



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

JESUS LUCAS CAVALCANTE COSTA

**AVALIAÇÃO DE PLANO DE FOGO PARA DESMONTE DE ROCHAS EM UMA
MINA DE CALCÁRIO BASEADA NA PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO PELOS
MÉTODOS DE KUZ-RAM E KCO**

CRATEÚS
2026

JESUS LUCAS CAVALCANTE COSTA

AVALIAÇÃO DE PLANO DE FOGO PARA DESMONTE DE ROCHAS EM UMA MINA
DE CALCÁRIO BASEADA NA PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO PELOS MÉTODOS
DE KUZ-RAM E KCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê De
Negreiros Moreira.

CRATEÚS

2026

JESUS LUCAS CAVALCANTE COSTA

AVALIAÇÃO DE PLANO DE FOGO PARA DESMONTE DE ROCHAS EM UMA MINA
DE CALCÁRIO BASEADA NA PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO PELOS MÉTODOS
DE KUZ-RAM E KCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê De
Negreiros Moreira.

Aprovado em: 15/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Emanuel Itaquê De Negreiros moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Josenildo Isidro dos Santos Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. de Minas João Pedro de Abreu Mesquita

A Deus,
Aos meus pais, Antonio e Maria
Aos meus Irmãos Jonas e Maria do Socorro
e a todos aqueles que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Como cristão, primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela dádiva da vida e pelo o privilégio de está alcançando o meu grande sonho e por todas as bênçãos concebidas em minha vida, não tenho dúvidas o quanto és extraordinário, uma vez que me permitiu sonhar e por consequência realizar, nada disso faria sentido sem a sua presença. A mão divina foi crucial para me guiar e sustentar ao longo dessa intensa jornada acadêmica, tendo em vista as incontáveis vezes que pensei em desistir.

Aos meus estimados, queridos e amados pais Antonio e Maria, registro a minha eterna gratidão por toda rede de apoio, orações, amor e carinho que sob muita luta e intensas jornadas de trabalho me orientou a seguir com muito afinho e determinação a minha jornada educacional. Comumente costumo dizer que sou filho de uma sofista que teve acesso somente até 4 série primária com MBO pela faculdade da vida e um economista analfabeto que apesar da ausência do rigor técnico detém um conhecimento fora da curva e que juntos foram cruciais para ser o que sou hoje. São minhas fontes inspiradoras de como ser um cidadão melhor, filho melhor, um irmão melhor, (...).

Aos meus queridos irmãos Jonas Costa e Maria do Socorro, minha eterna gratidão. Maria do Socorro é minha segunda mãe, uma pessoa que cuidou de mim desde a infância e que corrobora até os dias atuais. Riziane (familiarmente como chamamos Maria do Socorro) foi a pessoa que mais investiu na minha educação, foi ela que me deu o primeiro notebook, celular e etc. Ao longo de cinco anos com o Jonas tive o privilégio de vender picolé, cremosinho, sorvete e pastel, onde juntos conseguimos suprir um parâmetro econômico que outrora nossa família enfrentou em detrimento de problemas de saúde do meu pai, a principal fonte de renda da casa e com isso agradeço muito por sua parceria e por tudo que enfrentamos juntos.

A Universidade Federal do Ceará, especialmente ao Campus de Crateús, instituição no qual tenho um carinho enorme e um sentimento de gratidão indescritível. Não tenho dúvidas o quanto a interiorização das universidades no Brasil foi, se não o maior projeto educacional já desenvolvido. Uma vez que possibilita que os filhos de agricultores, serventes, carreteiros, pedreiros, diaristas, vendedores ambulantes e afins tenham acesso ao ensino superior com um padrão de qualidade de alto nível que a UFC disponibiliza e que com isso rompe o ciclo de analfabetismo - tudo isso dado ao contexto do discente estar morando perto de casa, junto com os seus familiares, tendo em vista a perspectiva que muitos não teriam a

viabilidade de se deslocar para uma capital para acessar o ensino superior. Portanto, registro aqui os meus mais sinceros sentimentos de gratidão a UFC Campus Crateús por todos os conhecimentos adquiridos.

Aos meus avôs maternos, Izaias da Costa e Laudilina Mota. Paternos, João Ferreira e Maria Luzia. A toda minha família pelo todo apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Me. Emanuel Itaquê De Negreiros Moreira, que aceitou me orientar ainda durante seu doutorado. Sou extremamente grato pela paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos enriquecedores transmitidos. Uma oportunidade ímpar, pois tive o privilégio de ser seu aluno em diversas disciplinas. Além de se destacar como docente e exímio profissional, é também um grande amigo, que se alegra ao ver seus alunos alcançando êxito em suas trajetórias.

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Me. Josenildo Isidro e o Eng. de Minas João Pedro, agradeço imensamente pela disponibilidade, pelo tempo dedicado e pelas contribuições valiosas para o aprimoramento deste trabalho.

A todos os meus queridos professores da UFC por todos os conhecimentos compartilhados, pela paciência e didática nas exposições teóricas e práticas, onde busquei com muita determinação absorver o máximo possível. São minhas principais referências em qualificação profissional e rigor técnico. Em especial gostaria salientar aos professores Emanuel Itaquê, Kennedy Ramos, Rafael Chagas, Tiany Cota, Alberto Filho, Debora Nogueira, Bruno Soares, Francisco Diones, Thaíla Ravena, Marcio Melo e Geanini Italino.

A Divisão de Apoio Educacional (DAE) do Campus de Crateús na pessoa da querida Gerlândia Alves, uma vez que foi de fundamental importância na minha permanência no ensino superior, através dos programas como BIA, Auxílio Moradia, PID e isenção do RU.

A todos os técnicos - administrativos da UFC e servidores terceirizados, em especial ao Wolker Cunha e Jonas.

À Votorantim Cimentos, em especial à unidade cearense, expresso minha gratidão pela oportunidade de estágio e pela lapidação profissional proporcionada. Foi um ambiente onde fui calorosamente acolhido e no qual pude vivenciar um crescimento profissional significativo e acelerado. Obrigado a todos que fazem integrar esse time, em especial o da mineração.

Ao Sr. Virgílio Augusto, registro os meus sinceros agradecimentos pela confiança em mim cedida, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo da minha

jornada de estagiário. Uma pessoa extremamente fundamental na minha carreira profissional onde tive o privilégio de compreender passos e métodos que outrora não seria possível somente com as literaturas. Muito obrigado por tudo Sr. Virgílio!

Ao Josimar Sousa, Paulo Makanaki, Ana Lúcia, Antonio de Lima (Sr. Tota), Joice Paiva, Carlos Sérgio e Vicente Machado por todos os conhecimentos compartilhados e pela amizade construída. Foi um exímio privilégio estagiar ao lado de profissionais tão gabaritados como vocês.

A equipe da Enaex na pessoa do Sr. Rozivaldo Felisberto.

Aos meus clientes do centro comercial de Novo Oriente, nas pessoas da dona Teresina da Tatajuba e do seu Antonino do Cavaco. Do meu bairro Lagoa do Tigre Norte, na pessoa do bar do Cicero.

Aos Bodes do Asfalto na pessoa do grandioso senhor Wendel Gomes, minha eterna gratidão.

A todos os meus amigos do ensino médio, nas pessoas do Eliardo Coelho, Juniê, Kleydston, Laercio, Carlos Rique, Felipe, Dnilson, Nathalia Coelho, Rakel, Jozimar, Renildo e David Oliveira.

Aos meus amigos que estiveram comigo nesta trajetória universitária, meu sincero agradecimento. Em especial, Vitória Medeiros, Djibril, Eliardo Coelho, Bruno Sousa, Kleydston, Laércio, Júlia, João Pedro, Paulo, Marcos Daniel, Lara, Hitallo, Wellington, José Sales, Ariane e Victor Rafael.

A todos aqueles que acreditaram e depositaram confiança em mim.

Gratidão a Deus, por tudo.

“Por isso não tema, pois estou com você;
não tenha medo, pois sou o seu Deus.
Eu o fortalecerei e o ajudarei;
Eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa.”

Isaías 41:10

RESUMO

O desmonte de rochas com uso de explosivos em pedreiras de calcário voltadas à indústria cimenteira possui relevância estratégica, pois garante a fragmentação eficiente dos maciços rochosos e sustenta a cadeia produtiva do setor. Essa técnica permite processar grandes volumes de rocha em curto intervalo de tempo, assegurando otimização e produtividade nas operações unitárias de carregamento, transporte e cominuição. Todavia, quando o dimensionamento do plano de fogo é inadequado, diversas consequências negativas podem ocorrer, como a formação de matacos, a presença de repés e os ultralançamentos, fatores que comprometem a segurança operacional e elevam os custos de produção. Nesse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que permitam compreender e controlar os parâmetros que influenciam diretamente a fragmentação dos maciços rochosos. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo analisar as curvas granulométricas geradas pelos métodos empíricos Kuz-Ram e KCO de uma pedreira do setor cimenteiro, de modo a confrontar com os dados processados no *software WipFrag* a partir do processamento de imagens geradas de um desmonte de rocha. Para atingir esse objetivo, será empregada uma metodologia baseada na predição granulométrica por meio dos modelos matemáticos de fragmentação Kuz-Ram e KCO. A escolha desses dois modelos se justifica pelo fato de o Kuz-Ram, embora amplamente utilizado, apresentar limitações na descrição das granulometrias mais finas, enquanto o KCO, baseado na equação Swebrec, mostra-se mais eficiente ao representar o comportamento granulométrico completo. A partir da aplicação conjunta, tornou-se possível realizar um estudo comparativo entre as curvas granulométricas teóricas e a curva real obtida em campo, permitindo avaliar a aderência dos modelos às condições reais, identificar desvios e evidenciar a necessidade ou não de ajustes no plano de fogo visando otimizar a fragmentação. Como resultado viu-se que a curva gerada pelo método KCO se aproximou mais da curva gerada pelo WipFrag que a curva gerada pelo método Kuz-Ram. Por conseguinte, a aplicação do método KCO calculou um $D_{80} = 56,23$ cm se consolidando como mais representativo frente a meta institucional ($D_{80} = 60$ cm), quando comparado com o D_{80} previsto pelo método Kuz-Ram, onde o $D_{80} = 52,42$ cm. Observou-se, também, que a curva granulométrica gerada pelo WipFrag não conseguiu identificar geração de matacos, evidenciando uma necessidade de se coletar imagens mais representativas da pilha desmontada. Por fim, vê-se a necessidade de considerar parâmetros do maciço rochoso e do explosivo para um dimensionamento mais eficaz do plano de fogo,

prevendo valores dos parâmetros geométricos diferentes para maciços rochosos dissemelhantes.

Palavras-chave: desmonte de rochas; plano de fogo; predição granulométrica; modelo Kuz-Ram; modelo KCO.

ABSTRACT

The blasting of rocks using explosives in limestone quarries dedicated to the cement industry holds strategic importance, as it ensures efficient fragmentation of rock masses and sustains the sector's production chain. This technique enables the processing of large volumes of rock within a short time frame, ensuring optimization and productivity in the unit operations of loading, transportation, and comminution. However, when the blast design is inadequate, several negative consequences may occur, such as the formation of boulders, the presence of toes, and excessive flyrock—factors that compromise operational safety and increase production costs. In this context, it becomes essential to develop studies that allow understanding and controlling the parameters that directly influence the fragmentation of rock masses. This research aims to analyze the granulometric curves generated by the empirical Kuz-Ram and KCO methods in a quarry of the cement sector, comparing them with data processed in the WipFrag software from images of a rock blast. To achieve this goal, a methodology based on granulometric prediction through the mathematical fragmentation models Kuz-Ram and KCO will be employed. The choice of these two models is justified by the fact that Kuz-Ram, although widely used, presents limitations in describing finer particle sizes, whereas KCO, based on the Swebrec equation, proves more efficient in representing the complete granulometric behavior. Through their combined application, it was possible to perform a comparative study between theoretical granulometric curves and the actual curve obtained in the field, allowing the evaluation of model adherence to real conditions, identification of deviations, and assessment of the need for adjustments in the blast design to optimize fragmentation. As a result, it was found that the curve generated by the KCO method was closer to the curve produced by WipFrag than that generated by Kuz-Ram. Consequently, the application of the KCO method calculated a $D_{80} = 56.23$ cm, proving more representative compared to the institutional target ($D_{80} = 60$ cm), while the Kuz-Ram method predicted $D_{80} = 52.42$ cm. It was also observed that the granulometric curve generated by WipFrag did not identify the presence of boulders, highlighting the need to collect more representative images of the blasted pile. Finally, it is evident that parameters of the rock mass and the explosive must be considered for a more effective blast design, predicting different geometric parameter values for dissimilar rock masses.

Keywords: rock blasting; blast design; particle size prediction; Kuz-Ram model; KCO model.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01: Representação de um depósito mineral.....	23
Figura 02: Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie, Austrália.....	26
Figura 03: Classificação das rochas carbonáticas.....	27
Figura 04: ANFO a granel (VERTEX).....	30
Figura 05: (A) emulsão encartuchada (Ibegel) (B) emulsão (Ibemux).....	32
Figura 06: Caminhão UMB – Unidade Móvel de Bombeamento.....	33
Figura 07: Comportamento da velocidade de detonação durante armazenamento de 12 meses.	34
Figura 08: Onda de choque atravessando a coluna de explosivo.....	38
Figura 09: Fases Dinâmicas e Semi-Estática (Curva típica de variação de pressão sobre as paredes do furo com o tempo após a detonação).....	40
Figura 10: Ignição da carga explosiva e comportamento da onda de propagação.....	42
Figura 11: Fase Semi-Estática.....	44
Figura 12: Zona triturada / fraturada do furo.....	45
Figura 13: Fraturamento radial.....	46
Figura 14: Ruptura por Flexão.....	49
Figura 15: Ruptura por colisão.....	50
Figura 16: Variáveis de um plano de fogo.....	52
Figura 17: Tipos de retardos.....	62
Figura 18: Maciço rochoso fraturado.....	73
Figura 19: Distribuição espacial em planta dos furos do desmonte.....	75
Figura 20: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo Kuz-Ram.....	77
Figura 21: Distribuição granulométrica pelo modelo Kuz-Ram.....	78
Figura 22: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo KCO.....	79
Figura 23: Distribuição granulométrica pelo modelo KCO.....	80
Figura 24: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo Kuz-Ram.....	83
Figura 25: Distribuição granulométrica através do modelo Kuz-Ram.....	84

Figura 26: Curva da distribuição granulométrica através do modelo Kuz-Ram.....	85
Figura 27: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo KCO.....	86
Figura 28: Distribuição granulométrica através do modelo KCO.....	87
Figura 29: Curva da distribuição granulométrica através do modelo KCO.....	88
Figura 30: Bancada desmontada.....	89
Figura 31: Processamento de imagens no Wipfrag.....	90
Figura 32: Processamento de imagens no Wipfrag.....	90
Figura 33: Distribuição granulométrica real.....	91
Figura 34: Curva da distribuição granulométrica real.....	92
Figura 35: Distribuição granulométrica por KUZ-RAM, KCO e Real.....	94
Figura 36: Curva da distribuição granulométrica por KUZ-RAM, KCO e Real.....	95

LISTAS DE TABELAS

Tabela 01:Resumo das fases de um empreendimento mineiro.....	24
Tabela 02: Massa específica de alguns explosivos comerciais.....	36
Tabela 03:Classificação geomecânica para obtenção do fator de rocha.....	66
Tabela 04: Parâmetros de entrada dos modelos Kuz-Ram e KCO.....	74
Tabela 05: Plano de fogo avaliado.....	74
Tabela 06: Parâmetros de entrada dos modelos Kuz-Ram e KCO.....	76
Tabela 07: Tabela auxiliar para cálculo do Fator de Rocha.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
CZM	<i>Crush Zone Model</i>
KCO	Kuznetsov Cunningham Ouchterlony
TCM	<i>Two-Component Model</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo geral.....	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1	Mineração a céu aberto.....	22
3.2	Método de lavra em bancadas.....	25
3.3	Calcário para fabricação de cimento.....	26
3.4	Explosivos comerciais.....	28
3.5	ANFO.....	29
3.6	Emulsões.....	31
3.7	PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS.....	34
3.7.1	<i>Densidade dos explosivos.....</i>	<i>35</i>
3.7.2	<i>Potência e energia de detonação.....</i>	<i>36</i>
3.7.3	<i>Velocidade e pressão de detonação.....</i>	<i>37</i>
3.7.4	<i>Sensibilidade à iniciação.....</i>	<i>38</i>
3.8 -	MECANISMOS DE RUPTURA DOS MACIÇOS ROCHOSOS COM USO DE EXPLOSIVOS.....	39
3.8.1	<i>Fase dinâmica.....</i>	<i>41</i>
3.8.2	<i>Fase Semi-Estática.....</i>	<i>43</i>
3.8.3	<i>Trituração da rocha.....</i>	<i>44</i>
3.8.4	<i>Fraturamento radial.....</i>	<i>46</i>
3.8.5	<i>Reflexão da onda de choque.....</i>	<i>47</i>
3.8.6	<i>Extensão e abertura de fendas radiais.....</i>	<i>47</i>
3.8.7	<i>Fraturamento pela a liberação da carga.....</i>	<i>47</i>
3.8.8	<i>Fraturamento por cisalhamento.....</i>	<i>48</i>
3.8.9	<i>Ruptura por flexão.....</i>	<i>48</i>

3.8.10	Ruptura por colisão.....	49
3.9	PARÂMETROS DE UM PLANO DE FOGO DE LAVRA A CÉU ABERTO...	
51		
3.9.1	<i>Afastamento</i>	52
3.9.2	<i>Espaçamento</i>	53
3.9.3	<i>Diâmetro do furo</i>	55
3.9.4	<i>Bancada</i>	56
3.9.5	<i>Altura da bancada</i>	57
3.9.6	<i>Subperfuração</i>	57
3.9.7	<i>Profundidade do furo</i>	58
3.9.8	<i>Inclinação do furo</i>	59
3.9.9	<i>Carga de coluna e carga de fundo de furo</i>	59
3.9.10	<i>Tampão</i>	60
3.9.11	<i>Tempos de retardo e sequência de detonação</i>	61
3.10	MODELOS MATEMÁTICOS PARA A AVALIAÇÃO DA	
	FRAGMENTAÇÃO ROCHOSA.....	62
3.10.1	<i>Modelamento de desmonte de rocha - modelo KUZ-RAM</i>	64
3.10.2	<i>Equação de Kuznetsov</i>	64
3.10.3	<i>Equação de ROSIN-RAMMLER</i>	67
3.10.4	<i>Modelo Kuznetsov Cunningham Ouchterlony (KCO)</i>	69
3.10.5	<i>WipFrag</i>	71
4	METODOLOGIA.....	72
4.1	Localização da Pedreira.....	72
4.2	Escolha dos modelos de predição granulométrica.....	72
4.3	Obtenção dos dados do plano de fogo.....	74
4.4	Desenvolvimento dos cálculos.....	76
4.4.1	<i>Para o modelo KUZ-RAM</i>	77
4.4.2	<i>Para o modelo KCO</i>	78

4.5	Resultados e discussões.....	81
4.5.1	<i>Modelo de Kuz-Ram.....</i>	81
4.5.2	<i>Modelo de KCO.....</i>	85
4.5.3	<i>Análise pelo Software WipFrag.....</i>	88
4.6	Análise comparativa entre os modelos Matemáticos x Real.....	93
5	CONCLUSÃO.....	96
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Em pedreiras, o desmonte de rocha com uso de explosivos constitui uma prática indispensável para assegurar otimização, produtividade, eficiência e redução de perdas, além de atender a outros parâmetros norteadores da indústria mineral (Quaglio, 2020). Ainda segundo Gomes (2022), a correta execução dessa etapa é fundamental para alinhar os resultados operacionais às metas de desempenho e competitividade do setor. Assim, a fragmentação da rocha, obtida durante o desmonte, representa um parâmetro de suma importância na otimização do processo como um todo, pois influencia diretamente a lucratividade e a eficiência das operações subsequentes (Braga, 2018).

Outrossim, ao longo das últimas sete décadas, diversos estudos foram desenvolvidos com foco em métodos de controle de fragmentação no desmonte de rochas, utilizando modelos empíricos para prever a curva granulométrica do material desmontado, bem como modelos matemáticos que, associados aos avanços tecnológicos, passaram a incorporar análises de imagens por meio de softwares especializados, corroborando para maior precisão e eficiência nos resultados (Braga, 2018).

Cunningham (1983) desenvolveu o modelo Kuz-Ram, amplamente utilizado devido à sua formulação simples e aplicação prática, ainda que apresente limitações. Posteriormente, outros modelos foram propostos, como o Kuznetsov Cunningham Ouchterlony (KCO), que introduzem novas formulações com o objetivo de aprimorar e expandir as capacidades do modelo Kuz-Ram, oferecendo maior precisão na previsão da fragmentação resultante do desmonte de rochas, Ouchterlony (2005).

Cabe salientar que apesar da utilização dos modelos empíricos Kuz-Ram e KCO na previsão da fragmentação, observa-se uma lacuna significativa entre os resultados teóricos e os parâmetros reais obtidos em campo, especialmente em pedreiras vinculadas à indústria cimenteira, Costa (2019). Essa discrepância evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados que considerem variáveis locais, como características geológicas específicas, condições operacionais e práticas de perfuração e carregamento, fatores que muitas vezes não são plenamente contemplados pelos modelos existentes, Santana (2018).

Dessa forma, uma fragmentação inadequada impacta diretamente a produção, ao gerar materiais com dimensões superiores às especificadas ou excesso de finos (Braga, 2018). Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido em uma pedreira vinculada à indústria

cimenteira localizada na região noroeste do Ceará, onde no qual um desmonte de rocha resultou em uma relação de matacos por tonelada significativamente elevada. A partir das informações disponibilizadas pela concedente e com base nos modelos empíricos Kuz-Ram e KCO, foram geradas e analisadas curvas de distribuição granulométrica, de modo a confrontar os resultados teóricos com os parâmetros reais, permitindo avaliar a eficiência do desmonte e propor ajustes que contribuam para a otimização do processo produtivo.

A realização deste estudo se justifica pela relevância de compreender e reduzir as discrepâncias existentes entre os resultados previstos pelos modelos empíricos de fragmentação, como o Kuz-Ram e o KCO, e os parâmetros reais observados em campo. Haja visto que, em pedreiras vinculadas à indústria cimenteira, tais divergências podem comprometer a eficiência produtiva, elevar custos operacionais e impactar diretamente a qualidade do material destinado ao beneficiamento. Nesse sentido, torna-se imprescindível investigar alternativas e ajustes que permitam maior precisão na previsão da granulometria de desmonte de rocha.

Por fim, neste trabalho foram elaboradas planilhas para simular os modelos Kuz-Ram e KCO aplicados ao desmonte de uma pedreira vinculada à indústria cimenteira, em razão de o processo ter gerado blocos de rocha superiores a 1,60 metros (dado fornecido pela pedreira). A partir dessas simulações, foram confeccionadas curvas de distribuição granulométrica, as quais foram confrontadas com os dados reais obtidos por meio do software WipFrag, utilizando parâmetros disponibilizados pela empresa, de modo a avaliar a precisão dos modelos e identificar possíveis discrepâncias entre previsões teóricas e resultados práticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar as curvas granulométricas geradas pelos métodos empíricos Kuz-Ram e KCO de uma pedreira do setor cimenteiro, de modo a confrontar com os dados processados no software WipFrag a partir do processamento de imagens geradas de um desmonte de rocha.

2.2 Objetivos específicos

- Aplicar os modelos Kuz-Ram e KCO na predição da fragmentação;
- Obter distribuição granulométrica real através do *Software WipFrag*;
- Comparar as curvas granulométricas obtidas pelos modelos avaliados;
- Evidenciar a necessidade ou não de ajustes no plano de fogo visando otimizar a fragmentação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

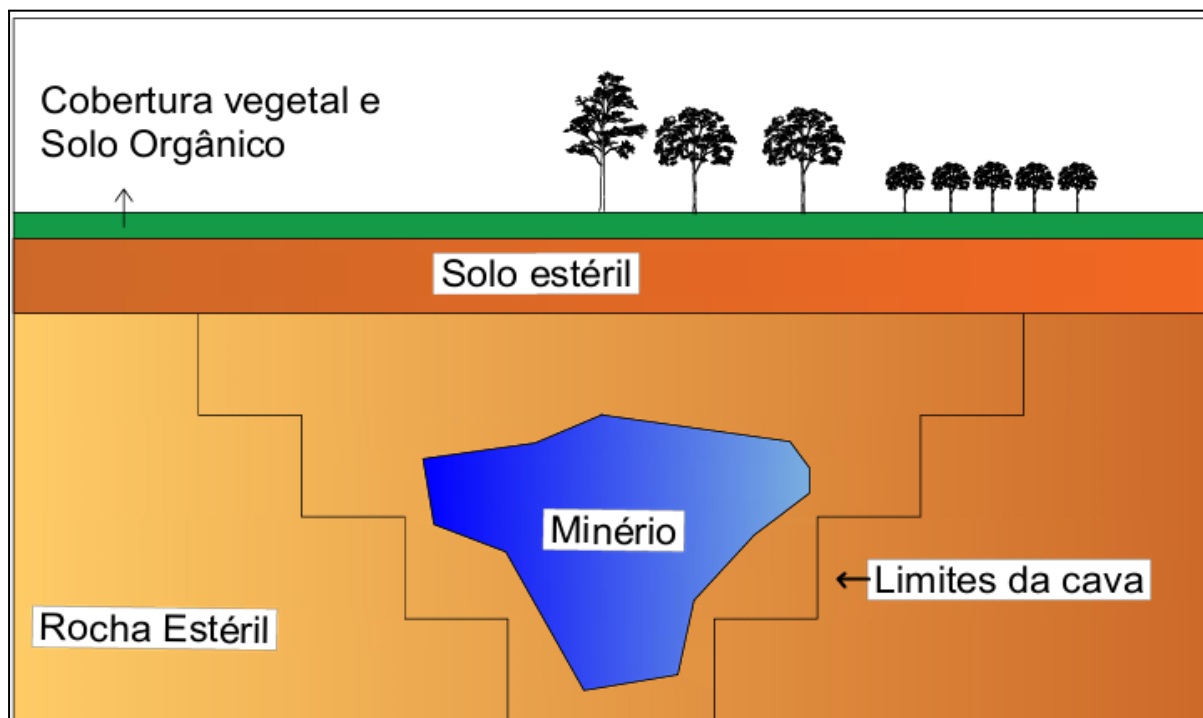
Neste capítulo serão apresentados os aspectos fundamentais para a compreensão do processo de desmonte de rocha, realizado pelo método de lavra a céu aberto por bancadas com o uso de explosivos. Em síntese, serão abordados sobre os principais tipos de explosivos comerciais, seus mecanismos de fragmentação dos maciços rochosos, os parâmetros geométricos de um plano de fogo e os modelos de predição granulométrica Kuz-Ram e KCO.

3.1 Mineração a céu aberto

Promulgado em 1968 o código de mineração brasileiro, através do artigo 35, estabelece que por lavra formalmente consiste em um conjunto de operações coordenadas que objetiva o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas (Brasil, 1968). Outrora, Curi (2014), argumenta que o método de lavra a céu aberto de minas é tecnicamente e economicamente justificável, desde que a reserva mineral esteja geoposicionada próxima à superfície ou profundidades moderadas.

Todavia, vale salientar que em função dos avanços tecnológicos, em síntese no setor de mecanização, depósitos estão sendo extraídos a profundidades cada vez maiores. Não obstante, Fourie (1992), salienta que uma lavra a céu aberto (Open Pit) é uma escavação ou corte feito na superfície do solo com o propósito de extrair minério, sendo exposta a superfície durante a vida útil da mina. No contexto do tema supracitado, e com o intuito de exemplificar um depósito mineral que possibilite a aplicação do método de lavra a céu aberto por bancadas, observe a Figura 01.

Figura 01:Representação de um depósito mineral.



Fonte: Adaptado de Moreira (2024).

O esquema apresentado ilustra, de forma didática, a disposição das camadas geológicas desde a superfície, evidenciando a cobertura vegetal e o solo orgânico, seguidos pelo solo estéril e pela rocha estéril. Por outro lado, no interior do maciço rochoso temos a camada de minério, delimitada pelo contorno da cava, que indica a área destinada à lavra.

Por outro lado, o desenvolvimento do empreendimento mineiro envolve diversas fases que estão interligadas entre si, uma vez que, instrumentaliza desde a ocorrência mineral até a recuperação da área degradada após o depósito exaurir (Dutra, 2014).

Diante do supracitado, cabe destacar que cada fase é considerada no plano de lavra, haja visto que, estabelece limites terminais da cava, que segundo Hartman e Mutmanský (2002), tais etapas podem ser compreendidas como pré-mineração, através da prospecção e exploração mineral. Mineração, no que se toca ao desenvolvimento e exploração minério / estéril, e por fim, a Pós-Mineração, compreendida como recuperação e reabilitação da área degradada. Assim, com vista no detalhamento de cada fase supracitada segue a Tabela 1.

Tabela 01:Resumo das fases de um empreendimento mineiro

FASE	PROCEDIMENTOS	TEMPO
	PRÉ MINERAÇÃO	
PROSPECÇÃO (Depósito Mineral)	Procura do minério: a) Métodos de prospecção Diretos: físicos, geológicos; Indiretos: geofísicos e geoquímicos; b) Localização favorável (mapas, literatura, minas antigas); c) No ar: Fotografia aérea, satélite; d) Na superfície: geofísica e geologia; e) Anomalias locais, análises, avaliação.	1 - 3 anos
EXPLORAÇÃO (Corpo Mineral)	.Definição do valor e extensão do minério a) Amostra (perfuração ou escavação) ensaios e testes; b) Estimativa de tonelagem e teor; c) Avaliação econômica do depósito; Avaliação do mercado para tomada de decisão	2 - 5 anos
	MINERAÇÃO	
DESENVOLVIMENTO (Perspectivas)	Abertura do depósito mineral para produção: a)Aquisição ou locação de direitos minerários, se não houver sido realizado na fase anterior; b) Classificação dos impactos ambientais; c) Decapeamento da área; d) Construção dos acessos, sistemas de transporte; e) Construção de instalações.	2 - 5 anos
LAVRA (mina)	Produção de minério em larga escala: a) Fatores para escolha do método: geológico, econômico, ambiental, social e de segurança; b) Tipos de métodos de mineração: Em superfície: Open pit, Open Cast etc; Em profundidade: Room and Pilar, Block Caving etc; c) Monitorizar custos e recuperação econômica.	3 - 10 anos
	PÓS MINERAÇÃO	
	Restauração da área: a) Remoção da planta e edificações;	

RECUPERAÇÃO	b) Recuperação dos resíduos e refugos; c) trabalhos de recuperação de área degradada.	1 - 10 anos
--------------------	--	-------------

Fonte: Hartman e Mutmansky (2002)

3.2 Método de lavra em bancadas

De modo geral, o método de lavra em bancadas destaca-se como um dos mais utilizados na mineração, sobretudo em função das características geométricas do depósito mineral, que frequentemente se apresentam em camadas aproximadamente horizontais e próximas à superfície, favorecendo a aplicação desse método sob os aspectos técnicos e econômicos (Lenoir, 2019). Não obstante, cabe destacar que o desenvolvimento das bancadas é realizado em um sistema *top down* ou de cima para baixo de maneira consecutiva até os limites finais dos corpos mineralizados mais profundos, dado que o minério é lavrado e o estéril é removido e transportado formando pilha nas adjacências da mina (Curi, 2014).

Um dos aspectos sobressalentes do vigente método é a capacidade de produção em elevados níveis, com alta produtividade e que comumente utiliza equipamentos de grande porte, além de possuir taxas de recuperação que podem chegar próximo a 100% e apresentar baixa diluição (Moreira, 2024). Segundo Carli (2013), o layout de uma lavra a céu aberto por bancadas é concebido em consonância com a progressão das operações mineiras, à medida que ocorre a remoção dos materiais de cobertura do minério.

Esse processo resulta na formação de bancadas compostas por uma superfície horizontal, denominada berma, e por uma face inclinada entre as bermas, correspondente ao talude. Tal configuração segue um padrão geométrico previamente estabelecido, no qual a altura das bancadas é definida com base em critérios técnicos, operacionais e geotécnicos. Assim, considerando o contexto supracitado, observe a Figura 02, que exemplifica de maneira didática o método de lavra em bancadas.

Figura 02: Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie, Austrália.



Fonte: Australian (2018).

3.3 Calcário para fabricação de cimento

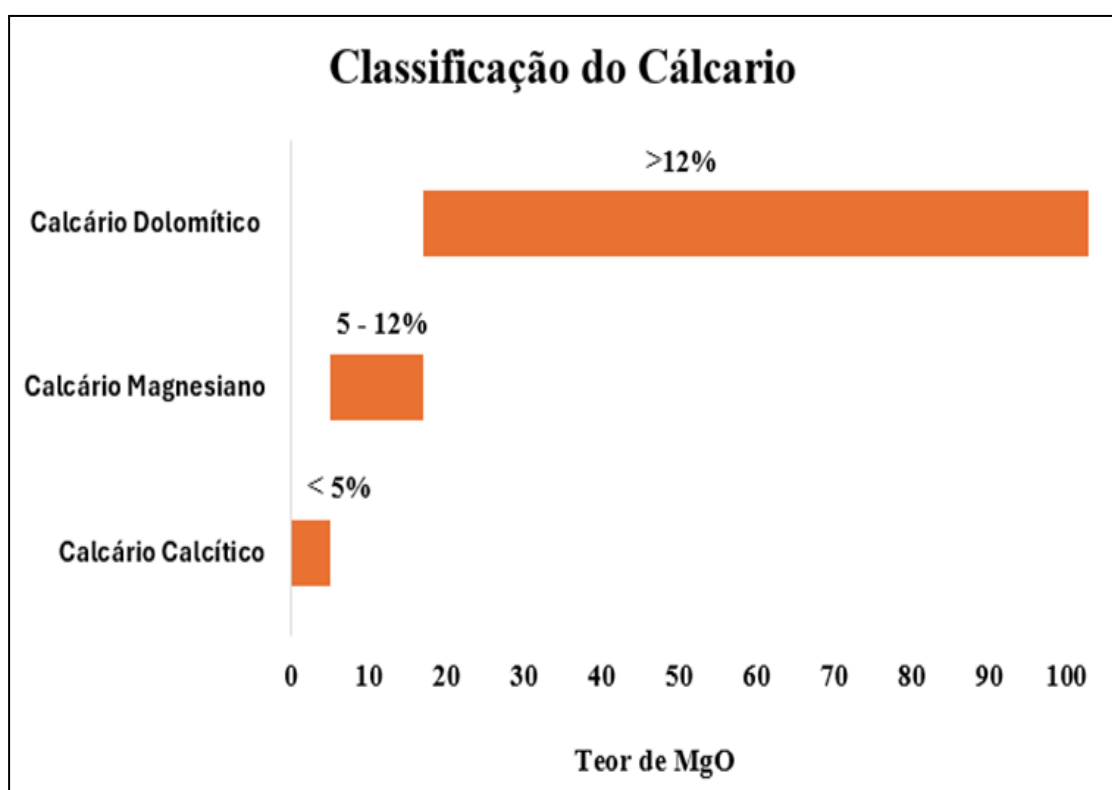
De origem sedimentar, o calcário é uma rocha composta essencialmente por carbonato de cálcio (calcita – CaCO_3). Associados à calcita, aparecem com frequência a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e a aragonita (CaCO_3), enquanto minerais como quartzo, feldspato, pirita e siderita ocorrem de forma menos comum (Severino, 2003). A presença desses minerais secundários pode modificar as propriedades físicas e químicas da rocha, influenciando de maneira significativa sua utilização e o valor econômico em diferentes aplicações industriais (Almeida, 2005).

Não obstante, segundo Lima (2011), salienta que o calcário se apresenta na natureza acompanhado de diversas impurezas, como óxidos de ferro, alumínio e silício, que podem ser benéficos. Entretanto, por outro lado, quando tem a presença dos óxido de magnésio, sódio e potássio, geralmente são indesejáveis. A cal, que é a fração de maior

interesse na fabricação do cimento, corresponde a cerca de 56% da matéria bruta, indicando que, de cada tonelada de calcário, apenas 560 kg são efetivamente aproveitados.

Em consonância Tomas (2007), o termo calcário é comumente utilizado para designar um grupo de rochas que apresentam teores de carbonatos superiores a 50% em sua composição. De modo geral, a classificação das rochas carbonáticas baseia-se na porcentagem de óxido de magnésio (MgO) presente, conforme na Figura 03.

Figura 03: Classificação das rochas carbonáticas



Fonte: Adaptado de Tomas (2007).

Com base na Figura 03 é possível observar que o calcário calcítico é concebido pela a capacidade de apresentar um teor inferior a 5% de MgO, sendo o tipo mais puro e amplamente utilizado na indústria cimenteira. Já o calcário magnesiano, com teores entre 5% e 12%, possui maior presença de magnésio, o que pode alterar suas propriedades físico-químicas e limitar algumas aplicações industriais. Por fim, o calcário dolomítico, com teor superior a 12% de MgO, caracteriza-se pela predominância de dolomita, sendo mais empregado em processos que exigem maior resistência térmica ou química, Tomas (2007).

Outrora, conforme Coelho (1995), do ponto de vista genético, os calcários constituem um grupo heterogêneo de rochas. Alguns são detríticos, formados a partir do

transporte e deposição de sedimentos clásticos, enquanto outros têm origem química ou bioquímica, resultando da precipitação de soluções ou da formação *in situ*. Os processos diagenéticos subsequentes podem alterar profundamente esses tipos de rochas, fazendo com que o caráter original desapareça parcial ou totalmente.

3.4 Explosivos comerciais

Historicamente, há registros de que os primeiros explosivos foram desenvolvidos pelos chineses no século XII, com a criação da pólvora negra, uma mistura de nitrato de potássio, enxofre e carbono. Já no século XIX, em 1846, o alemão Christian Friedrich descobriu acidentalmente a nitrocelulose (resultado da reação entre ácido nítrico e celulose), enquanto realizava experimentos em sua cozinha. No ano seguinte, em 1847, o italiano Ascanio Sobrero sintetizou a nitroglicerina, uma molécula altamente explosiva obtida a partir da combinação de glicerol, ácido nítrico e ácido sulfúrico. Posteriormente, em 1867, o químico sueco Alfred Bernhard Nobel desenvolveu um método seguro para utilizar a nitroglicerina, tornando-a comercialmente viável por meio da dinamite, composta pela junção de nitroglicerina com diatomita e nitrocelulose.

Segundo Geraldin (2011), uma substância pode ser considerada explosiva quando, ao ser devidamente iniciada ou ativada, sofre transformações químicas imediatas e violentas, passando do estado sólido ou líquido para o estado gasoso em um intervalo de tempo infinitesimal. Esse processo libera uma grande quantidade de energia sob a forma de gases em altas pressões e temperaturas, caracterizando o fenômeno da detonação.

Os explosivos comerciais ou industriais são definidos como misturas de substâncias, algumas atuando como combustíveis e outras como oxidantes, que, quando devidamente iniciadas, desencadeiam uma reação exotérmica extremamente rápida. Essa reação resulta na formação de uma série de produtos gasosos de alta temperatura, quimicamente mais estáveis e que ocupam um volume significativamente maior do que o material inicial. Assim, os explosivos químicos ou comerciais podem ser compreendidos como substâncias ou misturas, em qualquer estado físico, que ao serem submetidas a uma causa térmica ou mecânica suficientemente intensa, como calor, atrito ou impacto, transformam-se total ou parcialmente em gases em um intervalo de tempo extremamente curto, liberando uma quantidade significativa de calor (JIMENO, 1990; SILVA, 2009).

Segundo Silva (2009), os explosivos químicos são os mais utilizados em atividades de mineração e obras civis, sendo classificados em três categorias principais:

- Explosivos rápidos ou detonantes (altos explosivos): caracterizam-se pela elevadíssima velocidade de reação, variando entre 1.500 e 9.000 m/s, e pela alta taxa de pressão, que pode alcançar valores de 0,1 GPa a 150 GPa.
- Explosivos lentos ou deflagrantes (baixos explosivos): apresentam velocidade de reação inferior a 1.500 m/s e pressões em torno de 345 MPa, sendo empregados em situações que exigem combustão controlada.
- Agentes detonantes: consistem em misturas cujos ingredientes isolados não são classificados como explosivos, mas que, combinados, possuem grande poder de detonação. Exemplos incluem ANFO, ANFO/AL, lama explosiva, ANFO pesado e emulsões.

3.5 ANFO

Em termos históricos, foi evidenciado que em 1923, na Alemanha, ocorreu o primeiro grande acidente envolvendo nitrato de amônia. Na tentativa de fragmentar o material, que se encontrava aglutinado pela umidade, utilizando dinamite, houve uma violenta explosão que resultou na destruição de parte da cidade, marcando o surgimento industrial de mais um membro da família dos explosivos (Olofsson, 1990). Apesar disso, a capacidade explosiva do nitrato de amônia permaneceu pouco reconhecida. Contudo, em 1947, um novo acidente trouxe à tona sua real potencialidade, o choque entre dois navios, sendo um carregado de nitrato de amônia e outro de petróleo, provocou um incêndio seguido de uma explosão devastadora, que destruiu o porto e parte da cidade de Texas City, nos Estados Unidos da América (Geraldi, 2011).

Entre os explosivos granulados, o ANFO é um dos mais utilizados em escala mundial. A sigla deriva dos termos em inglês *Ammonium Nitrate e Fuel Oil*, refletindo sua composição básica. Ou seja, esse explosivo é obtido pela simples mistura de nitrato de amônia (94,5%) com óleo diesel (5,5%), proporções consideradas ideais e estabelecidas por Lee e Akre, em 1955. Sua popularidade decorre da combinação de eficiência, baixo custo e facilidade de preparo, fatores que o consolidaram como um dos principais agentes empregados em operações de desmonte de rochas, Silva (2009).

De acordo com Neves (2018), a presença de água constitui um fator extremamente prejudicial à utilização do ANFO, pois absorve calor e reduz de forma significativa a potência do explosivo. Não obstante, outro aspecto determinante é a densidade, que exerce influência direta sobre a velocidade de detonação, pois, quanto maior a densidade, maior tende a ser a velocidade. No entanto, esse aumento ocorre em detrimento da facilidade de iniciação, tornando o processo de detonação mais exigente em termos de energia de ignição.

O nitrato de amônio puro, na forma granulada (*prills*), como ilustrado na Figura 04, atua apenas como um agente explosivo, ou seja, não é capaz de detonar por si só. Contudo, quando esse material é misturado com óleo combustível, preferencialmente óleo diesel (fuel oil), forma-se uma mistura explosiva conhecida como ANFO. A proporção ideal varia entre 3 e 3,5 litros de óleo para cada 50 kg de nitrato de amônio. Ou seja, essa mistura tem como objetivo aumentar o volume de gases produzidos durante a detonação e evitar o contato direto do material com a água, o que poderia comprometer sua eficiência. Caso os prills entrem em contato com paredes úmidas dos furos de detonação, pode ocorrer uma redução significativa da potência explosiva do produto (Geraldi, 2011).

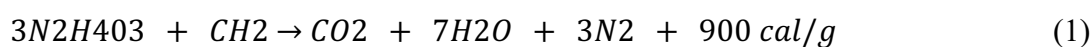
Figura 04: ANFO a granel (VERTEX).



Fonte: Britanite Enaex (2026).

Outrora, o ANFO deve ser aplicado preferencialmente em furos com diâmetro superior a 50 mm, pois em diâmetros menores a velocidade de detonação tende a diminuir, podendo resultar em deflagração (Jimeno et al., 1990). Por outro lado, em furos de grande diâmetro, a sensibilidade do ANFO é reduzida, sendo mais indicado para aplicações em furos com diâmetros na faixa de 150 mm (Filho, 2022).

Em termos ideais a reação do ANFO ($N_2H_4O_3$ - Nitrato de amônio e CH_2 - Óleo diesel) quando o balanço de oxigênio é zero, pode ser expressa, segundo Silva (2009) pela seguinte Equação 01:



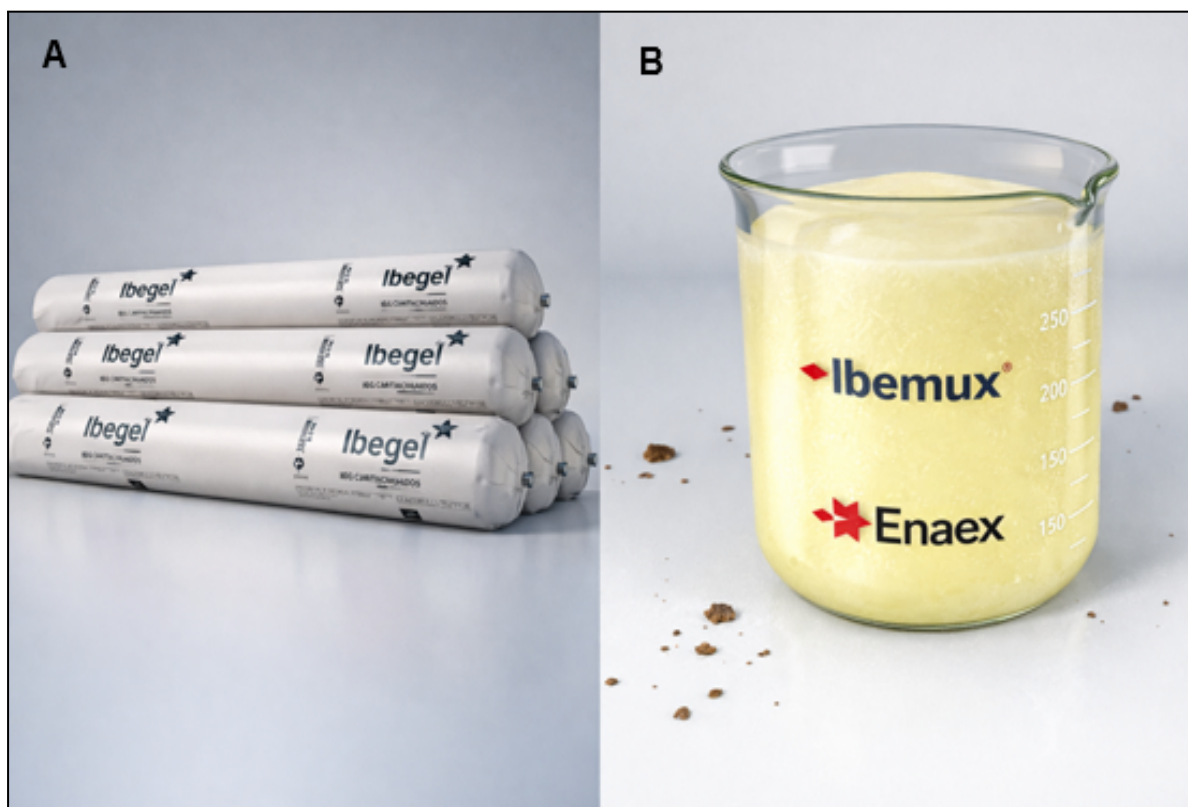
Cabe destacar que outros explosivos granulados, produzidos por diferentes fabricantes, consistem em formulações semelhantes ao ANFO, diferenciando-se pela adição de componentes como explosivos ou sensibilizantes, além de combustíveis, oxidantes e absorventes.

3.6 Emulsões

Segundo Silva (2009), o interesse pelos explosivos em emulsão surgiu no início da década de 1960. Esses explosivos pertencem ao tipo “água-em-óleo” (*water-in-oil*), consistindo em microgotículas de solução oxidante supersaturada dispersas em uma matriz oleosa. Para maximizar o rendimento energético e, ao mesmo tempo, reduzir os custos de produção e comercialização, o oxidante presente nas microgotículas é composto principalmente por nitrato de amônio. Ou seja, do ponto de vista químico, uma emulsão é definida como uma dispersão estável de um líquido imiscível em outro, obtida por meio da ação de agentes emulsificantes e de uma intensa agitação mecânica, que asseguram a estabilidade da mistura.

De acordo com Araujo (2020), as emulsões explosivas são classificadas em dois grupos amplamente reconhecidos. A emulsão encartuchada, ilustrada na Figura 05 (A), recebe essa denominação quando é embalada industrialmente para utilização. Já a emulsão bombeada, representada na Figura 05 (B), corresponde à aplicação do produto diretamente nos furos de detonação, sem embalagem. Essa diferenciação é essencial para compreender as distintas formas de uso e adequação das emulsões às condições específicas de campo.

Figura 05: (A) emulsão encartuchada (Ibegel) (B) emulsão (Ibemux).



Fonte: Britanite Enaex (2026).

De modo geral, as emulsões bombeadas são preparadas e transportadas por meio de caminhões conhecidos como UMB – Unidade Móvel de Bombeamento (Figura 06). Esses veículos pesados, equipados com tanques e sistemas específicos, foram projetados para atender às demandas da mineração e da construção civil. Sua função é garantir o transporte seguro, o preparo adequado e o bombeamento direto das emulsões explosivas nos furos de detonação, assegurando eficiência e segurança nas operações de desmonte de rochas (Neves, 2018).

Figura 06: Caminhão UMB – Unidade Móvel de Bombeamento

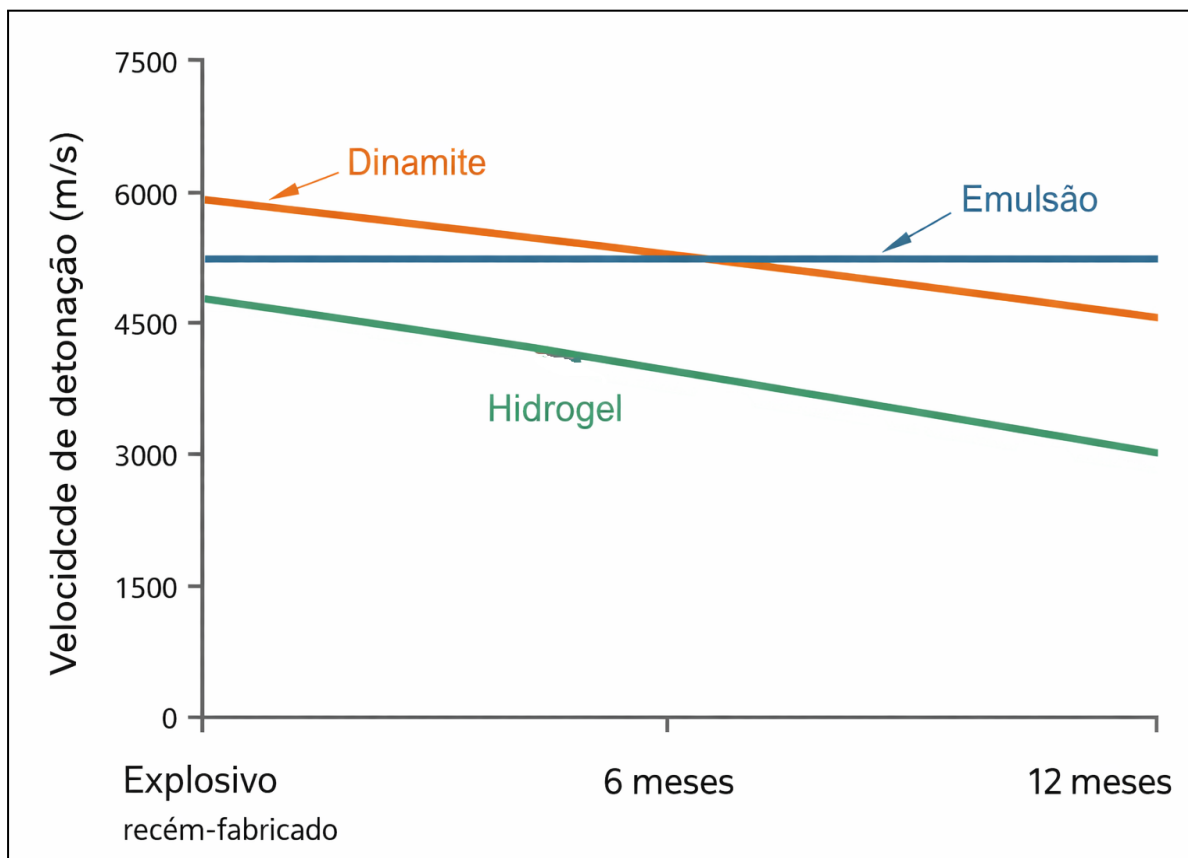


Fonte: Britanite Enaex (2026).

Outrossim, é importante salientar que as emulsões explosivas se destacam por apresentarem elevada velocidade de detonação (VOD), superior à das misturas granulares, como o ANFO. Ou seja, essa característica proporciona uma transmissão de energia mais eficiente ao maciço rochoso, especialmente em rochas de alta competência, favorecendo o desempenho nas operações de desmonte de rochas (Olofsson, 1990).

Segundo Real (2019), as emulsões explosivas destacam-se por sua alta estabilidade química. Isso significa que, quando são armazenadas de forma adequada, suas propriedades permanecem praticamente inalteradas ao longo do tempo. Frente ao supracitado, observa-se na Figura 07, uma comparação entre três tipos de explosivos: dinamite, hidrogel e emulsão. Nota que, enquanto a dinamite e o hidrogel apresentam variações mais significativas em suas características com o passar dos meses, a emulsão mantém-se estável, ou seja mesmo após 12 meses de armazenamento, a emulsão preserva suas características físicas iniciais e continua apresentando praticamente a mesma velocidade de detonação (VOD), evidenciando sua superioridade em termos de estabilidade.

Figura 07: Comportamento da velocidade de detonação durante armazenamento de 12 meses



Fonte: Adaptado de Atlas Powder Company (1987).

3.7 PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

O conhecimento das propriedades dos explosivos é essencial para garantir tanto a eficiência quanto a segurança nas operações de desmonte. Cada característica, como densidade, potência, velocidade de detonação e sensibilidade e etc, influencia diretamente o comportamento do explosivo e, conseqüentemente, o resultado obtido na fragmentação da rocha. Assim, compreender esses parâmetros permite selecionar o tipo de explosivo mais adequado às condições do maciço rochoso e ao objetivo da operação, evitando desperdícios de energia, reduzindo riscos de acidentes e assegurando maior controle sobre os efeitos gerados. Logo, o estudo das propriedades constitui a base para os tópicos sucessivos, que detalham a influência de cada variável no desempenho e na aplicação prática dos agentes explosivos (Silva, 2009).

Conforme salientam Jimeno et al. (1990), os explosivos convencionais e os agentes explosivos apresentam propriedades diferenciadoras que orientam sua correta seleção, levando em consideração o tipo de detonação desejada e as condições específicas de aplicação. O conhecimento dessas propriedades permite prever com maior precisão os resultados esperados em termos de fragmentação, deslocamento e vibração do maciço rochoso. Entre as características mais relevantes destacam-se, potência e energia desenvolvida, velocidade de detonação, densidade, pressão de detonação, resistência à água e sensibilidade.

3.7.1 Densidade dos explosivos

Em termos algébricos, a densidade é determinada pela razão entre a massa (kg) e o respectivo volume (m^3). De acordo com Silva (2009), a densidade dos explosivos comerciais varia entre 0,6 e 1,45 g/cm³, sendo um parâmetro fundamental para a escolha do tipo de explosivo a ser empregado. Haja visto que, explosivos com densidade igual ou inferior a 1 g/cm³ não devem ser utilizados em furos contendo água, a fim de evitar que flutuem, tendo em vista que água tem uma densidade igual a 1 g/cm³. Não obstante, já em detonações complexas, nas quais se busca uma fragmentação mais fina e controlada, recomenda-se o uso de explosivos mais densos. Por outro lado, em rochas já fragmentadas *in situ*, ou em situações em que não se exige uma fragmentação intensa, um explosivo de baixa densidade mostra-se suficiente.

Jimeno *et al.* (1990), destaca que a densidade é um parâmetro crítico para o desempenho dos agentes explosivos. Ou seja, quando muito baixa, os explosivos tornam-se mais sensíveis, com risco de acionamento antes do tempo previsto. Em contrapartida, quando muito elevada, podem adquirir insensibilidade, dificultando ou até impedindo a detonação. Além disso, a densidade adequada varia conforme a posição do explosivo na coluna perfurada para o desmonte, isto é as cargas de coluna requerem explosivos menos densos, enquanto as cargas de fundo do furo necessitam de explosivos mais densos, capazes de fornecer maior energia para promover a fragmentação eficiente da rocha. A Tabela 02 mostra valores típicos da massa específicas dos explosivos:

Tabela 02: Massa específica de alguns explosivos comerciais

TIPO	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)
Dinamite granulada	0,8 – 1,4
Dinamite gelatinosa	1,0 – 1,7
Lama encartuchada	1,1 – 1,3
Lama a granel	1,1 – 1,6
ANFO	0,8 – 1,0
ANFO encartuchada	1,1 – 1,2
ANFO pesado	1,1 – 1,4

Fonte: National Highway Institute (1991)

3.7.2 Potência e energia de detonação

Do ponto de vista das aplicações industriais, a potência constitui uma das propriedades mais relevantes dos explosivos, sendo definida como a quantidade de energia disponível para produzir efeitos mecânicos sobre o maciço rochoso. Esse parâmetro está diretamente relacionado à capacidade do explosivo de gerar ondas de choque intensas e gases de alta pressão. Ou seja, a finalidade da aplicação de um explosivo em um desmonte é gerar trabalho útil, aproveitando a energia liberada durante a detonação. Essa energia, ao ser transmitida ao maciço rochoso, é utilizada de diferentes formas, como na pulverização da rocha nas paredes do furo, no rompimento e deslocamento do material, na produção de calor e luz, no movimento da rocha fragmentada, na vibração do terreno e na geração de sobrepressão atmosférica (Silva, 2009).

Outrossim, segundo Silva (2009), por muito tempo, a energia de um explosivo foi avaliada em função do percentual de nitroglicerina (NG) presente em sua formulação. Entretanto, com os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novas metodologias, os agentes detonantes modernos já não utilizam NG em sua composição. Diante dessa mudança, restabeleceu-se um padrão de comparação baseado em dois parâmetros principais:

- RWS – *Relative Weight Strength* (Energia relativa por massa): corresponde à energia disponível por unidade de massa de um determinado explosivo, comparada

com a energia liberada por igual massa de um explosivo tomado como referência. Normalmente, o ANFO é utilizado como padrão.

- RBS – *Relative Bulk Strength* (Energia relativa por volume): refere-se à energia disponível por unidade de volume de um tipo de explosivo, comparada com a energia liberada por igual volume de um explosivo padrão. Esse parâmetro considera a densidade e o volume ocupado no furo, sendo essencial para avaliar a eficiência em diferentes condições de aplicação.

3.7.3 Velocidade e pressão de detonação

A velocidade de detonação de um explosivo (VOD) é o principal indicador de seu desempenho, uma vez que, a pressão de detonação é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação, conforme podemos observar na equação 02. Essa relação evidencia que pequenas variações na velocidade podem resultar em grandes diferenças na pressão gerada. Ou seja, uma forma prática de avaliar o desempenho de um explosivo consiste na comparação da pressão produzida no furo durante a detonação. Se essa pressão não superar a resistência dinâmica da rocha, o material não será fragmentado adequadamente e assim, nestes casos, a energia não aproveitada no processo de fragmentação e deslocamento da rocha se propaga pelo terreno sob a forma de vibrações (Silva ,2009).

$$PF = \rho \frac{VOD^2}{4} \times 10^{-6} \quad (2)$$

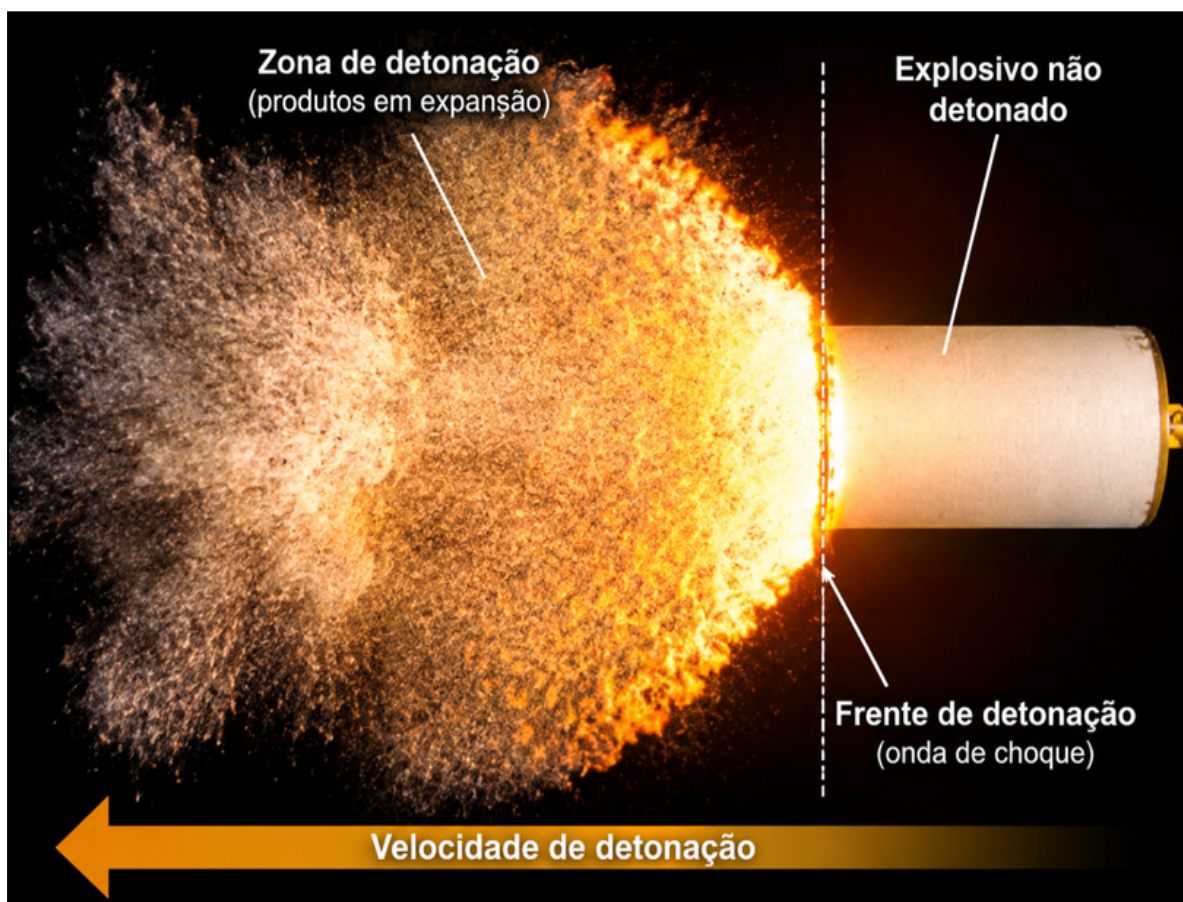
Onde:

- PF = pressão produzida no furo ao acoplar completamente o explosivo ao furo (GPa);
- ρ = densidade do explosivo (g/cm³);
- VOD = velocidade de detonação (m/s).

Não obstante, de acordo com Mancini e Cardu (2001), a velocidade de detonação corresponde à rapidez com que a onda de choque se propaga ao longo de uma coluna de explosivo. Esse parâmetro é influenciado por diversos fatores, entre eles, a composição química do explosivo, o diâmetro da carga, a densidade e o tamanho das partículas do material, o confinamento empregado no desmonte e o tipo de iniciação utilizado.

A Figura 08 representa o processo de detonação em um explosivo cilíndrico, evidenciando a frente de detonação, a zona de produtos em expansão e o explosivo não detonado. Nesse contexto, a velocidade de detonação (VOD) corresponde à rapidez com que a frente de choque se desloca pelo material explosivo, transformando o aludido instantaneamente em gases quentes sob alta pressão. Ou seja, esse parâmetro é crucial para avaliar o desempenho dos explosivos, pois determina a eficiência da transmissão de energia ao maciço rochoso e influencia diretamente a qualidade da fragmentação (Mancini e Cardu, 2001).

Figura 08: Onda de choque atravessando a coluna de explosivo



Fonte: Adaptado do Atlas Powder Company (1987).

3.7.4 Sensibilidade à iniciação

A sensibilidade é uma característica fundamental dos explosivos, pois define sua capacidade de permitir uma propagação eficiente da detonação ao longo da carga de coluna (Mancini e Cardu, 2001). Nesse contexto, a sensibilidade ao detonador corresponde à

quantidade de energia necessária para que o dispositivo de iniciação consiga iniciar, de forma satisfatória, a detonação do explosivo. Quanto maior a sensibilidade, menor será a energia exigida para o acionamento. Por outro lado, já os explosivos menos sensíveis requerem detonadores mais potentes ou condições específicas de iniciação para garantir a propagação da onda de choque.

Outrora, em consonância com Silva (2009), a sensibilidade pode ser definida como a susceptibilidade de um explosivo à iniciação, ou seja, sua capacidade de ser acionado por diferentes dispositivos de iniciação, como espoletas, cordéis detonantes ou boosters (reforçadores). Esse parâmetro está diretamente relacionado à reação necessária para que um explosivo inicie o processo de detonação. No caso dos agentes explosivos, a sensibilidade é controlada e só pode ser ativada por meio de um detonador, justamente por se tratarem de explosivos estáveis (Jimeno et al., 1990).

3.8 - MECANISMOS DE RUPTURA DOS MACIÇOS ROCHOSOS COM USO DE EXPLOSIVOS

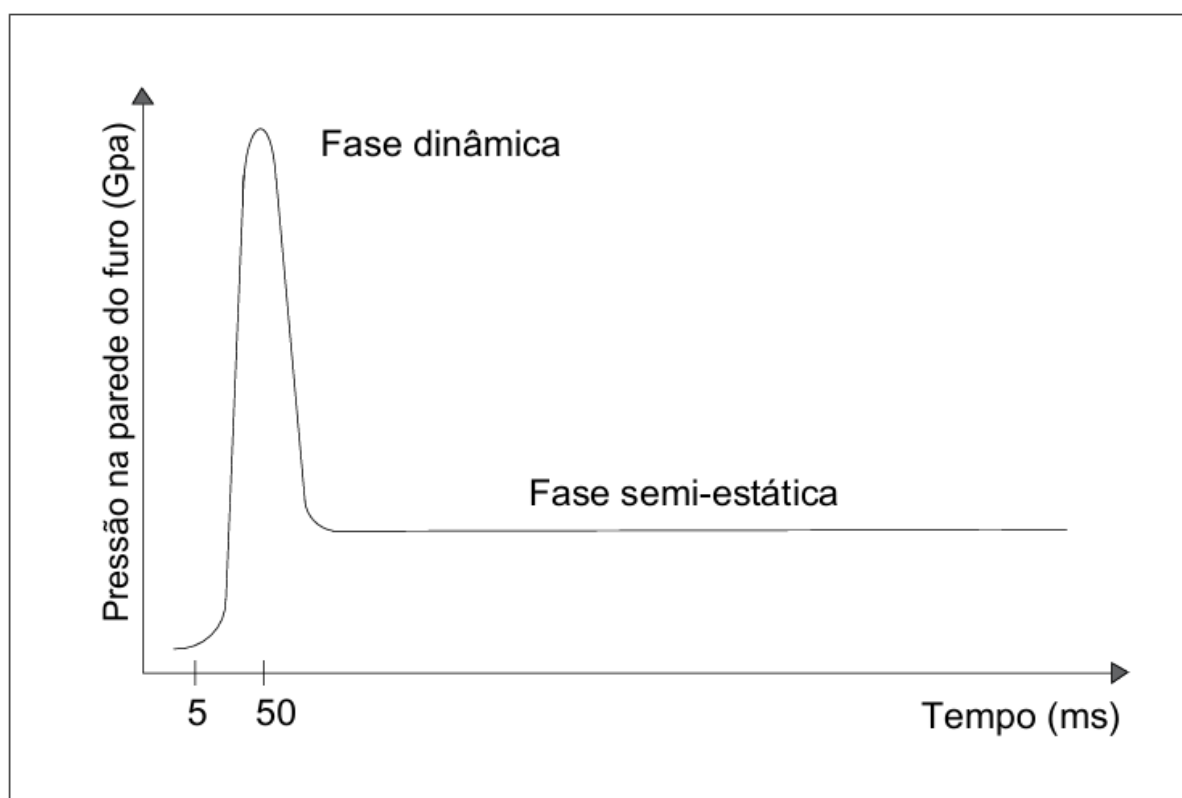
Findada a correta alocação dos explosivos e acessórios conforme a distribuição e geometria definidas na etapa de perfuração, é dado início ao processo de detonação. Esse procedimento promove a geração de uma intensa onda de choque, que se propaga rapidamente ao longo do maciço rochoso, em um curto intervalo de tempo, favorecendo a fragmentação da rocha e a eficiência da lavra. Esse fenômeno contribui para as duas fases principais das ações tensionais. Na primeira, ocorre um impacto imediato e intenso provocado pela onda de choque, associado à energia de tensão liberada em frações de segundo. Na segunda fase, os gases produzidos na zona de reação passam a atuar como portadores de energia termodinâmica, formando uma espécie de bolha sob condições de alta pressão e temperatura, conforme descrito por Jimeno (1990).

Ademais, é importante destacar que os mecanismos associados à atuação dos explosivos no interior dos maciços rochosos estão amplamente documentados e compreendidos, sobretudo em razão do uso intensivo da fragmentação de rochas nas atividades mineradoras. Esse processo se mostra essencial por fornecer materiais com granulometria adequada às etapas subsequentes de carregamento, transporte e britagem, além de apresentar baixo custo quando comparado ao tempo e ao volume produzido. Para alcançar tal eficiência, diversos fatores devem ser considerados, como o tempo de detonação, a

propagação das ondas de choque, a mecânica das rochas, a energia termodinâmica liberada e outras variáveis relevantes (Macedo, 2014).

De acordo com Silva (2009), os objetivos do desmonte de rocha com uso de explosivos estão fundamentados em quatro fatores amplamente reconhecidos: i) alcançar uma fragmentação adequada; ii) promover o deslocamento, movimentação e lançamento controlado da pilha; iii) minimizar os impactos ambientais decorrentes da operação; iv) reduzir ao máximo os danos ao maciço remanescente. Cabe salientar que para alcançar tais fatores, segundo Lenoir (2019), é necessário compreender as duas fases, que corroboram para que as perturbações sejam desencadeadas nas paredes dos furos ou do maciço rochoso ao longo do tempo, sendo elas a Fase Dinâmica e Semi - Estática. A Figura 09 evidencia os dois cenários.

Figura 09: Fases Dinâmicas e Semi-Estática (Curva típica de variação de pressão sobre as paredes do furo com o tempo após a detonação)



Fonte: Filho (1993).

Observa-se (na Figura 09) que a fase dinâmica é caracterizada pelo desprendimento de uma elevada pressão em um curto intervalo de tempo na parede do furo,

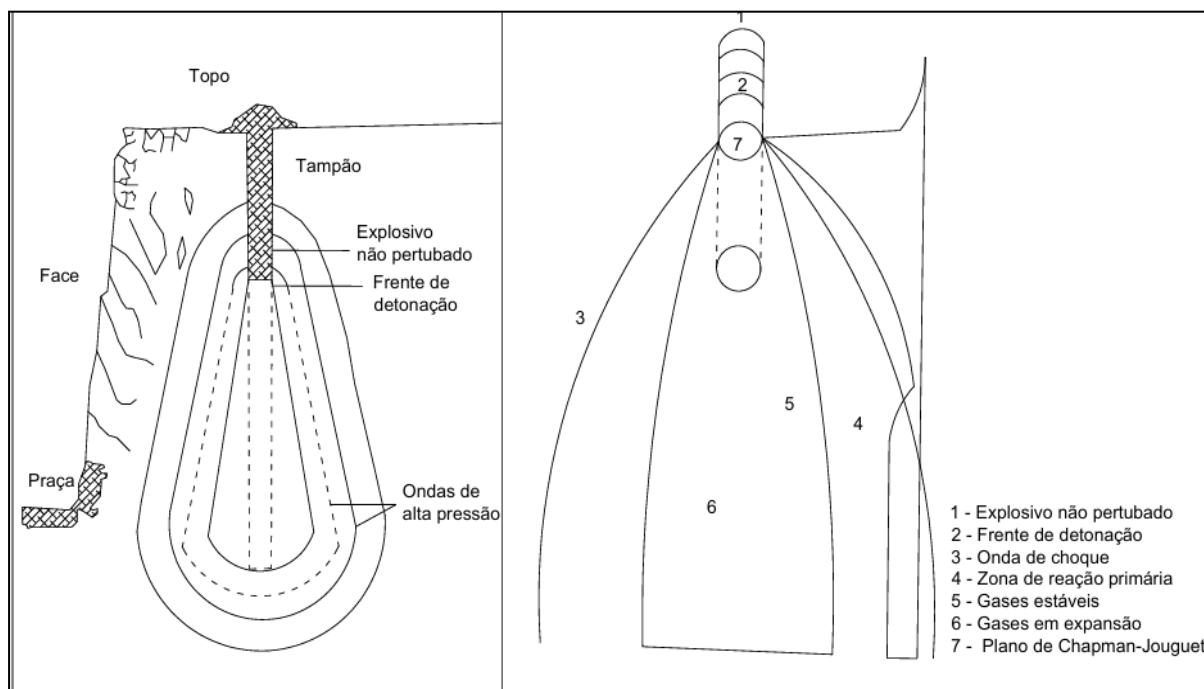
ou seja, uma elevada quantidade de energia é desprendida na rocha na forma de ondas de choque. Por conseguinte, esta pressão cai bruscamente em função do amortecimento das ondas de refração, configurando assim a fase semi-estática representada pela descompressão dos gases resultantes da detonação.

Por muito tempo, acreditava-se que os explosivos industriais desenvolviam seu trabalho de fragmentação da rocha apenas pela atuação dos gases de alta pressão decorrentes da detonação. Haja visto que, com as observações de campo, percebia-se que estes gases, no processo de descompressão, corroboram para a criação de fendas que percorriam até as faces livres e, por consequência, fragmentava o maciço rochoso. Contudo, nas últimas décadas, através da utilização de conceitos da fotoelasticidade, uma nova teoria de fragmentação surgiu e diante dos experimentos foi concebido que uma carga explosiva confinada desempenha duas fases distintas, sendo elas a fase dinâmica e a fase quase estática (Hayashida, 1999).

3.8.1 - Fase dinâmica

A detonação de um explosivo caracteriza-se pela formação de uma onda de choque, que pode assumir forma esférica, cilíndrica ou tronco-cônica (conforme ilustrado na Figura 10), propagando-se ao longo de toda a carga de coluna. Sua velocidade de propagação varia conforme o tipo de explosivo, as condições de ignição e o grau de confinamento. Sob essa perspectiva, a fase dinâmica da detonação tem início precisamente com o surgimento dessa onda de choque, ocorrendo aproximadamente nos primeiros 5 milissegundos após a ignição (como demonstrado na Figura 09). A partir desse ponto, a onda se desloca pela coluna de explosivos, desencadeando o processo de liberação de energia e fragmentação do maciço rochoso (Hayashida, 1999).

Figura 10: Ignição da carga explosiva e comportamento da onda de propagação



Fonte: Adaptado de Scott (1996)

Com base na Figura supracitada e de acordo com Silva (2009), destaca que a fase dinâmica se inicia pela deflagração da reação química do explosivo (que basicamente consiste em um processo exotérmico de decomposição de uma substância química explosiva), termodinamicamente instável, tendendo a atingir um regime estacionário segundo o plano de Chapman - Jouguet. Tal onda de choque, extremamente forte, que se desloca no maciço rochoso, numa expansão axial e radial, ao percorrer a coluna de explosivo, propaga-se pelo maciço adjacente de forma concêntrica, exercendo pulsos de compressão até alcançar a face livre (Jimeno et al., 1990). Nesse ponto, a onda é dividida nas ondas refratárias (que se desloca no meio subsequente) e nas reflexivas, que retorna para o interior do maciço, aplicando esforços de tração ou compressão dependendo da relação de impedância entre os meios.

Cabe salientar que a fase dinâmica se encerra no momento em que começam a surgir, de forma gradual, fraturas tangenciais originadas nas faces livres, propagando-se até alcançar novamente o plano que contém os furos de perfuração. Não obstante, Scott (1996), salienta que os tipos de ondas envolvidos no processo de detonação basicamente podem ser resumidos nas ondas longitudinais ou primárias (compressão P) e transversais ou secundárias

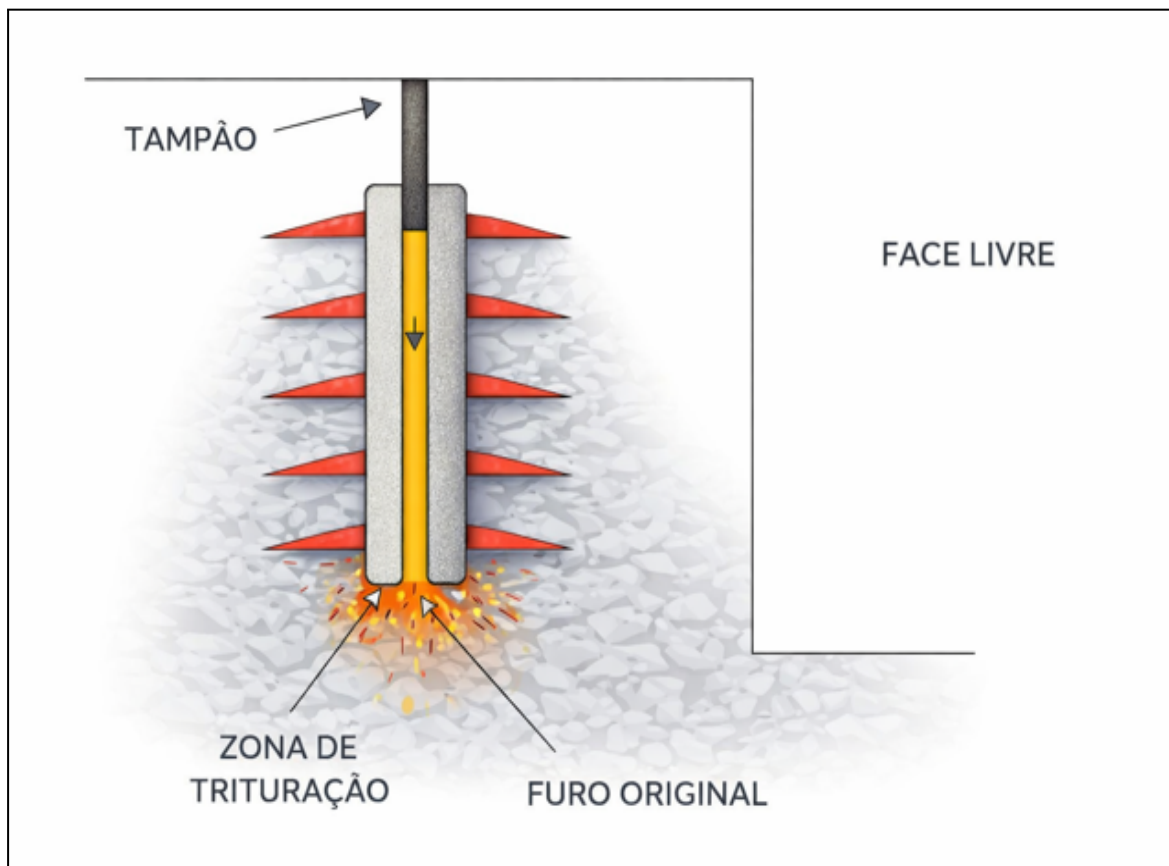
(cisalhantes S). Ainda neste viés Hayashida (1999), enfatiza que as velocidades com que estas ondas P e S se propagam pelo maciço são características de cada rocha, sendo maiores para as compactas e sãs, e menores para as menos compactas e/ou alteradas. Ao mesmo tempo, as ondas P são mais velozes que a S.

3.8.2 - Fase Semi-Estática

Filho (1993) argumenta que a fase semi-estática é responsável pela maior parcela da energia empregada na fragmentação do maciço rochoso, contribuindo com cerca de 95% a 97% da energia total disponibilizada durante o processo de detonação. Todavia, convém salientar que apesar da expressiva contribuição na redução de granulometria da rocha, a fase semi-estática só entra em ação após a fase dinâmica, haja visto que, para maciços não fraturados, tornar-se-ia impossível a fragmentação somente pela ação da fase semi-estática.

Segundo Hayashida (1999), esta fase ocorre quando os gases da detonação, em altas pressões e temperaturas, resultantes da reação química da detonação do explosivo, confinados na cavidade da rocha, procuram seu caminho de saída para a atmosfera. Haja visto que, trata-se do trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação, que ao transitarem pelas fendas e pelas microfissuras resultantes da fase dinâmica, os gases gerados agem através da ação de cunhas, propagando por meio das fendas e fraturas, que podem ser observados na Figura 11. Normalmente, esse evento ocorre após os 50 milissegundos da ignição (Figura 08) (Silva 2009). Ainda Hayashida (1999), argumenta que a medida em que os gases são liberados, ocorre o lançamento dos blocos, consumando-se o desmonte de rocha propriamente dito.

Figura 11: Fase Semi-Estática



Fonte: Adaptado de Silva, (2009).

3.8.3 - Trituração da rocha

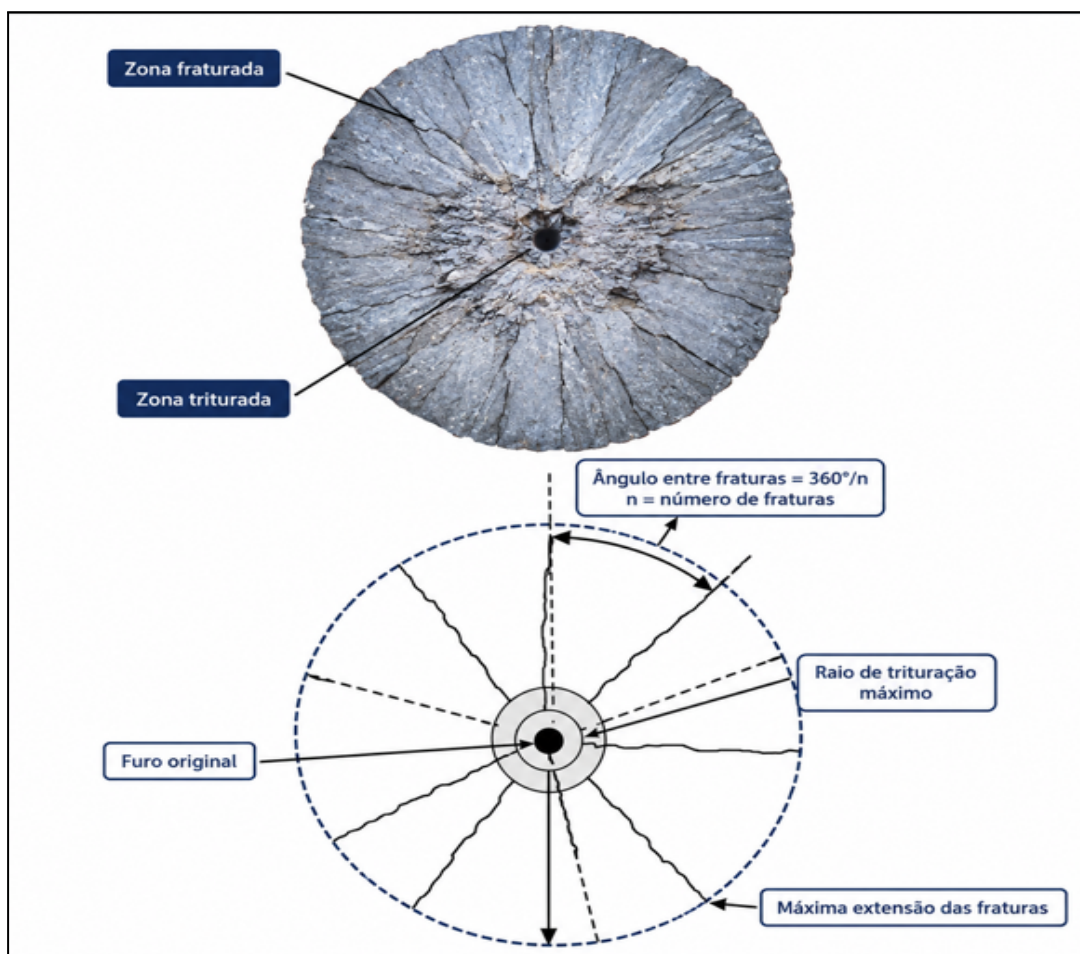
De acordo com Jimeno (1990), a trituração da rocha ocorre nos instantes iniciais da detonação, quando uma elevada pressão é exercida sobre as paredes do furo em forma de onda de choque. Essa onda, se propaga de maneira cilíndrica, atingindo valores muito superiores à resistência à compressão dinâmica da rocha, corroborando para destruição de sua estrutura inter cristalina e intergranular. Não obstante, Hagan (1977), destaca que esse mecanismo de ruptura consome aproximadamente 30% da energia transportada pela onda de choque, contribuindo para a fragmentação da rocha em cerca de 0,1% do volume total a ser desagregado.

Outrora, em consonância com Silva (2009), na vigente etapa a energia é transmitida para o maciço rochoso vizinho, na forma de uma onda de compressão, ou onda de choque, que se propaga a uma velocidade de 2.000 a 6.000 m/s. Ainda, nesta etapa, a pressão da frente da onda de choque, que se expande de forma cilíndrica, atinge valores acima de

18.000 atm, superando a resistência dinâmica à compressão da rocha e por consequência ocorre a trituração da rocha.

Silva (2009) enfatiza que o tamanho da circunferência de rocha triturada aumenta com a pressão de detonação do explosivo e com o acoplamento. Assim como, as feições da fragmentação com explosivos mostram que a maioria dos finos originam-se na área circunvizinha do furo, o que perfeitamente é explicado pelo esmagamento decorrente da pressão de pico nas ondas de choque, que excedem, em muito, o limite de resistência à compressão dinâmica das rochas. Segundo Jimeno et al., (1990), em desmontes realizados com explosivos de alta potência e em rochas porosas, o raio da zona triturada pode atingir valores de até 8 vezes o diâmetro do furo. Entretanto, em condições normais, esse valor geralmente varia entre 2 a 4 vezes o valor do diâmetro do furo de perfuração. Frente ao supracitado observe a Figura 12.

Figura 12: Zona triturada / fraturada do furo

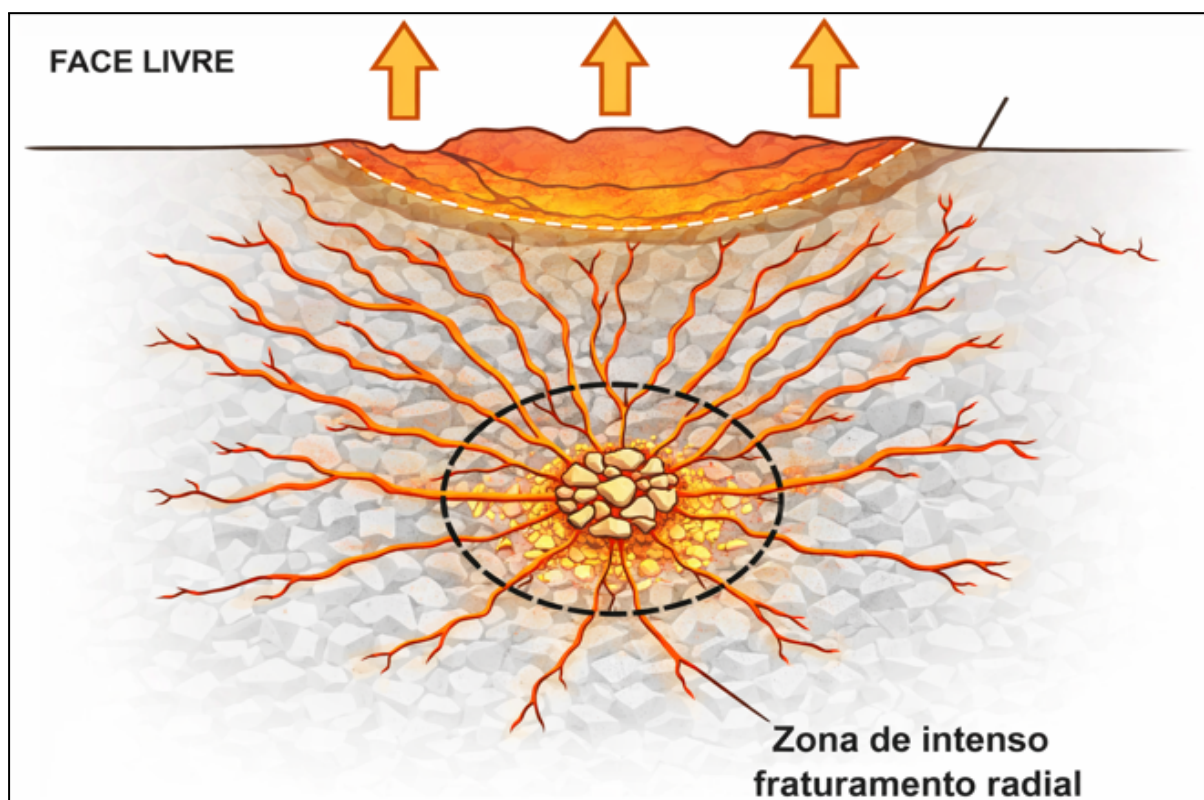


Fonte: Adaptações de Silva, (2009).

3.8.4 - Fraturamento radial

Consoante Silva (2009), durante a propagação da onda de choque, a rocha circundante ao furo é submetida a uma intensa compressão radial que induz componentes de tração nos planos tangenciais da frente da onda. Isto é, conforme Filho (1993), ao se considerar um contorno cilíndrico envolvendo a zona de esmagamento no instante da passagem da onda de deformação, essa região é submetida a uma intensa compressão radial, resultando no surgimento de tensões tangenciais de tração, conforme a Figura 13.

Figura 13: Fraturamento radial



Fonte: Adaptado de Jimeno et al., (1990).

Ainda neste viés, de acordo com Persson (1994), se a deformação excede à resistência à tração dinâmica da rocha, é possível evidenciar a formação de uma densa rede de microfissuras nas proximidades do furo, salientando um decréscimo no número dessas microfissuras à medida que se distancia do mesmo. Assim, quando as tensões superam a resistência dinâmica à tração da rocha, inicia-se a formação de uma zona densa de fraturas radiais ao redor da zona triturada que rodeia o furo.

3.8.5 - Reflexão da onda de choque

De acordo com Neves (2018), quando uma onda de choque alcança uma superfície livre, ela se subdivide em duas outras ondas, comumente denominadas onda cisalhante e onda de tração. Esse fenômeno ocorre em virtude da reflexão da onda ao atingir a face livre. Já segundo Stephen Timoshenko (2017), quando uma onda incide sobre um meio de impedância menor do que aquele em que vinha se propagando, parte de sua energia é refletida na forma de pulsos de tração. Assim, caso o pulso refletido seja superior à resistência à tração da rocha, podem ocorrer lascamentos ou escamamentos, que se iniciam na face livre e avançam em direção ao interior do maciço. Dessa forma, tanto as ondas de tração quanto as de cisalhamento têm potencial para propagar e ampliar fissuras pré-existentes.

3.8.6 - Extensão e abertura de fendas radiais

Segundo Macedo (2014), após a reflexão da onda de choque, forma-se ao redor do furo um campo de tensão, pois durante e após a geração das fendas radiais os gases passam a se expandir e a penetrar nas fraturas, prolongando as mesmas. Nesse sentido, Neves (2018) destaca que ocorre um aumento no tamanho e na quantidade das rachaduras radiais, provocado pela expansão dos gases que se infiltram nas fraturas após a passagem da onda de choque.

3.8.7 - Fraturamento pela a liberação da carga

De acordo com Jimeno et al. (1990), logo após a passagem da onda de compressão, estabelece-se um estado de equilíbrio quase estático acompanhado pela redução da pressão no furo. Esse fenômeno decorre da fuga dos gases através das fendas radiais já formadas e do deslocamento das rochas adjacentes. Nesse contexto, Neves (2018) ressalta que a ruptura é desencadeada pela rápida liberação da energia de tensão armazenada no maciço. Tal mecanismo não apenas afeta o volume de rocha próximo ao furo, mas também é capaz de provocar danos estruturais significativos a dezenas de metros de distância, ampliando o alcance da fragmentação e comprometendo a integridade do maciço.

3.8.8 - Fraturamento por cisalhamento

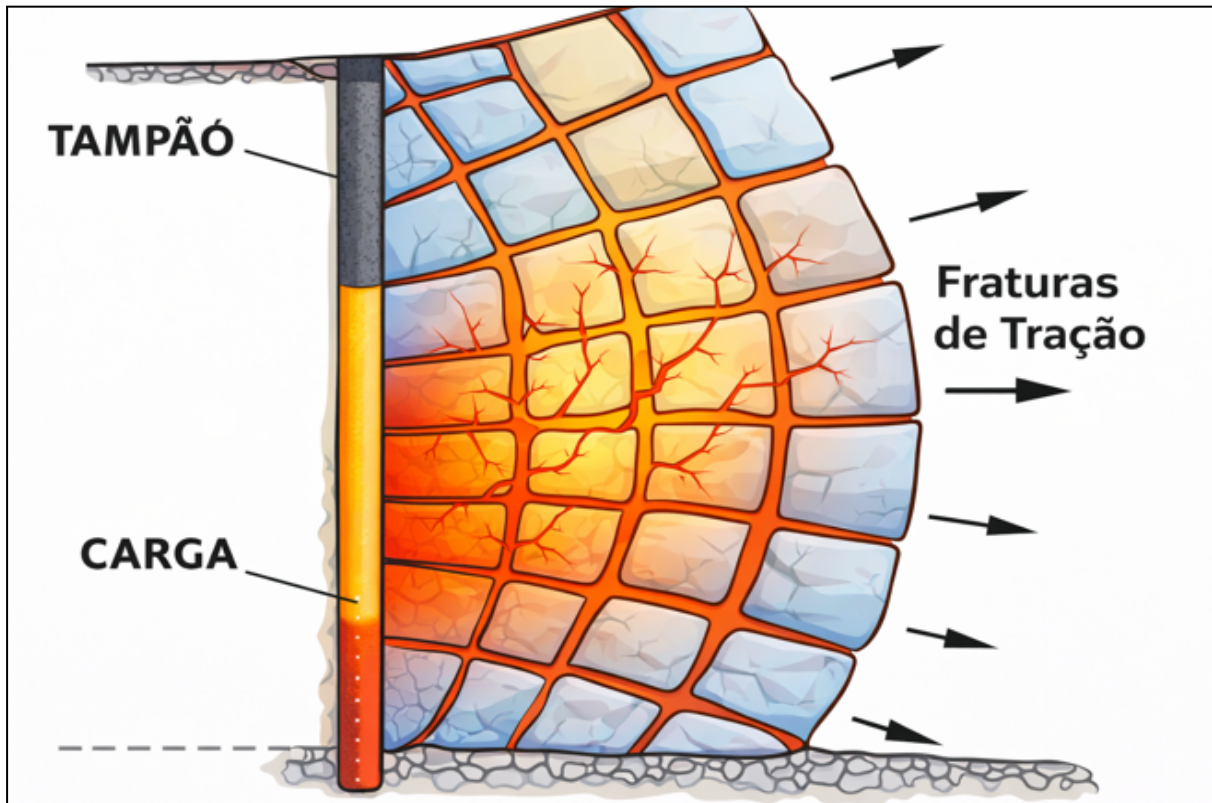
De maneira holística, o fraturamento por cisalhamento ocorre quando uma rocha adjacente sofre deslocamentos em tempos distintos ou a velocidades diferentes, provocados pela ação dos gases em alta pressão (Silva, 2009). Nesse processo, as tensões geradas favorecem o surgimento de planos de ruptura. Além disso, conforme destaca Macedo (2014), em formações rochosas sedimentares, quando os estratos apresentam diferentes módulos de elasticidade, surgem rupturas nos planos de separação. Em outras palavras, a heterogeneidade mecânica entre os estratos conduz ao desenvolvimento de tensões diferenciais ou cortantes, que desencadeiam a ruptura ao longo desses planos de fraqueza.

Não obstante, segundo Filho (1993), quando os gases penetram entre duas fraturas radiais adjacentes, exercem pressão sobre a rocha por efeito de cunha. Esse mecanismo de compressão pode gerar deslocamentos adicionais e, caso a pressão seja suficientemente elevada, desencadeia a formação de fraturas cisalhantes orientadas de forma normal às fraturas radiais já existentes.

3.8.9- Ruptura por flexão

Segundo Jimeno *et al.* (1990), a ruptura por flexão consiste na pressão exercida pelos gases da detonação, onde faz com que a rocha se comporte de maneira semelhante a uma viga submetida a esforços internos. Esse efeito gera deformações que, ao excederem a resistência do material, resultam em fraturamento por flexão, ampliando fissuras pré-existentes e favorecendo a fragmentação do maciço rochoso, como podemos observar na Figura 14.

Figura 14: Ruptura por Flexão



Fonte: Adaptado de Jimeno et al., (1990).

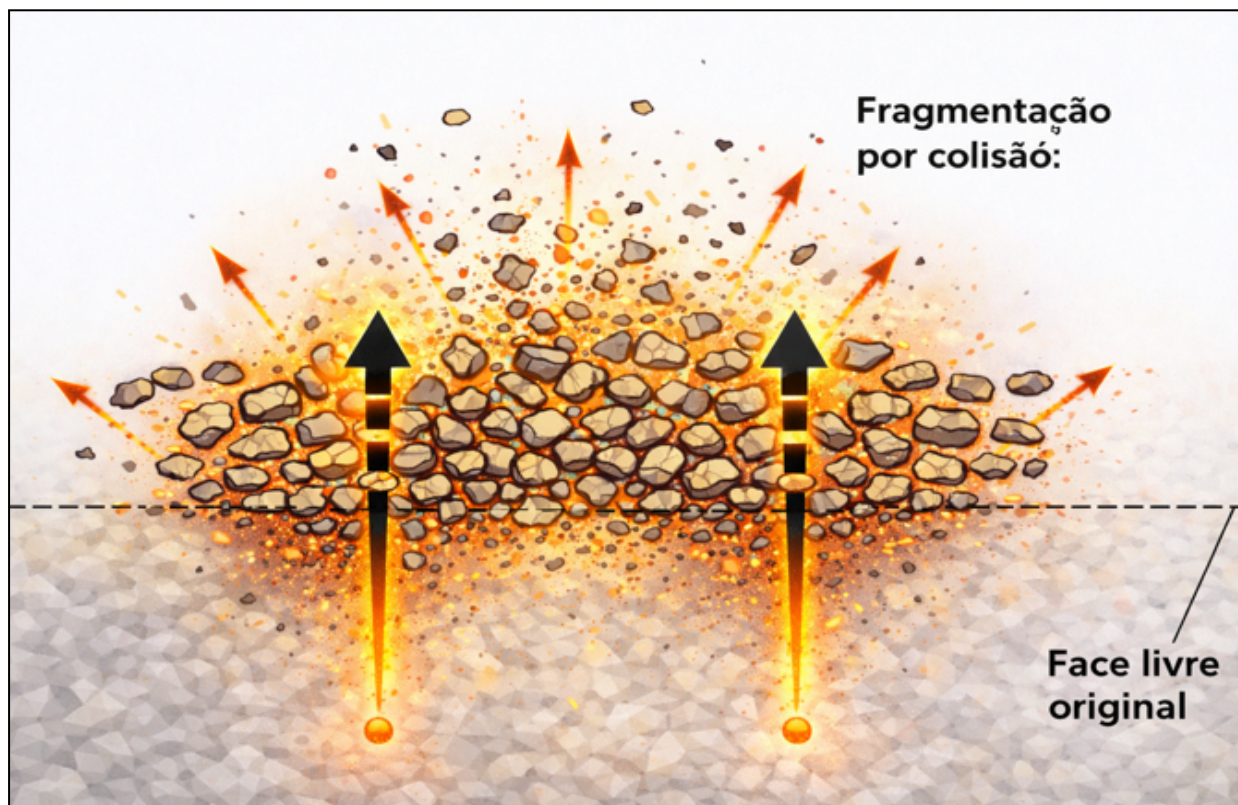
Observe que na figura supracitada, a carga detonada dentro do furo gera ondas de compressão que se propagam pelo maciço e, ao atingir a superfície livre, parte dessa energia se reflete em forma de pulsos de tração. Esses pulsos iniciam fraturas de tração que se desenvolvem a partir da face livre em direção ao interior da rocha. Nesse mecanismo, a rocha entre o furo e a superfície livre comporta-se como uma viga submetida a esforços de flexão. O deslocamento diferencial causado pela propagação das ondas e pela expansão dos gases cria momentos fletores internos. Quando a tensão de tração resultante excede a resistência do material, ocorre a ruptura por flexão, ampliando as fissuras já existentes e favorecendo a fragmentação do maciço.

3.8.10 - Ruptura por colisão

A ruptura por colisão constitui um mecanismo adicional de fragmentação, resultante do choque entre os fragmentos previamente gerados pelos demais processos de fraturamento. Esses fragmentos, impulsionados e acelerados pela ação dos gases sob alta pressão, colidem entre si, produzindo tensões adicionais que intensificam a quebra da rocha.

Esse fenômeno complementa os mecanismos primários de fraturamento, ampliando a pulverização do material e contribuindo para a eficiência global do desmonte (Neves, 2018). Frente ao supracitado observe a Figura 15.

Figura 15: Ruptura por colisão



Fonte: Adaptado de Jimeno et al., (1990).

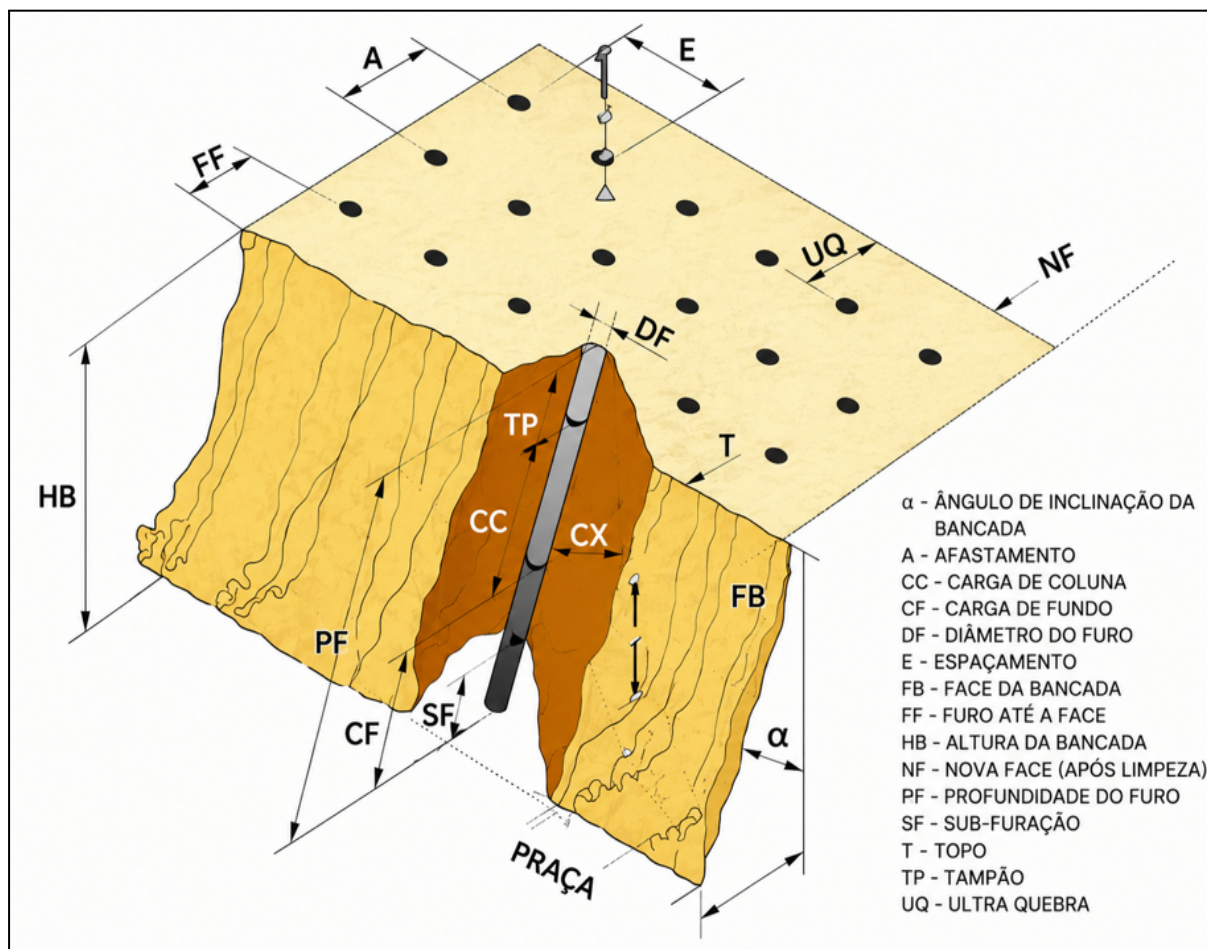
A figura acima ilustra o processo pelo qual fragmentos de material se chocam entre si após a detonação, intensificando a fragmentação do maciço. Ou seja, quando a carga explosiva é liberada, as ondas de choque propagam-se em direção à face livre, provocando deslocamentos bruscos de blocos e partículas. Esses fragmentos, ao se moverem em alta velocidade, colidem uns contra os outros, gerando tensões adicionais que favorecem a quebra secundária da rocha. Sob esse viés, esse mecanismo é descrito por Jimeno et al. (1990) como um dos responsáveis pela ampliação da fragmentação, pois não apenas atua na região próxima ao furo, mas também contribui para a dispersão e pulverização do material em áreas mais afastadas da frente livre. Assim, a ruptura por colisão complementa os efeitos das fraturas radiais e de tração, garantindo maior eficiência no desmonte e explicando a presença de partículas menores resultantes do impacto entre fragmentos.

3.9 PARÂMETROS DE UM PLANO DE FOGO DE LAVRA A CÉU ABERTO

No desenvolvimento dos cálculos e da elaboração de um plano de fogo, é necessário considerar variáveis que influenciam diretamente o resultado esperado da operação de desmonte. Essas variáveis se organizam em três grupos distintos, comumente conhecidos como, geométrico, que envolve parâmetros como diâmetro e comprimento da carga, altura da bancada, espaçamento e afastamento entre os furos; O físico-químico, relacionado às propriedades do explosivo, como sua energia, tipo e potência, e por fim, temporal, que abrange os tempos de retardo e as sequências de iniciação. A integração adequada desses fatores é essencial para garantir a eficiência da fragmentação, a segurança da operação e a otimização dos recursos empregados no desmonte de rochas (Macedo, 2014).

Cabe salientar que, segundo Oliveira (2017), a elaboração de um plano de fogo exige análise criteriosa e planejamento detalhado. Haja visto que, um projeto bem estruturado é essencial para alcançar uma fragmentação eficiente, minimizar o desperdício de explosivos e reduzir os efeitos adversos das vibrações, além de contemplar outros fatores que impactam diretamente a segurança e a eficácia da operação. Diante deste contexto e com vista a compreender cada parâmetro, observe a Figura 16.

Figura 16: Variáveis de um plano de fogo



Fonte: Silva, (2019).

Pode-se observar na Figura 16 a sintetização dos principais parâmetros que devem ser considerados na elaboração de um projeto de desmonte de rocha. Ou seja, trata de um esquema técnico que evidencia como fatores geométricos, no caso do diâmetro do furo (DF), o afastamento (A), o espaçamento (E) e a altura da bancada (HB), se relacionam com elementos operacionais, como a carga de fundo (CF) e a carga de coluna (CC). Além disso, o diagrama destaca variáveis complementares, como a subfuração (SF), o ângulo de inclinação da bancada (α) e a ultra quebra (UQ), que influenciam diretamente a eficiência da fragmentação e a segurança da operação (Silva, 2019).

3.9.1 Afastamento

De modo geral, o afastamento (A) pode ser definido como a distância entre a face livre e a primeira linha de furos ou alternativamente como a menor distância entre as linhas

da malha de perfuração. Esta é uma das variáveis mais críticas na elaboração do plano de fogo (Oliveira, 2017). Conforme Jimeno et al. (1990), a função desse parâmetro é controlar a quantidade de rocha a ser deslocada, dado que quando o afastamento é excessivo, poderá ocorrer má fragmentação (geração de matacos ou granulometrias fora das especificações requeridas), enquanto valores muito reduzidos resultam em excesso de energia e fragmentação pulverulenta (excesso de finos ou até mesmo ultralançamentos). Em ambos os casos, o descontrole desse fator acarreta custos adicionais, seja pelo uso excessivo de explosivos, seja pela necessidade de desmontes secundários, como aqueles realizados mecanicamente por meio de rompedores hidráulicos.

Segundo Morais (2004), o afastamento deve ser definido em função do diâmetro dos furos, das características do maciço rochoso e dos tipos de explosivos empregados. Diversos autores têm proposto fórmulas para o cálculo desse parâmetro; contudo, todas convergem para um intervalo que varia entre 25 e 40 vezes o diâmetro do furo (d), (Macedo, 2014). Além disso, conforme a Equação 03 proposta por Bhagat *et al.* (2020), a determinação adequada do afastamento depende também da Designação de Qualidade da Rocha (RQD), do diâmetro do furo, da densidade do explosivo e da densidade da própria rocha, evidenciando que se trata de uma variável multifatorial cuja correta definição é essencial para a eficiência e segurança do plano de fogo.

$$A = \frac{g}{RQD} x d^{0,7} x \frac{\sqrt{\rho}}{\gamma} \quad (03)$$

Onde:

- A = Afastamento (m);
- g = constante gravitacional, (9,8 m/s²);
- RQD = Designação de Qualidade da Rocha;
- d = diâmetro do furo (m);
- ρ = densidade do explosivo (Kg/m³);
- γ = densidade da rocha (Kg/m³).

3.9.2 Espaçamento

Comumente representado pela letra E, o espaçamento corresponde à distância entre furos pertencentes a uma mesma linha da malha de perfuração. Em geral, seu

dimensionamento é definido em função do afastamento, assumindo valores entre 1,1 e 1,5 vezes esse parâmetro, conforme Oliveira (2017). Entretanto, Silva (2009) ressalta que o espaçamento jamais deve ser inferior ao afastamento, pois essa condição pode ocasionar a geração excessiva de matacões e comprometer a eficiência da fragmentação. O autor também destaca que, em malhas alongadas, caracterizadas por elevadas relações entre espaçamento e afastamento (E/A), normalmente superiores a 1,75, há melhor desempenho em rochas friáveis, favorecendo a distribuição de energia do explosivo e a fragmentação do maciço rochoso.

Segundo Filho (1993), o espaçamento (E) apresenta diferentes valores conforme o tipo de malha de perfuração adotada. Para malhas quadradas, o valor de E é igual ao afastamento (A); nas malhas retangulares inversas, varia entre $A/2$ e A ; já nas malhas retangulares de corte, deve ser inferior a $A/2$. No caso das malhas retangulares convencionais, o espaçamento pode variar de A até $2A$, enquanto nas malhas alongadas, em situações especiais, E é superior a $2A$, podendo atingir até $6A$. Em desmontes convencionais de pedreiras, observa-se que o espaçamento geralmente utilizado situa-se entre 1,3 e 3 vezes o afastamento, valor que busca equilibrar a eficiência da fragmentação com o consumo adequado de explosivos.

De acordo com Silva (2009), a altura da bancada influencia diretamente na definição do espaçamento entre os furos, sendo necessário considerar diferentes condições conforme a relação entre altura da bancada (Hb) e afastamento (A). No caso de bancadas baixas ($Hb/A < 4$), dois cenários devem ser avaliados, primeiro quando os furos são detonados com retardos, o espaçamento é determinado pela Equação 04; Por outro lado, quando os furos de uma linha são iniciados instantaneamente, o espaçamento é obtido pela Equação 05. De forma análoga, em bancadas altas ($Hb/A > 4$), também se observam duas situações. Isto é, para iniciações instantâneas, o espaçamento é calculado pela Equação 06; enquanto para furos detonados com retardos, temos a equação 07. As equações são apresentadas a seguir

$$E = \frac{(Hb + 7A)}{8} \quad (04)$$

$$E = 0,33 (Hb + 2A) \quad (05)$$

$$E = 2 \times A \quad (06)$$

$$E = 1,4 \times A \quad (07)$$

3.9.3 Diâmetro do furo

A definição do diâmetro de perfuração (D) envolve a consideração de diversos fatores que influenciam diretamente a eficiência do desmonte. Entre os aspectos mais relevantes concerne a fragmentação requerida, que determina o tamanho e a distribuição dos blocos resultantes, assim como a produtividade de escavação desejada, que condiciona o ritmo e a viabilidade econômica da operação. Bem como, as propriedades do maciço rochoso, que incluem resistência, estrutura e grau de fraturamento in situ. Assim, a análise integrada desses elementos é essencial para assegurar que o diâmetro escolhido proporcione equilíbrio entre desempenho técnico, segurança e otimização dos custos operacionais (Oliveira, 2017).

Outrora, Silva (2009) enfatiza que, além do supracitado, a escolha do diâmetro de perfuração está também diretamente relacionada à produção horária, ao ritmo de escavação, à altura da bancada e à resistência da rocha. Haja visto que, em operações que demandam elevada produtividade, torna-se necessário o uso de furos de maior diâmetro. Contudo, o aumento da produção não ocorre de forma linear em relação ao diâmetro do furo, mas sim de maneira aproximadamente quadrática, dependendo da capacidade dos diferentes equipamentos de perfuração disponíveis.

Em lavra superficial, os diâmetros de perfuração variam entre 50 mm e 380 mm (Jimeno et al., 1990), e sua escolha impacta diretamente a eficiência do desmonte, apresentando vantagens e desvantagens conforme o valor adotado. Os diâmetros menores favorecem uma melhor fragmentação da rocha, reduzem o nível de vibração e minimizam os danos ao maciço remanescente, entretanto, exigem maior número de furos e aumentam o tempo de perfuração. Já os diâmetros maiores reduzem a quantidade de furos necessários, o tempo de perfuração e a carga de explosivo por furo, mas tendem a gerar uma distribuição granulométrica menos uniforme, resultando em pior qualidade de fragmentação quando comparados aos diâmetros menores. Dessa forma, a definição do diâmetro ideal deve buscar o equilíbrio entre produtividade, qualidade da fragmentação e custos operacionais, considerando as características específicas do maciço rochoso e os objetivos da operação.

Outrossim, o diâmetro do furo exerce influência indireta sobre a dimensão dos blocos obtidos no desmonte, uma vez que está associado às limitações impostas pelos equipamentos de carregamento. Nesse contexto, a pá carregadeira, responsável pela limpeza

da praça, é considerada o primeiro equipamento limitante quanto ao tamanho máximo dos blocos, estabelecendo uma relação direta com o diâmetro de perfuração. Essa correlação é descrita por meio da Equação 08 empírica proposta por Herrmann (1972), que busca compatibilizar as características operacionais da máquina com os parâmetros de perfuração, garantindo maior eficiência no processo de desmonte.

$$\phi = \mu c \quad (08)$$

onde:

- ϕ é o diâmetro do furo em polegadas;
- μc é a capacidade da pá carregadeira em jardas cúbicas.

3.9.4 Bancada

Segundo Filho (1993), a bancada pode ser compreendida como a forma geométrica atribuída ao maciço rochoso com o objetivo de organizar a formação das faces livres. Sobre essas faces incidem e se refletem as ondas de choque provenientes da detonação, ampliando os efeitos da fragmentação por meio da ação dinâmica e semi-estática das cargas explosivas. Os principais elementos constituintes da bancada são o topo ou crista, a face e a praça ou pé da bancada, cada um desempenhando papel fundamental na eficiência do desmonte e na qualidade da fragmentação obtida.

Segundo Curi (2014), as bancadas constituem as unidades básicas em que se organiza a exploração nas operações de lavra a céu aberto. Existem diferentes tipos de bancadas, cada uma com funções específicas. As bancadas de trabalho, também chamadas de praças, são aquelas onde se realizam efetivamente as operações fundamentais do ciclo de lavra, como perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Já as bancadas de contenção são projetadas para reter materiais que eventualmente escorreguem de níveis superiores. Por sua vez, as bancadas ou bermas de segurança têm como função principal manter o ângulo geral do talude, contribuindo para a estabilidade global do *pit* e garantindo maior segurança às operações.

3.9.5 Altura da bancada

Em consonância com o antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a altura da bancada (HB) constitui um parâmetro de grande relevância para a segurança e a economicidade das operações de lavra. Essa altura deve ser definida de modo que qualquer perturbação no equilíbrio dos níveis provoque apenas efeitos locais, além de assegurar a compatibilidade entre a escala de produção desejada e os equipamentos de lavra disponíveis. Ainda segundo Silva (2009), a definição da altura da bancada deve ser realizada considerando aspectos de ordem técnica e econômica, tais como:

- As condições de estabilidade da rocha que compõe o maciço e a segurança nas operações de escavação;
- O volume de produção desejado, o qual determinará o tipo e o porte dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte;
- A maximização da eficiência no custo total de perfuração e desmonte.

Ainda no contexto supracitado, Jimeno et al., (1990) ressalta que a altura da bancada corresponde à altura do banco de rocha a ser desmontado, ou seja, a distância vertical entre a praça e o topo da bancada, medida em metros. A definição desse parâmetro deve ter como objetivo a maximização do rendimento do desmonte, assegurando sua adequação aos equipamentos de carregamento, a redução dos custos de perfuração e o aumento da estabilidade do talude remanescente.

Não obstante, conforme Curi (2014), a altura dos bancos de lavra é definida, entre outros fatores, a partir das dimensões dos equipamentos de perfuração e desmonte, das características do maciço rochoso e da dimensão dos blocos de lavra. Normalmente, esse parâmetro é estabelecido com base na altura máxima de escavação do equipamento utilizado nas operações de desmonte. Com os avanços tecnológicos, a perfuração deixou de impor limites significativos à altura da bancada, restrição que, até alguns anos atrás, precisava ser cuidadosamente investigada.

3.9.6 Subperfuração

A subperfuração (SF) corresponde ao comprimento perfurado abaixo da praça da bancada ou do greide a ser atingido. Sua necessidade decorre do engasgamento da rocha no pé da bancada. Caso não seja realizada, a base não será arrancada segundo um ângulo de 90°,

e o pé da bancada deixará de permanecer horizontal, formando o chamado “repé”. Essa condição exige perfurações secundárias de acabamento, que são altamente onerosas e representam riscos significativos tanto para os operários quanto para os equipamentos. Geralmente, corresponde a aproximadamente 30% do afastamento, ou seja, cerca de 0,3 vezes o valor do afastamento, conforme apresentado na Equação 09 a seguir (Silva, 2009).

$$S = 0,3A$$

(09)

Cabe salientar que o dimensionamento da subperfuração depende diretamente das propriedades do maciço rochoso, do tipo de carga de fundo utilizada, do diâmetro e da inclinação do furo, além da região de iniciação da coluna de explosivos (Atlas Powder, 1987). Contudo, quando realizada em excesso, pode resultar em perfuração desnecessária, desperdício de explosivos, intensificação das vibrações no maciço e fragmentação indesejada do piso da bancada, comprometendo etapas subsequentes de perfuração e tamponamento.

3.9.7 Profundidade do furo

Conforme Jimeno et al., (1990), a profundidade do furo (PF) corresponde ao comprimento total perfurado, sendo superior à altura da bancada, uma vez que, para sua determinação, devem ser considerados tanto a subperfuração quanto a inclinação do furo. Cabe salientar que, a escolha do equipamento de perfuração é determinada pela profundidade e pelas condições do espaço disponível. Por exemplo, em perfurações mais profundas, entre 50 e 70 metros ou superiores, é empregado o método do martelo de fundo de furo, em substituição ao martelo de superfície, haja visto que, esse sistema assegura maior eficiência na transmissão de energia e na remoção dos fragmentos de rocha (Silva, 2009).

Segundo Silva (2009), o comprimento do furo aumenta proporcionalmente à inclinação aplicada, entretanto, a subperfuração (SF) tende a diminuir nesse mesmo contexto. Para o cálculo da profundidade do furo (PF), utiliza-se a Equação 10

$$PF = \frac{HB}{\cos \alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \times SF \quad (10)$$

Onde:

- PF = profundidade do furo (m);

- HB = altura da bancada (m);
- α = ângulo de inclinação do furo (graus);
- SF = Sub - furação (m).

3.9.8 Inclinação do furo

A perfuração pode ser realizada tanto com furos verticais quanto inclinados. A adoção de furos inclinados apresenta vantagens e desvantagens, sendo a escolha condicionada às características do maciço rochoso e às exigências operacionais. Assim, cabe à análise das condições específicas determinar a necessidade de utilizar furos inclinados ou não (Oliveira, 2017).

Outrora, a utilização de furos inclinados apresenta vantagens como melhor fragmentação da rocha e menor espalhamento da pilha, já que o afastamento calculado na superfície se mantém mais uniforme ao longo do furo. Além disso apresenta maior eficiência na utilização da energia do explosivo, devido à maior reflexão da onda de choque em comparação com furos verticais, assim como corrobora com a redução da necessidade de subperfuração, o que contribui para melhor aproveitamento da energia e diminuição das vibrações produzidas. Por outro lado, entre as desvantagens é possível salientar a maior dificuldade de posicionamento das perfuratrizes, o aumento do comprimento do furo em relação ao vertical, o maior desgaste dos equipamentos e a complexidade em manter o paralelismo da perfuração (Macedo, 2014).

3.9.9 Carga de coluna e carga de fundo de furo

De acordo com Filho (1993), a própria geometria da bancada induz maior resistência à fragmentação nas regiões próximas ao piso. Essas diferentes reações da rocha à quebra tornam necessária a utilização de, pelo menos, dois tipos distintos de carregamento de explosivos, definidos conforme a posição ocupada no furo, isto é, as cargas de fundo, aplicadas na base, e as cargas de coluna, posicionadas ao longo do restante do furo. Jimeno et al. (1990) recomenda que a energia da carga de fundo seja aproximadamente de 2 a 2,5 vezes superior à energia da carga de coluna. Para alcançar essa proporção, empregam-se explosivos de alta potência e elevada densidade no fundo, como a emulsão, enquanto na coluna são utilizados materiais de menor potência, como ANFO ou emulsões de baixa densidade.

Outrora, a carga de coluna corresponde à porção de explosivo posicionada acima da carga de fundo. Diferentemente desta, não necessita ser tão concentrada, já que a rocha nessa região apresenta menor resistência à fragmentação. A altura da carga de coluna é obtida pela diferença entre a altura total da carga (H_c) e a altura da carga de fundo (H_{cf}), (Silva, 2009). Dito isso e dado a perspectiva algébrica temos a seguir a Equação 11.

$$H_{cc} = H_c - H_{cf} \quad (11)$$

Outrossim, segundo Silva (2009), a carga de fundo é uma carga reforçada, indispensável na base do furo, onde a rocha apresenta maior resistência à fragmentação. Alguns autores recomendam que a altura da carga de fundo (H_{cf}) corresponda a aproximadamente 30% a 40% da altura total da carga de explosivos (H_c). Contudo, a tendência, conforme os resultados obtidos nos desmontes, é reduzir gradualmente esse valor, visando à diminuição dos custos com explosivos. Com efeito e com base no supracitado, podemos determinar a altura da carga de fundo utilizando a Equação 12.

$$H_{cf} = 0,3 \times H_c = 0,3 \times (H_f - T) \quad (12)$$

O cálculo do comprimento da carga de fundo baseia-se na ação das ondas de choque, que se propagam de forma esférica. Na condição limite, quando a velocidade de detonação do explosivo é equivalente (em módulo) à velocidade de propagação da onda de choque na rocha, o comprimento atribuído à carga de fundo pode ser determinado pela equação previamente apresentada, conforme descrito por Filho (1993).

3.9.10 Tampão

Segundo Oliveira (2017), o tampão corresponde à porção superior do furo, que não é carregada com explosivos, mas preenchida com material inerte, geralmente brita, areia ou detritos de perfuração. Esse material deve ser devidamente compactado, de modo a cumprir sua principal função, como o confinamento dos gases de detonação garantindo maior eficiência no processo de fragmentação da rocha.

Conforme Silva (2009), o material utilizado no tampão deve possuir forma angular para garantir seu funcionamento adequado, sendo desaconselhado o uso de detritos de perfuração. O confinamento eficiente é essencial para que a carga explosiva libere sua máxima energia, além de contribuir para o controle da sobrepressão atmosférica e para a

redução do ultralaçamento de fragmentos rochosos. A altura do tampão pode ser determinada pela equação 13.

$$T = 0,7 A \quad (13)$$

Entretanto, Silva (2009) ressalta que o ótimo tamanho do material do tampão (OT) deve apresentar um diâmetro médio (D) equivalente a aproximadamente 0,05 vezes o diâmetro do furo, conforme expresso na Equação 14 a seguir.

$$OT = \frac{D}{20} \quad (14)$$

A análise das condições do tampão permite observar dois cenários distintos. Quando o comprimento do tampão (T) é menor que o afastamento (A), aumenta o risco de ultralaçamento dos fragmentos para regiões mais altas da bancada. Por outro lado, quando (T) é maior que (A), ocorre a formação de mais matação (fragmentos grandes), porém o lançamento de material tende a ser reduzido ou até mesmo eliminado (Silva, 2009).

3.9.11 Tempos de retardo e sequência de detonação

Segundo Filho (1993), a sequência de detonação dos furos constitui um dos fatores fundamentais para o sucesso do desmonte. Com o uso de retardos adequados, à medida que os furos são detonados, além de favorecer o fraturamento por cisalhamento, surgem novas faces livres, o que reduz a resistência da rocha à ação dos explosivos nos furos subsequentes. Por meio de técnicas de retardo, é perfeitamente possível obter uma pilha de material fragmentado compatível com os equipamentos de carregamento e transporte, além de controlar a área de lançamento do material desmontado, garantindo maior eficiência e segurança operacional.

Adicionalmente, Silva (2009), destaca que os retardos são acessórios empregados em desmontes controlados ou no controle de vibrações, conforme ilustrado na Figura 15. Esse dispositivo é formado por uma cápsula, composta por um tubo metálico revestido de material plástico. Ou seja, sua utilização ocorre na conexão com o cordel detonante, sendo iniciado em uma das extremidades. Assim, durante o processo ocorre uma redução da velocidade de queima no interior do dispositivo retardador, seguida pela detonação do cordel na extremidade oposta àquela em que foi iniciado, uma vez que, segundo Herrmann (1972),

esse mecanismo garante maior controle sobre a sequência de detonação, contribuindo para a eficiência e segurança das operações de desmonte.

Figura 17: Tipos de retardos



Fonte: Britanite Enaex (2024).

3.10 MODELOS MATEMÁTICOS PARA A AVALIAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO ROCHOSA

A aplicação do desmonte por explosivos tem como objetivo principal fragmentar a rocha em tamanhos menores, de forma eficiente e em grande escala, contribuindo para a redução do tempo de execução das operações (JIMENO *et al.*, 1990). Nesse contexto, os modelos matemáticos surgem como ferramentas fundamentais para estimar e prever o comportamento da rocha frente à ação dos explosivos, permitindo maior previsibilidade dos resultados, otimização dos custos e redução dos impactos ambientais.

Não obstante, cabe salientar que a escolha de um modelo de predição da fragmentação torna possível estimar, de forma sistemática, a distribuição granulométrica

resultante do desmonte, considerando os parâmetros definidos no plano de fogo (JIMENO et al., 1990). A eficiência desses modelos é avaliada por meio da comparação entre os resultados previstos e a fragmentação real observada, permitindo verificar o grau de precisão alcançado e ajustar os cálculos para futuras operações.

Outrossim, no que se refere às principais aplicações dos modelos matemáticos vigentes, destaca-se o estudo de caso desenvolvido por Braga (2018), intitulado Análise da fragmentação de gnaiss no desmonte com explosivos por métodos analíticos e uso de imagens. O trabalho teve como objetivo elaborar uma revisão aprofundada e promover o entendimento detalhado do processo de fragmentação da rocha durante o desmonte por explosivos. Nesse contexto, foi realizada a análise de um caso real de detonação, no qual se compararam os modelos Kuz-Ram, KCO e TCM, aplicados ao município de Divinópolis, Minas Gerais. A abordagem permitiu avaliar a aplicabilidade prática desses modelos, bem como a confiabilidade dos resultados obtidos por meio de métodos analíticos e da utilização de imagens digitais para caracterização granulométrica.

Não obstante, cabe salientar também o trabalho desenvolvido por Kansake, B. A., Temeng, V. A. e Afun, B. O. (2016), onde tem como título: *Comparative Analysis of Rock Fragmentation Models – A Case Study*. O estudo de caso teve como objetivo avaliar o desempenho dos modelos Kuz-Ram, Kuz-Ram Modificado e KCO, buscando identificar aquele de maior precisão e aplicabilidade às minas analisadas. A pesquisa foi conduzida em duas grandes minas de ouro em Gana, denominadas Mina A e Mina B. A Mina A localiza-se em *Tarkwa*, na Região Ocidental de *Gana*, aproximadamente 85 km a noroeste de *Takoradi* e 320 km a sudoeste de *Accra*, capital do país (Kansake et al., 2016).

Além dos trabalhos já mencionados, destaca-se o estudo de Santana (2018), intitulado Aplicação do modelo KUZ-RAM e Fotoanálise na avaliação da eficiência do desmonte em mineração de gipsita na região do Araripe. O objetivo foi otimizar os resultados do desmonte, reduzindo a geração de blocos indesejados e ajustando o plano de fogo para adequar melhor os fragmentos à etapa de britagem. O estudo foi desenvolvido em um empreendimento de extração de gipsita inserido no Polo Gesseiro do Araripe, onde foram levantados os parâmetros do maciço rochoso e do plano de fogo, com posterior tratamento das imagens por meio da fotoanálise, associado à aplicação do modelo Kuz-Ram e de técnicas de otimização matemática, resultando em uma avaliação precisa da eficiência do desmonte e em propostas de melhorias no processo.

3.10.1 Modelamento de desmonte de rocha - modelo KUZ-RAM

Múltiplos autores desenvolveram modelos matemáticos com o intuito de estimar a granulometria do desmonte de rochas, considerando parâmetros relacionados aos explosivos, à geometria do plano de fogo e às características do maciço rochoso. Diante do supracitado, entre esses estudos, destaca-se o modelo Kuz-Ram, amplamente utilizado na mineração devido à sua simplicidade na coleta dos dados de entrada e à relação direta estabelecida entre o projeto de desmonte e o resultado do desmonte de rocha, Cunningham (2005).

Dada a perspectiva histórica, segundo Adebola et al. (2018), o modelo Kuz-Ram foi apresentado pela primeira vez na Conferência de Lulea, em 1983, com o propósito de prever a fragmentação de rochas resultante do uso de explosivos. Assim, desde sua criação, o modelo passou por avaliações e melhorias, que embora atualmente existam modelos mais complexos que oferecem maior precisão, ainda assim, o Kuz-Ram permanece relevante por sua simplicidade e pela capacidade de fornecer aproximações razoáveis dos resultados da fragmentação.

Segundo Neves (2018), o modelo de fragmentação Kuz-Ram é fundamentado em três equações principais, comumente conhecidas como a equação de Kuznetsov, a função de Rosin-Rammler e a equação de uniformidade de Cunningham. Ou seja, quando essas três bases matemáticas, estão integradas, permitem estimar de forma consistente a granulometria resultante do desmonte de rochas, relacionando parâmetros dos explosivos, do plano de fogo e das características do maciço rochoso.

3.10.2 Equação de Kuznetsov

De acordo com Cunningham (1987) modificou a equação empírica de Kuznetsov com o objetivo de estimar o tamanho médio dos fragmentos (xm) resultantes da detonação. Além disso, incorporou a distribuição de Rosin-Rammler para representar toda a distribuição granulométrica. Nesse contexto, a equação de Kuznetsov descreve tanto o tamanho médio dos fragmentos detonados (xm) quanto a razão de carga, conforme apresentado nas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$Xm = A \cdot K^{-0,8} \cdot Q^{0,167} \cdot \left(\frac{115}{ER}\right)^{0,633} \quad (15)$$

Onde:

- X_m = Tamanho médio dos fragmentos (cm);
- A = Fator de rocha, dependerá das características geomecânicas do maciço;
- K = Fator de carga (Kg/m^3);
- Q = Carga de explosivos no furo (Kg);
- RWS ou ER: Energia relativa por massa efetiva do explosivo, ANFO, por exemplo é de 100;

Cabe salientar que a determinação do parâmetro A é obtida por meio da Equação 16, a qual descreve o fator de rocha. Esse fator depende diretamente das características geomecânicas do maciço, refletindo suas propriedades físicas e estruturais que influenciam o comportamento durante o desmonte (Braga, 2018).

$$A = 0,06 \cdot (RMD + JF + RDI + HF) \quad (16)$$

Onde:

- RMD = Resistência mecânica da rocha
- JF = Grau de fraturamento
- RDI = Rugosidade das descontinuidades
- HF = Homogeneidade do maciço

Por outro lado, conforme Braga (2018), a determinação do fator de carga K é apresentada na Equação 17, onde expressa (Q_e) - a relação da massa do explosivo no furo (kg) e V_0 é o volume de rocha desmontado por furo (m^3), isto é:

$$K = \frac{Q_e}{V_0} \quad (17)$$

Outrora a energia relativa do explosivo (RWS ou ER) pode ser calculada, segundo Tidman (1991) e conforme citado por Braga (2018), por meio da Equação 18.

$$ER = \left(\frac{V_{ODe}}{V_{ODn}} \right)^2 \cdot RSW_e \quad (18)$$

Onde:

- V_{ODe} = é a velocidade de detonação efetiva em m/s (medida em campo);
- V_{ODn} é a velocidade de detonação nominal em m/s (no rótulo do produto);

- RSW é a energia relativa do ANFO (RSWANFO=100).

Não obstante, cabe salientar que Lilly (1986) introduziu o conceito de fator de rocha, posteriormente aperfeiçoado por Cunningham (1987). Para a definição desse fator, utilizam-se os dados provenientes da categorização apresentada no Tabela 03, que considera parâmetros como o tipo de rocha, a direção e o mergulho das descontinuidades em relação à frente livre do desmonte. Diante do exposto, o fator de rocha é aplicado como elemento de ajuste no modelo de previsão, permitindo corrigir o tamanho médio dos fragmentos resultantes da operação de desmonte (CUNNINGHAM, 1987; MORAIS et al., 2004).

Tabela 03:Classificação geomecânica para obtenção do fator de rocha

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE
RMD	Maciço Rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço Fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Oversize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção de mergulho em relação a face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha)	RDI= 25d- 50	

	intacta, g/cm ³)	
HF	Se E < 50 Gpa	HF= E/3
	Se E > 50 Gpa	HF= UCS/5
E	Módulo de Young (GPa)	
UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	

Fonte. MORAIS et al, 2004 *apud* CUNNINGHAM, 1983

3.10.3 Equação de ROSIN-RAMMLER

A Equação 19, proposta por Rosin-Rammler, estabelece uma correlação entre o índice de uniformidade de Cunningham e a equação de Kuznetsov. Ou seja, a partir dessa relação, torna-se possível traçar a curva de distribuição granulométrica das partículas, permitindo avaliar de forma precisa o grau de fragmentação resultante do desmonte.

$$R = e^{(-0,693 \cdot (\frac{X}{X_m})^n)} \quad (19)$$

Onde:

- R = Fração retida (não passante) por uma malha de tamanho x;
- X = Abertura da peneira (cm);
- X_m = Tamanho médio dos fragmentos (cm);
- n = Índice de uniformidade de Cunningham.

Cabe salientar que o índice de uniformidade desempenha papel essencial na avaliação da fragmentação resultante do desmonte. Esse índice é obtido por meio da Equação 20 desenvolvida por Cunningham (1987), a qual permite quantificar o grau de homogeneidade da distribuição granulométrica das partículas, servindo como parâmetro de referência para o controle da eficiência e da qualidade do processo de fragmentação.

$$n = [2,2 - 14 \frac{A}{DF}] \cdot [1 + \frac{(\frac{E}{A})}{2}]^{0,5} \cdot [(1 - \frac{W}{A}) \cdot (abs \cdot \frac{CF-CC}{HC} + 0,1) \cdot \frac{HC}{HB}] \quad (20)$$

Onde:

- n = Índice de uniformidade de Cunningham;
- A = Afastamento (m);
- DF = Diâmetro do furo (m);
- E = Espaçamento (m);
- W = Desvio do furo (mm);
- abs = Valor absoluto;
- CF = Comprimento da carga de fundo (m);
- CC = Comprimento da carga de coluna (m);
- HC = Comprimento da carga (m);
- HB = Altura da bancada (m).

Frente ao exposto e em consonância com Cunningham (1987), foi estabelecida a aplicabilidade do coeficiente de uniformidade (n , geralmente entre 0,6 e 2,2) por meio de diversas investigações, considerando os efeitos da geometria do plano de fogo, tais como: diâmetro e comprimento do furo, espaçamento, carga explosiva e precisão da perfuração. Assim, quando se realizam desmontes com a aplicação de diferentes cargas explosivas, isto é, a carga de fundo e a carga de coluna diferem quanto a sua composição, podemos então determinar o Índice de uniformidade de Cunningham por meio da expressão representada pela Equação 20.

Por outro lado, quando se utiliza um único tipo de explosivo no furo, o índice de uniformidade de Cunningham pode ser determinado em função da Equação 21, a qual expressa a relação direta entre as características do explosivo e o padrão de fragmentação esperado no desmonte.

$$n = [2,2 - 14 (\frac{A}{DF})] \cdot [0,5(1 + \frac{E}{A})]^{0,5} \cdot [1 - \frac{W}{A}] \cdot [\frac{HC}{HB}] \quad (21)$$

Onde:

- n = Índice de uniformidade de Cunningham;
- A = Afastamento (m);
- DF = Diâmetro do furo (m);
- E = Espaçamento (m);

- W = Desvio do furo (mm);
- HC = Comprimento da carga (m);
- HB = Altura da bancada (m).

3.10.4 Modelo Kuznetsov Cunningham Ouchterlony (KCO)

Ouchterlony (2005) destacou que o modelo Kuz-Ram não se mostrou adequado para definir com precisão as frações granulométricas finas e grosseiras. Nesse sentido, a limitada capacidade do modelo proposto por Cunningham em representar os finos foi uma das principais razões que motivaram o desenvolvimento do *Two-Component Model* (TCM) (1999) e do *Crush Zone Model* (CZM) (1999). Ambos os modelos combinam duas distribuições do tipo Rosin-Rammler: uma voltada para a parte grosseira da curva e outra destinada principalmente à representação dos finos, proporcionando maior precisão na caracterização da distribuição granulométrica.

Não obstante, Ouchterlony sugeriu uma nova abordagem paralela ao TCM e ao CZM, denominada KCO. Nesse modelo, o tamanho médio dos fragmentos e o índice de uniformidade são calculados a partir da equação proposta por Cunningham (1987). A função anteriormente utilizada por Rosin-Rammler para definir a distribuição granulométrica passa, nesse contexto, a ser substituída pela Swebrec, que oferece maior precisão na representação das partículas, especialmente nas frações finas e grosseiras. Diante do exposto, observa-se que a função Swebrec $P(x)$ é descrita pela Equação 22, constituindo uma alternativa mais robusta para a modelagem da curva granulométrica.

$$P(x) = \frac{1}{\left\{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)}\right]^b\right\}} \quad (22)$$

Onde:

- $P(x)$ = Porcentagem de material passante em uma peneira com abertura X (cm);
- b = Fator de ondulação da curva (fator geométrico);
- X_{50} = Tamanho médio da distribuição granulométrica da pilha de material desmontado (cm);
- X_{max} = Tamanho máximo dos blocos formados na detonação (cm);

O parâmetro b , denominado expoente de ondulação, ou, em algumas referências, expoente da característica natural de quebra, foi destacado por Ouchterlony (2005) como um elemento fundamental na descrição da curva granulométrica, influenciando diretamente a forma da distribuição das partículas resultantes do desmonte. Nesse contexto, o parâmetro b pode ser determinado por meio da Equação 23, que fornece a base matemática para sua quantificação e aplicação prática.

$$b = [2 \cdot \ln(2) \cdot \ln(\frac{X_{max}}{X_{50}})] \cdot n \quad (23)$$

O pré-fator $g(n)$, é dado pela Equação 24 (Quaglio, 2020).

$$g(n) = \frac{\ln 2^{\frac{1}{n}}}{\Gamma(1 + \frac{1}{n})} \quad (24)$$

Onde:

- Γ = função gama
- n = índice de uniformidade.

Tamanho médio (X_{50}) da distribuição granulométrica da pilha de material desmontado pode ser determinado pela Equação 25, Castro (2021);

$$x_{50} = \left[\frac{g(n) \cdot A \cdot Q^{\frac{1}{6}} \cdot (\frac{115}{S_{ANFO}})}{q^{0,8}} \right] \quad (25)$$

Conforme Finn Ouchterlony (2005), para que a equação responsável por obter a curva de fragmentação possa ser resolvida, é necessário determinar previamente o índice de uniformidade (n), o qual é calculado por meio da Equação 26.

$$n = \frac{(2,2 - 0,014 E)}{DF} \cdot \left(\frac{1 - SD}{E} \right) \cdot \sqrt{\left[\frac{1 + \frac{A}{E}}{2} \right]} \cdot \left[\frac{|CF - CC|}{Hc + 0,1} \right]^{0,1} \cdot \left(\frac{Hc}{HB} \right) \quad (26)$$

Onde :

- DF = Diâmetro do furo (m);
- A = Afastamento (m);

- E = Espaçamento (m);
- HB = altura da bancada (m);
- CF = comprimento carga de fundo (m);
- CC = comprimento carga de coluna (m);
- Hc = Comprimento total do furo (m);
- SD = Razão de saturação ou fator de desvio;

3.10.5 *WipFrag*

O programa *WipFrag*, conforme descrito por Moraes (2004), foi desenvolvido com o propósito de realizar estudos granulométricos por meio da técnica de fotoanálise. Criado pelos pesquisadores John Franklin e Norbert Maerz, da Universidade de Waterloo, em colaboração com a indústria mineradora, o software consolidou-se como uma ferramenta inovadora ao permitir a conversão de imagens de pilhas de material fragmentado em curvas granulométricas confiáveis. Assim, ao automatizar a medição de partículas, o *WipFrag* reduz a subjetividade das análises visuais e fornece resultados quantitativos que podem ser comparados diretamente com modelos empíricos, como o Kuz-Ram e o KCO.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada em seis etapas principais, descritas a seguir:

- I. Seleção da pedreira e da bancada para estudo de caso;
- II. Seleção dos métodos de predição granulométrica para análise;
- III. Levantamento dos dados do plano de fogo e imagens do desmonte;
- IV. Obtenção dos parâmetros dos modelos;
- V. Desenvolvimento das planilhas de cálculo e gráficos;
- VI. Avaliação dos resultados obtidos.

4.1 Localização da Pedreira

A base desta pesquisa foi desenvolvida em um empreendimento de extração de calcário, uma pedreira voltada para a indústria cimenteira localizada na região noroeste do estado do Ceará.

4.2 Escolha dos modelos de predição granulométrica

Durante uma reunião realizada com a concedente do empreendimento mineiro, foi destacado que em determinadas regiões da mina o número de maticos por tonelada apresentava-se elevado, demandando medidas corretivas para reverter o quadro. Com o intuito de compreender os fatores que contribuíam para essa situação, a concedente disponibilizou o plano de fogo da área em questão, contemplando os parâmetros geométricos, características da mecânica das rochas, explosivos utilizados, resultados de fotoanálises e o gráfico de distribuição da curva granulométrica real produzida pelo desmonte, fornecendo subsídios técnicos para a avaliação e proposição de ajustes necessários.

Assim, considerando o contexto apresentado, o levantamento bibliográfico realizado e a análise de *softwares* (como *Wipfrag*) voltados à previsão e avaliação da fragmentação, verificou-se que os modelos mais empregados na prática são o Kuz-Ram e o KCO, apesar de suas limitações. Ambos se destacam pela simplicidade de formulação e pela necessidade de poucos dados de entrada, o que facilita a determinação de seus parâmetros e contribui para sua ampla adoção em diferentes operações de desmonte. Contudo, o elevado custo de *softwares* comerciais leva muitas empresas a recorrerem a alternativas mais

acessíveis, como o desenvolvimento de planilhas próprias e o uso de ferramentas de baixo custo, a exemplo do *Excel*, para o controle e acompanhamento das atividades mineiras.

Além disso, considerando as características do maciço rochoso, que embora apresente zonas fraturadas (Figura 18) mantém elevada consistência por se tratar de uma rocha metamórfica. Assim, o modelo Kuz-Ram destaca-se por fornecer curvas de distribuição do tamanho das partículas, enquanto o KCO aprimora essa previsão ao incorporar zonas de fragmentação e parâmetros de uniformidade, tornando a análise mais detalhada e representativa das condições reais de desmonte.

Figura 18: Maciço rochoso fraturado



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Portanto, neste estudo, o trabalho foi conduzido por meio do desenvolvimento de planilhas didáticas desenvolvidas no *software Excel*, referentes aos métodos Kuz-Ram e KCO, utilizando o plano de fogo fornecido pela concedente, com o objetivo de comparar as curvas granulométricas previstas matematicamente com a curva real obtida no desmonte (dado fornecido pela a empresa). Para tanto, foram considerados como parâmetros de entrada

os dados levantados do maciço rochoso e do plano de fogo, cuja relação encontra-se apresentada na Tabela 04.

Tabela 04: Parâmetros de entrada dos modelos Kuz-Ram e KCO.

Parâmetros	Kuz-Ram	KCO
Densidade	X	X
Resistência à compressão uniaxial	X	X
Resistência à tensão	X	X
Módulo de Young	X	X
Diâmetro máximo		X

Fonte: Autor (2026)

4.3 Obtenção dos dados do plano de fogo

Tabela 05: Plano de fogo avaliado.

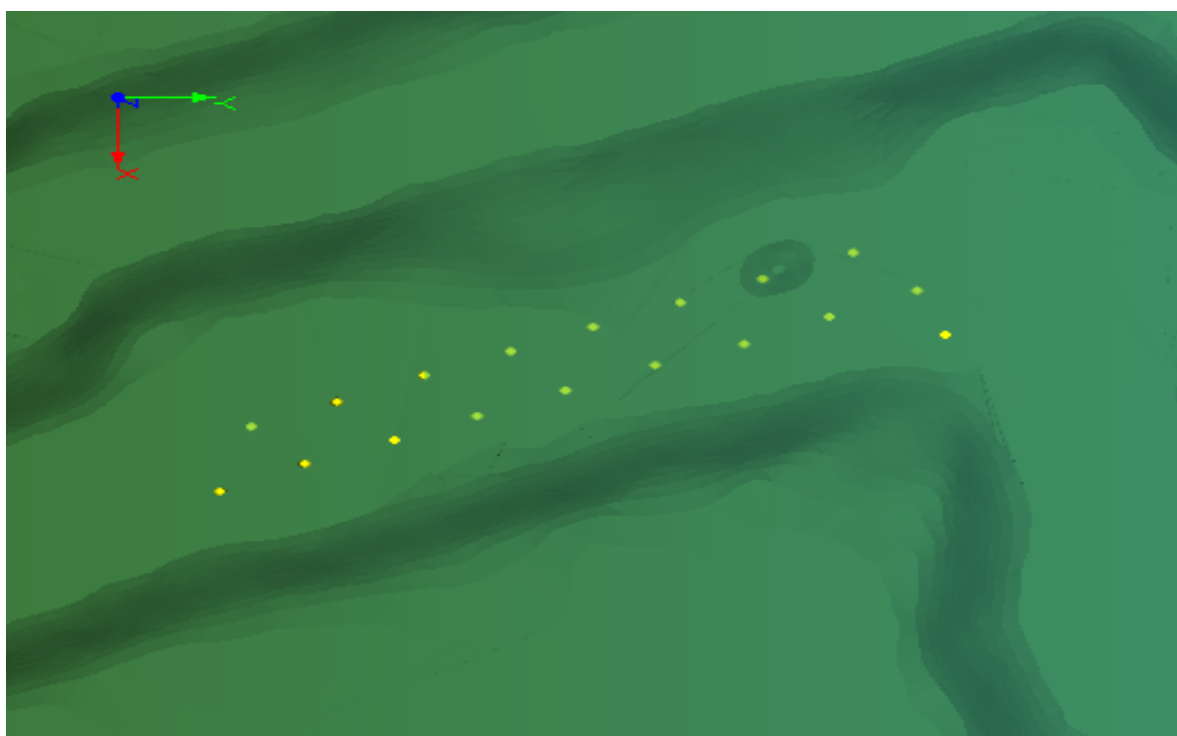
Parâmetros	Símbolos	Unidade	Valor
Diâmetro dos furos	DF	mm	139,70
Afastamento	A	m	4,00
Espaçamento	E	m	7,00
Subfuração	SF	m	1,20
Tampão	TP	m	2,80
Altura do Banco	HB	m	12,85
Comprimento do Furo	PF	m	15,21
Comprimento da Carga	C	m	12,16
Carga de Fundo	CF	m	0
Carga de Coluna	CC	m	12,16
Número de furos	N	-	18
Inclinação	α	°	20
Total Desmontado	TD	ton	9197,12

Volume Total Desmontado	VT	m ³	3537,35
Volume Desmontado por Furo	VF	m ³	393,04
Carga de Explosivo por Furo	Qe	Kg	265,22
Razão Linear	RL	Kg/m	17,48
Razão de Carga Mássica	RCm	Kg/ton	0,259
Razão de Carga Volumétrica	RCv	kg/m ³	0,674

Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Corroborando, temos a Figura 19, representando a distribuição dos furos na bancada em planta. Os aludidos foram levantados através do sistema o RTK (Real-Time Kinematic) que é uma técnica de posicionamento GNSS que aumenta a precisão do GPS de metros para centímetros ou até milímetros, usando correções em tempo real enviadas de uma estação base para um receptor móvel. Assim, os aludidos respeitam os critérios expostos na Tabela 05 .

Figura 19: Distribuição espacial em planta dos furos do desmonte



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Após a execução de todos os furos de produção do desmonte de rocha, foi empregado como explosivo na bancada em questão a emulsão bombeada, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 06 a seguir. Não obstante, para os furos identificados pelo operador da perfuratriz como “deram passagem” - indicando que, em determinada profundidade, foi constatada uma zona de alívio ou a formação de pequenas cavidades - tornou-se necessária a utilização de emulsão encartuchada (conforme já ilustrado na Figura 04), de modo a garantir o preenchimento adequado e a eficiência da detonação nesses casos específicos.

Tabela 06: Parâmetros de entrada dos modelos Kuz-Ram e KCO

Propriedade dos explosivos	
Tipo	Emulsão
Densidade (g/cm ³)	1,15
RSW	85,0
VODn (km/s)	4,25

Fonte: adaptado de <http://www.oricaminingsservices.com/br/pt>

4.4 Desenvolvimento dos cálculos

Para a geração dos gráficos de previsão da fragmentação da rocha segundo cada um dos dois modelos, foram elaboradas planilhas no *software Excel*. Uma vez que, as planilhas foram desenvolvidas de forma autônoma, com formulações simples dos parâmetros, reforçando a praticidade e a acessibilidade dos modelos em aplicações reais. Nas aludidas, os *inputs* ou dados de entrada correspondem aos parâmetros específicos de cada método, enquanto os *outputs* ou resultados representam as frações de fragmentos com diâmetro superior a um tamanho X (cm), conforme a equação de Rosin-Rammler. Os gráficos obtidos expressam as curvas granulométricas previstas para os resultados simulados de cada modelo. Nas Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam-se as capturas de tela das planilhas elaboradas para ambos os métodos avaliados.

4.4.1 Para o modelo KUZ-RAM

Figura 20: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo Kuz-Ram

Determinação dos parâmetros de KUZ - RAM									
Cálculo de A		Cálculo de K (Q_e/V_0)		Cálculo de Er		Cálculo de n			
RDI		Q_e		VODe		Descrição	Unidade	Valor	
d (g/cm^3)		V_0		VODn		A (afastamento)	m		
HF				RWSe		E (Espaçamento)	m		
G (Gpa)		K	#DIV/0!			DF (Diâmetro do furo)	mm		
UCS (Mpa)				Er	#DIV/0!	W (Desv. Pad. Perf)	m		
RMD						HC (Compr. Tot carga)	m		
JF		Tamanho médio de Kuznetsov		$X_{\text{máx}}$ (m)	#NÚM!	HB (Haltura da Banc.	m		
JPS		X_{50}	#DIV/0!			CF (Comp car fundo)	m		
MS						CC (Comp carga col)	m		
DP						Tampão	m		
JPA		Parâmetros da rocha							
		E (Gpa)				1 tipo de explosivo	n1	#DIV/0!	
		UCS (Mpa)	0			2 tipos de explosivos	n2	#DIV/0!	
A	0	d (g/cm^3)	0						

Fonte: Adaptado de Braga (2018).

Cabe ressaltar que a Figura 20 foi desenvolvida no *software Microsoft*. Para determinar todos os parâmetros de cada modelo foram utilizadas todas as equações expostas ao longo do tópico 3.10 e seus respectivos subtópicos. Por exemplo, o tamanho médio de Kuznetsov foi determinado por meio da Equação 15, procedimento aplicado de forma análoga aos demais dados considerados no estudo. Assim, uma vez definidos os dados supracitados, aplicou-se a equação de Rosin-Rammler, que possibilita obter a distribuição granulométrica em função das diferentes aberturas de peneiras, considerando o tamanho médio das partículas e o índice de uniformidade, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 21: Distribuição granulométrica pelo modelo Kuz-Ram.

FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA (KUZ-RAM)				
Descrição	Símbolo	Peneira (cm)	Unidade	Valores
Fator de Rocha	A	-		0
Tamanho Médio da partícula	X ₅₀	-	cm	#DIV/0!
Índice de Uniformidade	n	-		#DIV/0!
Distribuição de tamanho dos fragmentos	P	1000	%	#DIV/0!
		749.9	%	#DIV/0!
		562.3	%	#DIV/0!
		421.7	%	#DIV/0!
		316.2	%	#DIV/0!
		237.1	%	#DIV/0!
		177.8	%	#DIV/0!
		133.4	%	#DIV/0!
		100	%	#DIV/0!
		74.9	%	#DIV/0!
		56.23	%	#DIV/0!
		42.17	%	#DIV/0!
		31.62	%	#DIV/0!
		23.71	%	#DIV/0!
		17.78	%	#DIV/0!
		13.34	%	#DIV/0!
		10	%	#DIV/0!
		7.499	%	#DIV/0!
		5.623	%	#DIV/0!
		4.217	%	#DIV/0!
		3.16	%	#DIV/0!
		2.37	%	#DIV/0!
		1.78	%	#DIV/0!
		1.33	%	#DIV/0!
		1	%	#DIV/0!

Fonte: Adaptado de Braga (2018).

Cabe salientar que neste estudo, o índice de uniformidade foi calculado a partir da Equação 21, que considera apenas um tipo de explosivo. Além disso, adotou-se o mesmo *mesh* (abertura de peneira) da distribuição granulométrica real fornecida pela concedente, possibilitando o desenvolvimento de uma análise comparativa e o confronto direto entre os resultados previstos e os dados experimentais.

4.4.2 Para o modelo KCO

Para o modelo KCO, o desenvolvimento foi realizado de forma semelhante ao aplicado no método Kuz-Ram, utilizando as equações apresentadas no tópico 3.10.3, que

estabelecem os parâmetros necessários para a obtenção de cada dado. A aplicação dessas equações permitiu estruturar os cálculos de forma sistemática, conforme ilustrado na Figura 22 a seguir.

Figura 22: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo KCO.

Determinação dos parâmetros de KCO							
Cálculo de A		Cálculo de K (Q_e/V_0)		Cálculo de Er		Cálculo de n	
RDI		Q_e		VODe		Descrição	Unidade
d (g/cm ³)		V_0		VODn		A (afastamento)	m
HF				RWSe		E (Espaçamento)	m
G (Gpa)		K	#DIV/0!			DF (Diâmetro do furo)	mm
UCS (Mpa)				Er	#DIV/0!	W (Desv. Pad. Perf)	m
RMD						HC (Compr. Tot carga)	m
JF		Tamanho médio de Kuznetsov		X _{máx} (m)	#NÚM!	HB (Haltura da Banc.	m
JPS		X ₅₀	#DIV/0!			CF (Comp car fundo)	m
MS						CC (Comp carga col)	m
DP				b	#NÚM!	Tampão	m
JPA		Parâmetros da rocha					
		E (Gpa)		G(n)	#DIV/0!	1 tipo de explosivo	n1
		UCS (Mpa)	0			2 tipos de explosivos	n2
A	0	d (g/cm ³)					

Fonte: Adaptado de Braga (2018).

Outrora, a distribuição granulométrica foi determinada a partir da Equação 22 de *Swebrec*, uma vez que descreve uma função matemática voltada para a previsão da curva granulométrica resultante do desmonte de rocha. Ou seja, ela se destaca por oferecer maior precisão em relação a modelos tradicionais, pois considera tanto o tamanho máximo das partículas (X_{max}) quanto o tamanho médio (X₅₀), além de incluir o parâmetro b, que controla a uniformidade da distribuição. Dessa forma, a equação permite calcular a porcentagem acumulada de material passante em função da abertura das peneiras (X), gerando uma curva contínua e ajustada às condições reais de fragmentação. Observe a Figura 23.

Figura 23: Distribuição granulométrica pelo modelo KCO

FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA (KCO)				
Descrição	Símbolo	Peneira (Cm)	Unidade	Valores
Fator de Rocha	A	-		0
Tamanho Médio da partícula	X ₅₀	-	cm	#DIV/0!
Índice de Uniformidade	n	-		#DIV/0!
Distribuição de tamanho dos fragmentos	P	1000	%	#DIV/0!
		749.9	%	#DIV/0!
		562.3	%	#DIV/0!
		421.7	%	#DIV/0!
		316.2	%	#DIV/0!
		237.1	%	#DIV/0!
		177.8	%	#DIV/0!
		133.4	%	#DIV/0!
		100	%	#DIV/0!
		74.9	%	#DIV/0!
		56.23	%	#DIV/0!
		42.17	%	#DIV/0!
		31.62	%	#DIV/0!
		23.71	%	#DIV/0!
		17.78	%	#DIV/0!
		13.34	%	#DIV/0!
		10	%	#DIV/0!
		7.499	%	#DIV/0!
		5.623	%	#DIV/0!
		4.217	%	#DIV/0!
		3.16	%	#DIV/0!
		2.37	%	#DIV/0!
		1.78	%	#DIV/0!
		1.33	%	#DIV/0!
		1	%	#DIV/0!

Fonte: Adaptado de Braga (2018).

4.5 Resultados e discussões

Os resultados avaliados consistiram nas curvas granulométricas obtidas a partir de um desmonte de rocha que gerou um elevado número de maticos por toneladas, considerando cada um dos métodos de fragmentação selecionados. Essas curvas permitiram observar a distribuição das partículas em diferentes faixas de tamanho, fornecendo uma visão clara da eficiência de cada técnica aplicada. A análise comparativa mostrou como cada método influencia diretamente na proporção de finos e grossos, o que é fundamental para avaliar a adequação do processo às exigências operacionais e de qualidade do material produzido.

Além disso, os resultados foram confrontados com a curva gerada pelo *software WipFrag*, que utiliza processamento digital de imagens para estimar a distribuição granulométrica. Essa comparação possibilitou verificar a confiabilidade das medições experimentais frente a uma ferramenta computacional amplamente utilizada na indústria de mineração. O cruzamento dos dados reforçou a importância de integrar métodos práticos e digitais, garantindo maior precisão na caracterização dos materiais desmontados e subsidiando decisões técnicas sobre o desempenho dos processos de fragmentação.

4.5.1 Modelo de Kuz-Ram

Em consonância com os dados fornecidos pela concedente e com base na análise do maciço rochoso, a determinação do Fator de Rocha (A) foi realizada a partir da Tabela 07 proposta por Cunningham (1987), a qual estabelece critérios para definir esse parâmetro considerando as características geológicas e estruturais do maciço. Para os demais cálculos, foram utilizados os seguintes dados disponibilizados pela empresa: densidade da rocha de 2,6 g/cm³, Módulo de Young igual a 47,6 GPa e resistência à compressão uniaxial de 125 MPa.

Não obstante, é importante salientar que a Tabela 07 apresentada é de caráter próprio e foi desenvolvida especificamente para auxiliar no cálculo do Fator de Rocha, tomando como base o modelo proposto por Cunningham. Esse modelo é amplamente reconhecido por integrar parâmetros geológicos e operacionais que influenciam diretamente o comportamento da fragmentação em desmontes com explosivos. Ou seja, a tabela organiza variáveis fundamentais, como por exemplo, classificação do maciço rochoso, espaçamento das descontinuidades, direção e mergulho em relação à face livre, densidade da rocha intacta, módulo de Young e resistência à compressão uniaxial, de modo em que expõe um formato

sistematizado que permite calcular o fator de rocha de forma prática e adaptada às condições locais.

Tabela 07: Tabela auxiliar para cálculo do Fator de Rocha.

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE	AVALIAÇÃO
RMD	Maciço Rochoso	Friável	10	JF
		Fraturado	JF	
		Maciço	50	
JF	Maciço Fraturado	JPS + JPA		30
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10m	10	35
		0,10 a MS	20	
		MS a DP	50	
MS	Oversize da britagem primária (m)			0,165
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)			2,1
JPA	Direção de mergulho em relação a face livre	Horizontal	10	30
		Mergulhando para fora da face livre	20	
		Direção perpendicular à face livre	30	
		Mergulhando para dentro da face	40	
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm³)	RDI= 25d- 50		15
HF	Se E < 50 Gpa	HF= E/3		23,4
	Se E > 50 Gpa	HF= UCS/5		
E	Módulo de Young (GPa)			47,6

UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	125
-----	---	-----

Fonte: Autoria própria (2026).

Observe-se que alguns parâmetros tangenciais às regras estabelecidas por Cunningham (1987) foram ajustados em função dos dados de entrada já refinados e fornecidos pela concedente. Para evitar inconsistências entre os valores teóricos e os resultados reais, esses dados disponibilizados foram rigorosamente respeitados ao longo da análise. Não obstante, diante da impossibilidade de mensuração dos desvios de perfuração, estes foram considerados nulos ($W=0$). Pelo mesmo motivo, as velocidades de detonação nominal e real foram assumidas como equivalentes, adotando-se a razão 1:1.

Diante do exposto, e com base na planilha estruturada (Figura 20) utilizada para a determinação dos cálculos subsequentes, foi elaborada a Figura 24, na qual se reúnem todas as informações necessárias para a análise.

Figura 24: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo Kuz-Ram.

Determinação dos parâmetros de KUZ-RAM													
Cálculo de A		Cálculo de K (Qe/V0)		Célculo de Er		Cálculo de n							
RDI	12	Qe	265.22	VODe	1	Descrição		Unidade	Valor				
d (g/cm³)	2.6	V0	393.039	VODn	1	A (afastamento)		m	4.00				
HF	23.4	K		RWSe	85	E (Espaçamento)		m	7.00				
G (Gpa)	47.6			Er		DF (Diâmetro do furo)		mm	139.70				
UCS (Mpa)	125	0.674793087				W (Desv. Pad. Perf)		m	0.00				
RMD	68	Tamanho médio de Kuznetsov		Xmáx (m)		HC (Compr. Tot carga)		m	12.16				
JF	30					HB (Haltura da Banc.		m	15.00				
JPS	35	X50	33.714	CF (Comp car fundo)						m	0.00		
MS	0.165	CC (Comp carga col)								m	12.16		
DP	2.1	Tampão								m	2.80		
JPA	30	Parâmetros da rocha								1 tipo de explosivo		n1	1.710
		E (Gpa)	47.6	2 tipos de explosivos						n2	1.926		
		UCS (Mpa)	125										
A	8.004	d (g/cm³)	2.6										

Fonte: Autoria própria (2026).

A seguir temos da Figura 25 expondo a distribuição granulométrica obtida através da Figura 21, observe.

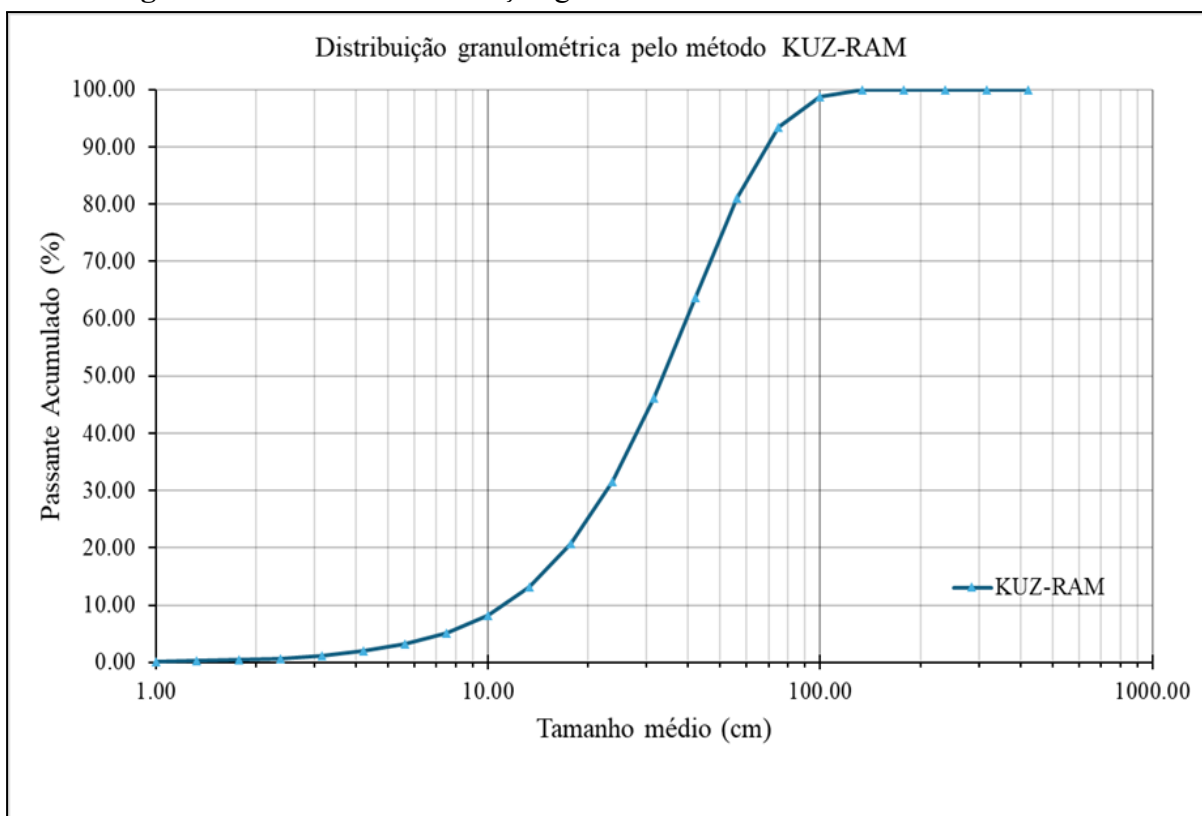
Figura 25: Distribuição granulométrica através do modelo Kuz-Ram.

FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA (KUZ-RAM)				
Descrição	Símbolo	Peneira (cm)	Unidade	Valores
Fator de Rocha	A	-		8.004
Tamanho Médio da partícula	X ₅₀	-	cm	33.714
Índice de Uniformidade	n	-		1.710
Distribuição de tamanho dos fragmentos	P	1000	%	100.00
		749.9	%	100.00
		562.3	%	100.00
		421.7	%	100.00
		316.2	%	100.00
		237.1	%	100.00
		177.8	%	100.00
		133.4	%	99.93
		100	%	98.83
		74.9	%	93.37
		56.23	%	81.03
		42.17	%	63.80
		31.62	%	46.26
		23.71	%	31.58
		17.78	%	20.71
		13.34	%	13.23
		10	%	8.31
		7.499	%	5.16
		5.623	%	3.19
		4.217	%	1.96
		3.16	%	1.20
		2.37	%	0.74
		1.78	%	0.45
		1.33	%	0.27
		1	%	0.17

Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 26, mostra a curva da distribuição granulométrica dos fragmentos pelo método Kuz-Ram que foram obtidos por meio do circuito da Figura 25.

Figura 26: Curva da distribuição granulométrica através do modelo Kuz-Ram



Fonte: Autoria própria (2026).

4.5.2 Modelo de KCO

No tocante aos cálculos desenvolvidos para o modelo KCO, estes foram realizados de maneira análoga ao método Kuz-Ram, diferenciando-se apenas em alguns aspectos específicos decorrentes das peculiaridades de cada abordagem. Entre essas diferenças, destacam-se a forma de determinação da granulometria máxima, a definição do pré-fator de rocha e o cálculo do tamanho médio de Kuznetsov. Diante do exposto, podemos observar os respectivos cálculos através da Figura 27.

Figura 27: Planilha de cálculo dos parâmetros do modelo KCO.

Determinação dos parâmetros de KCO									
Cálculo de A		Cálculo de K (Q_e/V_0)		Cálculo de Er		Cálculo de n			
RDI	12	Q_e	265.22	VODe	1	Descrição	Unidade	Valor	
d (g/cm^3)	2.6	V_0	393.039	VODn	1	A (afastamento)	m	4.00	
HF	23.4	K		RWSe	85	E (Espaçamento)	m	7.00	
G (Gpa)	47.6			Er		DF (Diâmetro do furo)	mm	139.7	
UCS (Mpa)	125	Tamanho médio de Kuznetsov		Xmáx (m)		W (Desv. Pad. Perf)	m	0.00	
RMD	68			b		HC (Compr. Tot carga)	m	12.41	
JF	30	X_{50}	25.574	G(n)		HB (Haltura da Banc.	m	15.00	
JPS	35	Parâmetros da rocha		1 tipo de explosivo		CF (Comp car fundo)	m	0.00	
MS	0.165	E (Gpa)	47.60	2 tipos de explosivos		CC (Comp carga col)	m	12.41	
DP	2.1	UCS (Mpa)	125.00			Tampão	m	2.80	
JPA	30	d (g/cm^3)	2.60						
A	8.004								

Fonte: Autoria própria (2026).

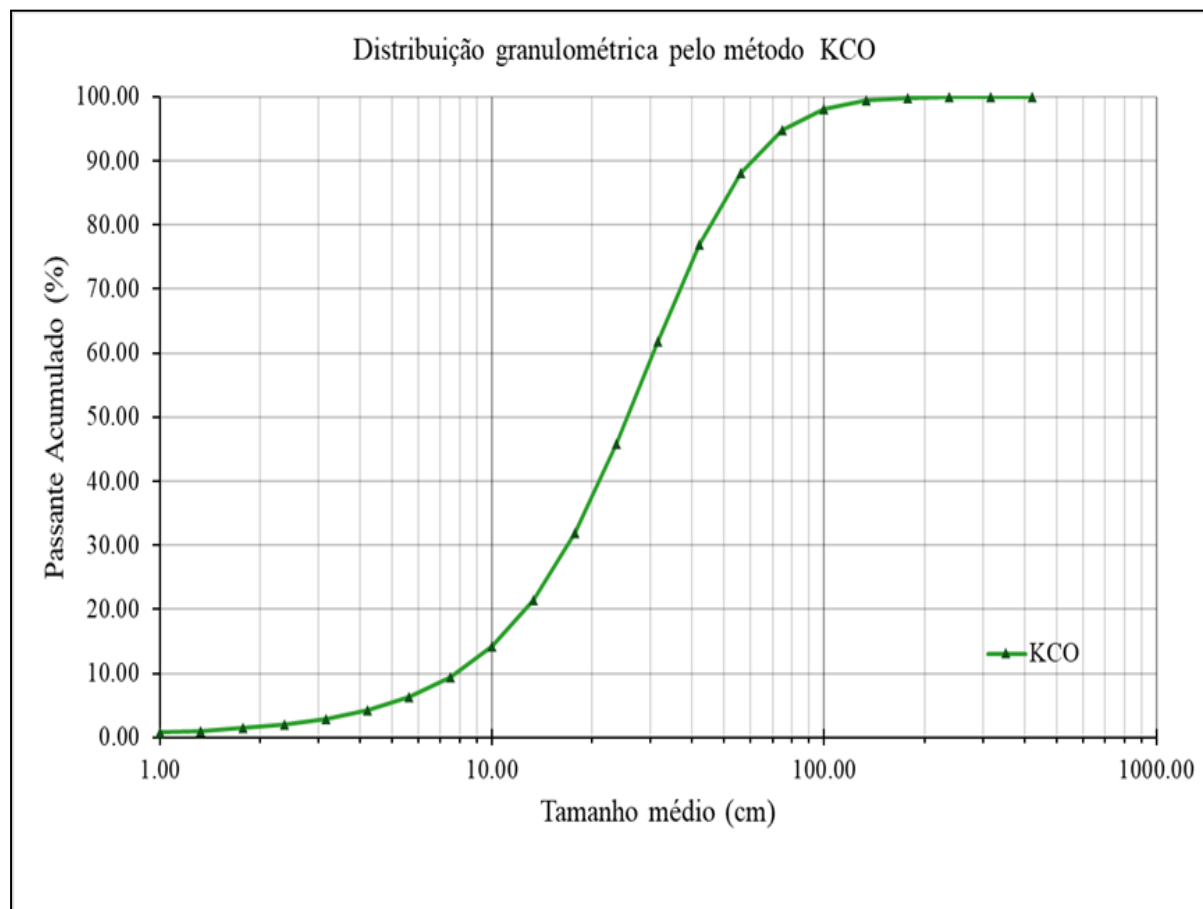
Com base nos dados supracitados e em consonância com a equação Swebrec, que se mostra mais eficiente na modelagem da parcela de finos em comparação à função de Rosin-Rammler, foi obtida a Figura 28, a qual apresenta uma distribuição de fragmentos semelhante ao modelo Kuz-Ram. Contudo, observa-se uma ligeira predominância de partículas menores que 13,34 cm, aspecto também evidenciado na Figura 24. Ademais, o tamanho máximo previsto pelo modelo foi de 5,29m, valor correspondente à média geométrica entre o espaçamento e o afastamento proposto por Kansane et al. (2005).

Figura 28: Distribuição granulométrica através do modelo KCO.

FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA (KCO)				
Descrição	Símbolo	Peneira (cm)	UNID.	Valores
Fator de Rocha	A	-		8.004
Tamanho Médio da partícula	X50	-	cm	25.5737
Índice de Uniformidade	n	-		1.745
Distribuição de tamanho dos fragmentos	P	1000	%	100.000
		749.90	%	100.000
		562.30	%	100.000
		421.70	%	100.000
		316.20	%	99.9998
		237.90	%	99.9925
		177.80	%	99.9444
		133.40	%	98.7441
		100.00	%	98.9700
		75.00	%	96.0947
		51.62	%	77.1276
		20.30	%	35.3151
		17.78	%	15.4215
		13.40	%	4.9615
		10.00	%	1.3863
		7.52	%	2.6896
		5.62	%	4.8761
		2.60	%	2.0869
		3.62	%	1.1486
		3.16	%	0.9637
		2.78	%	0.9637
		1.00	%	0.4805

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 29: Curva da distribuição granulométrica através do modelo KCO



Fonte: Autoria própria (2026)

4.5.3 Análise pelo *Software WipFrag*

A utilização do WipFrag permitiu medir e analisar a fragmentação de rochas de forma rápida e precisa a partir de imagens digitais, substituindo métodos tradicionais como peneiramento físico. Sua importância está em fornecer dados confiáveis que otimizam o desmonte, reduzem custos e aumentam a eficiência energética em processos de britagem e moagem.

É de fundamental importância destacar que essa etapa não foi desenvolvida no âmbito do presente trabalho, mas sim fornecida pela concedente, com o objetivo de possibilitar uma interpretação consistente frente aos dados disponibilizados.

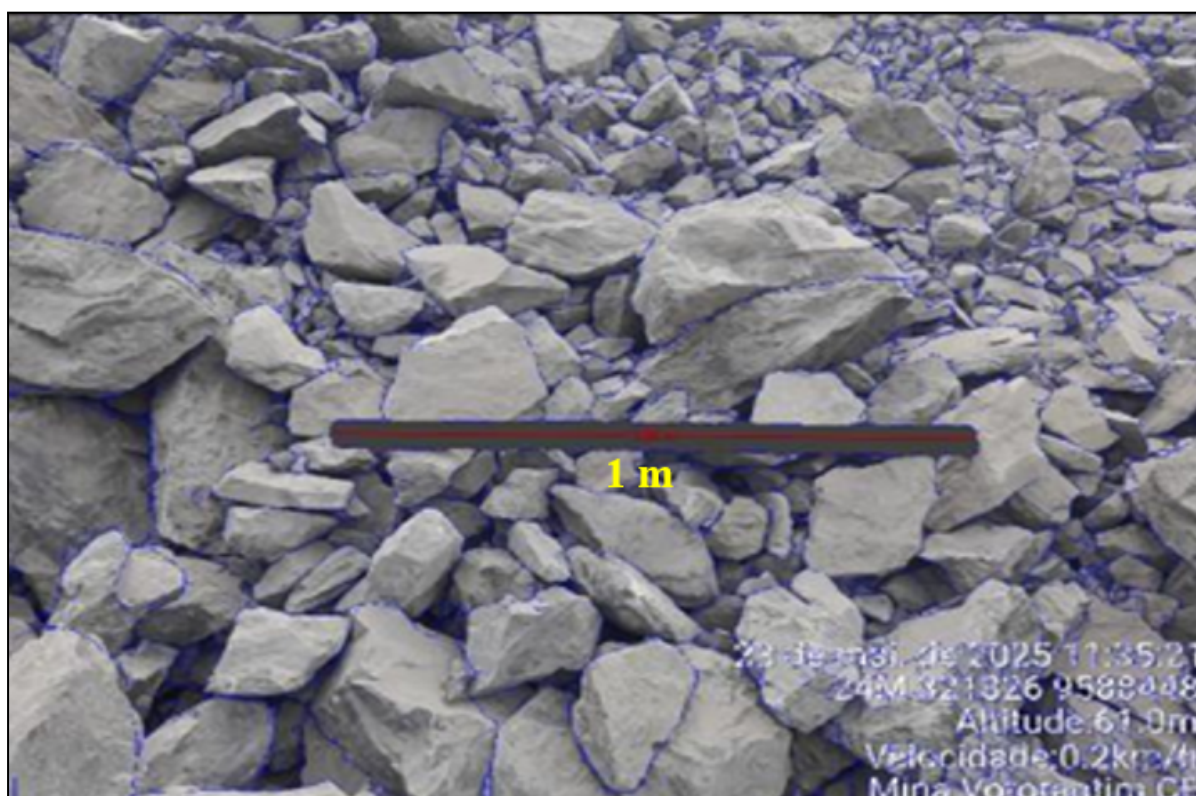
Figura 30: Bancada desmontada.



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

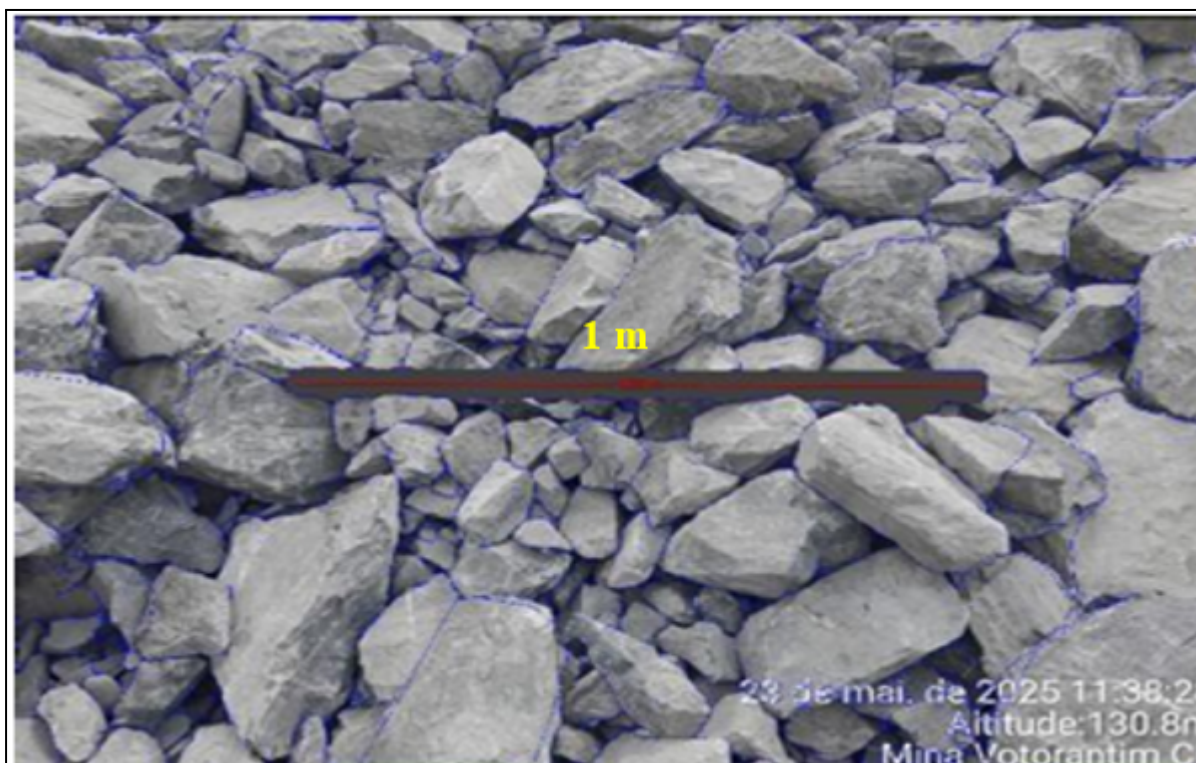
Para a análise da granulometria do material estudado, foram inicialmente avaliadas as imagens obtidas após o desmonte, conforme apresentado na Figura 30. Em seguida, foram registradas 15 (quinze) fotografias adicionais, utilizando um dispositivo móvel (celular), de modo a compor o conjunto amostral destinado ao processamento no *software*. Essas imagens apresentam características análogas às ilustradas nas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Processamento de imagens no *Wipfrag*



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Figura 32: Processamento de imagens no *Wipfrag*.



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

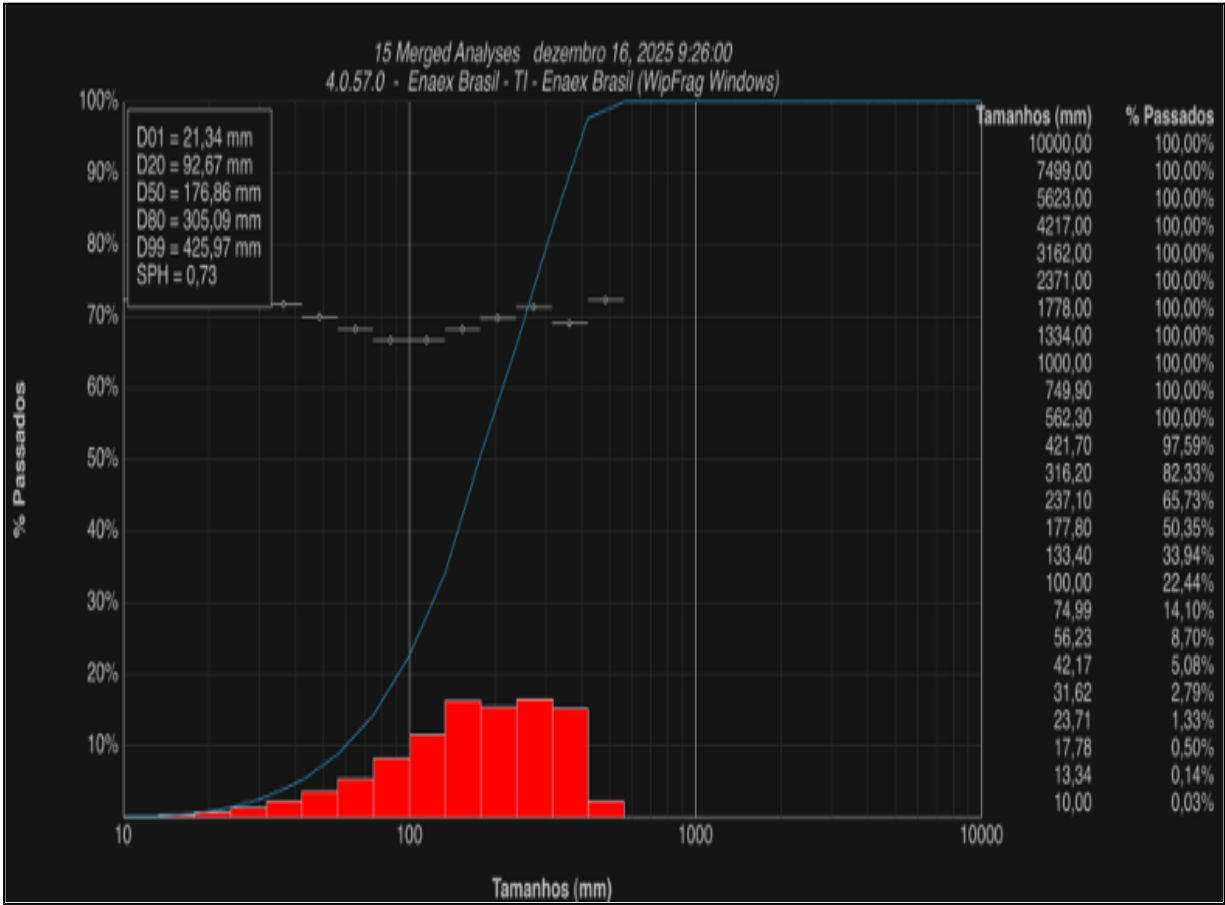
Cabe salientar que a escala utilizada corresponde ao valor de 1 metro (100 centímetros). Uma vez que essas imagens foram processadas pelo software WipFrag, foi possível obter tanto a distribuição granulométrica quanto a respectiva curva granulométrica, apresentadas nas Figuras 33 e 34.

Figura 33: Distribuição granulométrica real.

PENEIRAS (cm)	REAL (%)
421.7	100
316.2	100
237.1	100
177.8	100
133.4	100
100	100
74.9	100
56.23	100
42.17	97.59
31.62	82.33
23.71	65.73
17.78	50.35
13.34	33.94
10	22.44
7.499	14.1
5.623	8.7
4.217	5.08
3.16	2.79
2.37	1.33
1.78	0.5
1.33	0.14
1	0.03

Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Figura 34: Curva da distribuição granulométrica real



Fonte: arquivo interno da empresa (2026).

Com base na Figura 34, é possível realizar algumas observações iniciais. O presente estudo teve como etapa precursora um desmonte de rocha que resultou em um elevado número de matacos por tonelada, situação que tangenciava as metas previamente estabelecidas da pedreira. Para compreender melhor esse aspecto, foi destacado que, na unidade analisada, blocos com granulometria igual ou superior a 1,60 m são considerados matacos pela concedente. Entretanto, observa-se que a distribuição granulométrica apresentada no gráfico em estudo expõe uma condição distinta daquela verificada na prática pela empresa, o que sugere que a amostra utilizada pode não ser representativa da realidade operacional.

Não obstante, observa-se que, para peneiras com abertura superior a 1 metro (1000 mm), o percentual de material retido foi nulo, o que implica afirmar que 100% do material analisado encontra-se abaixo dessa dimensão. Tal resultado contraria a constatação prática de um elevado número de matacos por tonelada. Um fator que possivelmente

comprometeu os resultados refere-se ao levantamento de imagens realizado após o desmonte. Como esse procedimento foi conduzido utilizando um celular, a maioria dos parâmetros geoposicionais associados às imagens apresentou erros significativos, reduzindo a confiabilidade da análise. Além disso, não houve registro sucessivo das imagens à medida que o material era consumido, o que poderá ter comprometido a representatividade da amostra.

4.6 Análise comparativa entre os modelos Matemáticos x Real

Em consonância com os cálculos apresentados nas Figuras 24 e 27, referentes aos modelos Kuz-Ram e KCO, é possível observar que ambos fornecem parâmetros fundamentais para a análise da fragmentação de rochas em desmontes controlados. A curva gerada pelo método KCO se aproximou mais da curva gerada pelo WipFrag que a curva gerada pelo método Kuz-Ram. Os resultados obtidos demonstram coerência entre as variáveis geológicas e operacionais, evidenciando que o modelo Kuz-Ram apresentou um tamanho $D_{80} = 55,2$ cm, superior ao estimado pelo KCO ($D_{80} = 43,1$ cm) o que sugere uma menor eficiência na previsão granulométrica para as condições específicas da pedreira estudada. Haja visto que, o D_{80} estimado pelo WipFrag foi de aproximadamente 30 cm.

Não obstante, cabe salientar que a meta da granulometria ótima estabelecida pela unidade é de 60 cm, parâmetro que apresenta pequena discrepância em relação aos tamanhos previstos pelos modelos KCO e Kuz-Ram. Essa diferença evidencia a necessidade de ajustes no plano de fogo para aproximar os resultados simulados da realidade operacional, uma vez que a granulometria obtida em campo mostra-se mais heterogênea do que a prevista teoricamente.

Adicionalmente, sugere-se dimensionar o plano de fogo considerando características do maciço rochoso para o cálculo dos parâmetros geométricos. Uma vez que o grau de fraturamento do maciço pode diferir dependendo da localização e orientação da bancada. Desta forma, espera-se que menos matacos sejam gerados por desmonte e que a granulometria se ajuste com aquela definida no planejamento.

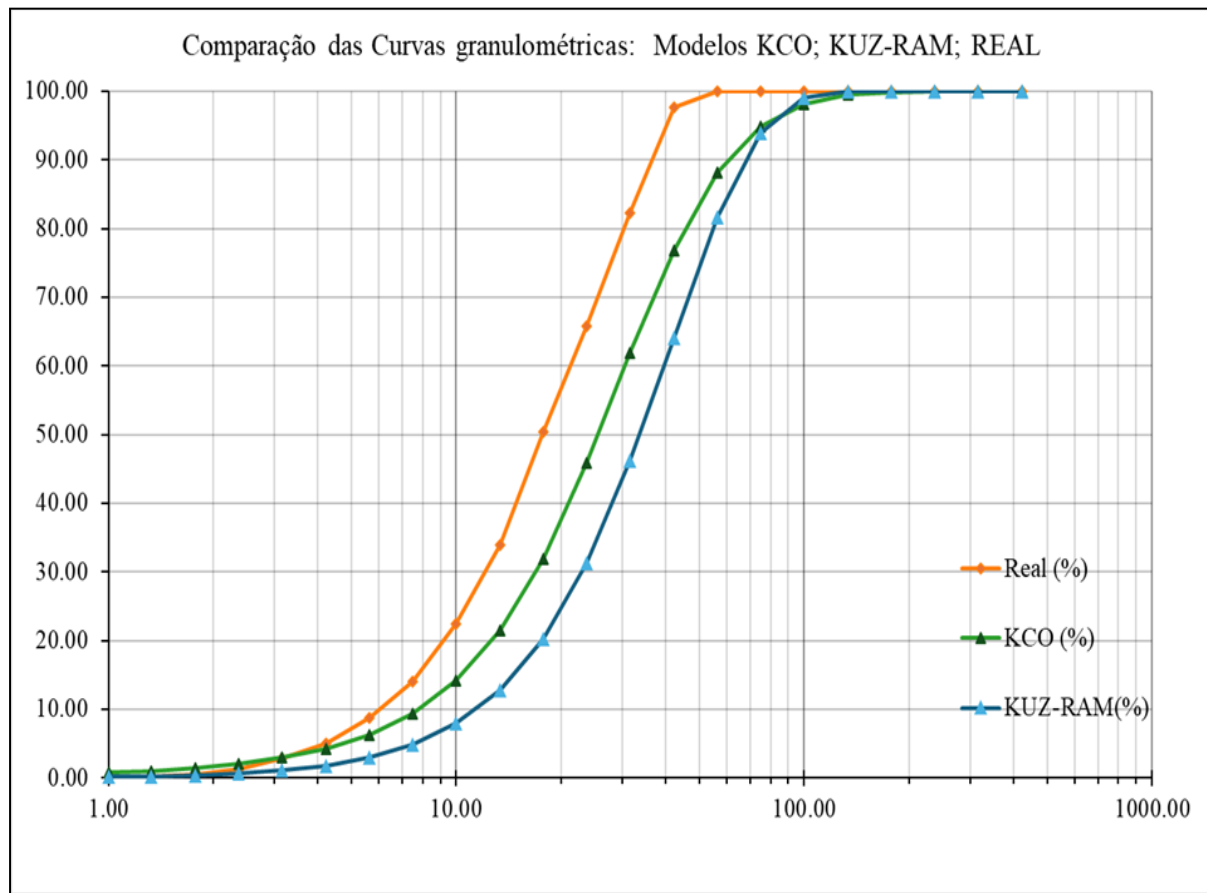
Outro ponto válido de ressaltar é que a seleção das imagens a serem utilizadas no Wipfrag seja melhor definida de modo a se gerar uma melhor medição da granulometria produzida no desmonte, servindo de retroalimentação para dimensionamento de planos de fogo futuros onde se tiver condições de maciço rochoso e explosivos semelhantes.

Figura 35: Distribuição granulométrica por KUZ-RAM, KCO e Real.

COMPARAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS			
PENEIRAS (cm)	REAL (%)	KCO (%)	KUZ-RAM (%)
421.70	100.00	100.00	100.00
316.20	100.00	100.00	100.00
237.10	100.00	99.99	100.00
177.80	100.00	99.89	100.00
133.40	100.00	99.48	99.95
100.00	100.00	98.17	99.02
74.90	100.00	94.87	93.87
56.23	100.00	88.15	81.59
42.17	97.59	76.89	64.09
31.62	82.33	61.86	46.18
23.71	65.73	45.90	31.26
17.78	50.35	31.98	20.30
13.34	33.94	21.48	12.84
10.00	22.44	14.20	7.97
7.50	14.10	9.41	4.90
5.62	8.70	6.29	3.00
4.22	5.08	4.27	1.82
3.16	2.79	2.94	1.11
2.37	1.33	2.06	0.67
1.78	0.50	1.47	0.41
1.33	0.14	1.06	0.25
1.00	0.03	0.78	0.15

Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 36: Curva da distribuição granulométrica por KUZ-RAM, KCO e Real.



5 CONCLUSÃO

Portanto, a partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que: apesar de os modelos Kuz-Ram e KCO não terem apresentado uma faixa granulométrica compatível com a meta estabelecida pela unidade, é possível destacar que, ao passarem por ajustes, ambos fornecem variáveis essenciais para a análise da fragmentação em desmontes controlados. Esses modelos permitem integrar de forma consistente os aspectos geológicos e operacionais, oferecendo uma base metodológica relevante para o planejamento e a otimização das práticas de desmonte

A curva gerada pelo método KCO se aproximou mais da curva gerada pelo WipFrag que a curva gerada pelo método Kuz-Ram. Os resultados obtidos demonstram coerência entre as variáveis geológicas e operacionais, evidenciando que o modelo Kuz-Ram apresentou um tamanho $D_{80} = 55,2$ cm, superior ao estimado pelo KCO ($D_{80} = 43,1$ cm), sugerindo menor eficiência na predição da granulometria do material desmontado, haja visto que, o D_{80} estimado pelo WipFrag foi de aproximadamente 30 cm.

Esse resultado sugere que, para as condições específicas da pedreira, o KCO pode oferecer maior representatividade em termos de previsão do tamanho dos fragmentos. Ainda assim, ambos os modelos apresentam pequenas discrepâncias em relação ao valor-alvo ($D_{80} = 60$ cm), evidenciando a necessidade de ajustes no plano de fogo e calibração com dados empíricos para que a granulometria do material desmontado se aproxime da necessidade operacional.

Na fração intermediária dos tamanhos, os dois modelos apresentaram comportamentos bastante semelhantes, indicando coerência na previsão dessa faixa granulométrica. Contudo, ao analisar a fração mais grossa dos fragmentos, o modelo KCO demonstrou maior eficiência, aproximando-se mais dos dados reais e oferecendo uma representação mais fiel da distribuição granulométrica observada em campo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação à curva real, observa-se que esta não se mostrou plenamente representativa diante dos parâmetros que culminaram no desmonte de rocha. Isso implica que os dados de entrada utilizados no software podem ter sido imprecisos, comprometendo a confiabilidade da simulação.

Como sugestão, destaca-se a importância do levantamento de imagens com drones, realizado não apenas após o desmonte, mas também em etapas sucessivas à medida que o material é consumido. Essa prática permitiria acompanhar de forma contínua a evolução da granulometria, evitando análises pontuais que podem não refletir a realidade operacional. Dessa forma, seria possível obter curvas granulométricas mais representativas, corrigindo a limitação observada na curva real e aumentando a precisão dos modelos matemáticos aplicados.

Não obstante, para os modelos matemáticos empíricos, torna-se urgente verificar se os parâmetros fornecidos estão de fato coerentes com as características reais do maciço rochoso. Nesse sentido, recomenda-se a coleta de corpos de prova e a realização de ensaios laboratoriais, de modo a refazer os levantamentos e validar os dados vigentes. Essa prática permitiria maior precisão na calibração dos modelos, reduzindo discrepâncias entre os resultados simulados e a curva granulométrica observada em campo.

Por fim, a integração entre medições laboratoriais e observações empíricas garante maior confiabilidade na análise da fragmentação, possibilitando ajustes no plano de fogo, tornando-o mais alinhado às condições geológicas específicas da pedreira. Dessa forma, os modelos matemáticos deixam de ser apenas ferramentas teóricas e passam a atuar como instrumentos de previsão robustos, capazes de subsidiar decisões estratégicas no processo de desmonte.

REFERÊNCIAS

ADEBOLA, J.M, AJAYI, O.D ELIJAH P.O, Rock Fragmentation Prediction using Kuz-Ram Model. **Journal of Environment and Earth Science**. Department of Minerals and Petroleum Engineering, School of Engineering, Kogi State Polytechnic, Lokoja, Nigeria. v. 06. n05, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322551080_Rock_Fragmentation_Prediction_using_Kuz-Ram_Model>. Acesso em: 19 de jun 2026.

ARAUJO, A.L.D. **Desmonte de rocha com o uso de explosivos: estudo de caso em trecho da Ferrovia Nova Transnordestina**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, Cajazeiras, 2020.

AUSTRALIAN, T. W. **Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie**, Austrália. 2018. Disponível em: <https://archive.thewest.com.au/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

BRAGA, N.Y. **Análise da fragmentação de gnaiss no desmonte com explosivos por métodos analíticos e uso de imagens**. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Escola de Minas – EM. Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN. Monografia de graduação em Engenharia de Minas. Ouro Preto. 84p. jul. 2018.

CAMERON, A.; HAGAN, T. **Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas**. Curso Internacional “Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas”, p.11-37, Belo Horizonte, 1997.

CARLI, C. D. **Avaliação de métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações diretas em solos não saturados**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/9916>. Acesso em: 23 mai. 2023.

COELHO, R.M.G. **Uso do agregado calcário na fabricação de concreto asfáltico**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção ao grau de Mestre. Campina Grande. 155p. 1995.

COSTA, R. J. **Modelamento do desmonte com explosivos em rochas graníticas visando a otimização dos processos de cominuição utilizando a metodologia kuz-ram**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas. Belo Horizonte. 203p. 2019.

CUNNINGHAM, C. V. B. **The Kuz–Ram fragmentation model – 20 years on**. In: BRIGHTON CONFERENCE PROCEEDINGS. Brighton: European Federation of Explosives Engineers, 2005. p. 201–210. ISBN 0-9550290-0-7.

CUNNINGHAM, C. V. B. **Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on**. [In:] Proc. 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, p. 475-487, 1987.

CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra.** [S.l.]: Oficina de Textos, 2014.

ENAEX BRITANITE. **Catálogo de produtos: soluções de classe mundial para fragmentação de rocha.** Quatro Barras, PR: Enaex Britanite, 2019. Disponível em: catálogo institucional em formato PDF. <https://www.britanite.com.br>. Acesso em: 16/06/2026.

FILHO, A.J.A.J. **Métodos de controle aplicados na mitigação dos efeitos danosos provocados pelas vibrações resultantes do desmonte de rochas com uso de explosivos: uma revisão.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Crateús, 2022.

FOURIE, A. B. **SME Mining Engineering Handbook.** Littleton: Society for Mining Metallurgy and Exploration, Inc., 1992.

GERALDI, José Lúcio Pinheiro. **O ABC das Escavações de Rocha.** Rio De Janeiro: Interciência Ltda, 2011. 266 P.

GOMES, É.F. **Modelos matemáticos utilizados na fragmentação de rochas com uso de explosivos: uma revisão.** Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. Crateús. 102p. 2022.

Hartman, H. L.; Mutmanský, J. M. **Introductory Mining Engineering.** 2. ed. John Wiley and Sons, 2002.

HERRMANN, Curt. **Manual de Perfuração de Rocha.** 2. Ed. São Paulo: Polígono, 1972. 416 P.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; GARCÍA, P. **Manual de perforacion y voladura de rocas.** Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 1990.

OUCHTERLONY, F. **The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing.** Mining Technology. p. 29-44, DOI: 10.1179/037178405X44539, 2005.

PERSSON, P. A., HOLMBERG, R. E LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering.** CRC press, 1994.

QUAGLIO, O. A., **Adequação do índice de blastabilidade de modelos de fragmentação ao desmonte de rochas em pedreiras de brita.** Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mineral. Ouro Preto. 235P. 2020

SANTANA. M.D.C. **Aplicação do modelo de kuz-ram e fotoanálise na avaliação da eficiência do desmonte em mineração de gipsita na região do Araripe.** Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral. Recife. 114p. 2018.

SCOTT. A. **Open pit blast desing: analysis and optimisation.** Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre. The university of Queensland, 1996. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing

SILVA, V. C. Curso de Mineração – **Operações Mineiras: Desmonte de rocha com explosivo**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Minas – UFOP. p. 190. mar. 2009.

TIDMAN, J. P. **Target for blast fragmentation models**. In: International Society of Explosives Engineers. Proceedings of 7th Annual Symposium of Explosives and Blasting Research; 1991 February 6-7; Las Vegas, Nevada: ISEE. p. 159-166.