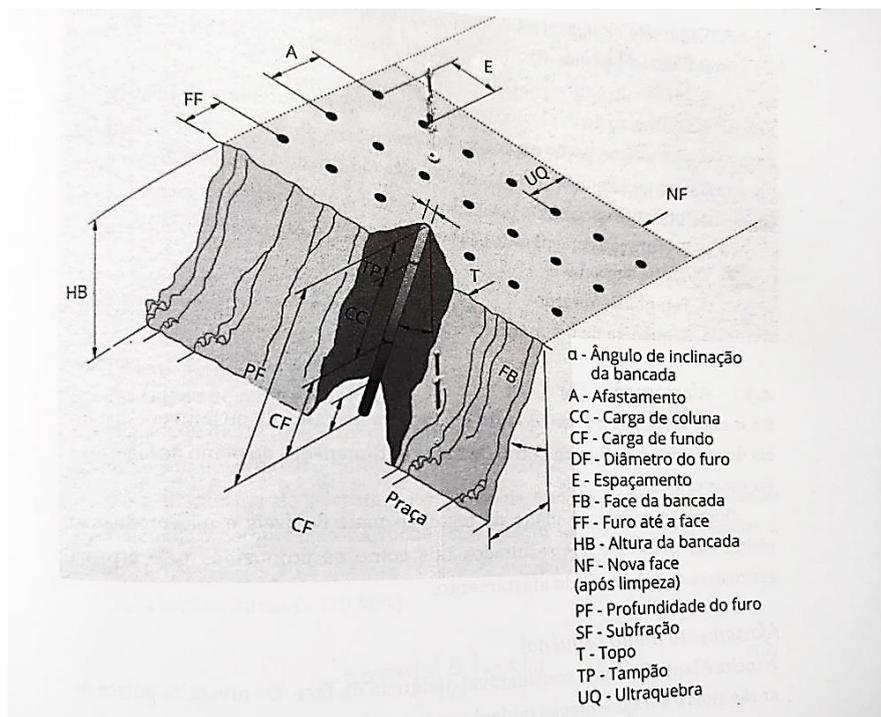
Fonte: CARSTE.

Sismógrafo é um instrumento essencial na monitorização de vibrações do solo, utilizado em diversas aplicações, como a análise de desastres naturais e a segurança em operações de mineração. Ele registra movimentos sísmicos e fornece dados cruciais para avaliar a intensidade das explosões e seus impactos nas áreas circunvizinhas (MACHADO E ASSUMPÇÃO, 2008). Pode-se dizer que sua utilização é fundamental em operações de mineração, garantindo a segurança e minimizando riscos para a população.

O tampão, que é a parte superior do furo, deve ter uma extensão equivalente ao afastamento e é preenchido com materiais inertes, como areia, pó de pedra e brita, sem conter explosivos. Sua função principal é confinar os furos, evitando a fuga de gases explosivos, e também reduzir os impactos da explosão de ar e minimizar o lançamento excessivo de fragmentos de rocha (RICARDO; CATALANI, 1977).

O tamponamento dos furos é realizado com material inerte, isto é, sem possibilidade de causar reação química e física. Em geral é usado o tampão de brita na gramatura 0 (material pétreo), os detritos sem classificação oriundos do processo de perfuração e a junção da brita 0 com plug. A definição da altura do tampão é dada pelo valor do afastamento da primeira carreira de furos até a face da bancada (CAMERON E HAGAN, 1996), conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Variáveis geométricas de um plano de fogo para bancadas



Fonte: Manual Britante (2010)

Com todos os trabalhos realizados, resta à última etapa, a detonação. Esse procedimento requer o cerco de uma área que recebe o nome de área quente (local com possibilidade de receber fragmentos de rocha). Também se faz necessário o uso de rádios comunicadores para o diálogo, sirene intermitente para aviso sonoro e placas de sinalização da área de risco (ALONSO; GOMEZ; HERBERT, 2013).

Ao ser iniciado o processo de detonação, esse ocorre em aproximadamente 3 minutos, após a indicação sonora da detonação, o blaster fará a constatação e verificação da detonação, e ao seu sinal os acessos são liberados. Após todos esses processos, o material fragmentado com explosivos está pronto para as próximas etapas de carregamento e beneficiamento (MORAIS, 2004).

Metodologia

O caráter de pesquisa deste trabalho é aplicada, do ponto de vista de seus objetivos, este trabalho tem caráter de pesquisa descritiva. Este trabalho obteve como referência o método de pesquisa bibliográfica e experimental, e a análise dos dados e resultados obtidos de modo quantitativa/comparativa. O desenvolvimento da teoria e prática deste trabalho, se deram em algumas etapas, as quais são; pesquisas bibliográficas, local para teste, parâmetros para comparação de tampão e execução da ideia proposta.

Toda a base teórica deste trabalho foi obtida através de pesquisa no site google acadêmico, livros e sites de fabricantes. No google acadêmico, foram pesquisadas palavras-chave como; tampão, desmonte de rocha e explosivos. Foram identificados aproximadamente 60.000 resultados iniciais, sendo a seleção realizada com base na análise dos títulos. Desses, 25 foram analisados de forma mais detalhada, resultando na escolha de 8 trabalhos que foram efetivamente estudados e utilizados como base para gerar citações que conferissem maior fundamentação ao presente estudo. Além disso, um livro foi pesquisado e estudado, gerando também contribuições citadas ao longo do trabalho.

A realização desse trabalho implicou na autorização de uma empresa no ramo de mineração de rochas a permitir a realização dos estudos e testes. O estudo foi realizado na cidade de Matias Barbosa, no estado de Minas Gerais. A empresa que autorizou o estudo é a Petra agregados indústria e comércio de agregados LTDA, figura 11 . Essa atua no ramo de mineração e beneficiamento de rocha que atende a diversos setores como; construção civil, pavimentação, ferroviária e outros.

Figura 11 - Vista aérea (Petra MG) Matias Barbosa - MG



Fonte: Google Earth (2024)

Parâmetros para a comparação de tampão

Este estudo teve início a partir de uma demanda específica de um dos sócios proprietários da pedreira em análise, o qual relatou diversas queixas relacionadas ao elevado ruído decorrente das detonações, além de dificuldades com a fragmentação das rochas e a presença de repé (projeções salientes de rocha no piso). Com base nessas demandas, propôs-se a realização de testes voltados à melhoria do processo de detonação, utilizando um tampão alternativo, composto por garrafas PET preenchidas com água e brita com granulometria zero.

O método de tamponamento tradicionalmente empregado pela empresa, que consistia na utilização de detritos de rocha sem classificação para confinamento dos explosivos, revelou-se ineficaz. Embora existam soluções mais eficientes disponíveis no mercado, como o Tamplug — um copo moldável de plástico com estrutura cônica e espessa, desenvolvido para otimizar o confinamento de gases —, o custo elevado desse material inviabilizou sua adoção para esta operação.

Assim, deu-se início à preparação para o teste experimental do tampão alternativo. O primeiro passo envolveu a coleta dos dados técnicos pertinentes à perfuração e à detonação, incluindo diâmetro dos furos, malha de perfuração, altura da bancada, razão de carga, inclinação da bancada e número total de furos. Com essas informações em mãos, foi elaborado o plano de fogo necessário para o

desmonte experimental.

Materiais e métodos

A metodologia utilizada neste trabalho baseia-se na adição de brita de granulometria 0 (com dimensão de 9,5 mm a 4,75 mm) e garrafas PET com água. Conforme Moraes (2004), o tampão pode ser composto por materiais como areia, brita ou resíduos da perfuração, visando o confinamento dos gases provenientes da deflagração do explosivo, de modo a direcionar a energia liberada para o maciço rochoso. De acordo com Silva (2019), o cálculo do comprimento do tampão segue a fórmula $T = 0,7 \times \text{afastamento de carreiras}$. Já Arroyo (2020) aponta que um tampão excessivo, com valor superior a 0,7 vezes o afastamento, pode resultar em blocos grandes e matações, enquanto um tampão inferior a essa proporção aumenta o risco de ultra lançamento e de fragmentação insuficiente.

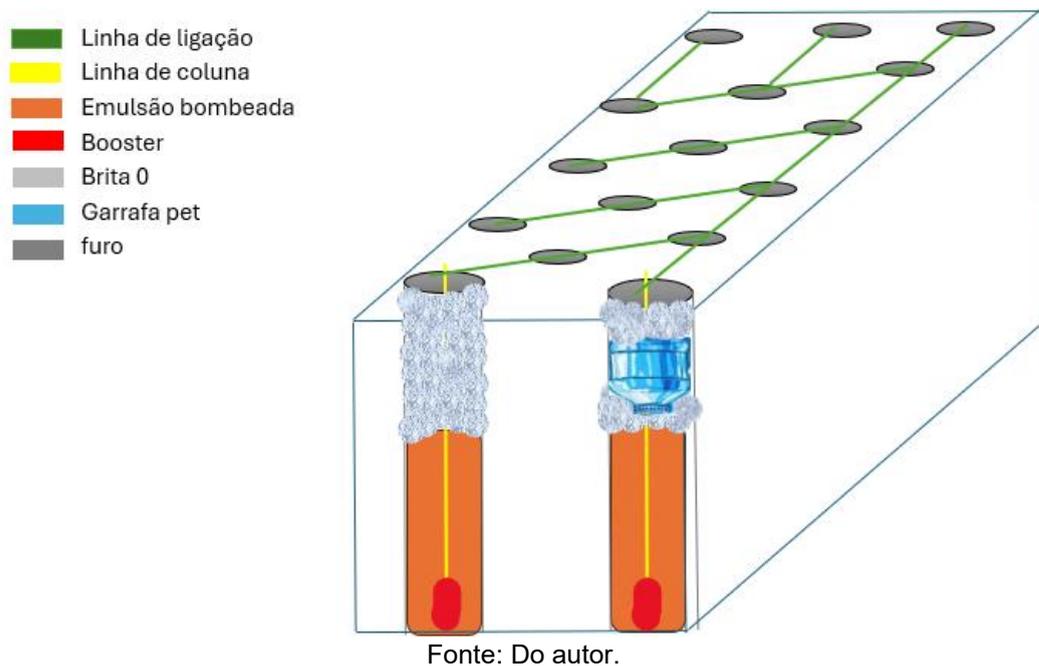
Análise do plano do fogo.

Com o objetivo de comparar a eficiência entre o tampão não convencional, composto por brita de granulometria 0 (9,5 mm a 4,75 mm) e garrafa PET com água, e o tampão convencional realizado com pó de rocha, este estudo estabelece a mesma configuração de desmonte para ambos os cenários, conforme descrito a seguir:

- I. Malha de perfuração: 1,60 m x 4,50 m;
- II. Diâmetro de perfuração: 3 polegadas;
- III. Inclinação dos furos: 0°;
- IV. Altura do tampão: 1,50 m;
- V. Explosivo: emulsão bombeada;
- VI. Iniciação: espoleta não elétrica;
- VII. Explosivo adicional: emulsão encartuchada.

A distinção entre os métodos reside exclusivamente no tipo de material utilizado para o tamponamento, como ilustrado na Figura 12. A análise dos resultados permitirá avaliar qual sistema oferece melhor desempenho em termos de controle da energia liberada, ruído, vibração e segurança. Além disso, será possível identificar as vantagens e desvantagens de cada técnica em relação à eficiência operacional e ao impacto ambiental nas operações de desmonte.

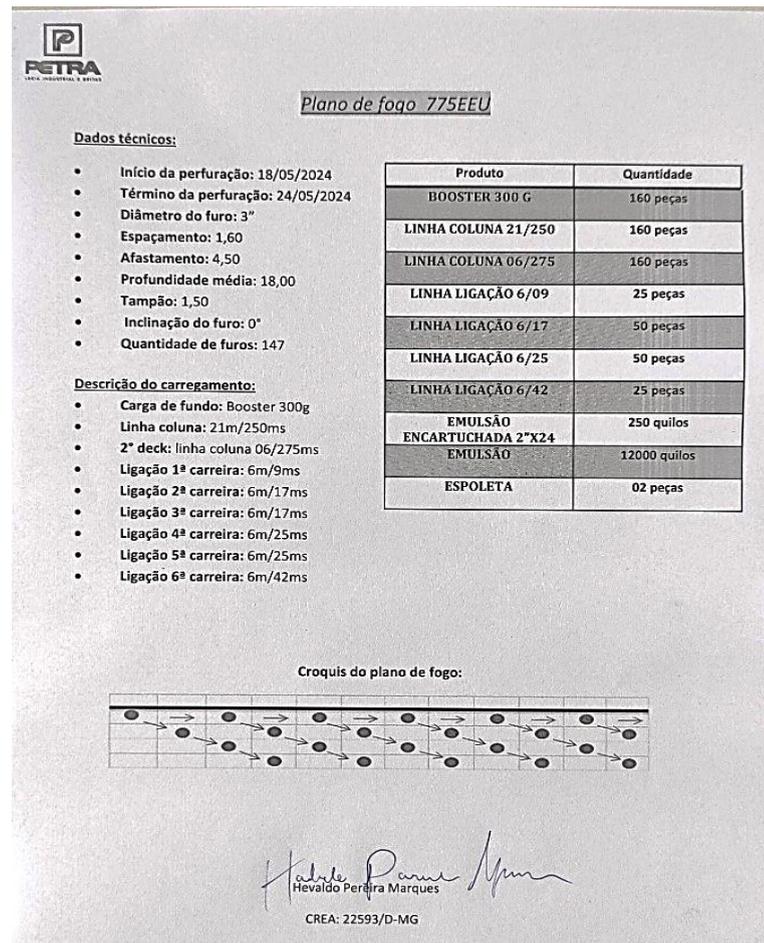
Figura 12 - Sistema de Tamponamento



A Figura 12 acima ilustra as duas configurações de tamponamento empregadas: à esquerda, o método convencional utilizado pela empresa, e à direita, o método não convencional com garrafa PET e brita 0. Nota-se que, em ambas as situações, a quantidade de material explosivo utilizada para a emulsão foi mantida constante.

A Figura 13 apresenta os planos de fogo utilizados nos desmontes, elaborados sob a supervisão técnica do engenheiro de minas Hevaldo Pereira Marques, CREA: 22593/D-MG. Esses planos seguem um padrão unificado, já que a metodologia foi estabelecida para garantir que os testes sejam realizados em condições equivalentes para ambos os cenários analisados. O objetivo é obter uma comparação precisa entre as duas abordagens de tamponamento, levando em consideração os aspectos de segurança, eficiência na fragmentação das rochas e o impacto ambiental resultante. A padronização das condições de desmonte também visa a minimização de variáveis externas, permitindo que os resultados observados sejam diretamente atribuídos ao tipo de tampão utilizado. A análise dos resultados será realizada de forma quantitativa, levando em conta parâmetros como a quantidade de fragmentos, a dispersão das rochas e os níveis de vibração e ruído gerados durante o processo de detonação. Com isso, espera-se determinar qual dos métodos oferece o melhor desempenho geral, considerando os custos, a segurança e a sustentabilidade.

Figura 13 - Plano de Fogo



Fonte: Petra MG

A figura 13 acima apresenta um exemplo do plano de fogo elaborado, destacando informações pertinentes à bancada de explosão. Inclui a quantidade de furos, espaçamentos, profundidades e cargas de materiais explosivos, além da interligação entre cada furo.

O procedimento de carregamento das duas propostas de tampão, convencional e não convencional, é conduzido em conformidade com todas as etapas delineadas no referencial teórico. A diferença entre os métodos reside exclusivamente na abordagem de tamponamento. No sistema convencional, o tamponamento é realizado utilizando apenas material pétreo, especificamente brita com granulometria de 9,5 mm, conforme ilustrado na Figura 14. Já no método não convencional, é empregado um tampão composto por garrafas PET preenchidas com água, juntamente com a brita 0. A escolha dos materiais de tamponamento impacta diretamente na eficiência do processo, influenciando a dispersão da energia da explosão e, conseqüentemente, a fragmentação da rocha.

Figura 14 - Tamponamento com brita 0 (9,5mm)



Fonte: Petra MG

Na Figura 14, observa-se a implementação do tamponamento convencional, que utiliza brita proveniente do processo de perfuração dos furos. Essa abordagem é caracterizada pelo uso de material pétreo para garantir o confinamento adequado dos gases gerados pela detonação, otimizando a eficácia do desmonte.

No sistema de tamponamento não convencional, o tampão é composto por brita de granulometria de 9,5 mm e garrafas PET de 510 ml, as quais são preenchidas com 50% de água, conforme ilustrado na Figura 15. Essa abordagem inovadora busca otimizar o confinamento dos gases gerados durante a detonação, promovendo uma eficácia semelhante ou superior em comparação com os métodos convencionais. O uso das garrafas PET como elemento de tamponamento pode representar uma alternativa mais sustentável e econômica, além de possibilitar o aproveitamento de materiais recicláveis. A combinação entre água e brita nas garrafas PET é projetada para melhorar o controle da dispersão de energia e reduzir os impactos ambientais.

Figura 15 - Tamponamento com garrafa pet e brita 0 (9,5mm)



Fonte: Petra MG

Análise fragmentação.

Concluídas as etapas dos desmontes e após o processo de britagem primária, foi possível realizar uma avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos em ambos os tipos de desmonte: o tampão convencional, constituído por brita 0 com granulometria de 9,5 mm, e o tampão não convencional, que combina brita de granulometria 9,5 mm e garrafas PET de 510 ml preenchidas com 50% de água. (Figura 16).

Figura 16 - Escorva do furo



Fonte: Petra MG

A escorva do furo refere-se ao processo de preenchimento dos furos de perfuração com um material, geralmente composto por rochas e outros detritos, que visa garantir a estabilidade e a segurança durante as operações de desmonte. Esse procedimento é fundamental para evitar a perda de eficiência na detonação e minimizar o risco de deslizamentos.

Resultados

Com base nos testes realizados para comparar e medir a eficácia dos dois tipos de tampão, o convencional, utilizando brita 0 com granulometria de 9,5 mm, e o não convencional, que incorpora brita de granulometria 9,5 mm juntamente com garrafas PET de 510 ml preenchidas com 50% de água. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 17. Esses dados são essenciais para a avaliação do desempenho de cada método de tamponamento no contexto dos processos de desmonte.

Figura 17 – Comparação visual dos fragmentos



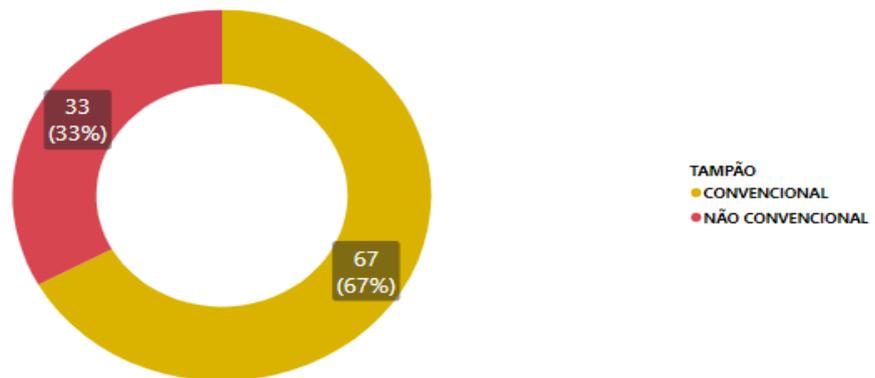
Fonte: Petra MG

As fotografias de comparação apresentadas permitem uma análise visual da fragmentação dos desmontes utilizando as duas propostas de tampão. Na imagem à esquerda, observa-se o método convencional, que utiliza restos de pedras provenientes das perfurações, enquanto na imagem à direita é exibido o método não convencional, que combina garrafa PET e brita 0. Para facilitar a comparação, uma bola oficial de voleibol, com dimensões de 21 cm de diâmetro, foi utilizada como referência, possibilitando uma avaliação qualitativa da eficiência dos desmontes. Ambas as fotografias foram capturadas sob o mesmo ângulo e distância, garantindo a

consistência da análise.

O gráfico 1 apresenta uma redução de 34% nos engaiolamentos de pedras no britador. Essa diminuição é crucial, pois os engaiolamentos podem interromper o processo de beneficiamento da rocha, resultando em perdas significativas de produtividade. Essa interrupção gera custos adicionais, não apenas devido ao aumento no consumo de energia elétrica para os motores, mas também pelo consumo de combustível dos equipamentos de transporte, que permanecem operando enquanto aguardam a liberação do britador.

Gráfico 1 - Engaiolamento britador primário



Fonte: Petra MG

Outro indicador levantado para análise é o número de maticos por tipo de tamponamento, um dado monitorado pela mineradora Petra MG. Esse controle é feito pela contagem dos maticos gerados durante o rompimento. Para determinar se uma pedra é considerada um matico, avalia-se se ela é passante pelo britador primário, Figura 18.

Figura 18 - Pedra engaiolada no britador primário



Fonte: Petra MG

A figura 18 mostra o engaiolamento de matacos no britador primário. Mataco é o termo utilizado para definir blocos de rochas maiores que a capacidade de processamento do britador, impossibilitando sua passagem e exigindo intervenções, como o desmonte secundário por um rompedor hidráulico, Figura 19.

Figura 19 - Rompedor Hidráulico

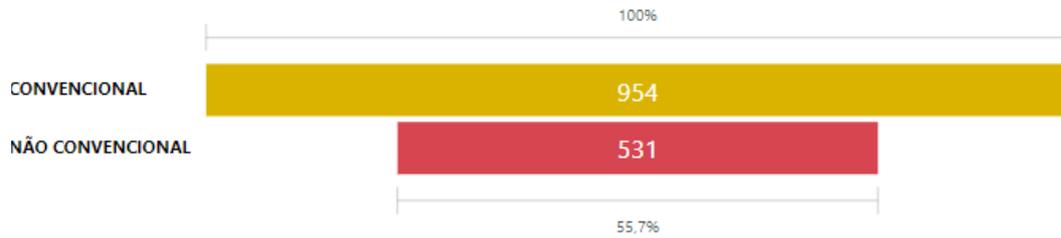


Fonte: Petra MG

Um rompedor hidráulico é um equipamento utilizado principalmente em mineração e construção civil para fragmentar rochas ou concreto de grandes dimensões, facilitando o seu processamento. Acoplado geralmente a escavadeiras, ele utiliza a pressão hidráulica para gerar impactos contínuos, quebrando materiais resistentes que não podem ser processados diretamente pelo britador.

O gráfico 2, indica que o uso do sistema de tamponamento não convencional proporcionou um ganho de performance de aproximadamente 29% em comparação ao tampão convencional, evidenciando uma melhora significativa na eficiência do desmonte. Esse aumento na eficiência pode ser atribuído ao melhor controle da energia liberada e à fragmentação mais uniforme das rochas. Além disso, o método não convencional demonstrou redução nos custos operacionais devido à diminuição do tempo de execução e ao menor consumo de explosivos. A análise de resultados sugere que, ao longo do tempo, essa abordagem pode se tornar uma solução mais vantajosa para as operações de desmonte em grande escala.

Gráfico 2 - Quantidade de matacos por tipo de tampão

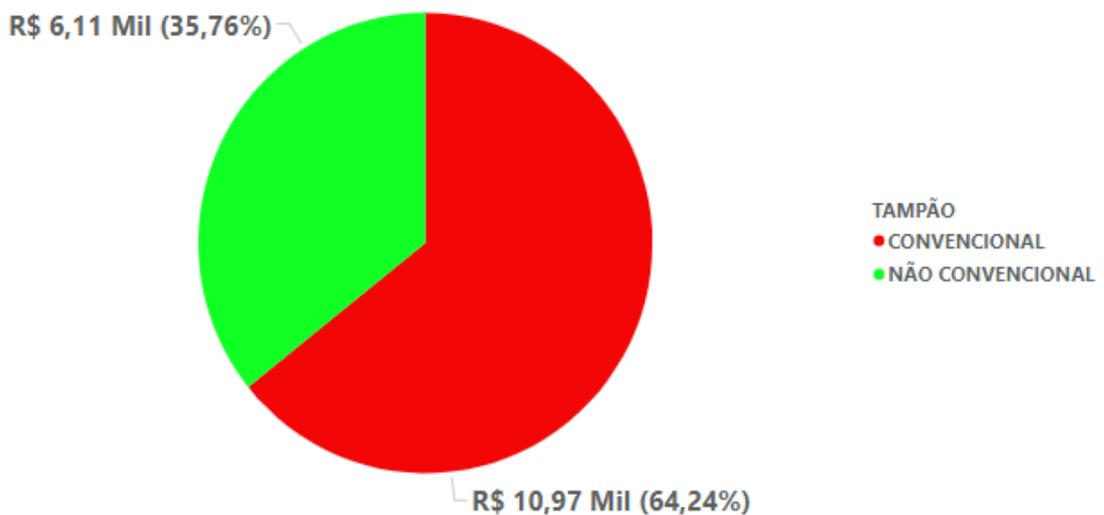


Fonte: Petra MG

O gráfico 2 demonstra que a quantidade de matacos foi significativamente maior no sistema de tamponamento convencional em comparação ao sistema não convencional, indicando que este último promove uma fragmentação mais eficiente das rochas.

A análise do custo médio do desmonte secundário, voltada ao rompimento de matacos, demonstrou que o uso dos diferentes sistemas de tamponamento – convencional (brita 0, granulometria 9,5mm) e não convencional (brita 0 e garrafas PET de 510 ml com água) – impacta significativamente na operação. Conforme indicado no Gráfico 3, em três desmontes com cada tipo de tampão, observou-se uma economia média de R\$ 4.860,00 ao optar pelo sistema não convencional, considerando o custo/hora do equipamento para o desmonte secundário.

Gráfico 3 - Custo desmonte secundário por tipo de tampão



Fonte: Petra MG

De acordo com o gráfico 3 apresentado, conclui-se que o uso do sistema de tamponamento não convencional contribui para uma redução significativa dos custos após a desfragmentação da rocha, refletindo-se na linha de produção subsequente.

Conclusão

Com base nos dados obtidos na etapa anterior deste estudo, o tamponamento não convencional, utilizando brita 0 com granulometria de 9,5 mm, demonstrou maior eficiência em comparação ao sistema de tamponamento convencional, que emprega brita com a mesma granulometria (9,5 mm) associada a garrafas PET de 510 ml preenchidas com 50% de água. Os resultados evidenciaram uma redução de 34% nos engaiolamentos, indicando um ganho significativo de produtividade, além de uma diminuição de 45% na geração de matacos, reduzindo a necessidade de desmonte secundário. Esse sistema também proporcionou uma redução de 44% nos custos associados ao desmonte secundário e uma queda de 28% na ineficiência horária de produção.

Ademais, o tamponamento não convencional contribuiu para a melhoria da qualidade dos materiais pétreos, uma vez que sua fragmentação mais uniforme, em comparação ao método convencional, assegura que o britador, equipamento responsável pela fragmentação das rochas, opere com maior densidade e menor número de vazios, otimizando o atrito e a eficiência no processamento das rochas.

Por fim, os benefícios socioambientais também são significativos, considerando que as garrafas PET, que frequentemente são descartadas de forma inadequada e prejudicial ao meio ambiente, encontram uma aplicação sustentável no contexto do desmonte de rochas, promovendo uma destinação mais responsável e ecológica desses resíduos.

Referências Bibliográficas

ALONSO, José Bernaola; GOMÉZ, Jorge Castilla; HERBERT, Juan Herrera. Perforación y voladura de rocas em minería. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013. 264 f. TCC (Graduação).

ARROYO, Carlos. Operações mineiras – MIN112. Ouro Preto, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9.653: Vibrações em estruturas - requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

BAHIA.BA. Detonação em pedreira afeta casas em Nazaré das Farinhas. Disponível em: <https://bahia.ba/bahia/detonacao-em-pedreira-afeta-casas-em-nazare-das-farinhas/>. Acesso em: 15 maio 2024.

BERNARDO, P. Análise comparativa das substâncias explosivas mais usadas em desmorte de rochas. Portugal, 2014.

BRASIL. Decreto-Lei n. 227, de 28 de fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Decreto-Lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940. (Código de Minas).

BRASIL. Lei n. 7.805, de 18 de julho de 1989. Altera o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, cria o regime de permissão de lavra garimpeira, extingue o regime de matrícula e dá outras providências.

CAMERON, A.; HAGAN, T. Curso internacional: tecnologia de desmorte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas. Belo Horizonte: IBRAM, 1996.

CARDOSO, T. F. L. Sociedade e desenvolvimento tecnológico: uma abordagem histórica. In: GRINSPUN, M. P. S. Z. (org.). Educação tecnológica: desafios e perspectivas. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2001. p. 183-226.

CARSTE. Sismografia. Disponível em: https://carste.com.br/portfolio_item/sismografia/. Acesso em: 2 maio 2024.

DHEKNE, P. Y. Environmental impacts of rock blasting and their mitigation. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences, v. 3, 2015.

DOBRILOVIC, M.; ESTER, Z.; JANKOVIC, B. Measurement in blast hole stem and influence of stemming material on blasting quality. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, v. 17, p. 47-53, 2005.

EPIROC. Epiroc Smart ROC CL atua na mina Terrafame, localizada no norte da Finlândia. Publicado em 2023. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/3174/perfuratriz-de-superficie-compacta-e-automatizada-ajuda-a-extrair-niquel-para-1-milhao-de-baterias.html>. Acesso em: 02/08/2024.

GAITHER, N. Administração da produção e operações. 8. ed. São Paulo:

Pioneira, 2001.

GERALDI, J. L. P. O ABC das escavações de rocha. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 2011. p. 284.

GOOGLE EARTH. Vista aérea da Petra Agregados na cidade de Matias Barbosa, MG. Disponível em: https://www.google.com/maps/place/Petra+Agregados+%7C+Unidade+Matias+Barbosa/@21.8388939,43.385394,646m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x989048097becbb:0xeb446e5eeab4b815!8m2!3d21.8373774!4d43.3803419!16s%2Fg%2F11b6hqsc2s?entry=tту&g_ep=EgoyMDIOMTAyOS4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D. Acesso em: 10/06/2024.

HOBBSAWM, Eric J. A era das Revoluções – 1789/1848. Rio de Janeiro: Ed. Paz e Terra, 1977.

HERRMANN, H. et al. Código de Mineração de “A” a “Z”. 2. ed. Campinas, São Paulo: Millennium, 2010. 327 p.

ISEE. International Society of Explosives Engineers's Standards Committee.

ISEE field practice guidelines for blasting seismographs. Cleveland, Ohio, 2015.

JKMRC. Mine-to-Mill: Increasing mine-site profitability through optimisation of mining and processing operations. 2002. 7 p.

MACHADO, R.; ASSUMPÇÃO, M. Conceitos de sismologia. Disponível em: <http://www.sismo.iag.usp.br/sismologia/cursosPalestras.php>. Acesso em: 28 de maio de 2011.

MANUAL BRITANTE. Guia de utilização de produtos. Quatro Barras – PR, 2010.

MENDES, M. L. Curso de desmonte de rochas por explosivos - formação de blaster. 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/10183750/CURSO_DE_DESMONTE_DE_ROCHAS_POR_EXPLOSIVOS_-_FORMAÇÃO_DE_BLAZER. Acesso em: 11 out. 2024.

MORAIS, J. L. Simulação da fragmentação dos desmontes de rocha por explosivos. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2004.

NEOBRYTA. Lastro ferroviário feito com Neobryta. Disponível em: <https://neobryta.com.br/lastro-ferroviario/>. Acesso em: 11 out. 2024.

PETRA AGREGADOS. Informações internas sobre a unidade Matias Barbosa, MG.

PONTES, J.; LIMA, V.; SILVA, V. Impactos ambientais no desmonte de rochas com foco na transição para a economia circular. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 3, p. 1240-1251, 2020. DOI: 10.34188/bjaerv3n3-

042.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha. 3. ed. São Paulo: Pini, 1977.

SANTOS, Regina Helena Vieira. Vilas operárias como patrimônio industrial: vilas operárias... como preservá-las? FIAM-FAAM, São Paulo, 2024. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/VI_coloquio_t2_vilas_operarias.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

SILVA, Valdir. Desmonte de rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

VALCARENGHI, D. de O.; SOUZA, L. E.; ABICHEQUER, L. A.; OLIVEIRA NETO, R.; GONÇALVES, Í. G. Metodologia de análise quantitativa de volume de rocha desmontado utilizando software de mineração. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria, v. 14, Ed. Especial Unipampa, 2015, p. 01-13. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM. ISSN: 2236-1308.