

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**MEDIÇÃO DE DENSIDADE EM EMULSÕES EXPLOSIVAS  
CONFINADAS NOS FUROS DE DESMONTE DE ROCHAS**

**FELIPE FRANÇA SITONIO**

**PORTO ALEGRE  
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**MEDIÇÃO DE DENSIDADE EM EMULSÕES EXPLOSIVAS  
CONFINADAS NOS FUROS DE DESMONTE DE ROCHAS**

**FELIPE FRANÇA SITONIO**

Defesa de Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Minas.

**PORTO ALEGRE  
2024**

FELIPE FRANÇA SITONIO

**MEDIÇÃO DE DENSIDADE EM EMULSÕES EXPLOSIVAS  
CONFINADAS NOS FUROS DE DESMONTE DE ROCHAS**

Esta defesa de Tese foi julgada adequada e aprovada pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Aprovada em: 27/07/2024

---

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – UFRGS

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Dr. Vitor Luconi Rosenhaim

---

Dr. Juarez Lopes de Moraes

---

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski

PORTO ALEGRE  
2024

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer à família que construí durante o período de doutoramento: minha companheira Gessica e minha filha Janaína. É por elas que acordo diariamente com o intuito de ser o melhor que posso ser. Agradeço ao meu pai João Afonso e à minha mãe Angela Maria, por terem me dado, além de carinho e boa educação, o privilégio de estudar em boas escolas e cursos complementares que garantiram que eu chegasse até aqui. Sou também grato ao meu orientador Jair Koppe por ingressar nesta empreitada, além de me ajudar a abrir portas no universo da mineração de grande porte. Não posso esquecer também de Victor Hugo Paredes Canto, colega de profissão que nos apoiou no desenvolvimento das ferramentas necessárias para construção desta tese. Por fim, presto meus sinceros agradecimentos às instituições públicas e privadas que me apoiaram durante o período do doutorado, garantindo os recursos necessários para que eu pudesse concluir o doutorado com sucesso: UFRGS, Fundação Luiz Englert, ISEE, Vale e Lundin Mining.

## RESUMO

O controle dos parâmetros dos explosivos aplicados em desmontes de rochas de minas à céu aberto tem sido um tema de grande interesse ao longo dos anos, com o objetivo de aprimorar a eficácia das detonações. Consequentemente, diversas são as ferramentas concebidas para garantir a aderência às variáveis planejadas desta atividade da mineração. A densidade das emulsões explosivas é um aspecto crucial, pois impacta diretamente na sensibilidade do produto e sua Velocidade de Detonação (*Velocity of Detonation, VOD*). Os planos de fogo geralmente são elaborados assumindo a densidade medida em condições atmosféricas como confiável, e que os agentes gaseificantes irão performar conforme especificado ao longo do furo. No entanto, as condições de confinamento costumam ser negligenciadas em modelos preditivos, e especificamente para emulsões sensibilizadas quimicamente, estas condições trazem impactos e variações significativas ao longo da coluna explosiva. Esta tese descreve a construção e aplicação de um dispositivo equipado com sensores de pressão, com o intuito de monitorar e aferir a variação de densidade de emulsões explosivas em colunas confinadas. A partir de resultados obtidos no processamento dos dados no *Dispositivo de Cálculo de Densidade (DCD)*, foi possível realizar uma comparação entre a variação de densidade das emulsões explosivas sensibilizadas com nitrito de sódio em diferentes condições, além de equipará-las com a densidade teórica do produto. O dispositivo mostrou-se uma ferramenta eficaz para analisar e verificar as condições das emulsões explosivas, possibilitando a reavaliação dos parâmetros do plano de fogo. Além disto, destaca-se o potencial de criações tecnológicas de baixo custo para melhoria dos processos unitários de operação de mina.

**Palavras-chave:** Emulsões explosivas, desmonte de rochas, plano de fogo.

## ABSTRACT

The control of parameters of explosives used in open-pit rock blasting operations has been a topic of great interest over the years, aiming to enhance effectiveness of detonations performance. Consequently, several tools have been devised to ensure adherence to the planned variables of this mining activity. The density of explosive emulsions is a crucial aspect, as it directly impacts the product's sensitivity and VOD. Blast plans are typically developed assuming that the density measured under atmospheric conditions is reliable and that the gaseous agents will perform as specified along the borehole. However, confinement conditions are often neglected in predictive models, and specifically for chemically sensitized emulsions, these conditions bring significant impacts and variations along the explosive column. This thesis describes the construction and application of a device equipped with pressure sensors, aiming to monitor and assess the variation in density of explosive emulsions in confined columns. By processing the data obtained from the DCD, it was possible to compare the density variation of emulsions sensitized with sodium nitrite under different conditions and to equate them with the theoretical density of the product. The device proved to be an effective tool for analyzing and verifying the conditions of explosive emulsions, enabling the reevaluation of blast plan parameters. Additionally, it highlights the potential of low-cost technological creations to improve the unit operations of mining.

**Keywords:** Explosive emulsions, blast plan, rock blasting.

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – FAIXAS DE FORMULAÇÃO TÍPICA PARA EMULSÕES EXPLOSIVAS .....	21
TABELA 2 – VARIAÇÃO TEÓRICA DA DENSIDADE DA EMULSÃO DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE .....	34
TABELA 3 - PARÂMETROS DO DESMONTE REALIZADO EM 30/10/2020 E MEDIDAS DE DENSIDADE. ....	47

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ETAPAS PREVISTAS DURANTE A ELABORAÇÃO DESTE ESTUDO .....	14
FIGURA 2 - TERMINOLOGIA UTILIZADA EM DESMONTE DE ROCHAS .....	15
FIGURA 3 - MECANISMO DE RUPTURA RADIAL .....	17
FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE A RAZÃO DE CARREGAMENTO E O WI APRESENTADO .....	19
FIGURA 5 - PARCELA DE UTILIZAÇÃO DE EMULSÃO A GRANEL E ENCARTUCHADO NA UNIÃO EUROPEIA .....	23
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DE DENSIDADE DA EMULSÃO EXPLOSIVA A 31 °C.....	25
FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E VOD DO EXPLOSIVO SENSIBILIZADO QUIMICAMENTE .....	33
FIGURA 8 - EFEITO DA PRESSÃO NAS BOLHAS DE GÁS DE EMULSÕES SENSIBILIZADAS QUIMICAMENTE .....	33
FIGURA 9 - PROJETO DE PLACA ELETRÔNICA PARA CONSTRUÇÃO DO DCD.....	36
FIGURA 10 – PLACA INTERNA DO EQUIPAMENTO DCD, CONTENDO OS DOIS SENSORES MPX5700AP, SEUS RESPECTIVOS CAPACITORES E O ARDUINO V3.0. AO LADO, UM MODELO DO CORPO DE PROVA .....	37
FIGURA 11 - CORPO DE PROVA DO DCD INFLADO.....	38
FIGURA 12 - TOMADA DE DADOS DE PRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA, ADQUIRIDOS EM DESMONTE DE ROCHAS .....	38
FIGURA 13 - AQUISIÇÃO DE DADOS NO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA A MONITORIZAÇÃO DA PRESSÃO. A LINHA TRACEJADA VERMELHA DESTACA O INSTANTE EM QUE A PRESSÃO SE MANTÉM NUM INTERVALO MAIOR QUANDO A SONDA É ESVAZIADA, REPRESENTANDO A EQUALIZAÇÃO DE PRESSÃO .....	39
FIGURA 14 - METODOLOGIA ELABORADA PARA TESTES DE LABORATÓRIO DO SENSOR DCD .....	40
FIGURA 15 - CONVERSÃO DE DADOS DE DDP, EM V PARA VALORES DE PRESSÃO, EM kPa .....	41
FIGURA 16 - VISTA AÉREA DA MINA TUCANO, A ÉPOCA SUBSIDIADA PELA GREAT PANTHER MINING LTD.....	42
FIGURA 17 - CROQUI DO PLANO DE FOGO, SINALIZANDO OS FUROS MONITORADOS .....	43
FIGURA 18 - OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO DA BANCADA A SER DESMONTADA, REALIZADA PELA EMPRESA ORICA E EQUIPE DE DESMONTE DA GREAT PANTHER MINING .....	44
FIGURA 19 - SEQUENCIAMENTO E DIRECIONAMENTO DE ONDAS INDUZIDAS PELO DESMONTE EXECUTADO EM 30/10/2020.....	45
FIGURA 20 - BARRAS FÍSICAS IMPLANTANDAS, VISANDO GESTÃO VISUAL DA SELETIVIDADE DO MINÉRIO .....	45
FIGURA 21 - AQUISIÇÃO DOS DADOS DE PRESSÃO ABSOLUTA NO DESMONTE COM O SENSOR DCD.....	46
FIGURA 22 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS DENSIDADES MEDIDAS .....	48
FIGURA 23 - FLUXOGRAMA DE ANÁLISE CRÍTICA DA DENSIDADE DA EMULSÃO EXPLOSIVA NO DESMONTE DE ROCHAS .....	50



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

**ANFO** – *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

**AWS** – *Absolute Weight Strength*

**DCD** – Dispositivo de Cálculo de Densidade

**DTH** – *Down-the-hole*

**EPS** – Poliestireno expandido

**QAQC** – *Quality Assessment/Quality Control*

**NO** – Óxido nítrico

**PPGE3M** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

**SveBeFo** - *Swedish Rock Engineering Research Organization*

**UMB** – Unidade Móvel de Bombeamento

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**VOD** – Velocidade de detonação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 HIPÓTESE INVESTIGATIVA E META .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
1.3 ETAPAS DA PESQUISA .....	13
<b>2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>15</b>
2.1 DESMONTE DE ROCHAS .....	15
2.1.1 <i>Mecanismo de ruptura dos maciços rochosos</i> .....	16
2.1.2 <i>Influência do desmonte de rocha nas operações subsequentes</i> .....	18
2.2 EMULSÕES EXPLOSIVAS .....	19
2.2.1 <i>Composição das emulsões explosivas</i> .....	21
2.2.2 <i>Processo de sensibilização das emulsões explosivas</i> .....	23
2.2.2.1 <i>Sensibilização física das emulsões explosivas</i> .....	27
2.2.2.2 <i>Sensibilização química das emulsões explosivas</i> .....	28
2.2.3 <i>Densidade da emulsão explosiva e sua relação com parâmetros de detonação</i> .....	30
2.2.4 <i>Variação da densidade das emulsões explosivas sensibilizadas quimicamente</i> .....	32
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SENSOR DCD .....	36
3.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	37
3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE DADOS E ANÁLISE .....	38
3.4 VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO ACESSÓRIO EM TESTES EM LABORATÓRIO .....	39
3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS EM DESMONTES DE ROCHA DE BANCADAS A CÉU ABERTO .....	42
3.6 PROCESSAMENTO, MANIPULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....	46
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	51
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>
<b>APÊNDICE I – CÓDIGO EM C++ DO CÁLCULO DE DENSIDADE A PARTIR DA PRESSÃO AFERIDA NO FURO CONFINADO</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE II – RESULTADOS DE PRESSÃO E DENSIDADE AFERIDOS EM DESMONTES DE ROCHAS ENTRE OS DIAS 27 E 31 DE OUTUBRO DE 2020</b> .....	<b>59</b>
<b>APÊNDICE III – PLANO DE FOGO EXECUTADO EM 30/10/2020</b> .....	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Pequenas variações em um projeto de perfuração e desmonte podem trazer resultados completamente distintos. Seja do ponto de vista geológico, estrutural ou de uma condicionante geométrica do plano de fogo, o controle rigoroso das variáveis é essencial para melhoria contínua das detonações em uma operação mineira de rochas compactas, onde o uso de explosivos é fundamental para um ciclo de produção eficiente.

Embora as emulsões explosivas industriais sejam produtos confiáveis e a maioria das propriedades sejam previamente conhecidas, as medições de densidade realizadas nas bancadas de desmonte de rochas com balanças de precisão em condição atmosférica têm baixa confiabilidade. Estas medições podem resultar em planos de fogo incompatíveis, principalmente devido à expansão gasosa em emulsões sensibilizadas quimicamente, cujo comportamento em condições de confinamento nos furos de detonação é desconhecido. Além disto, fatores ambientais adversos, como ultralancamento, falhas de detonação, sobrepressão atmosférica ou ruídos, podem ocorrer devido a um superdimensionamento da carga de explosivos, falta ou excesso de sensibilização do explosivo. Em contrapartida, detonações ineficientes trazem baixa produtividade aos processos subsequentes de mina como carregamento, transporte e britagem, aumentando o custo operacional de lavra e processamento.

As emulsões explosivas foram desenvolvidas e patenteadas há pouco mais de 50 anos por Egly e Neckar (1964). Em geral, o produto é obtido pela adição de uma solução sensibilizante a uma matriz emulsionada, contendo uma quantidade substancial de oxidantes dissolvidos e envoltos por um combustível imiscível (Bandhari, 1997). Devido à sua reologia, o explosivo emulsionado e sensibilizado quimicamente (por exemplo, com nitritos) requer um tempo de reação dentro do furo para expandir volumetricamente e atingir a densidade ideal antes de ser tamponado. Medina (2014) menciona que o produto explosivo é afetado pela pressão hidrostática, uma vez que a mistura contém bolhas de nitrogênio. Portanto, um aumento na densidade é gerado no fundo do furo à medida que o volume das bolhas de gás diminui.

Cudzilo *et al.* (2002) estudaram o desempenho de cinco emulsões explosivas contendo microesferas de vidro, sendo estas sensibilizadoras, e com matriz emulsionante preparada utilizando soluções aquosas de nitrato de amônia ou combinado com outros nitratos. Os testes de expansão em cilindro e com morteiro balístico observaram uma redução da performance explosiva quando adicionados nitritos metálicos à solução aquosa, além de observar uma grande influência na sensibilização da emulsão com a variação dos diâmetros nos furos de detonação. Por outro lado, Cheng *et al.* (2017) observaram um aumento no poder de detonação dos

explosivos emulsionados quando sensibilizados com certa dose de hidreto de titânio. Um estudo realizado por Mishra *et al.* (2017) com o intuito de relacionar a velocidade de detonação (VOD) e a variação dos agentes gaseificantes e a densidade das emulsões, utilizou o nitrito de sódio como agente gerador dos gases em diferentes concentrações e em diferentes temperaturas. Como conclusão, observou-se um aumento linear na VOD do explosivo em densidades entre 0,95 g/cc e 1,15 g/cc e falhas de detonação em valores acima de 1,27 g/cc. No entanto, grande parte dos estudos levam em consideração apenas os valores de densidade encontrados em aferições onde não há confinamento, como a medição em copo, comumente utilizada nas operações de campo. Além disto, o fenômeno de compressão hidrostática dentro dos furos de desmonte de rocha é negligenciado, mesmo que tenha papel fundamental no valor real da densidade do explosivo. Conforme citado por Cavanaugh, Onederra e Torrance (2011), um melhor entendimento do desempenho de uma detonação de uma carga explosiva pode ser alcançado por medições diretas de pressão, temperatura e VOD, levando em consideração seu grau de confinamento e propriedades do maciço rochoso de entorno dos furos.

Em consonância com alguns trabalhos pioneiros desenvolvidos ao longo das duas últimas décadas, como os projetos de Cudzilo *et al* (2002), Cavanaugh *et al* (2015), Canto (2018) e Villanueva e Vasquez (2020), e com o intuito de desenvolver uma evolução nos controles de desmonte de rocha, o presente projeto baseia-se na criação de um dispositivo eletrônico para medição da densidade do explosivo emulsionado confinado nos furos de desmonte de rochas em bancadas a céu aberto. Uma vez que a VOD está intrinsecamente ligada com a densidade final das emulsões explosivas sensibilizadas quimicamente, podendo resultar em baixas pressões de detonações pela indisponibilidade de energia das ondas de choque (Yunoshev; Plastinin; Sil'vestrov, 2012), experimentos desdobrando o seu real valor se faz necessário para avaliar a qualidade do desmonte de rochas.

## 1.1 HIPÓTESE INVESTIGATIVA E META

Devido às limitações na medição das propriedades de emulsões explosivas em furos confinados durante o processo de desmonte de rochas, a densidade do produto é frequentemente estimada com base em medições nas condições ambiente ou em referências teóricas. Será possível desenvolver um produto com capacidade operacional para fornecer resultados confiáveis em um curto período? Esta solução seria complementar ou substituiria o *modus operandi* atual? É algo replicável em escala industrial?

A meta deste estudo, portanto, é propor uma nova ferramenta para aprimorar as tomadas de decisão de um plano de fogo, fornecendo novos dados para garantia da qualidade (*Quality Assessment/Quality Control*, QAQC) no processo de desmonte de rochas.

## 1.2 OBJETIVOS

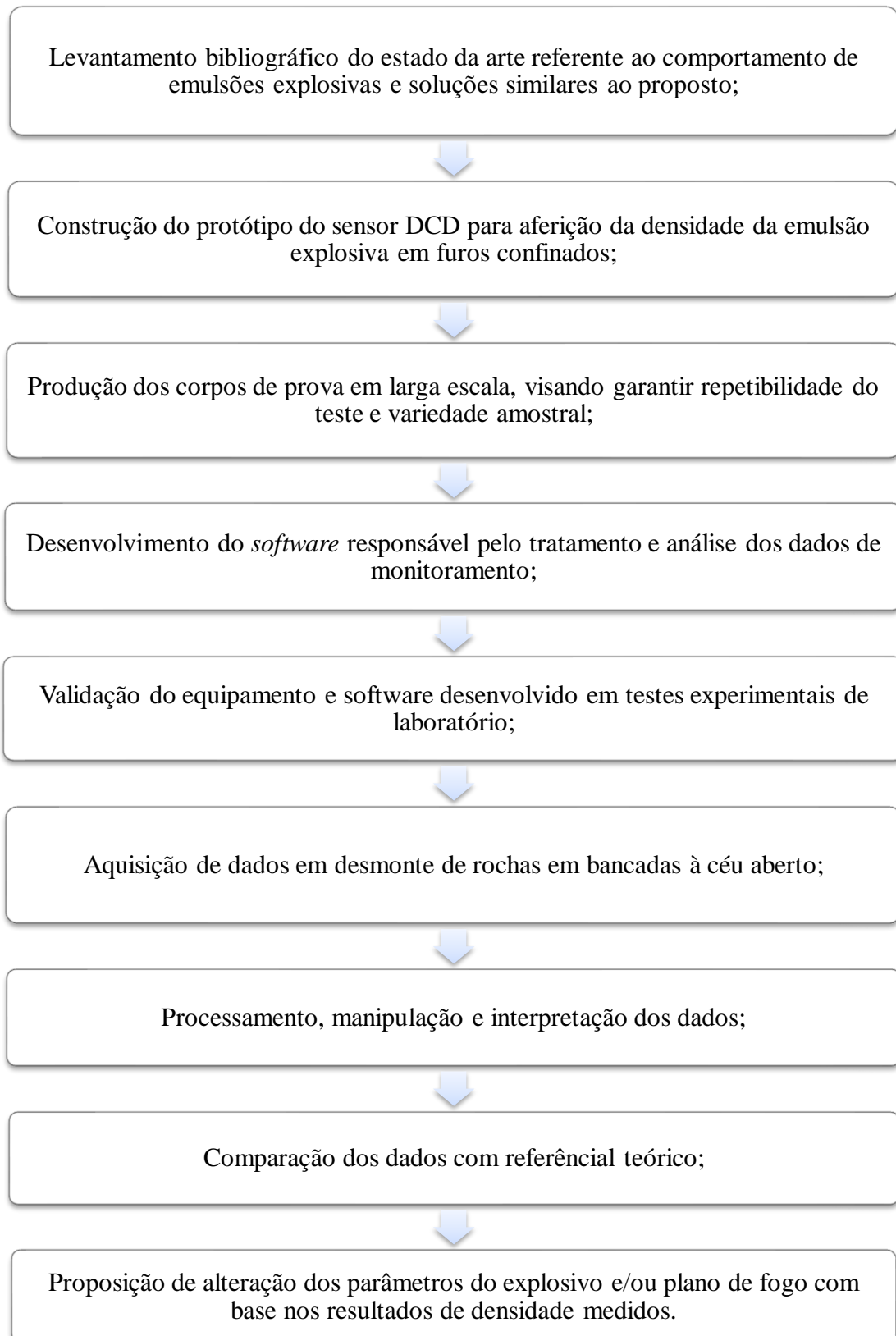
Considerando o problema de medição de densidade de emulsões explosivas em furos confinados, seus objetivos e possíveis soluções, este estudo concentra-se principalmente na proposição de uma nova ferramenta para estimativa da densidade de emulsão nos furos (Dispositivo de Cálculo de Densidade – DCD). Auxiliada por programações computacionais e componentes eletrônicos, ela visa aprimorar o desempenho do desmonte de rochas e seu ciclo de melhoria contínua, trazendo uma gestão de dados eficiente e inovadora. Para atingir esta meta, um dispositivo foi elaborado e seus respectivos corpos de prova confeccionados para que fosse garantida a repetibilidade dos eventos. Posteriormente, estes dados foram interpretados e confrontados com o referencial teórico. Assim sendo, foram definidos os seguintes objetivos:

1. Amplificar a zona de conhecimento das emulsões explosivas;
2. Desenvolver uma ferramenta robusta, com viés tecnológico, de fácil acesso e custo-benefício para medição de densidade de emulsões explosivas;
3. Avaliar a tendência de variação de densidade de emulsões explosivas ao longo de uma coluna de furos de desmonte de rochas;
4. Analisar diferentes situações operacionais e seu impacto no resultado final da densidade das emulsões explosivas;
5. Propor uma abordagem pouco ortodoxa, porém confiável, para melhoria contínua dos desmonte de rochas.

## 1.3 ETAPAS DA PESQUISA

Para atender aos objetivos propostos nessa pesquisa, foram definidas as seguintes etapas, conforme disposto na Figura 1:

**Figura 1 - Etapas previstas durante a elaboração deste estudo**

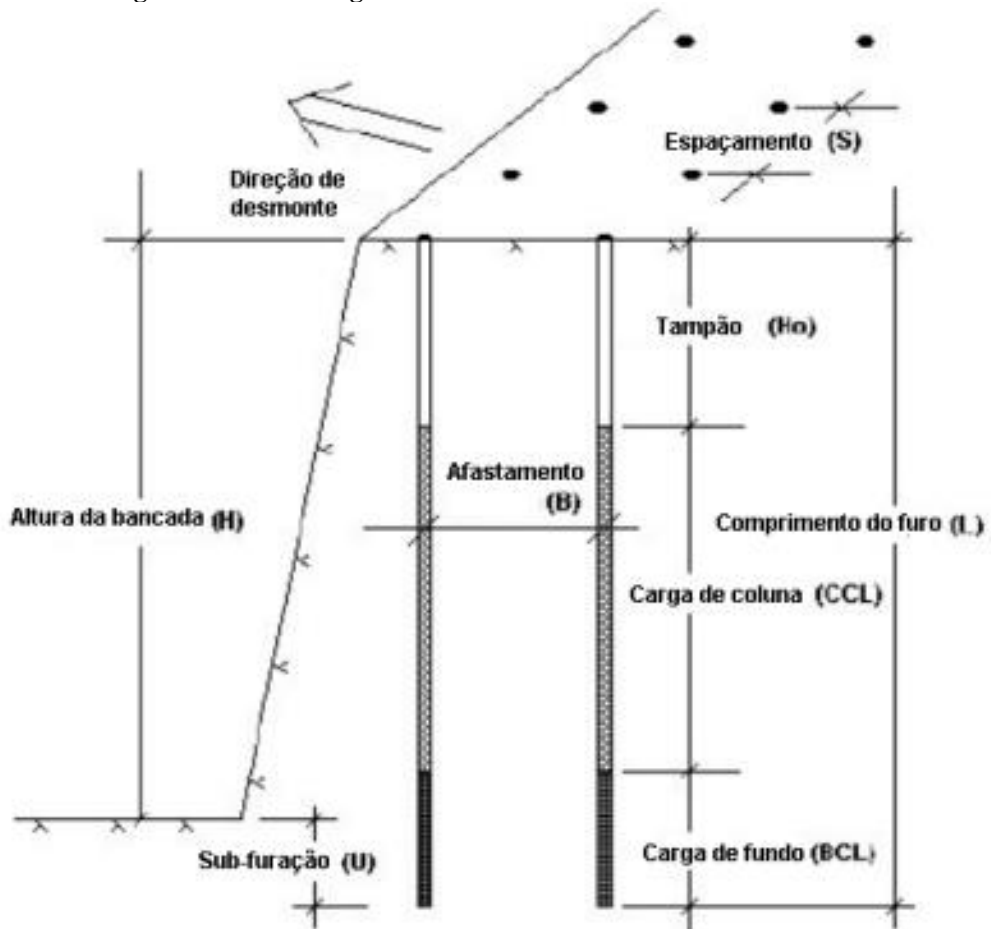


## 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 DESMONTE DE ROCHAS

O principal propósito de um desmonte de rochas com explosivos realizado em bancadas é de promover o fraturamento e movimentação do maciço rochoso intacto para que as posteriores etapas de carregamento, transporte e cominuição aconteçam em total harmonia e de forma eficiente (Demenegas, 2008). Existem diversos parâmetros que influenciam o resultado da fragmentação em um desmonte em bancada. Entre os mais relevantes, certamente estão as propriedades do maciço rochoso, as características geométricas do plano de fogo, a temporização a ser utilizada, o tipo de explosivo, sistema de iniciação, padrão no sequenciamento de iniciação, entre outros. Na Figura 2, é apresentada uma visão geral dos parâmetros geométricos de um desmonte a céu aberto e suas respectivas terminologias:

Figura 2 - Terminologia utilizada em desmonte de rochas



Fonte: Sironio, 2017.

*Afastamento (B)*: É a distância entre o furo e a face livre ou a distância entre linhas consecutivas.

*Espaçamento (S)*: Distância entre dois furos consecutivos de uma mesma linha.

*Carga de fundo (BCL)*: Terminologia para indicar a carga explosiva utilizada próxima ao pé da bancada, que é geralmente maior, com o intuito de compensar o aumento do confinamento, ou seja, a falta de face livre, evitando o surgimento de repé.

*Carga de coluna (CCL)*: O volume principal de explosivo distribuído ao longo da secção principal do furo perfurado.

*Altura da bancada (H)*: Relativa à distância vertical da crista ao pé da bancada.

*Sub-furação (U)*: A secção do furo que se estende abaixo do pé da bancada. É necessária para se alcançar quebra suficiente próximo ao pé da bancada, e por consequência alcançar uma maior suavidade no piso para a trabalhabilidade da pilha de minério, evitando-se a ocorrência de repés.

*Tampão (H0)*: A parte do topo do furo, na qual é mantida descarregada de material explosivo, e é preenchida com material inerte, como areia, pó de perfuração ou brita. O tampão existe com o intuito de reduzir o risco de ultra lançamento, além de promover a ação da massa gasosa gerada após a detonação.

### **2.1.1 Mecanismo de ruptura dos maciços rochosos**

Os mecanismos relacionados à atuação dos explosivos detonados no interior do maciço rochoso são representados pela interação dos explosivos com as rochas circundantes ao mesmo, envolvendo fatores como tempo, ondas de choque, mecânica das rochas, energia termodinâmica e outras variantes (Macedo, 2014). Após a detonação de um explosivo, o material situado na interface das paredes do furo onde se situa a carga é imediatamente sujeito a uma perturbação dinâmica. Posteriormente à esta fase dinâmica surge a semi-estática, representada pela descompressão dos gases resultantes da detonação (Navaro Torres, 2012).

A fase dinâmica é caracterizada pela ação das ondas de choque. Segundo Jimeno *et al.* (2003), se produz um forte impacto devido à onda de choque gerada a partir da energia de tensão. Scott (1996) comenta que a fase dinâmica corresponde à fase de choque representada pelas ondas de tensão P (Compressão) e S (Cisalhamento), sendo estas associadas à rápida aceleração da explosão na parede do furo.

A fase semi-estática por sua vez é caracterizada pela ação da pressão dos gases gerados pela detonação. Refere-se ao trabalho realizado pela expansão ou descompressão dos gases ao

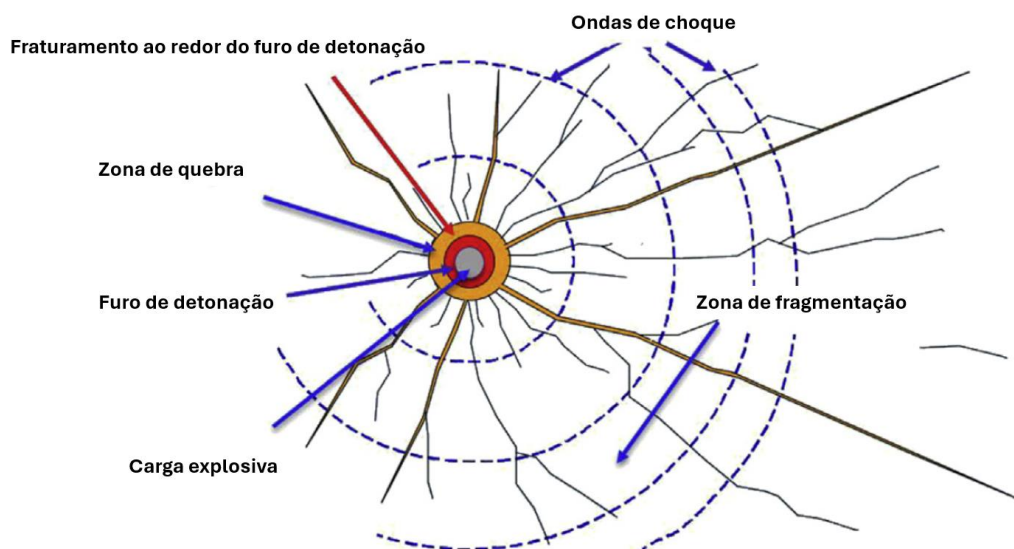


percorrerem pelas discontinuidades geradas pela fase dinâmica. Segundo Langefors e Kihlström (1978), à medida que os gases são liberados, blocos são lançados produzindo novas fraturas por ação de choque entre eles. Nesta fase atuam os gases produzidos através da zona de reação.

A fase de quebra ou cominuição da rocha é a etapa de fragmentação que ocorre nos primeiros instantes após a detonação, sendo que a energia liberada pelos explosivos é transmitida para o maciço rochoso na forma de ondas de choques (Figura 3). A pressão da frente da onda de choque que se expande de forma cilíndrica atinge valores que superam a resistência à compressão da rocha, causando a destruição de sua estrutura intercrystalina e intergranular. Segundo Hagan (1977), este mecanismo de ruptura consome em torno de 30% da energia que transporta a onda de choque.

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. Quando as tensões superam a resistência dinâmica a tração da rocha, se inicia a formação de uma zona de fraturas radiais em torno do da zona triturada que rodeia o furo (JIMENO *et al.* 2003). O comprimento e número de fraturas radiais aumentam conforme intensidade da onda de choque na parede do furo e diminuição da resistência dinâmica à tração do maciço rochoso.

**Figura 3 - Mecanismo de ruptura radial**



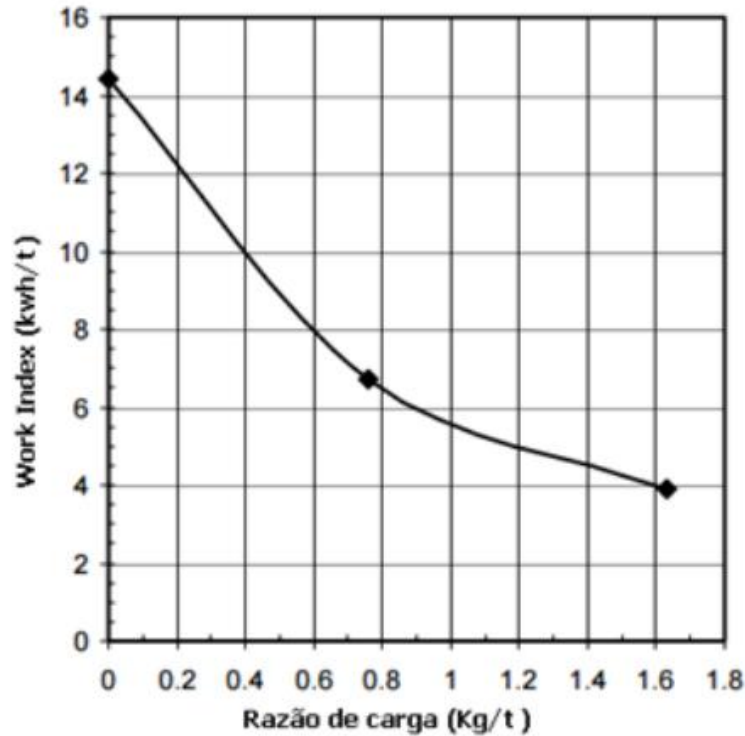
Fonte: Adaptado de Kabwe, 2018.

### 2.1.2 Influência do desmonte de rocha nas operações subsequentes

O desmonte é o primeiro passo no processo de cominuição da rocha e tem um impacto significativo nas seguintes operações: carregamento, transporte, britagem e moagem. A uniformidade da pilha de minério desmontado beneficia a taxa de escavação, transformando as etapas de carregamento e transporte mais eficientes. O percentual de blocos que não estão dentro dos padrões de carregamento e transporte definem quais recursos serão utilizados a fim de reduzir a sua granulometria. A britagem, também, é um exemplo de operação que possui um grau de influência altíssimo do desmonte de rocha. A distribuição granulométrica dos fragmentos oriundos da detonação é o parâmetro mais óbvio a ser aprofundado. Uma quantidade exagerada de material grosseiro em uma pilha de minério irá resultar em um aumento no consumo de energia na etapa de britagem, além de reduzir a capacidade de processamento do britador primário, resultando em um processo ineficaz. Os estudos acerca da influência do desmonte de rocha com o uso de explosivos nas etapas de britagem e moagem vêm evoluindo fortemente nos últimos anos.

Segundo Seccatore *et al.* (2015), um novo conceito de britabilidade parte do princípio de que a detonação produz dois efeitos no maciço rochoso: (i) Fragmentação: A distribuição granulométrica visível a olho nu que é mensurada por meios de análises de imagens ou peneiramento. (ii) Fraturamento invisível: O sistema de microfaturas, invisível ao olho nu, que só é detectado por análises microscópicas e mostram seu efeito direto no consumo de energia necessário para a cominuição em etapas subsequentes. Pode-se dizer que este efeito aumenta a britabilidade do material. Os estudos relativos aos microfraturamentos de fragmentos rochosos foram introduzidos por Nielsen e Kristiansen (1996), onde eles demonstraram que o aumento na razão de carga explosiva proporciona uma maior presença de microfaturas no material, resultando em reduções significativas no *Work Index* (WI) de Bond (Bond, 1961), conforme mostrado na Figura 4. Mais adiante, Workman e Eloranta (2009) dissertaram sobre diferentes formas de se alcançar uma maior razão de carga como benefício do ponto de vista econômico para a britagem: aumentando a quantidade de explosivo por furo ou variando espaçamento e afastamento.

Figura 4 - Relação entre a razão de carregamento e o WI apresentado



Fonte: Adaptado de Nielsen e Kristiansen, 1996.

## 2.2 EMULSÕES EXPLOSIVAS

As emulsões explosivas foram desenvolvidas e patenteadas há pouco mais de 50 anos por Egly e Neckar (1964). De forma geral, o produto é obtido por adição de uma solução sensibilizante a uma matriz emulsionada, contendo uma quantidade substancial de oxidantes dissolvidos e envoltos por um combustível imiscível (Bandhari, 1997).

As emulsões explosivas têm ganhado amplo uso em detonações comerciais devido à sua alta resistência à água, alta velocidade de detonação, boa sensibilidade em furos de diâmetros pequenos (menor que quatro polegadas), baixa suscetibilidade à temperatura ambiental e iniciação acidental.

A fase combustível é a fase contínua ou externa, responsável por envolver e revestir as gotículas do oxidante. As emulsões precisam que a proporção de volume de oxidante para combustível seja aproximadamente de 9 para 1 para um balanceamento de oxigênio ideal. A viscosidade de uma emulsão é controlada pela natureza da fase de combustível e pelo tamanho das gotículas. Óleos de baixa viscosidade, como o óleo diesel, são comumente utilizados na fabricação de emulsões bombeáveis, enquanto ceras e óleos de alta viscosidade são ideais para fazer emulsões espessas e pastosas para produtos encartuchados (Ramsey, 2000).

Quanto mais rápido e por mais tempo uma emulsão é misturada, menor é o tamanho e a distribuição das gotículas. Quanto menores os tamanhos das gotículas, mais espessa é a emulsão. O tamanho das gotículas geralmente está na faixa de 0,2 a 10 micrômetros de diâmetro.

Embora a energia absoluta disponível (*Absolute Weight Strength, AWS*) das emulsões seja tipicamente menor do que a do explosivo produzido pela mistura de hidrocarbonetos líquidos e nitrato de amônio (*Ammonium Nitrate/Fuel Oil, ANFO*), outros fatores permitem que os produtos emulsificados tenham um desempenho comparável ao do ANFO em razões de carga significativamente menores. O fator responsável por este resultado é o fator de acoplamento da carga. Um cristal de nitrato presente em uma emulsão base tem uma densidade de aproximadamente 1,70 g/cc. Em contrapartida, os grânulos (ou *prills*) de nitrato de amônio presentes no ANFO têm uma densidade típica de 0,84 g/cc. Portanto, aproximadamente metade do volume ocupado pelo ANFO é composto por ar. Ao detonar o ANFO, os gases explosivos devem pressurizar este vazio antes de expandirem para as paredes do furo de detonação e iniciar o processo de fragmentação. Consequentemente, os concentrados de emulsão preenchem uma parte do volume ocupado pelo ar e melhoram o acoplamento do explosivo.

O fato de que o ar é deslocado significa que menos energia é gasta pelos gases explosivos na pressurização do furo de detonação, e mais energia disponível pode ser transmitida diretamente para a fragmentação da rocha sobre as faixas de pressão onde a fragmentação da rocha está ocorrendo. Consequentemente, devido ao aprimoramento do acoplamento, emulsões têm pressões iniciais muito mais altas e geralmente realizarão mais trabalho disponível até pressões que representam o limite de falha da rocha quando comparado ao ANFO (Rollins; Givens, 2000), refletindo em um maior VOD.

Uma opção amplamente utilizada no mercado é a aplicação de emulsões blendadas com ANFO. Existe diversas variações de formulação, e três fatores principais devem ser observados anterior à esta definição: o aumento de proporção de ANFO na mistura reflete em um aumento da força de arrasto do explosivo, devido ao aumento do volume gasoso pós detonação. Em contrapartida, a VOD decresce em similar proporção; a mistura só é capaz de ser bombeada em uma proporção de ANFO de até 40%. Acima disto, é necessário que seja derramado, podendo refletir em um impacto operacional; formulações com percentual de ANFO acima de 55% tendem a perder a sensibilidade quando operacionalizado em furos com água (Evans; Taylor, 1987).

### 2.2.1 Composição das emulsões explosivas

Os explosivos emulsionados consistem em sais oxidantes, combustíveis orgânicos imiscíveis em água, menos do que cerca de 6% de água e emulsificantes. Os sais oxidantes podem incluir, além de nitrato de amônio, pelo menos um composto que, ao ser aquecido, forma uma solução ou fusão com um ponto de fusão muito mais baixo do que o ponto de fusão do nitrato de amônio puro. Este composto pode ser um sal inorgânico como nitrato de sódio, nitrato de potássio, nitrato de cálcio, nitrato de magnésio ou misturas destes. Outros componentes aceitáveis são nitratos orgânicos como nitratos de amina ou nitratos de diamina (Li *et al.*, 1997). Estes compostos podem ser usados para formar a solução ou fusão de sais oxidantes com nitrato de amônio. Li *et al.* (1997) também afirma que a mistura selecionada para formar a solução ou fusão deve ter um ponto de fusão adequado e ser substancialmente insolúvel nos combustíveis escolhidos. Geralmente, o ponto de fusão das soluções ou fusões deve estar dentro da faixa de 80 °C a 140 °C.

O combustível é preferencialmente um combustível insolúvel em água, que pode ser selecionado entre óleo mineral, óleos combustíveis, óleo lubrificante, parafina líquida, ceras micro cristalinas, ceras de parafina, e misturas destes. Para explosivos emulsionados, uma mistura preferencial compreende uma mistura de óleo mineral e ceras de parafina que formam um combustível com alto ponto de fusão. Ao mesmo tempo, a mistura de combustível deve ter excelente viscosidade para que possa reparar a quebra ou enfraquecimento da emulsão. Os emulsificantes com boa estabilidade em alta temperatura, como a série de succinimida de poliisobutileno, são preferencialmente escolhidos (Al-Sabagh *et al.*, 2017).

Aditivos sólidos dispersos em combustíveis contínuos são preferencialmente adicionados à emulsão para acelerar a cristalização da fase de sal oxidante e o empoeiramento da matriz da emulsão. Aditivos sólidos são geralmente superfinos, podendo ser combustíveis sólidos ou sólidos inertes como alumínio atomizado ou de grau de pintura, carvão, carvão ativo, caulim e dióxido de silício.

As faixas típicas de formulação para explosivos emulsionados estão listadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Faixas de formulação típica para emulsões explosivas**

Composição	Exemplos de ingrediente	Massa (%)
Oxidante	Nitrato de amônio, nitrato de sódio, nitrato de cálcio, perclorato de sódio, perclorato de amônio, nitrato de ureia, ácido nítrico	50-85

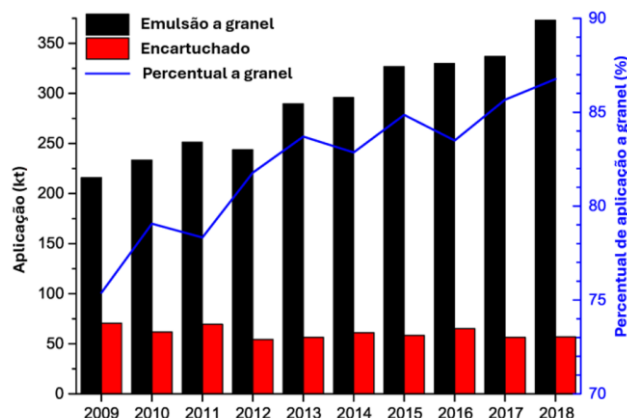
Combustível	Parafina, óleo combustível	2-7
Água	-	8-15
Tensoativo	Emulsificantes	0,5-2,5
Sensibilizante solúvel	Nitrato de monometilamina, Ácido nítrico	0-30
Sensibilizante insolúvel	Alumínio em pó, compostos nitro	0-15
Sensibilizante físico	Microbalões de vidro, perlita expandida, espumante químico	0-35
Aditivos	Estabilizante, modificador cristalino	0,05-1,0

Fonte: Adaptado de Wang (1994).

A simplicidade no transporte de matrizes de emulsões explosivas foi o principal fator subjacente ao seu desenvolvimento. Emulsões explosivas a granel, que são uma forma inovadora de materiais energéticos, podem ser produzidas diretamente dentro de furos de perfuração. Isso é alcançado carregando os furos de perfuração com uma mistura da matriz de emulsões explosivas e um agente sensibilizante químico. Esta abordagem elimina a necessidade de transportar e manusear materiais explosivos antes da operação de detonação, permitindo o carregamento remoto de furos de perfuração. As principais vantagens das emulsões explosivas a granel em comparação com os materiais energéticos tradicionais em cartuchos são aumento da segurança e carregamento fácil de furos de perfuração.

Os últimos anos, também, trouxeram uma melhoria significativa no desempenho das emulsões explosivas a granel, resultando em seu uso cada vez mais popular, especialmente em comparação com as emulsões explosivas em cartuchos (Figura 5), pois sua participação no uso total de emulsões explosivas na União Europeia superou 85% em 2018 e espera-se que tenha aumentado ainda mais nos últimos anos. A aplicação primária de emulsões explosivas é realizada em operações de detonação orientadas para mineração a céu aberto e subterrânea. O desenvolvimento e a comercialização de emulsões explosivas permitiram que emulsões explosivas a granel competissem com materiais energéticos tradicionais nesta área. Considerando a escala em que as emulsões explosivas a granel são utilizadas anualmente, mesmo melhorias incrementais aparentemente menores em seu desempenho são esperadas ter um impacto econômico significativo, e melhorias nos parâmetros de segurança das emulsões explosivas a granel são de ainda maior importância. Conseqüentemente, o desenvolvimento de novas formulações de emulsões explosivas e ferramentas de controle exibindo propriedades melhoradas é altamente desejável em várias perspectivas.

**Figura 5 - Parcela de utilização de emulsão a granel e encartuchado na União Europeia**



Fonte: Adaptado de Kramarczyk *et al*, 2022.

### 2.2.2 Processo de sensibilização das emulsões explosivas

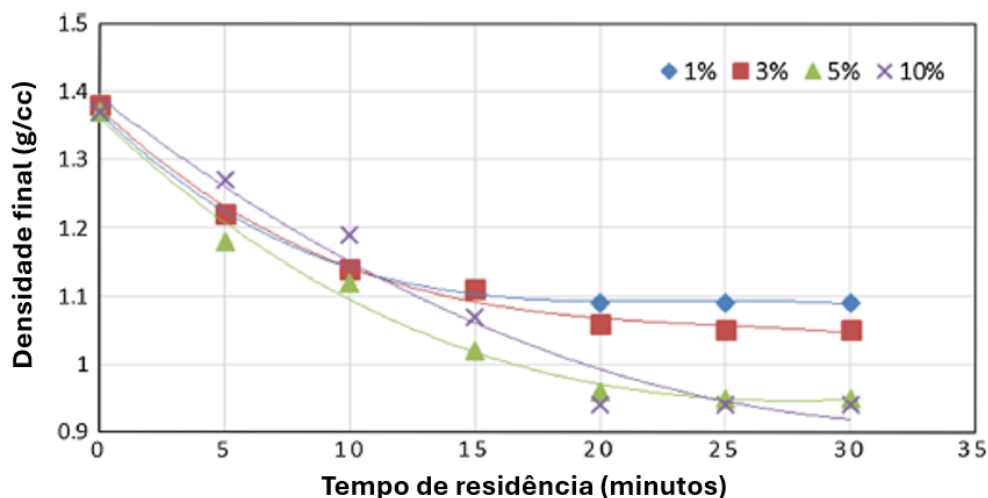
Como citado anteriormente, nos últimos anos o uso de explosivos em emulsão tem se tornado cada vez mais abrangente, pois é seguro para o manuseio, transporte e armazenamento, além de ser resistente à água, ao contrário do ANFO. Uma emulsão é uma dispersão de dois líquidos imiscíveis, onde um líquido, na forma de gotículas (fase interna), é disperso em outro líquido (fase contínua). A matriz explosiva em emulsão é uma emulsão altamente concentrada do tipo água-em-óleo, onde o oxidante é disperso em uma mistura de combustível. No entanto, a matriz de explosivos em emulsão requer um sensibilizante para garantir a detonação. A sensibilização pode ser feita quimicamente ou mecanicamente. O conceito principal por trás da sensibilização da matriz de explosivos em emulsão é a redução da densidade da emulsão, resultando na geração de bolhas ou vazio na emulsão, garantindo assim pontos quentes durante a detonação. A sensibilização química cria bolhas de gás como resultado de uma reação química iniciada pelo sensibilizante na interface oxidante/combustível. A densidade final da emulsão ou o número de bolhas de gás formadas é controlado pela quantidade do agente químico ou aditivo adicionado à matriz de emulsão. A gaseificação química geralmente ocorre logo antes do carregamento do explosivo em um furo de detonação. A reação química ocorre enquanto a emulsão está no furo de detonação. Por outro lado, a sensibilização mecânica envolve a adição por exemplo de micro balões na matriz de emulsão exatamente pelo mesmo motivo da sensibilização química. No entanto, devido a preocupações com a segurança e legislação em certos países, esse tipo de sensibilização só pode ocorrer no local de fabricação dos explosivos em emulsão. Ambos os métodos têm seus prós e contras. Em primeiro lugar, a sensibilização química proporciona um transporte, manuseio e armazenamento mais seguros, pois fornece

sensibilização da emulsão apenas quando o produto é carregado no furo de detonação. Antes de ser carregado no furo de detonação, ele é classificado como oxidante 5.1, conforme classificação de produtos perigosos vigente no Brasil. Explosivos em emulsão sensibilizados mecanicamente são transportados, manuseados e armazenados como um explosivo do tipo 1.1. Em segundo lugar, há a possibilidade de falta de controle de densidade usando sensibilização química devido a vários fatores que afetam a reação química, onde o fator humano e calibração da Unidade Móvel de Bombeamento (UMB), também, devem ser considerados. Estes fatores podem culminar em um desempenho de detonação abaixo do esperado. Por último, a densidade de carregamento em massa de uma matriz emulsificante sensibilizada quimicamente varia ao longo do comprimento do furo de detonação, ao contrário dos explosivos em emulsão sensibilizados com micro balões, que possuem uma tendência de densidade uniforme caso homogeneizada corretamente. Para emulsões sensibilizadas mecanicamente, a densidade de carregamento em massa costuma permanecer a mesma ao longo do furo de detonação (Kharatyan; Halliday, 2015).

Por conta de sua reologia, o explosivo emulsionado e sensibilizado de forma química (por meio de nitritos, por exemplo) necessita de um tempo de reação dentro do furo para que expanda volumetricamente e obtenha a densidade ideal antes de ser tamponado ou confinado. Mishra *et al* (2017) concluiu que após a adição do sensibilizante, a mistura gradualmente adquire as propriedades de uma emulsão explosiva. Para isto, a densidade da emulsão formulada foi monitorada em diferentes intervalos de tempo de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. A variação da densidade para diferentes concentrações de agente de gaseificação a uma temperatura de 31 °C, obtida pelos autores referidos anteriormente, é apresentado na Figura 6 com o efeito do intervalo de tempo.



Figura 6 - Variação de densidade da emulsão explosiva a 31 °C



Fonte: Adaptado de Mishra *et al*, 2017.

Emulsões são sistemas de dispersão termodinamicamente instáveis que são susceptíveis ao envelhecimento ou maturação através, por exemplo, do processo de Ostwald, da floculação, da cremagem e da coalescência, resultando em separação de fases e em um desvio gradual das propriedades da emulsão inicial (Kramarczyk *et al*, 2022). Devido à alta fração volumétrica da fase dispersa nas matrizes de emulsões explosivas, elas são altamente resistentes à floculação e à cremagem. Em vez disso, o modo mais relevante de maturação da matriz de emulsões explosivas com o objetivo de dessensibilização é a transição de emulsão para suspensão, devido à cristalização gradual do nitrato de amônio. Estudos deste processo de cristalização revelaram que ele ocorre nas gotículas da matriz de emulsões explosivas sobressaturadas com nitrato de amônio, resultando na formação de cristais de nitrato de amônio puro e gotículas de soluções de nitrato de amônio insaturadas.

A escolha do agente emulsificante usado para produzir as matrizes de emulsões explosivas é altamente relevante para a estabilidade da formulação de emulsões explosivas. Conforme citado por Al-Sabagh *et al* (2017), no caso do poliisobutileno com terminações de anidrido succínico (PIBSA) modificado com dietanolamina ou com oligômeros de polietileno glicol, descobriu-se que a escolha do agente emulsificante tem um impacto significativo na estabilidade e nas propriedades reológicas das matrizes de emulsões explosivas. Curiosamente, mesmo que tenham sido identificados dois compostos com alto desempenho (prevenindo a separação de fases e resultando em uma perda mínima de nitrato de amônio da matriz de emulsões explosivas durante estudos de maturação), descobriu-se que o equilíbrio hidrofílico-lipofílico dos agentes emulsificantes tem pouca correlação com sua eficácia.

Em um estudo adicional (Zhou *et al*, 2021), uma escolha mais diversa de agentes emulsificantes, bem como suas misturas foi testada, revelando que agentes emulsificantes poliméricos foram, em geral, mais eficazes na manutenção da matriz de emulsões explosivas do que agentes de baixo peso molecular, apesar de proporcionarem valores de tensão interfacial mais altos do que aqueles proporcionados por agentes de baixo peso molecular. Curiosamente, entre os agentes emulsificantes testados, o polipropileno foi encontrado como mais eficaz do que agentes contendo vários grupos funcionais.

A filosofia de segurança na produção de emulsões explosivas é de que componentes não explosivos são misturados para formar uma emulsão matriz. A matriz não é um explosivo, pois sua densidade e homogeneidade não permitem suportar os processos de detonação. Para alcançar a transição desse estado não explosivo para um estado explosivo, no qual a emulsão explosiva é capaz de sustentar, a matriz de emulsões explosivas deve ser sensibilizada. A sensibilização consiste em suplementar a matriz com substâncias que diminuem a densidade e introduzem defeitos de homogeneidade, como pequenas esferas preenchidas com gás, que constituem pontos quentes. Ao detonar, as bolhas de gás (pontos quentes) absorvem energia, aquecendo a altas temperaturas, permitindo que a detonação seja sustentada. Métodos de sensibilização física e química são empregados, sendo a escolha do método fortemente correlacionada com o tipo de emulsões explosivas (encartuchado ou a granel) a serem sensibilizadas (Yoshikazu *et al*, 2002).

A sensibilização física consiste em suplementar a matriz de emulsões explosivas com microesferas de vidro (pequenas contas de vidro de densidade muito baixa) e é a forma predominante de sensibilização para a produção de emulsões explosivas encartuchados, por exemplo. A sensibilização química, por outro lado, é principalmente empregada para emulsões explosivas a granel. Ela depende da reação do agente sensibilizante com agentes oxidantes que constituem a matriz das emulsões explosivas, pois esta reação resulta na evolução de gás que produz pequenas bolhas em todo o volume da matriz sensibilizada. Em ambos os casos, a sensibilização resulta na diminuição da densidade da matriz de emulsões explosivas.

Uma consideração importante para emulsões explosivas sensibilizados é a do tamanho e da população ideais dos defeitos de baixa densidade (microesferas ou bolhas de gás) no volume das emulsões explosivas. Hirosaki *et al* (2002) descobriram que o diâmetro dos poros em emulsões explosivas sensibilizadas impacta fortemente sua velocidade de detonação e diâmetro crítico. Conseqüentemente, este aspecto da sensibilização, também, deve ser levado em consideração durante o desenvolvimento de emulsões explosivas, com o controle sobre as dimensões e a distribuição dos poros provavelmente sendo os aspectos chave do

desenvolvimento de novos métodos de sensibilização de emulsões. No caso da sensibilização física, não há problema em manter um tamanho de poro uniforme. As microesferas podem ser facilmente fabricadas para terem uma distribuição de tamanho estreita. No caso da sensibilização química, no entanto, o tamanho das bolhas de gás depende principalmente do tipo de agente sensibilizante, tempo de sensibilização, temperatura e viscosidade da matriz de emulsões explosivas. O nitrogênio liberado na reação do nitrito de sódio com o nitrato de amônio na fase inicial da sensibilização gera bolhas muito pequenas. À medida que a reação prossegue, elas começam a aumentar de volume até que todo o nitrito de sódio tenha reagido. As bolhas devem ser o menor possível e perfeitamente distribuídas por toda a massa da emulsão.

A dessensibilização por pressão de explosivos em emulsão é um fenômeno bem conhecido. No entanto, a experiência e os experimentos indicaram que as características de dessensibilização de uma emulsão gaseificada podem ser bastante diferentes daquelas de uma emulsão sensibilizada com micro balões, por exemplo (Nie, 2000).

#### *2.2.2.1 Sensibilização física das emulsões explosivas*

A sensibilização física baseia-se na adição de esferas sólidas preenchidas com gás à matriz de emulsão explosiva. Microesferas de vidro e polímero são as mais comumente usadas para esse fim, mas a perlita às vezes, também, é utilizada (Yunoshev *et al*, 2017). A quantidade de agente sensibilizante na formulação final de emulsão explosivas está tipicamente na faixa de 1 a 4% em peso, dependendo do tipo de microesferas e da densidade desejada final. Microesferas de polímero são mais eficazes na redução de densidade do que as de vidro. No entanto, deve-se notar que a comparação entre os dois tipos de microesferas foi realizada com base na densidade das emulsões explosivas sensibilizadas, e não em sua participação em peso na formulação, sendo a diferença quase dobrada nos diâmetros das microesferas um fator provavelmente altamente significativo. Apesar deste problema potencial não resolvido, as microesferas de polímero têm uma vantagem significativa em seu processamento fácil, permitindo sua fabricação diretamente no local. O uso de perlita está atualmente em declínio, devido à tecnologia em rápido desenvolvimento para a produção de microesferas de vidro. Em termos de sensibilização física de emulsões explosivas, as cenosferas (resíduo do processo de combustão do carvão mineral) parecem ser uma alternativa viável às microesferas de vidro e polímero, já que a VOD relatada para emulsões explosivas à base de cenosferas é comparável àquela relatada para emulsões explosivas à base de microesferas de vidro. O valor agregado das cenosferas em comparação com outros tipos de agentes sensibilizantes físicos é que elas são

um material de resíduo e, como tal, não requerem investimentos significativos de energia ou material para serem obtidas.

Andrew, Morrison e Tiedgen (2015) estudaram os resultados de uma emulsão sensibilizada de sólidos composta por uma emulsão de nitrato de amônio especialmente misturada e poliestireno expandido (EPS). O componente EPS desta emulsão explosiva atua tanto como sensibilizador quanto como modificador de densidade, o que significa que o referido explosivo pode ser fabricado em densidades variáveis, variando de 0,5 a 1 g/cc. Isto difere da maioria dos explosivos de baixa densidade disponíveis comercialmente, pois pode ser fabricado em densidades até menores do que as do ANFO (o derramado tem uma densidade nominal de 0,8 g/cc). Este explosivo é um produto resistente à água e adequado para furos de detonação contendo água parada quando fabricado com uma densidade acima de 1 g/cc, com toda a faixa adequada para furos de detonação secos, lamacentos ou úmidos.

#### *2.2.2.2 Sensibilização química das emulsões explosivas*

Devido principalmente às questões de logística, a sensibilização química é mais amplamente usada do que a sensibilização física. Em alguns casos, este tipo de sensibilização, também, é usado para os cartuchos. Envolve uma reação química entre a solução sensibilizante e a fase de agente oxidante da matriz de emulsão. Soluções aquosas de nitrito de sódio são principalmente usadas como agentes sensibilizantes químicos. O uso de nitrito de sódio é baseado em uma reação entre nitrito de sódio e nitrato de amônio acidificado na presença de tiourea. Essa reação produz nitrogênio que, na forma de microbolhas, preenche todo o volume da emulsão, reduzindo a densidade e criando pontos quentes. A taxa dessa reação é estritamente dependente da temperatura dos componentes e a reação continua até que um dos reagentes seja esgotado. A sensibilização química pode ser problemática em ambientes frios, às vezes necessitando de acidificação adicional, para alcançar a taxa desejável da reação de sensibilização. A reação subjacente à sensibilização química, ou seja, a reação de ânions de nitrito e cátions de amônio, apresenta cinética relativamente lenta. Essa cinética se traduz nas propriedades da emulsão explosiva, sendo fortemente dependente do tempo decorrido entre a sensibilização e a iniciação (ou tempo de repouso) da carga de emulsão (Piotr Mertuszka; Kramarczyk, 2021).

Trabalhos mais recentes sobre o assunto da sensibilização química foram dedicados a complementar a fase de combustível com gordura de cacau e ácido esteárico (Cordova e Lopez, 2010). Supostamente, essa adição estabiliza o processo de sensibilização, resultando em uma

emulsão explosiva com uma distribuição homogênea de bolhas de gás nitrogênio que é estável por no mínimo 96 horas. Embora nenhuma evidência material tenha sido fornecida para apoiar estas reivindicações, os aditivos postulados são usados em quantidades significativas e, à luz de serem visivelmente mais caros do que os outros componentes, pode haver pouca justificativa econômica para incluí-los na formulação da emulsão explosiva. Uma rota alternativa para a sensibilização química de emulsões explosivas depende de uma reação entre nitrato de amônio e hipocloritos. Embora a reação seja descrita como menos perigosa do que a sensibilização química com o uso de tioureia, isto pode ser discutível, pois a reação produz cloramina como produto intermediário, que pode ser transformada em hidrazina altamente tóxica, dependendo das condições de reação. Outra questão potencial dessa invenção é que a taxa de sensibilização é difícil de controlar, mesmo com o uso de uma variedade de surfactantes, devido à alta reatividade dos reagentes (Gabriel da Silva; Dlugogorski; Kennedy, 2006). Embora muito menos relevante do que a composição dos gases pós-detonações e as ameaças decorrentes disso, a emissão de gases perigosos de emulsões explosivas em processo de sensibilização, também, é um risco significativo do ponto de vista de saúde ocupacional. No caso da reação de nitrito-amônio, tanto o nitrogênio inerte quanto o perigoso óxido nítrico (NO) são produzidos. Recentemente, Wendy *et al* (2013) descobriram que a emissão deste último pode ser mitigada com o uso de nitrosoaromáticos sulfonatos, como o 5-dimetil-4-nitrosobenzeno sulfonato. Mesmo uma adição de 1% em peso deste composto foi encontrada para reduzir as emissões de NO da emulsão explosiva em aproximadamente 70%.

Existem dois métodos para gaseificar quimicamente explosivos de emulsão. A escolha do método a ser usado depende da temperatura da emulsão durante a gaseificação. Ambos os métodos usam um agente de gaseificação de nitrito de sódio, mas para aplicações de gaseificação em baixas temperaturas, um catalisador é adicionado para aumentar a taxa de gaseificação.

*Gaseificação a Quente:* Para a gaseificação da emulsão em temperaturas de 40°-100°C, uma solução aquosa de 15% em peso de nitrito de sódio é usada em conjunto com ácido para produzir gás nitrogênio. A solução de nitrito de sódio é adicionada à corrente de emulsão em uma faixa de 0,6% a 2,0% em peso, mas geralmente é usada em 0,9% em peso.

*Importância do pH do Oxidante:* Em vez de se considerar acidez ou basicidade, geralmente, considera-se o pH da fase oxidante. O pH é uma convenção usada para discutir a quão ácida ou básica é uma solução aquosa. O pH varia de 0 a 14. Soluções ácidas têm pHs baixos (menores que pH = 7). Soluções básicas têm pHs altos (maiores que pH = 7). O pH = 7 é considerado neutro. O pH é o logaritmo negativo da concentração de prótons (H<sup>+</sup>) de uma

solução aquosa. Quanto menor o logaritmo negativo, maior a quantidade que ele representa. Uma solução com  $\text{pH} = 3$  tem uma concentração de prótons maior do que uma solução com  $\text{pH} = 8$ , por exemplo. Outro fato a ter em mente é que o  $\text{pH}$  representa uma escala exponencial. Isso significa que um aumento de uma unidade no  $\text{pH}$  representa um aumento na concentração de prótons ou acidez da solução de 10 unidades. Se o  $\text{pH}$  do sistema variar apenas uma pequena quantidade, pode afetar muito a taxa de gaseificação.

*Gaseificação a Frio* - Para a gaseificação abaixo de  $40^\circ\text{C}$ , é necessário um catalisador de tiocianato de sódio para facilitar a geração de gás nitrogênio. O íon tiocianato é um nucleófilo mais forte do que o íon nitrito e permite que a reação ocorra em temperaturas mais baixas do que com o íon nitrito (Manka, 2004).

### **2.2.3 Densidade da emulsão explosiva e sua relação com parâmetros de detonação**

Na mineração, a boa execução de um desmonte de rochas com utilização de explosivos está intrinsecamente relacionada ao tipo de explosivo empregado, que deve ser caracterizado por propriedades termodinâmicas adequadas. Isso é particularmente importante no caso de detonação usando explosivos de emulsão a granel fabricados no local de disparo, onde a manutenção da qualidade é mais difícil. Isso significa que a eficiência da detonação deve ser avaliada com base nas medições de velocidade de detonação de campo. No entanto, esse parâmetro, também, é relativamente fácil de medir em condições controladas de laboratório. A velocidade de detonação (VOD) descreve a velocidade com que a frente de detonação se propaga dentro do explosivo. O valor VOD medido e a estabilidade do processo de detonação podem ser facilmente considerados como reflexo da qualidade de um dado explosivo (Merturska *et al*, 2020).

Conforme explanado por Manka (2004), um explosivo de emulsão típico de nitrato de amônio (como uma emulsão com uma proporção de 90% em peso de oxidante para 10% em peso de combustível) tem uma densidade inicial entre 1,30-1,40 g/cc. A densidade a granel da emulsão pode variar devido à proporção de combustível para oxidante empregada, quais sais de nitrato são usados na fase oxidante, a proporção de oxidante para água e qual combustível é usado. Para que uma emulsão de nitrato de amônio seja detonada, a densidade deve ser reduzida de 1,30-1,40 g/cc para cerca de 0,90-1,10 g/cc, embora muitas emulsões tenham uma densidade final mais alta de 1,15-1,25 g/cc. Isto é frequentemente alcançado pela adição de grânulos de nitrato de amônio (NA), visando manter uma velocidade de detonação (VOD) constante no nível necessário, geralmente 5000 m/s.

Como apresentado nos capítulos anteriores, existem três métodos comuns de redução de densidade de emulsão. Dois métodos envolvem a adição de sólidos de baixa densidade; grânulos porosos de nitrato de amônio ou microesferas de vidro oco de baixa densidade, à emulsão. O terceiro método usa a geração química ou *in situ* de bolhas de gás. Combinações desses três métodos também podem ser usadas juntas para alcançar os alvos desejados de custo/desempenho.

Cada um dos três métodos tem vantagens e desvantagens. A adição de grânulos porosos de nitrato de amônio é menos custosa financeiramente. No entanto, os grânulos reduzem a resistência à água da mistura de emulsão e grânulos e podem diminuir a estabilidade da emulsão ao absorver a fase de combustível da emulsão, causando a sua quebra. A adição de microesferas mantém a resistência à água da emulsão e geralmente não prejudica a sua estabilidade. O uso de microesferas, também, garante um tamanho de vazio uniforme, volume de vazio e distribuição dos vazios por toda a emulsão. Infelizmente, as microesferas são caras. A gaseificação química é menos cara do que a adição de microesferas, mantém a resistência à água em comparação com o grânulo de nitrato de amônio e, se feita corretamente, não prejudica a estabilidade da emulsão.

A relevância da redução da densidade da emulsão está necessariamente associada aos elementos que são colocados na emulsão, pela adição dos grânulos, microesferas e bolhas de gás que são críticos para a detonação. Os vazios são adicionados para fornecer espaço para a compressão e superaquecimento da emulsão durante a detonação. A compressão dos vazios gera pontos quentes para que a detonação possa progredir adequadamente ao longo da coluna explosiva. Quando a onda de choque propagadora iniciada pelo explosivo de alta potência usado para detonar a emulsão se move através do explosivo, a onda de choque atinge um vazio ou bolha de gás e o comprime. A pressão que comprime os vazios ou bolhas de gás durante a detonação está na ordem de 7.000 a 200.000 atm. Quando o vazio se comprime, ele gera calor entre 3.000-7.000 °C. Esta geração instantânea de calor propaga energia de choque na frente da detonação, que inicia o procedimento novamente com o próximo vazio.

Uma perda de vazios ou uma mudança no tamanho das bolhas de gás pode fazer com que a emulsão falhe na detonação. Caso essa condição de falha seja causada pela ação da onda de choque atingindo a emulsão em furos adjacentes, aumentando a densidade da emulsão ou alterando o tamanho ou densidade da bolha de gás, o processo é conhecido como pré-compressão.

No caso de explosivos emulsificados, a VOD depende de múltiplos fatores, como o diâmetro do furo, o tamanho do reforçador (*booster*) e a densidade do explosivo. Explosivos

com velocidade de detonação relativamente baixa são tipicamente caracterizados por uma menor eficiência do ponto de vista de fragmentação quando comparados a explosivos com VOD mais alta. Como pode ser concluído, a velocidade de detonação tem um impacto significativo sobre a pressão de detonação, e, portanto, também sobre a energia transferida para o maciço rochoso. Cooper (1996) define a seguinte relação:

$$P_d = \left( \rho_{ex} \cdot c_d^2 / \gamma + 1 \right) \quad (2.1)$$

Onde:

$P_d$ : pressão do explosivo (GPa);

$\rho_{ex}$  – é a densidade do explosivo (g/cc);

$c_d$  – VOD (m/s);

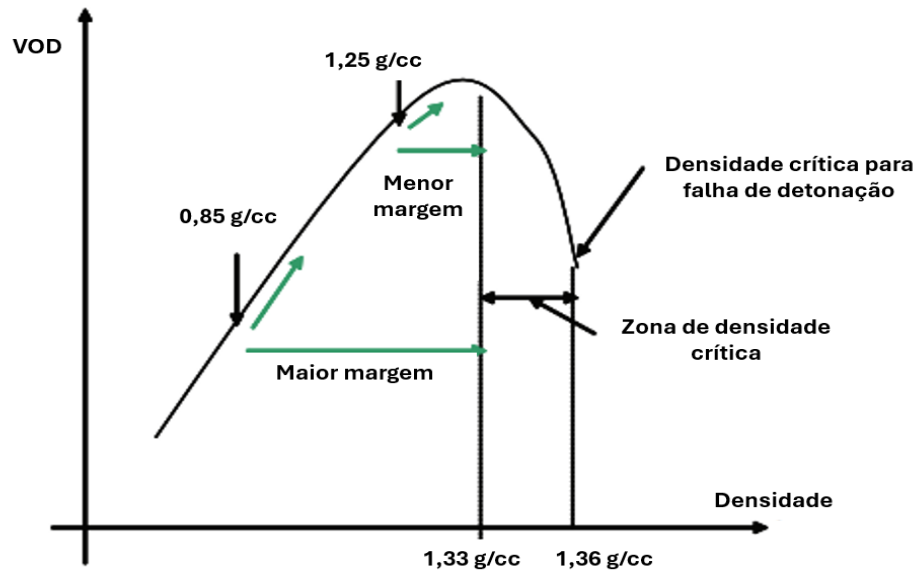
$\gamma$  – razão de calor específico dos produtos da detonação.

#### 2.2.4 Variação da densidade das emulsões explosivas sensibilizadas quimicamente

Com base no exposto, pode-se afirmar que a densidade tem uma importância significativa no processo de uso eficaz da energia da detonação, e influencia diretamente na fragmentação da rocha. Yang (2011) concluiu que os explosivos sensibilizados quimicamente, e conseqüentemente passível de aumento da densidade conforme aumento da profundidade do furo, têm uma relação direta entre densidade e velocidade de detonação. No estudo supracitado, definiu-se uma densidade crítica de falha de 1,38 g/cc. Conforme a Figura 7, um produto de baixa densidade tem uma maior margem para que sua densidade aumente antes que sua VOD comece a cair em uma detonação de baixa grandeza em comparação com um produto de alta densidade. Mas se tivermos uma emulsão com maior densidade alvo, ela aumentará pelo próprio peso da coluna de explosivo. Desta forma, a densidade possivelmente alcançará níveis críticos, resultando em detonações deficientes ou até mesmo deflagração.



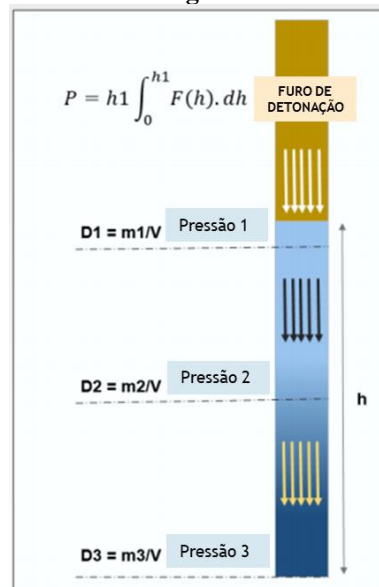
Figura 7 - Relação entre densidade e VOD do explosivo sensibilizado quimicamente



Fonte: Adaptado de Yang, 2011.

Medina (2014) menciona que o produto explosivo é afetado pela pressão hidrostática, uma vez que a mistura contém bolhas de nitrogênio. Portanto, um aumento na densidade é gerado no fundo do furo à medida que o volume das bolhas de gás diminui, vide Figura 8.

Figura 8 - Efeito da pressão nas bolhas de gás de emulsões sensibilizadas quimicamente



Fonte: Adaptado de CANTO, 2018.

Conforme discutimos anteriormente, a emulsão é sensibilizada por bolhas de nitrogênio. O nitrogênio é o produto de uma reação química de gaseificação entre a emulsão e uma solução

de nitrito de sódio. Este processo de gaseificação ocorre em um misturador estático que está acoplado ao sistema da Unidade Móvel de Bombeamento (UMB).

A Tabela 2 apresenta uma variação teórica da densidade de uma emulsão explosiva no furo conforme a variação da profundidade, considerando que a densidade na profundidade zero é conhecida devido os testes preliminares de bancada.

**Tabela 2 – Variação teórica da densidade da emulsão de acordo com a profundidade**

<b>Profundidade do furo (m)</b>	<b>Densidade (g/cc)</b>						
0	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	
1	0,92	0,97	1,02	1,07	1,12	1,17	
2	0,95	0,99	1,04	1,09	1,13	1,18	
3	0,97	1,01	1,06	1,10	1,15	1,19	
4	0,98	1,03	1,08	1,12	1,16	1,20	
5	1,00	1,05	1,09	1,13	1,17	1,21	
6	1,02	1,06	1,10	1,14	1,18	1,21	
7	1,03	1,07	1,11	1,15	1,19	1,22	
8	1,04	1,08	1,12	1,16	1,19	1,23	
9	1,06	1,10	1,13	1,17	1,20	1,23	
10	1,07	1,11	1,14	1,18	1,21	1,24	
12	1,09	1,12	1,16	1,19	1,22	1,24	
14	1,10	1,14	1,17	1,20	1,23	1,25	
16	1,12	1,15	1,18	1,21	1,23	1,26	
18	1,13	1,16	1,19	1,22	1,24	1,26	
20	1,14	1,17	1,20	1,22	1,25	1,27	

Para encontrar uma relação matemática entre a pressão e a densidade no furo do explosivo, vamos considerar um segmento da coluna de explosivo, com densidade estável (densidade final do processo de gaseificação), denominada  $D_{ag}$ . Vamos isolar a fase gasosa compressível do restante dos componentes não compressíveis, como a emulsão matriz e o nitrato de amônio. A fase gasosa ocupa um volume  $V_1$  e suportará uma pressão  $P_1$  a uma certa profundidade  $H_1$ . Mas a uma profundidade maior  $H_2$ , a pressão  $P_2$  será maior e o volume será comprimido para  $V_2$ .

Neste contexto, a lei de Boyle desempenha um papel importante. Tendo sido interpretada por Daniel Bernoulli como devendo-se ao fato de a pressão de um gás ser resultado de um efeito cinético de seus átomos, observa-se facilmente que esta lei é um caso particular da lei de Charles posteriormente enunciada, que relaciona a pressão absoluta ( $P$ ) ao volume total ( $V$ ) e à temperatura absoluta ( $T$ ) de um gás pela equação abaixo:

$$(PV)/T = C \quad (2.2)$$

Neste caso, C é uma constante. A lei de Boyle, que afirma que a pressão é inversamente proporcional ao volume, é obtida quando a temperatura T é mantida constante. A interpretação desta lei em termos estatísticos levou à teoria cinética dos gases (Vertchenko; Dickman, 2012).

Uma vez que o volume e a pressão são inversamente proporcionais, pode-se demonstrar que a densidade do explosivo gaseificado sob pressão  $D_{bg}$  pode ser calculada por:

$$D_{bg} = 1 / \left( \frac{1}{D_0} + \frac{P_1}{P_2} \left[ \frac{1}{D_g} - \frac{1}{D_0} \right] \right) \quad (2.3)$$

Onde,

$D_{bg}$ : Densidade do explosivo após a reação e confinado

$D_0$ : Densidade da mistura explosiva anterior à reação

$D_g, V_g$ : Densidade e Volume do explosivo gaseificado sob pressão  $P_1$  em  $H_1$

$P_1$ : Pressão em  $H_1$

$P_2$ : Pressão em  $H_2$

Nos ensaios para determinação da densidade do explosivo, têm dois estados de referência com densidades bem conhecidas, o primeiro é antes da gaseificação do explosivo, cuja densidade é denominada  $D_0$ , no segundo estado o explosivo já está gaseificado, mas fora do furo, esta é a densidade de copo que é representativa apenas para a parte superior da coluna de explosivo, onde não há pressão hidrostática. Em outras palavras, quando  $H_1 = 0$ , a densidade  $D_g$  torna-se igual a densidade de copo, que é facilmente medida no campo. Portanto, usando a Equação 2.3, podemos calcular a densidade relativa no furo em qualquer profundidade. O problema é então reduzido à medição das pressões  $P_1$  e  $P_2$  em pelo menos duas profundidades diferentes ( $H_1, H_2$ ).

### 3 METODOLOGIA

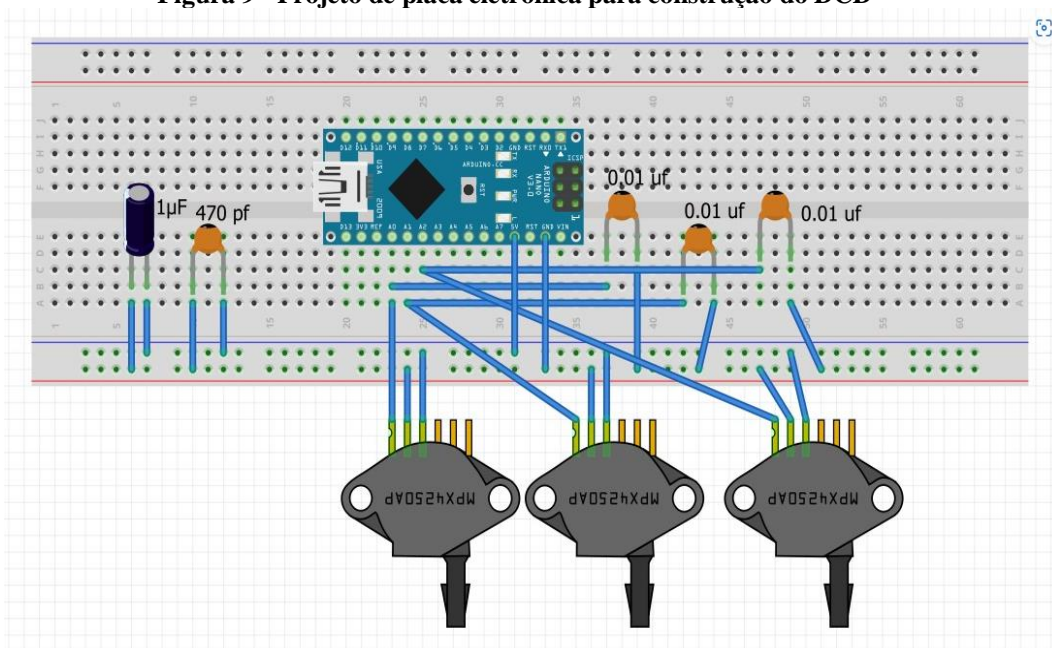
Ao longo do desenvolvimento deste estudo foram construídos equipamentos e ferramentas necessárias para aferição dos dados de pressão no furo confinado em desmonte de rochas à céu aberto, além de programações computacionais que garantissem o processamento destes dados e cálculo das densidades reais, conforme o referencial teórico abordado acima.

### 3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SENSOR DCD

O sensor de pressão MPX5700AP, capaz de medir a pressão absoluta de gases entre 15 kPa e 700 kPa e temperaturas entre 0° C e 85° C, foi definido como peça principal do equipamento (Freescale Semiconductor, 2009). A série de transdutores piezo resistivos MPX5700 é um sensor de pressão de silício monolítico de última geração projetado para uma ampla gama de aplicações, mas particularmente aquelas que empregam um microcontrolador ou microprocessador com entradas de conversão analógico/digital, que é o caso deste estudo. O intuito dele é fornecer um sinal de saída analógico preciso e de alto nível que é proporcional à pressão aplicada.

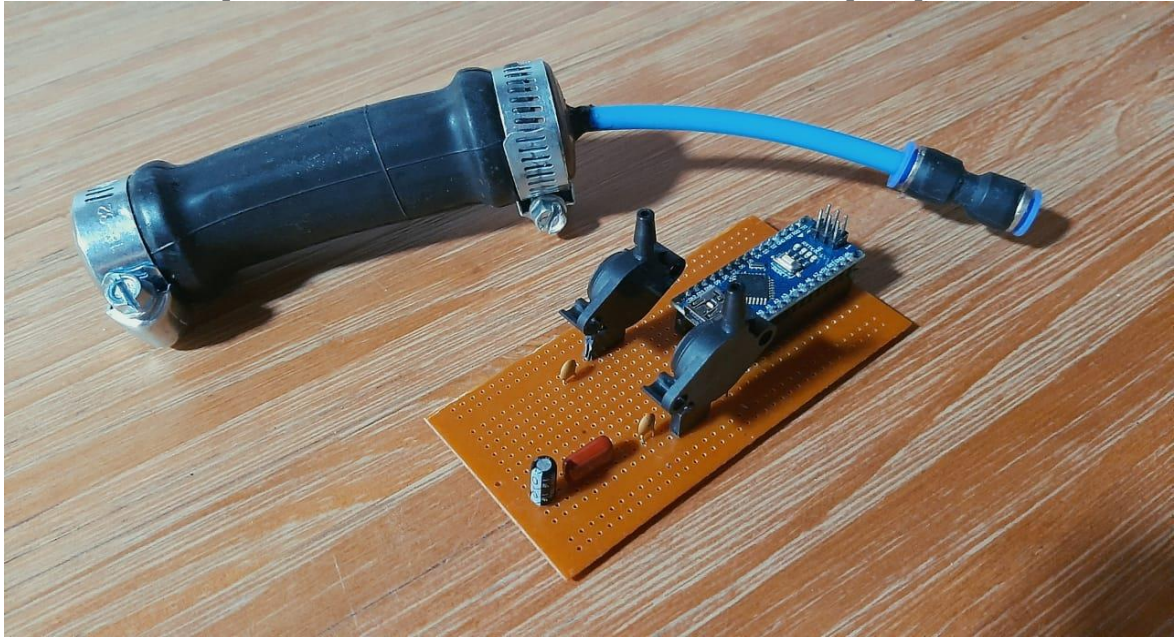
Com o estudo de técnicas de soldagem eletrônica, o Sensor DCD foi desenvolvido em um esquema de placa eletrônica vazada contendo um Arduino Nano V3.0 e um conjunto de capacitores de 1  $\mu$ F, 0,01  $\mu$ F e 470 pF, servindo como interface entre o dispositivo e o computador utilizado para aferição da densidade, vide Figura 9.

**Figura 9 - Projeto de placa eletrônica para construção do DCD**



Ao fim, um conjunto de dois sensores foi construído (Figura 10), com a ideia de obter-se dados apenas no fundo e no topo dos furos de desmorte, levando em consideração que a densidade do explosivo emulsionado varia ao longo da coluna por questões hidrostáticas. A expectativa após a aplicação é que a densidade performe-se igual ou muito similar aos valores teóricos.

**Figura 10 – Placa interna do equipamento DCD, contendo os dois sensores MPX5700AP, seus respectivos capacitores e o Arduino V3.0. Ao lado, um modelo do corpo de prova**



### 3.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após várias tentativas de definição relativas ao esquema de construção dos corpos de prova, os materiais e suas dimensões foram definidos:

- Seção câmara de ar de bicicleta PE-26 com 10 cm;
- Duas cápsulas de vedação de plástico;
- Duas presilhas de alumínio;
- Cola epóxi de alta resistência (automobilística) para selagem;
- Mangueira de polietileno 6 mm e suas devidas conexões.

O resultado após inflado pode ser visualizado na Figura 11. O corpo demonstrou grande eficácia e resistência quando atuando em situações de pressão similares às que seriam posteriormente encontradas nos furos de desmorte de rocha. Para os testes experimentais iniciais, um total de 32 (trinta e dois) corpos de prova foram produzidos.

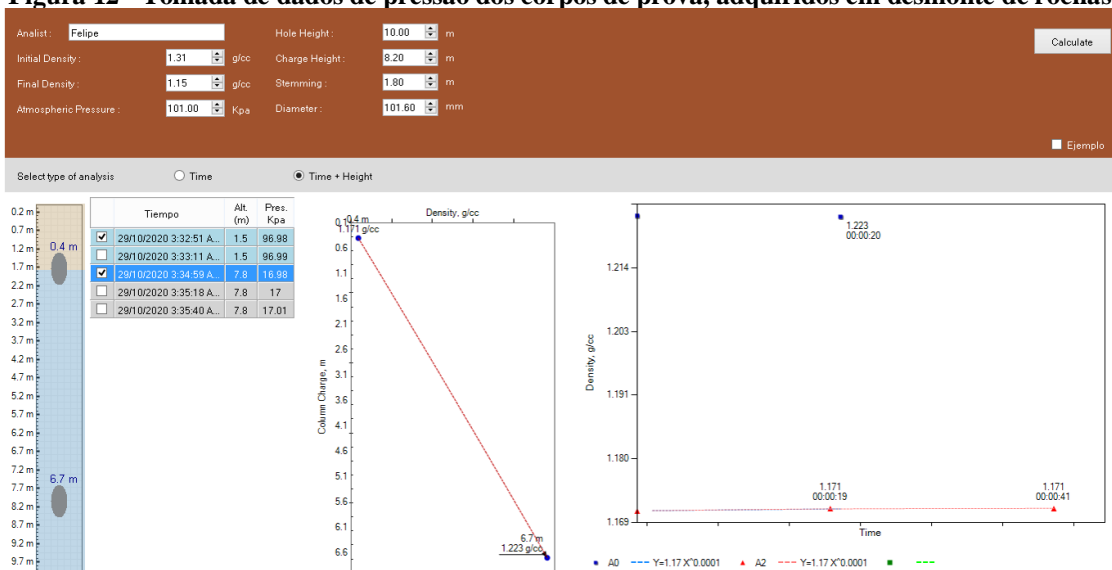
**Figura 11 - Corpo de prova do DCD inflado**



### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE DADOS E ANÁLISE

Com a consultoria da Delion Software possibilitada pelo aporte financeiro da Fundação Luiz Englert (FLE), uma programação computacional em C++ foi elaborada (vide APÊNDICE I) e um software denominado DDT foi desenvolvido para recepção e processamento das leituras de pressão dos corpos de prova (Figura 12). Com base na expressão da Lei de Boyle-Mariotte e demais assunções explicitadas na revisão de estado da arte, ele realiza o cálculo da densidade das emulsões explosivas no entorno dos corpos de prova.

**Figura 12 - Tomada de dados de pressão dos corpos de prova, adquiridos em desmonte de rochas**





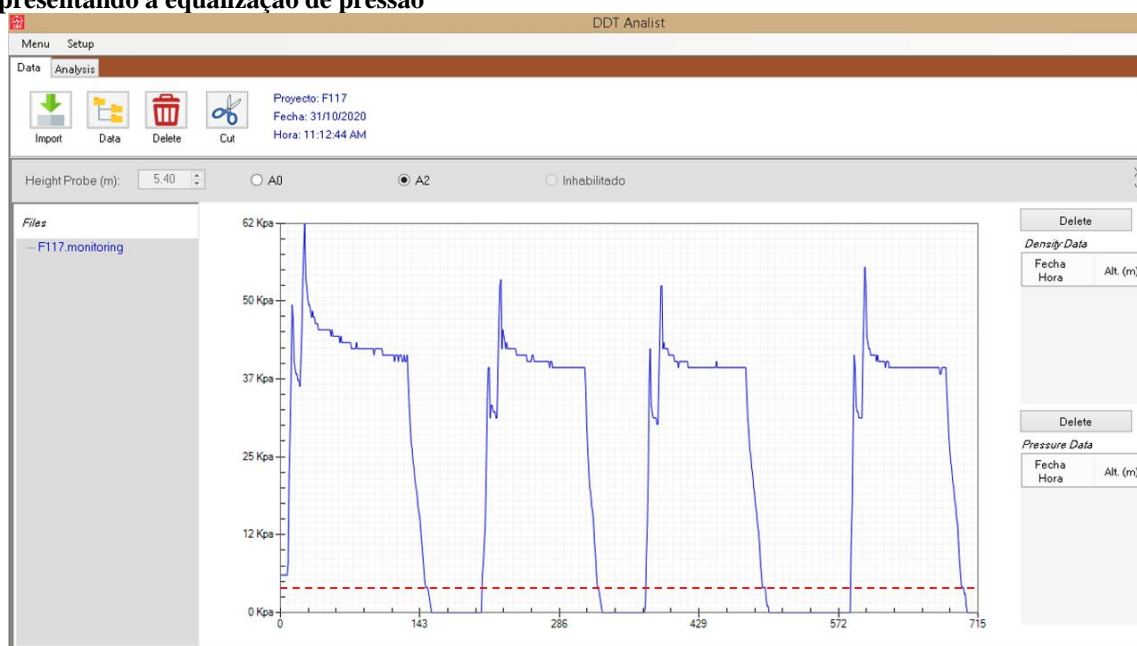
### 3.4 VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO ACESSÓRIO EM TESTES EM LABORATÓRIO

O protótipo foi então testado nos testes de laboratório, em colunas de tubo de PVC com diâmetros e altura compatíveis às dimensões encontradas em desmontes de rocha, ainda que utilizando água e óleo de soja como meio externo. A finalidade deste teste foi demonstrar o princípio da pressão hidrostática em um meio não viscoso, então encontrar a pressão exercida pela coluna de água em diferentes alturas dentro do tubo de PVC.

O peso da coluna pressiona a sonda quando esta é inflada. Imediatamente, o sinal é transmitido pela mangueira hidráulica para o sensor MPX5700AP, que converte o sinal em diferença de potencial elétrico. A tensão é transformada em unidades de pressão (kPa). O resultado deste nível de pressão é enviado para a porta USB onde está ligada ao Arduino.

Quando a sonda inflada é lentamente esvaziada, envolta num líquido ou emulsão, observa-se que o fluxo de ar que sai da sonda se detém momentaneamente quando a pressão no seu interior é igual à pressão circundante. Isto acontece porque a vazão é proporcional à diferença de pressão entre o meio interno e o meio externo, visto que a força nas interfaces das paredes elásticas do corpo de prova se equilibra. A Figura 13 mostra medições de pressão feitas em testes de campo capturadas em software, destacando o momento em que ela se mantém por um tempo maior, indicando que a pressão interna é igual à do ambiente explosivo da emulsão.

**Figura 13 - Aquisição de dados no software desenvolvido para a monitorização da pressão. A linha tracejada vermelha destaca o instante em que a pressão se mantém num intervalo maior quando a sonda é esvaziada, representando a equalização de pressão**

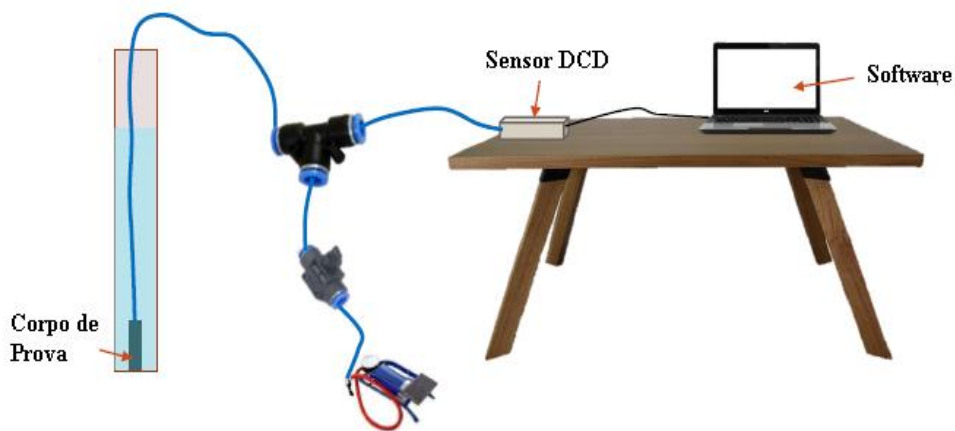


O corpo de prova necessita ser inflado até que seja observada taxas de pressão mais elevadas do que a externa, e lentamente esvaziada para obter o instante exato em que a pressão

externa é igual à interna. O processo deve ser repetido três a cinco vezes para confirmar os dados de amostragem anteriores.

Os valores de densidade encontrados estiveram em conformidade com o esperado, validando assim o Sensor DCD para ser utilizado na aferição da densidade de emulsões explosivas. Mangueiras hidráulicas, infladores pneumáticos e válvulas de retenção foram utilizados para controle de entrada e saída de ar, manipulando a pressão no corpo de prova para aquisição dos dados no Sensor DCD, conforme Figura 14.

**Figura 14 - Metodologia elaborada para testes de laboratório do Sensor DCD**

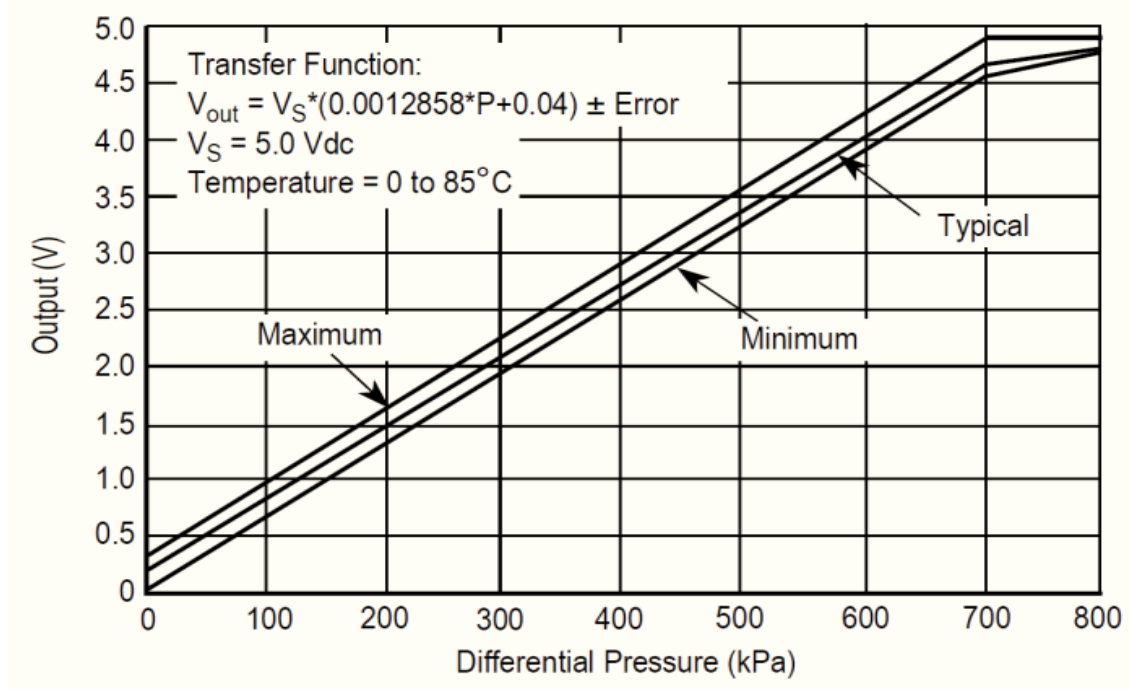


A aquisição de dados no software é realizada conforme passo-a-passo:

- O peso da coluna explosiva pressiona o corpo de prova;
- O sinal é transmitido pelo conjunto de mangueiras hidráulicas;
- O sensor MPX5700AP converte o sinal em diferença de potencial (DDP);
- A voltagem é transformada em unidades de pressão (kPa), conforme Figura 15;
- O valor de pressão em kPa é enviado à porta USB selecionada no computador;
- Os dados são coletados em tempo real pelo software.



Figura 15 - Conversão de dados de DDP, em V para valores de pressão, em kPa



Fonte: FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2009.

Considerando o fluxo e método de leitura acima, a validação dos dados e calibração do sistema foi realizada desta forma:

- Um tubo de PVC com 1,5 m de profundidade é enchido com uma coluna de 1,2 m de água;
- O corpo de prova é posicionado no fundo do furo e a medição é realizada;
- O corpo de prova é posicionado 0,5 metros acima do fundo e uma nova medição é realizada;
- A pressão teórica é calculada para ambas as condições (equação 3.1);
- Após a checagem dos valores teóricos e medidos, o sistema é dado como calibrado e pronto para aplicação.

$$P = D * g * h \quad (3.1)$$

Onde,

P = Pressão teórica (kPa)

D = Densidade da água (g/cc)

g = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

h = Coluna de água

### 3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS EM DESMONTES DE ROCHA DE BANCADAS A CÉU ABERTO

Um procedimento padrão foi desenvolvido para instalação, controle de carregamento do explosivo no furo, medições e tempo de espera para posterior aquisição dos dados no computador. O processo se provou eficaz quando utilizado nos desmonte de rocha avaliados na Pedreira Guarany e Mina Tucano, realizados entre os meses de outubro e novembro de 2020.

Os testes da Pedreira Guarany, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes – estado de Pernambuco, tiveram o objetivo de avaliar a metodologia em um ambiente de desmonte de rocha a céu aberto, a fim de que o processo não tivesse impacto negativo na operação mineira de larga escala, e ainda sim a aquisição pudesse ser realizada com máxima precisão.

Após definidos os procedimentos, três desmontes na Mina Tucano (Figura 16) foram monitorados. A Mina Tucano, adquirida pela Tucano Gold Inc em outubro de 2023, é uma operação de mineração de ouro a céu aberto localizada no município de Pedra Branca do Amapari, estado do Amapá, Brasil. Estava capacitada para uma produção de minério de ouro de 10.000 toneladas/dia. A mineração a céu aberto deverá ser retomada ainda em 2024, e a mineração subterrânea deverá começar pela primeira vez em 2025 no projeto Urucum Norte, com teores estimados de 4 a 5 g/t.

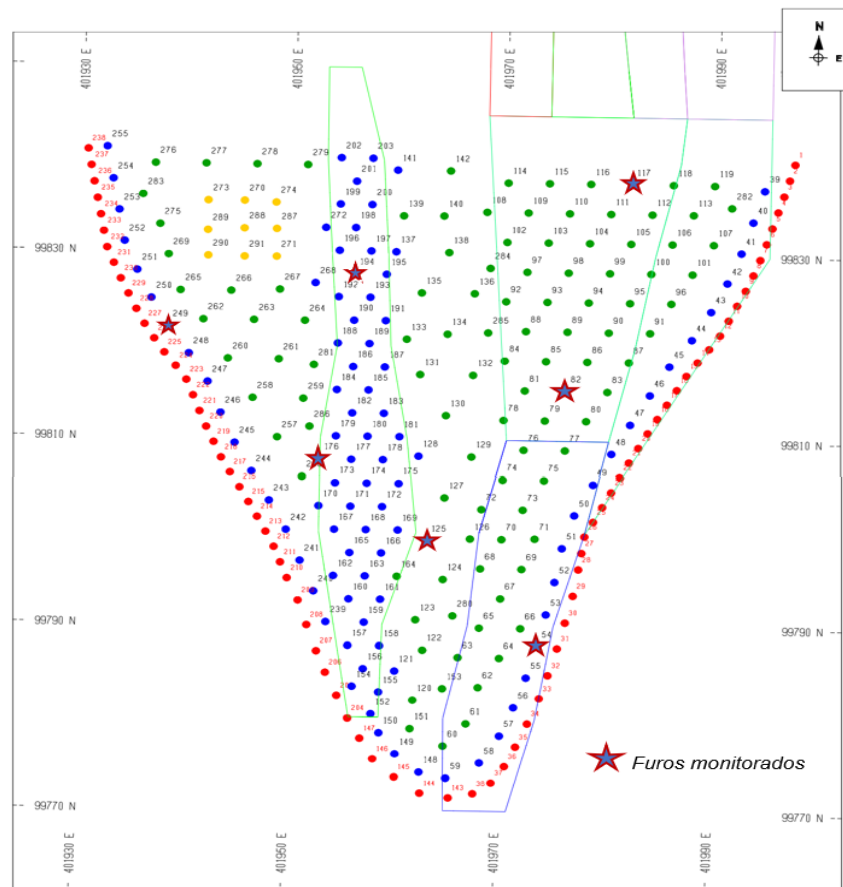
A Mina Tucano detém 100% de participação na mina de ouro Tucano, localizada em um terreno de 1.973 quilômetros quadrados no altamente prospectivo Cinturão de Pedras Verdes de Vila Nova, no Escudo das Guianas.

**Figura 16 - Vista aérea da Mina Tucano, a época subsidiada pela Great Panther Mining Ltd.**



No dia 30/10/2020, 7 furos do desmonte de rochas na Mina Tucano foram aferidos e monitorados (Figura 17), visando medir a densidade conforme metodologia proposta.

**Figura 17 - Croqui do plano de fogo, sinalizando os furos monitorados**



O processo de desmonte de rochas na Mina Tucano foi iniciado com perfurações *down-the-hole* (DTH) de diâmetro de 4” e 5,5”, totalizando uma metragem de 2.600 metros distribuídas entre 291 furos. O carregamento do explosivo foi realizado a partir de UMBs (Figura 18) com emulsão 100%, sensibilizadas por nitrito de sódio. A exceção do padrão de carregamento é para os furos de pré-corte, carregados por emulsões encartuchadas atreladas à cordéis detonantes, que visam garantir definição dos taludes conforme projeto geométrico da cava. O resumo do plano de fogo pode ser visualizado no APÊNDICE III.

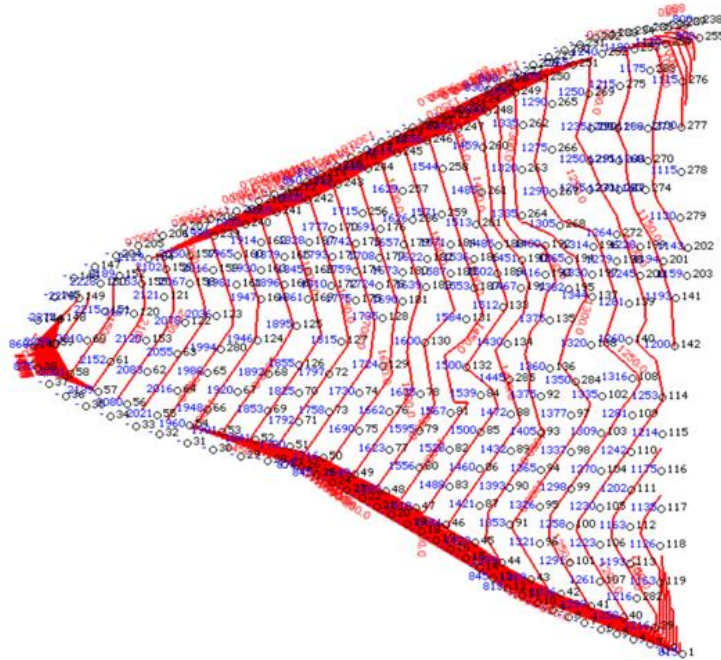
**Figura 18 - Operação de carregamento da bancada a ser desmontada, realizada pela empresa Orica e equipe de desmonte da Great Panther Mining**



O controle de diluição de minério é realizado por diversos meios, entre eles as malhas que divergem do estéril e garantem uma granulometria mais adequada para que as etapas subsequentes, seja para a disposição do estéril de maneira mais financeiramente atrativa ou para que o minério alimentado tenha melhor performance de cominuição e processamento. A Figura 19 apresenta o sequenciamento executado no desmonte.



**Figura 19 - Sequenciamento e direcionamento de ondas induzidas pelo desmorte executado em 30/10/2020**



Outra estratégia de controle de diluição é a implantação de barras físicas no contato entre minério e estéril, garantindo também uma gestão visual do operador de carga e técnicos de qualidade da seletividade do material (Figura 20).

**Figura 20 - Barras físicas implantandas, visando gestão visual da seletividade do minério**



Os sete furos foram escolhidos sistematicamente para que houvesse uma representatividade de toda a bancada. A Figura 21 demonstra o procedimento da tomada de dados na bancada a ser detonada. As tomadas de dados foram realizadas após 15 minutos do

tamponamento de cada furo, visando garantir a expansão volumétrica da emulsão explosiva. Os furos foram tamponados após 30 minutos do seu carregamento.

**Figura 21 - Aquisição dos dados de pressão absoluta no desmonte com o sensor DCD**



### 3.6 PROCESSAMENTO, MANIPULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Uma vez que os dados foram coletados entre 24/10/2020 e 03/11/2020, eles foram então processados e interpretados conforme a metodologia proposta, gerando uma análise dos processos de carregamento de explosivos na Mina Tucano, e seus reflexos na densidade final da emulsão dentro do furo carregado.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do experimento estão apresentados na Tabela 3. Conforme citado anteriormente, foram observados efeitos de pressão hidrostática (que aumenta com a profundidade), uma vez que os corpos de prova localizados na parte inferior dos furos carregados apresentaram valores de densidade mais elevados se comparadas com as localizadas no topo da coluna do mesmo furo. Além disso, é importante mencionar que o furo com o número de identificação 249, por exemplo, que por problemas de balanceamento devido processo de lavagem da mangueira de carregamento, tinha uma maior quantidade de água na mistura de

emulsão, teve resultados mínimos de densidade. Esta operação inadequada é frequente e deve ser sempre evitada, pois os resultados dos ensaios mostram a sua influência na densidade final e, por consequência, no VOD e performance do explosivo.

**Tabela 3 - Parâmetros do desmorte realizado em 30/10/2020 e medidas de densidade.**

ID (#)	A0 (m)	A2 (m)	h (m)	Ø (pol)	W	T (m)	Dbg (g/cc)	Dag (g/cc)	$\rho_{A0}$ (g/cc)	$\rho_{A2}$ (g/cc)
54	1,7	6,2	8,4	4,0	Sim	1,6	1,32	1,13	1,21	1,15
125	1,8	5,8	7,8	5,5	Sim	1,6	1,32	1,13	1,22	1,15
176	1,8	6,5	8,5	4,0	Não	0,9	1,32	1,13	1,22	1,17
249	2,3	6,0	8,2	4,0	Não*	1,7	1,32	1,13	1,19	1,15
82	1,7	6,6	8,6	5,5	Sim	1,8	1,31	1,15	1,22	1,17
117	1,1	5,4	7,3	5,5	Sim	1,4	1,31	1,15	1,20	1,16
194	2,0	6,5	7,9	4,0	Não	1,0	1,31	1,15	1,21	1,16

Onde,

A0 = altura da sonda, instalada na parte inferior do furo (m)

A2 = altura da sonda, instalada na parte superior do (m)

h = comprimento do furo (m)

Ø = diâmetro do furo (pol)

W = presença de água

T = comprimento do tampão (m)

Dbg = medida inicial da densidade do copo, antes da expansão da gaseificação (g/cc)

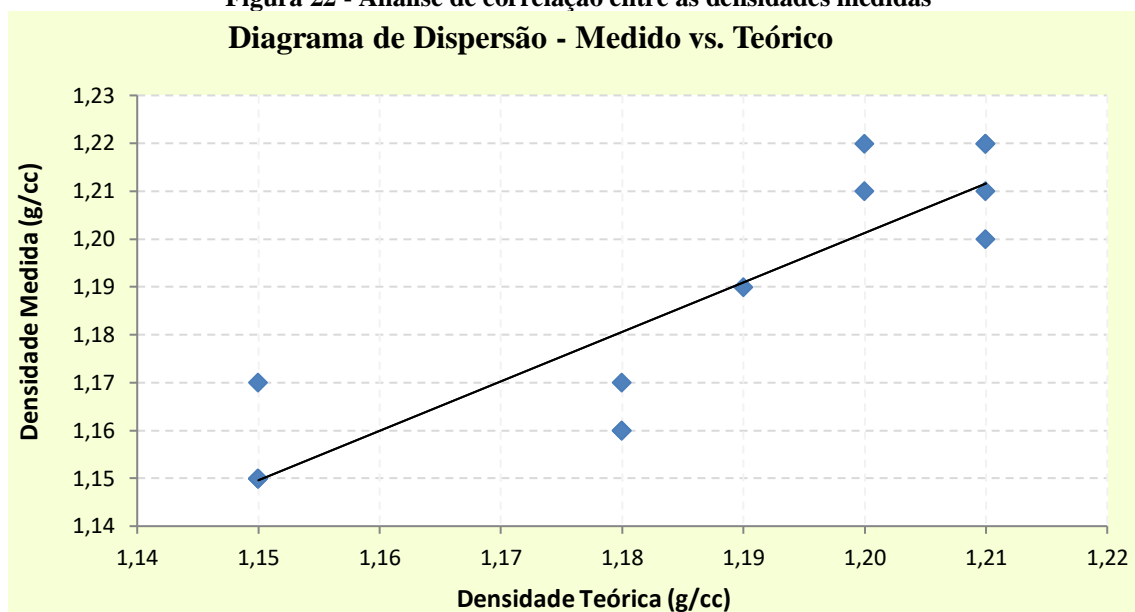
Dag = medida final da densidade do copo, 30 minutos após a expansão (g/cc)

$\rho_{A0}$  = densidade da emulsão explosiva, medida pelo corpo de prova A0 (g/cc)

$\rho_{A2}$  = densidade da emulsão explosiva, medida pelo corpo de prova A2 (g/cc).

Após a consolidação dos dados, um teste de correlação de Pearson foi realizado (Figura 22), para verificar a consistência das medições em detrimento do referencial teórico de densidade, considerando a profundidade do furo e a densidade Dag. O coeficiente de correlação de Pearson é um teste estatístico que mede a relação entre duas variáveis contínuas. Ele é considerado o método mais confiável para medir esta relação, porque se baseia na covariância. O coeficiente de correlação de Pearson pode ter um intervalo de valores de +1 a -1.

**Figura 22 - Análise de correlação entre as densidades medidas  
Diagrama de Dispersão - Medido vs. Teórico**



O valor encontrado da correlação no método de Pearson foi de 0,896, indicando uma correlação muito forte entre a densidade medida e teórica. Desta forma, é possível afirmar que os valores teóricos são confiáveis e fatores externos (não contemplados na Equação 2.3) como o diâmetro do furo, possíveis discontinuidades no maciço rochoso, presença de água, entre outros, impactaram minimamente o resultado. 85,7% das amostras se demonstraram confiáveis para análise do resultado. Os valores de densidade medidos na sonda instalada no topo dos furos de detonação, com exceção do furo de ID 249, comprometido devido desvio operacional, demonstraram uma variação média de 0,75% em relação à densidade alvo da emulsão após gaseificação (1,15 g/cc).

No caso dos furos verificados (com profundidade máxima de 9 metros), a amplitude de variação entre a densidade final em condições ambientes e no fundo do furo foi de 0,09 g/cc ou 8%. A variabilidade da densidade ao longo do furo tende a aumentar com o aumento da profundidade, e isto deve ser considerado no balanceamento de densidade após gaseificação da emulsão explosiva. Este servirá de referência para verificação do atingimento ou não da densidade crítica que poderá impactar o resultado da detonação.

Utilizando-se uma metodologia de controle operacional pouco ortodoxa, levando-se em consideração os estudos de Yang (2011) e Mishra *et al.* (2017), assumiremos uma densidade final crítica de emulsão explosiva de 1,30 g/cc. Em geral, estas condições devem ser evitadas, considerando que a emulsão pode vir a deflagrar e/ou gerar fragmentações ineficientes. Os resultados do estudo desta tese apresentaram valores máximos de 1,22 g/cc, 6% menor que a densidade crítica alvo. Isto se deve principalmente ao fato de que, conforme elucidado

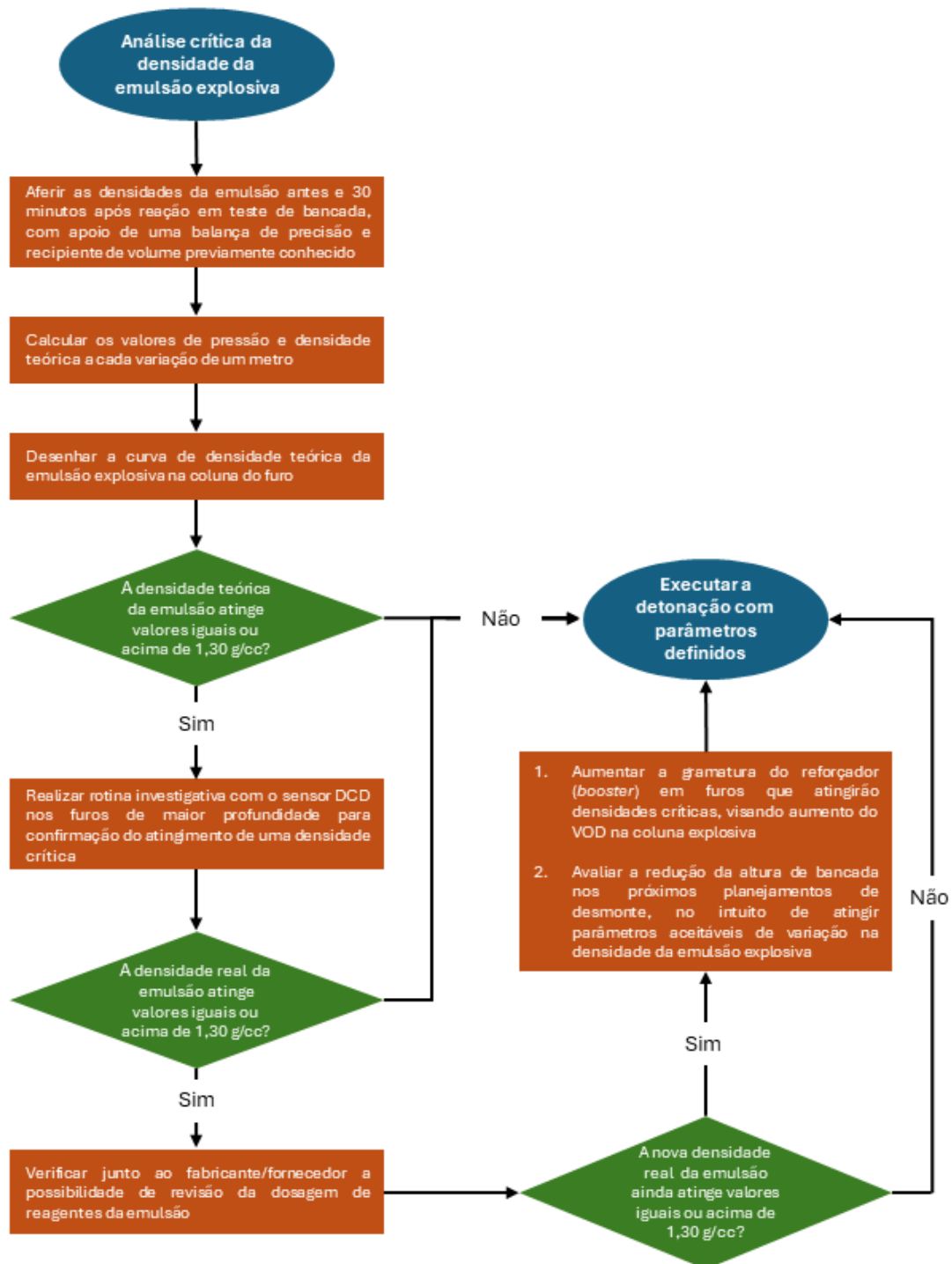


anteriormente, as variações de densidade são pouco expressivas em furos de desmonte rasos (inferior a 10 metros).

Para o caso de minerações em que operem em condições de bancadas acima de 10 metros, que apliquem emulsões explosivas gaseificadas, e/ou apresentem condições críticas no interior dos furos como alto índice de reatividade da rocha, vazios ou bolsões sistêmicos na formação da rocha etc., sugere-se um fluxo de processo (Figura 23) para tomada de decisão pouco convencional, visando a mitigação de riscos inerente à densidade final da emulsão aplicada:

- i. Aferir a densidade da emulsão explosiva antes e após sensibilização em testes de bancada (sem condições de confinamento de furo);*
- ii. Calcular os valores de pressão e densidade teórica a cada variação de um metro;*
- iii. Desenhar o perfil de densidade teórica por metro linear no furo;*
- iv. Caso o resultado em alguma profundidade a ser operacionalizada venha alcançar o valor definido como crítico de 1,30 g/cc, deve-se realizar rotinas investigativas por meio da construção de um DCD ou similar;*
- v. Em caso de indisponibilidade do equipamento, o cálculo teórico (Equação 2.3) deve ser utilizado como premissa para definição da dosagem ideal de reagentes, visando adequar a carga de fundo à parâmetros aceitáveis de densidade crítica, e por consequência, sua VOD;*
- vi. Caso o fabricante contraindique um incremento na dosagem de reagentes sensibilizantes à mistura explosiva visando a redução da densidade final, deve-se verificar a possibilidade de incremento na gramatura dos reforçadores (boosters), visando o aumento da VOD no ponto de iniciação da coluna explosiva, ou reavaliação da altura de bancada do desmonte de rochas, o que reduziria os limites de variação da densidade da emulsão explosiva na coluna.*

Figura 23 - Fluxograma de análise crítica da densidade da emulsão explosiva no desmonte de rochas



## 5 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos iniciais definidos neste projeto, pode-se concluir que:

- a) O desenvolvimento desta tese, incluindo a contextualização do estado da arte referente à aplicação e controle das emulsões na indústria explosiva, bem como os resultados obtidos com o DCD, representam uma evolução na barreira do conhecimento técnico e acadêmico deste tema;
- b) A tendência de variação da densidade de um explosivo em furo confinado, no contexto do desmonte de rochas à céu aberto, demonstrou consonância com os resultados teóricos. Contudo, a limitação de medição do equipamento de apenas dois sensores não permitiu a constatação de linearidade ou não desta variação;
- c) Diferentes condições que poderiam afetar o resultado de densidade foram avaliadas, como a variação do diâmetro de perfuração e a presença ou não de água na coluna. Considerando que os ensaios pós validação foram executados em apenas uma mineração, e neste caso existe certa rigidez operacional, a variabilidade dos parâmetros considerou-se satisfatória. Entende-se, contudo, que ensaios realizados em furos com profundidades superiores (acima de 20 metros, por exemplo) trariam uma maior amplitude de variação, e um provável atingimento de densidades acima dos valores preconizados neste estudo;
- d) Foi apresentada uma metodologia não convencional para bancadas com alturas maiores do que 10 metros, onde se apliquem emulsões explosivas gaseificadas, e/ou apresentem condições críticas no interior dos furos.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos desta natureza, sugere-se o seguinte, mas não limitado a:

- a) A construção de um equipamento com 3 ou mais sensores, visando avaliar um comportamento não linear entre as medições de densidade;
- b) Um maior tempo de residência dos corpos de prova nos furos, visando repetir as aferições em diferentes tempos de repouso do explosivo emulsionado. Isto será importante para avaliar até quando a reação de expansão ocorre em um furo confinado;

- c) Recomenda-se, também, o teste em emulsões explosivas sensibilizadas fisicamente com tendência a uma densidade linear e homogênea ao longo do furo, a fim de ratificar esta condição;
- d) A variação do pH e temperatura não foram consideradas neste estudo. Os referidos parâmetros têm um importante papel no processo de expansão e gaseificação das emulsões explosivas e devem ser consideradas;
- e) Diferentes formulações de explosivos podem ser consideradas em um estudo futuro. Emulsões blindadas com ANFO numa razão 70/30 ou 60/40, por exemplo, tendem a ter uma menor variação de densidade ao longo da coluna explosiva. Isto se dá pelo fato dos grânulos (ou *prills*) do nitrato não se comprimirem com o aumento da pressão hidrostática, ao contrário do que acontece com as bolhas de nitrogênio;
- f) Paralelamente à aferição da densidade, medição de VOD nos furos monitorados são importantes para verificação da correlação entre os parâmetros, visto que este tem relação com poder de fragmentação da rocha pelo explosivo que é, em geral, o objetivo final da gestão da sua densidade.

## REFERÊNCIAS

AGRAWAL, H.; MISHRA, A. A Study on Influence of Density and Viscosity of Emulsion Explosive on Its Detonation Velocity. **Modelling, Measurement and Control C**, v. 78, n. 3, p. 316–336, 30 set. 2017.

AL-SABAGH, A.M. et al. Preparation and investigation of emulsion explosive matrix based on gas oil for mining process. **Journal of molecular liquids**, v. 238, p. 198–207, 1 jul. 2017.

ANDREW, D. R.; MORRISON, K. T.; TIEDGEN, J. F. **Flexigel™ – A Variable-density Solution**. Iron Ore Conference. 14 jul. 2015.

BOND, F.C. **Crushing and grinding calculations, as discussed in Bemrose, C.R. and Bridgewater, J.** Powder Technology, 1961.

CAMPBELL, A. Effects of blast ring burden and explosive density on fragmentation and ore recovery in sublevel cave mines. **Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving**, 2018.

CANTO, V. H. **Medición de la densidad de explosivos gasificables en el fondo de taladro através de um dispositivo de monitoreo de presión hidrostática em mineração superficial**. Universidade Nacional de Trujillo, Departamento de Ingeniería de Minas – Peru. Trujillo, 2018.

CAVANOUGH, G. et al. **Measurement and Assessment of Bulk Explosive Products**. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015.

CAVANOUGH, G.; ONEDERRA, I.; TORRANCE, A. **Prototype gauges for measuring detonation temperature and pressure of commercial explosives**. International Society of Explosive Engineers, 2011.

CHENG, Y. et al. The Effect of the Hydrogen Containing Material TiH<sub>2</sub> on the Detonation Characteristics of Emulsion Explosives. **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, v. 42, n. 6, p. 585–591, 30 mar. 2017.

CUDZILO, S. et al. Performance of Emulsion Explosives. **Combustion, Explosion, and Shock Waves**, v. 38, n. 4, p. 463–469, 2002.

EGLY, R.S.; NECKAR A.E. Water-resistant sensitizers for blasting agents. **US Patent**. (31):615, 1964.

EVANS, W.B.; TAYLOR, D.P. Blended ANFO-based explosives. **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum**. v. 80, n. 905, p. 60-64, 1987.

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

FREESCALE SEMICONDUCTOR, Integrated silicon pressure sensor on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated. **MPX5700 Series Manual**, 2009.

GABRIEL DA SILVA; DLUGOGORSKI, B. Z.; KENNEDY, E. M. Water-in-oil emulsion foaming by thiourea nitrosation: Reaction and mass transfer. **AIChE Journal**, v. 52, n. 4, p. 1558–1565, 4 jan. 2006.

GOUVEIA, V. et al. Controle de desvio de furos através do uso de sensores eletrônicos: uma aproximação de Euler. **Boletim Informativo Detónica**, Vol. XIX, N. 52, Universidade do Porto, 2019.

HAGAN, T. N. **Rock Breakage by explosives**. 6th Symposium on Gas Dynamics of Explosives, Stocholm, Suécia, 1997.

HANSSON, H. **Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and FEM simulation**. Swedish Blasting Research Centre (SWEBREC), 2009.

HIROSAKI, Y. et al. Detonation characteristics of emulsion explosives as functions of void size and volume. **In Proceedings of the 12th International Detonation Symposium, San Diego**. (2002).

KABWE, E. Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 523–533, jun. 2018.

KHARATYAN, E.; HALLIDAY, P. **Novel Non-Detonable Pumpable Mechanical Sensitizer and System for Emulsion Explosives for Improved Security**. International Society of Explosive Engineers, 2015.

KRAMARCZYK, B. et al. Emulsion Explosives: A Tutorial Review and Highlight of Recent Progress. **Materials**, v. 15, n. 14, p. 4952, 15 jul. 2022.

LANGFORS U.; KIHLSSTRÖM B. **The Modern Technique of Rock Blasting**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1978.

LEE, E.; FINGER, M.; COLLINS, W. J. JWL equation of state coefficients for high explosives. **OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information)**, 16 jan. 1973.

LI, G. et al. **Emulsion Powder Explosives**. International Society of Explosive Engineers, 2000.

JIMENO, L. C. et al. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Madrid, Espanha, 2003.

MACEDO, C.E.M. **Otimização da fragmentação de rochas no desmonte de bancadas com explosivos**. Universidade Federal de Goiás – Brasil, 2014.

MANKA, J. S. **Factors that affect the chemical gassing of emulsion explosives**. International Society of Explosive Engineers, 2004.

MEDINA, R. O. **Evaluación técnico-econonómica-ecológica de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas em Cuajone – Southern Perú**. Tese da Universidade Nacional de Ingeniaría - Peru, 2014.

MISHRA, A. K. et al. Influence of Gassing Agent and Density on Detonation Velocity of Bulk Emulsion Explosives. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, n. 1, p. 89–94, 21 jul. 2017.

NAVARRO TORRES, V. F. **A dinâmica do desmonte de rochas**. 1º Curso Sobre Avanços Tecnológicos No Desmonte De Rochas Com Explosivos Em Minas e Obras Civis. Catalão, Goiás, Brasil, 2012.

NIE, S. **Pressure Desensitization of a Gassed Emulsion Explosive in Comparison with Micro-balloon Sensitized Emulsion Explosives**. International Society of Explosive Engineers, 2000.

NIELSEN, K., KRISTIANSEN, J. **Blasting – crushing - grinding: Optimization of an integrated comminution system**. Rock Fragmentation by Blasting. In: Mohanty (Ed.), Balkema, Rotterdam: 1996, p. 269-277.

PEREZ CORDOVA, P. F.; CARDENA LOPEZ, L.A. **US Patent**. 12 nov. 2010.

PIOTR MERTUSZKA et al. Field Evaluation of Mine Blasting Efficiency. **Earth and planetary sciences**, v. 2, n. 2, p. 1–16, 1 jun. 2020.

PIOTR MERTUSZKA; KRAMARCZYK, B. Study of the Influence of Sensitizer Content on the Density of a Bulk Emulsion Explosive Used in Underground Operations. **Central European Journal of Energetic Materials**, v. 18, n. 4, p. 429–447, 21 dez. 2021.

RAMSEY, D. **Novel Emulsion Explosives Technology and Application**. International Society of Explosive Engineers, 2003.

ROLLINS, R.R.; GIVENS, R.W. **Emulsion Comparison Tests**. International Society of Explosive Engineers, 2000.

SCOTT, A. **Open pit blast design: analysis and optimization**. Brisbane: The University of Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), 1996.

SECCATORE et al. **The influence of charge distribution on the grindability of the blaster material**. 11th International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting, 2015.

SITONIO, F. **Avaliação de plugs de tamponamento para detonação visando segurança & otimização operacional em desmontes a céu aberto de pedreiras localizadas em áreas urbanizadas**. Tese – Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

SUSHIL BHANDARI. **Engineering rock blasting operations**. Rotterdam: Balkema, pp. 388, 1997.

VERTCHENKO, L.; DICKMAN, A. G. **Verificando a lei de Boyle em um laboratório didático usando grandezas estritamente mensuráveis**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, dez. 2012.

VILLANUEVA, R.; VASQUEZ, J.C. **Measurement of the In-Hole Density of Gassed Explosives at Peruvian Mines**. International Society of Explosive Engineers, 2020.

WANG, Xuguang. **Emulsion Explosives**. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

WENDY et al. Trapping of Nitric Oxide, Generated during Sensitization of Ammonium Nitrate Emulsion Explosive, by Aromatic Nitroso Sulfonates. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 31, p. 10561–10568, 24 jul. 2013.

WORKMAN, I; ELORANTA, J. **Effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption**. Proceedings 35<sup>th</sup> Annual Conference on Explosive and Blasting Technique – ISEE, 2009

YANG, R. Effect of product density on the resistance to dynamic and static precompression of gassed emulsion explosives and their recoverability. **International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion**, v. 10, n. 6, p. 487–496, 2011.

YOSHIKAZU, H. et al. **Detonation characteristics of emulsion explosives as functions of void size and volume**, 2002.

YUNOSHEV, A. S.; PLASTININ, A. V.; SIL'VESTROV, V. V. Effect of the density of an emulsion explosive on the reaction zone width. **Combustion, Explosion, and Shock Waves**, v. 48, n. 3, p. 319–327, maio 2012.

YUNOSHEV, A. S. et al. Influence of artificial pores on the detonation parameters of an emulsion explosive. **Combustion, Explosion, and Shock Waves**, v. 53, n. 2, p. 205–210, mar. 2017.

ZHOU, J. et al. The effect of surfactant on the rheology and stability properties of emulsion explosive matrices. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 43, n. 14, p. 2156–2164, 18 maio 2021.

ZORZAL, C. S. **Análise dinâmica via MEF das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas**. Universidade Federal de Ouro Preto - PPGEM, 2019.



## APÊNDICE I – CÓDIGO EM C++ DO CÁLCULO DE DENSIDADE A PARTIR DA PRESSÃO AFERIDA NO FURO CONFINADO

```
#include <TimerOne.h>

char message[20], data[30];
int kpa1=0, kpa2=0, kpa3=0;
char *nro_serie="TR19F010";
char *fecha_calibracion="20_MAY_19";

int funcion1(int valor) // SENSOR 01
{
    float nval = ((float) valor / 1023.0);
    float kpa = ((nval - 0.04) / 0.0012858)-96;
    if (kpa <= 0)
    {
        kpa = 0;
    }
    return kpa;
}

int funcion2(int valor) // SENSOR 02
{
    float nval = ((float) valor / 1023.0);
    float kpa = ((nval - 0.04) / 0.0012858)-97;
    if (kpa <= 0)
    {
        kpa = 0;
    }
    return kpa;
}

int funcion3(int valor) // SENSOR 03
{
    float nval = ((float) valor / 1023.0);
```

```
float kpa = ((nval - 0.04) / 0.0012858)-97;
if(kpa<=0)
{
kpa=0;
}
return kpa;
}

void setup()
{
Timer1.initialize(100000);
Timer1.attachInterrupt(Datos);

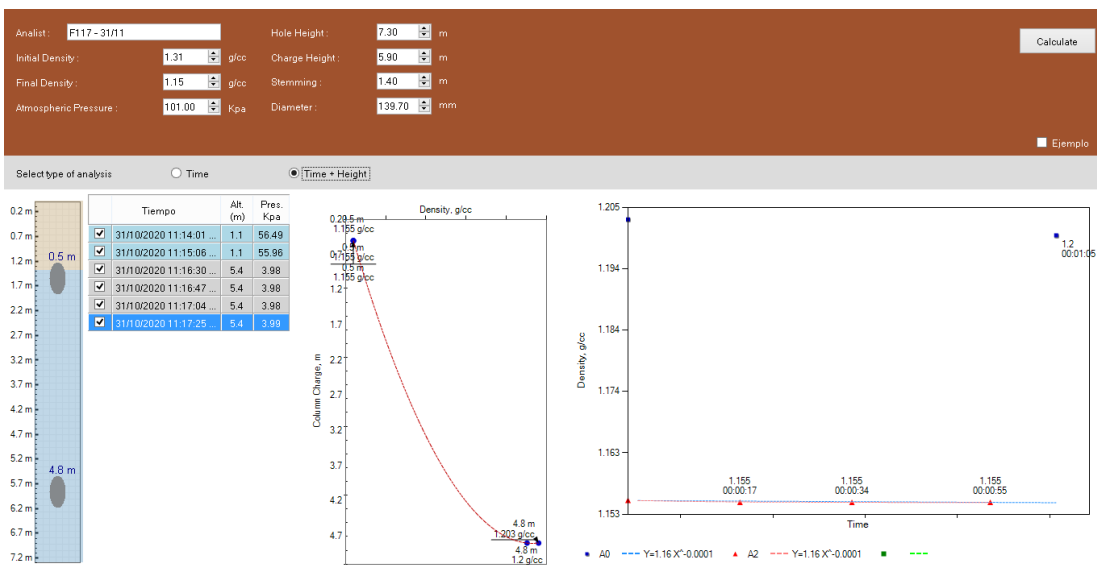
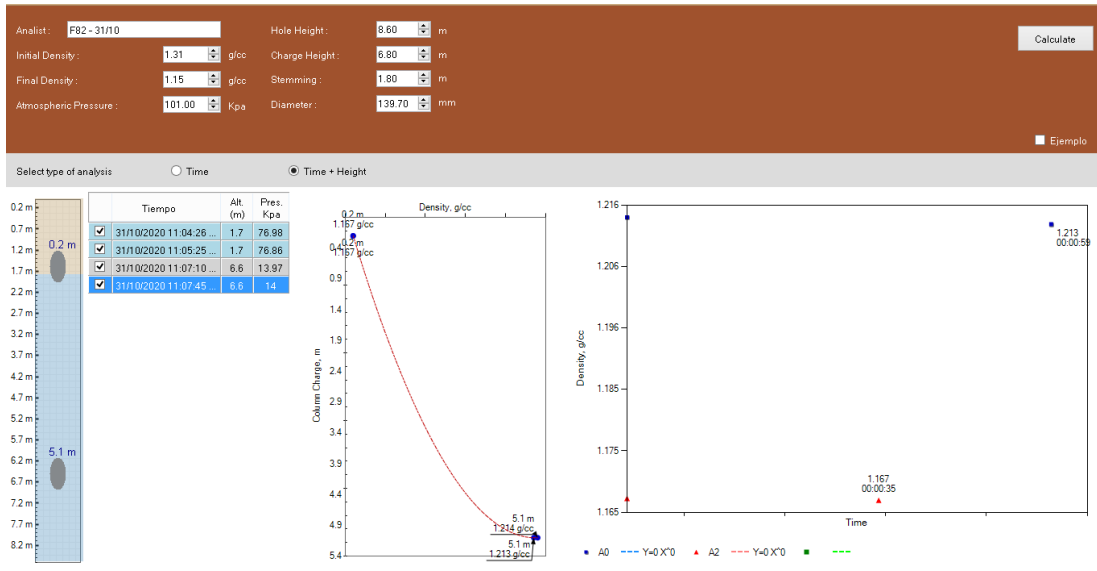
Serial.begin(250000);
}

void Datos(void)
{
kpa1 = funcion1(analogRead (0)); // POrt A0
kpa2 = funcion2(analogRead (2)); // POrt A2
kpa3 = funcion3(analogRead (3));

sprintf(data, "%s %s %d %d %d",fecha_calibracion,nro_serie, kpa1, kpa2, kpa3);
Serial.println(data);
}

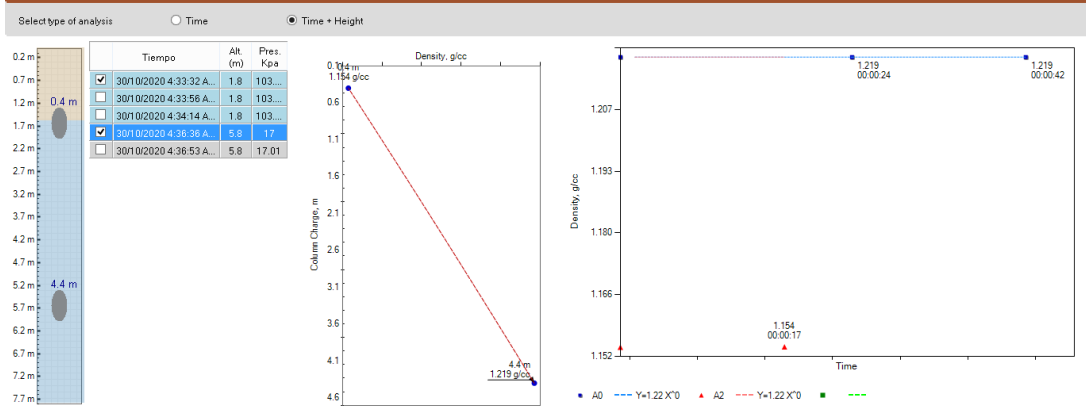
void loop()
{
}
}
```

## APÊNDICE II – RESULTADOS DE PRESSÃO E DENSIDADE AFERIDOS EM DESMONTES DE ROCHAS ENTRE OS DIAS 27 e 31 DE OUTUBRO DE 2020



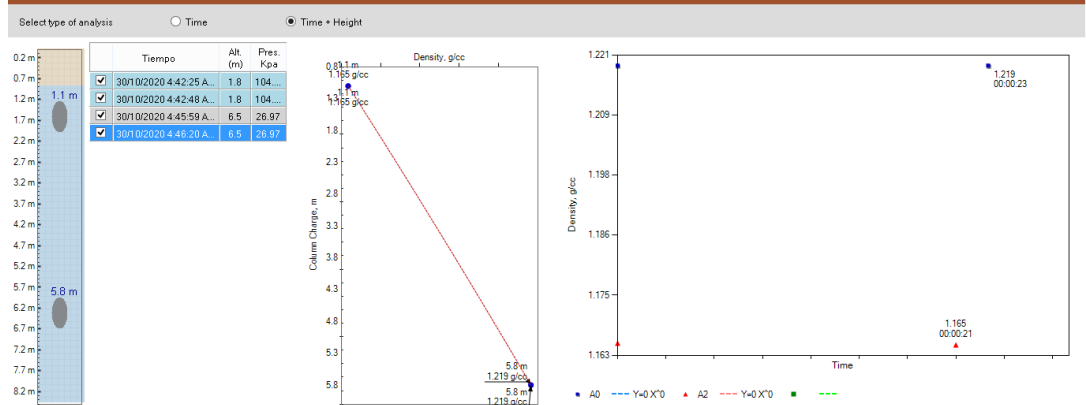
Analist:  Hole Height:  m  
 Initial Density:  g/cc Charge Height:  m  
 Final Density:  g/cc Stemming:  m  
 Atmospheric Pressure:  Kpa Diameter:  mm

Ejemplo



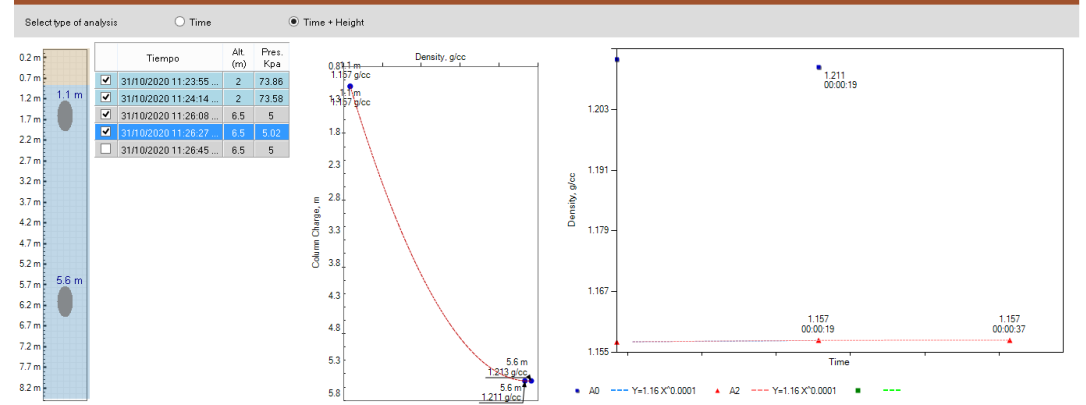
Analist:  Hole Height:  m  
 Initial Density:  g/cc Charge Height:  m  
 Final Density:  g/cc Stemming:  m  
 Atmospheric Pressure:  Kpa Diameter:  mm

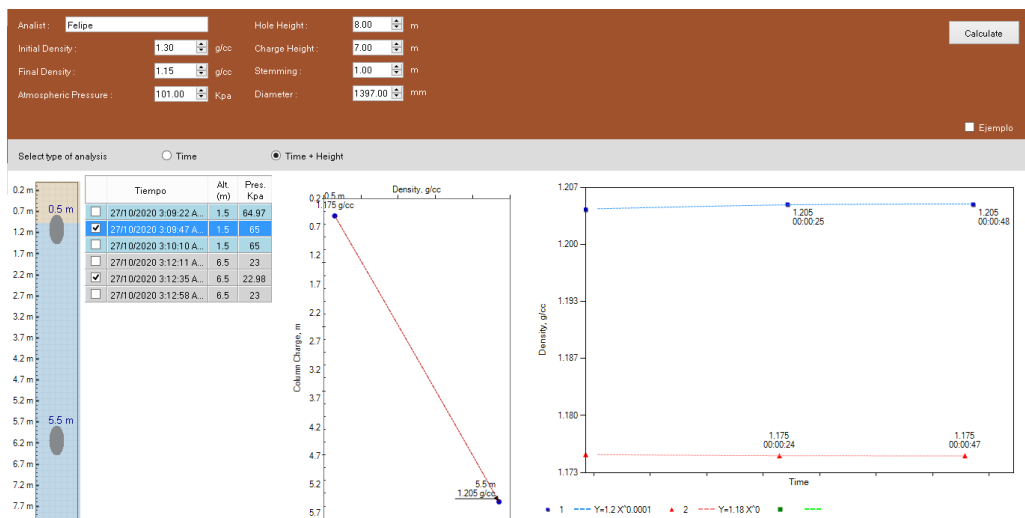
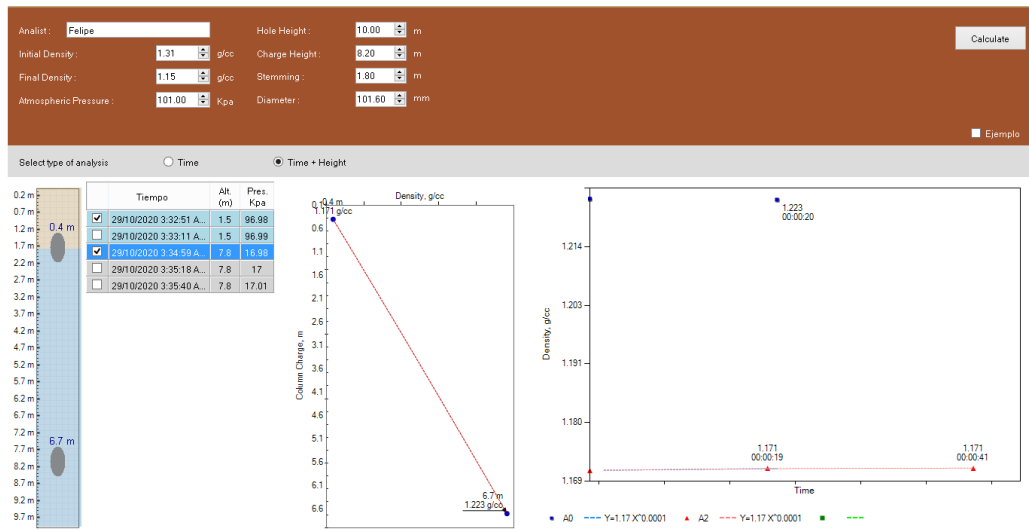
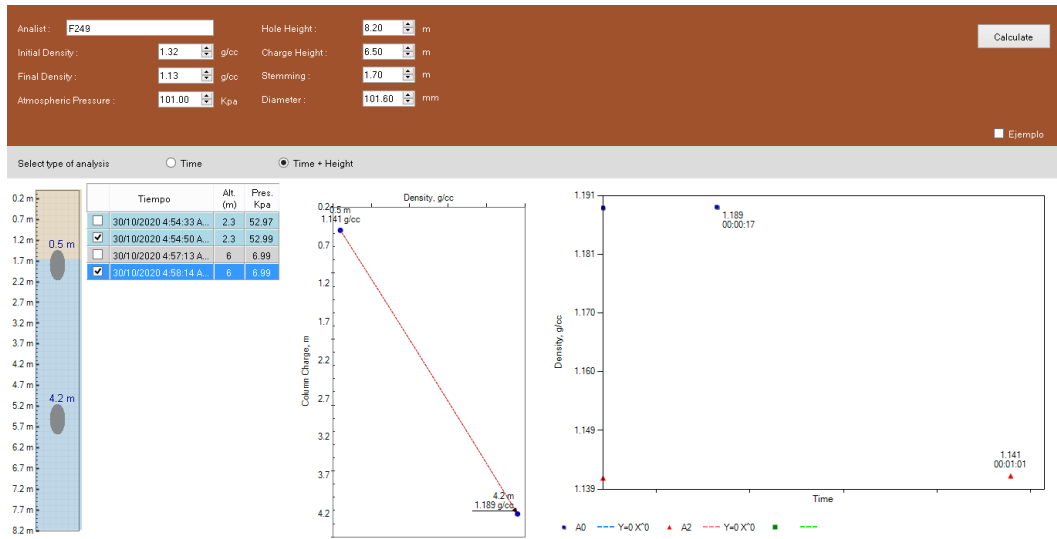
Ejemplo

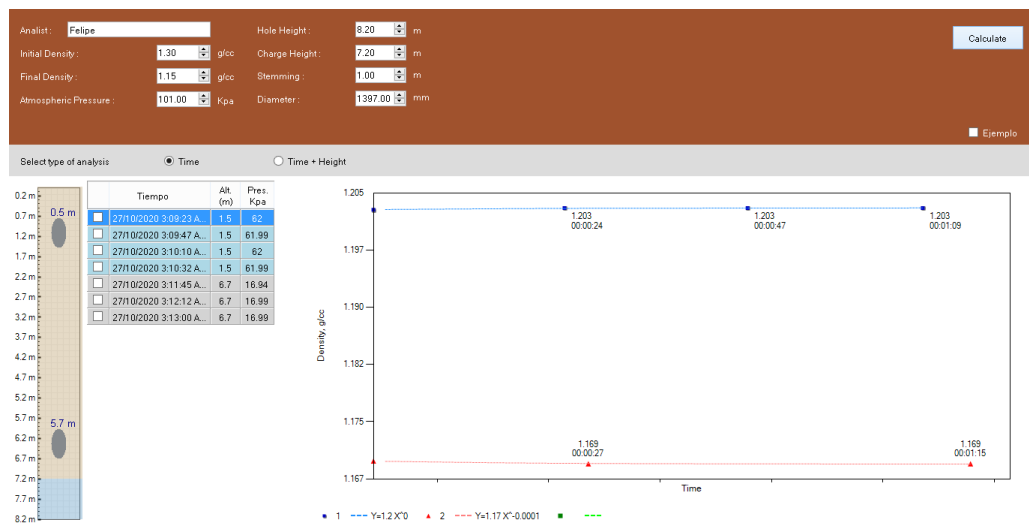
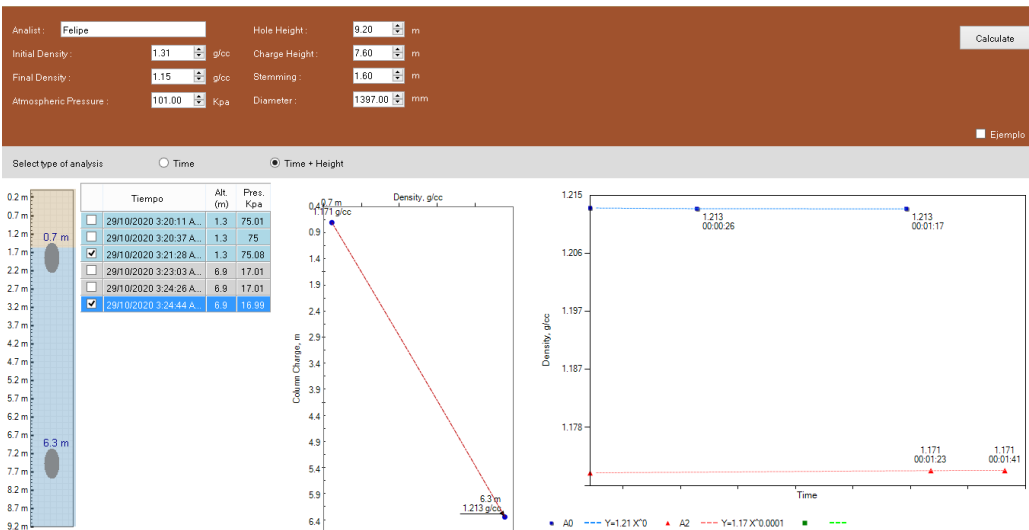
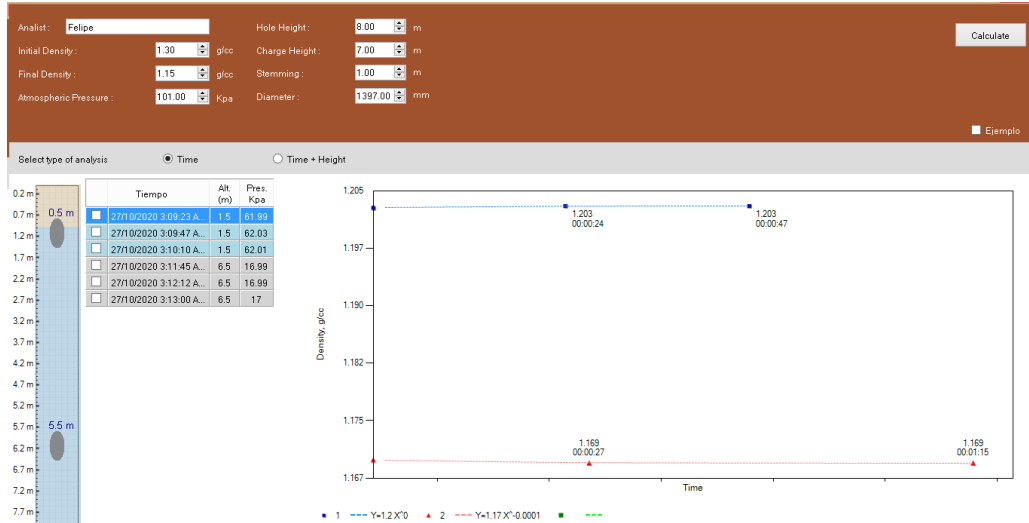


Analist:  Hole Height:  m  
 Initial Density:  g/cc Charge Height:  m  
 Final Density:  g/cc Stemming:  m  
 Atmospheric Pressure:  Kpa Diameter:  mm

Ejemplo







### APÊNDICE III – PLANO DE FOGO EXECUTADO EM 30/10/2020

