

## DENSITY MONITORING OF BULK EMULSION EXPLOSIVES IN CONFINED BLASTHOLES

F. F. SITONIO\*, J. KOPPE

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0992-6200>\*  
[felipe.sitonio@ufrgs.br](mailto:felipe.sitonio@ufrgs.br)\*

Submetido 17/01/2023 – Aceito 08/02/2024

DOI: 10.15628/holos.2024.14671

### ABSTRACT

Parameter's control of explosives used in open pit mining operations have become more relevant over the years, bringing a better understanding of detonation performance. Giving into consideration that bulk emulsion density reflects on blasting results due to its importance in product sensitivity and velocity of detonation (VOD), blast designs are conducted assuming that cup density measurements are reliable and explosives gassing agents will perform as per specifications. Nevertheless, confinement conditions in

boreholes are often neglected on predictive modelling. This paper describes the assembly of a device equipped with pressure sensors and its utilization in confined boreholes, obtaining in situ monitoring of density variation in explosive columns. The results enabled a comparison between bulk emulsion density variation when acting in different environments, providing detailed insights into how chemically sensitized explosives behave into different circumstances, giving the opportunity to re-evaluate blast design.

**KEYWORDS:** blasting, detonation, mining.

## MONITORAMENTO DE DENSIDADE DAS EMULSÕES EXPLOSIVAS EM FUROS CONFINADOS DE DESMONTE DE ROCHAS

### RESUMO

O controle dos parâmetros dos explosivos aplicados em desmontes de rochas de minas à céu aberto tem sido amplamente abordado ao longo dos anos, visando aumentar a performance das detonações. Uma vez que, a densidade das emulsões explosivas possui impacto direto na sensibilidade e velocidade de detonação (VOD) do produto, os planos de fogo são elaborados assumindo que a densidade de copo é confiável, e os agentes gaseificantes irão performar conforme especificado. Contudo, as condições de confinamento costumam ser

negligenciadas em modelos preditivos. Este trabalho descreve a construção de um dispositivo equipado com sensores de pressão, com o intuito de monitorar a variação de densidade em colunas explosivas confinadas. Os resultados obtidos permitiram uma comparação entre a variação de densidade das emulsões explosivas em diferentes condições. O dispositivo se demonstrou uma eficiente ferramenta de análise e verificação das condições da emulsão explosiva para reavaliação dos parâmetros do plano de fogo.

**Palavras chave:** detonação, mineração, plano de fogo.



## 1 INTRODUÇÃO

O processo de detonação na mineração visa a desagregação do maciço rochoso, e formação de fragmentos de rocha em granulometria satisfatória para alimentação das operações de britagem primária (Sitonio, 2020). Ainda que emulsões explosivas industriais sejam produtos confiáveis e a maioria das propriedades previamente conhecidas, a medição de densidade realizada nas bancadas de desmonte de rochas com balanças de precisão possui baixa confiabilidade. Este tipo de medição pode ocasionar planos de fogo incompatíveis, principalmente, pelo fato de que a expansão gasosa em emulsões sensibilizadas quimicamente é desconhecida em condições de confinamento nos furos executados. Além de condicionantes ambientais, 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). 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). 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. 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 a performance de cinco emulsões explosivas contendo microesferas de vidro, sendo estas sensibilizadas fisicamente, 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. Em contrapartida, 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 com o intuito de relacionar a VOD e a variação dos agentes gaseificantes e a densidade das emulsões foi realizado por Mishra et al. (2017). O nitrito de sódio foi utilizado como agente gerador dos gases em diferentes concentrações e em diferentes temperaturas. Como conclusão, observou-se um aumento linear no 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. Contudo, 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 e Onederra (2011), um melhor entendimento da performance 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 Zeman e Trzciński (2002) e Canto (2018), 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 VOD está intrinsecamente ligado 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 et al., 2012), experimentos desdobrando o seu real valor se faz necessário para avaliar a qualidade do desmonte de rochas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Construção do sensor

Visando monitorar variações de pressão em tempo real em furos confinados e relacionar com a densidade real das emulsões explosivas, foi desenvolvido um dispositivo equipado com dois sensores de pressão MPX5700AP, conforme as condições recomendadas de fabricante. O mesmo possui uma margem de erro de 2,5% nas leituras de pressão absoluta, possuindo também a capacidade de leitura de valores em ambientes com a temperatura entre 0° e 85° C. A Figura 1 mostra o gráfico da relação da tensão elétrica (saída) e pressão diferencial (entrada) para o sensor MPX5700AP.

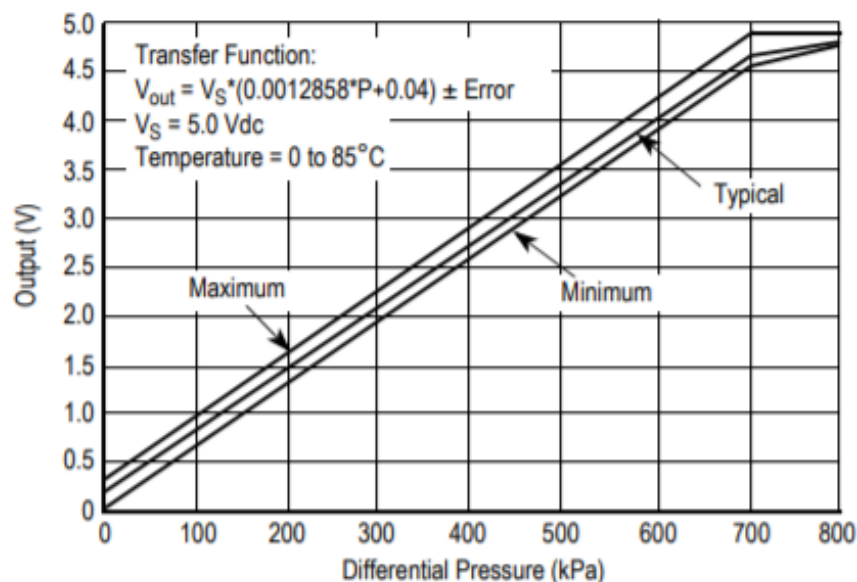


Figura 1: Tensão Elétrica vs. Diferencial de Pressão do sensor MPX5700AP

Responsável pela interface de hardware e software do equipamento, um Arduino Nano V3.0 é mostrado na Figura 2, ligado por meio de soldas eletrônicas à placa e seus respectivos componentes como condensadores, necessário para a funcionalidade do MPX5700AP.

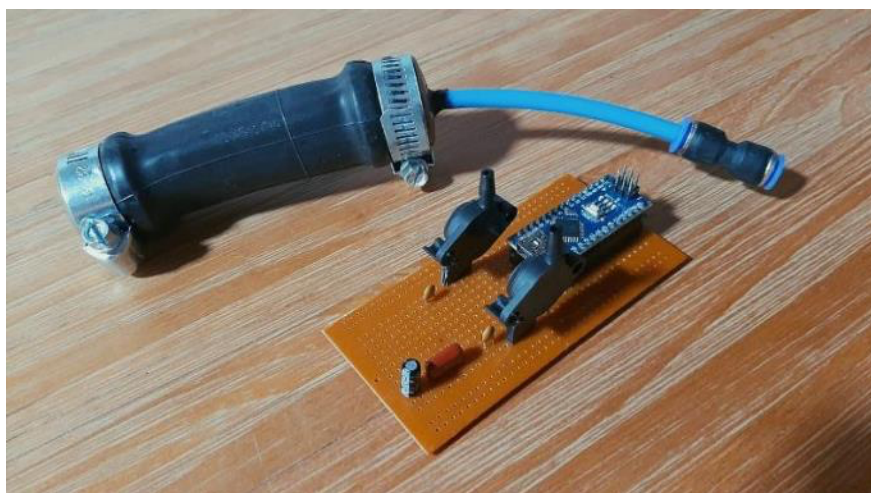


Figura 2: Placa de hardware, equipada com dois sensores MPX5700AP e placa Arduino Nano V3.0

Além da construção do circuito eletrônico, havia também a necessidade de desenvolver corpos de prova com capacidade de resistir a altos níveis de pressão, como pode ser visualizado na Figura 3. Câmaras de ar, braçadeiras, mangueiras hidráulicas e diversas conexões foram utilizadas para a construção. Os corpos de prova foram capazes de suportar pressões internas acima de 100 KPa, segundo os testes práticos.



Figura 3: Corpo de prova inflado, desenvolvido para operar em situações de confinamento com altos níveis de pressão

## 2.2 Funcionamento do dispositivo

Uma dada quantidade de emulsão explosiva tende a aumentar o seu volume inicial devido a formação contínua de bolhas quando sensibilizada e depois carregada em furos. Em consequência, a densidade do produto diminui à medida que a reação de gaseificação prossegue. Ao mesmo tempo, o tempo de reação é controlado pela proporção do gaseificador, pela fórmula da emulsão e pela temperatura.

O peso que suporta cada ponto ao longo da largura da coluna de explosivos mantém um gradiente de pressão distinto até a extremidade do furo. Neste caso, a quantidade de massa num determinado ponto varia em função da profundidade, pois a densidade também varia em relação direta com o gradiente de compressão. As rupturas de nitrogênio, submetidas a diferentes graus de pressão, apresenta volumes distintos, e esses espaços deixados pela bolha comprimida são ocupados pela emulsão, aumentando a massa e a densidade do produto.

A Equação 1 mostra a base de cálculo da densidade, através de medidas de pressão absoluta, no software desenvolvido para receber e processar os dados de saída do MPX5700AP. É importante mencionar que, para avaliar a densidade a uma determinada profundidade neste projeto, também é necessária a medição da densidade com balanças de precisão.

$$\rho(i) = 1 / (1/Dbg - 1/\rho(i - 1)) * (Pt(i - 1)/Pt(i) + 1/Dbg) \quad (1)$$

Onde,

$\rho(i)$  = densidade a uma dada profundidade, tomando a atmosfera como referência, i.e.,  $i = 0$  ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho(i-1)$  = densidade na distância de referência passada ( $\text{Kg/m}^3$ )

$Dbg$  = densidade da emulsão a granel antes da gaseificação, medida pelo ensaio do copo ( $\text{Kg/m}^3$ )

$Pt(i)$  = pressão hidrostática a uma determinada profundidade mais a pressão atmosférica ( $\text{N/m}^2$ )

$Pt(i-1)$  = pressão total na profundidade de referência passada.

### 2.3 Procedimento de ensaio da densidade

De forma a avaliar o procedimento de ensaio e a reação do equipamento ao processo, o protótipo de hardware foi então testado em ambiente laboratorial, utilizando um tubo de policloreto de vinila (PVC), representando um furo, cheio com água e óleo de cozinha para verificar a sua precisão em várias medições de densidade. Foi também utilizado um equipamento de bomba de ar e ligações de mangueiras para controlar o fluxo de pressão na sonda, conforme Figura 4.

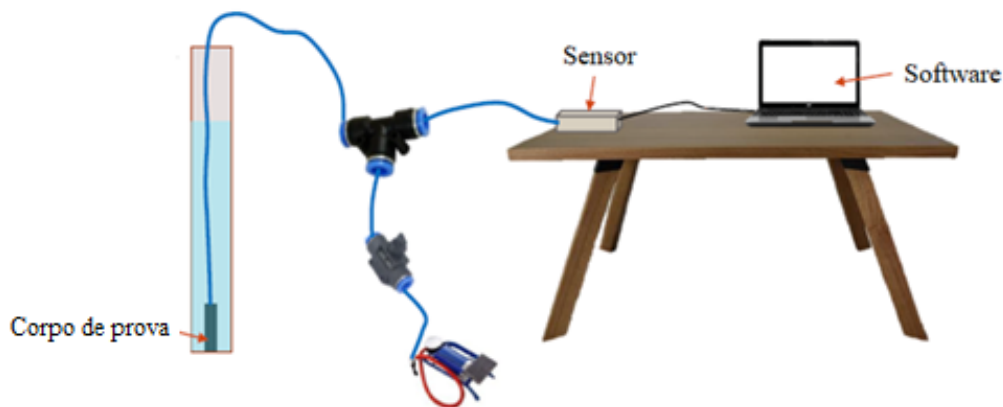
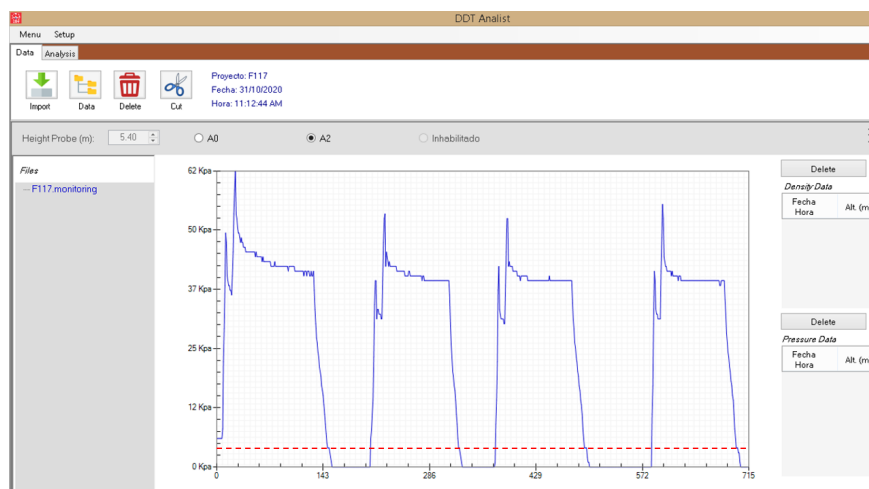


Figura 4: Metodologia de ensaio laboratorial

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 5 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.

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.



**Figura 5: 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 pressão da emulsão nas paredes da sonda**

## 2.4 Ensaios de campo

Com o procedimento avaliado com sucesso em situação off-site, um teste em uma operação de detonação de mineração em pedreira localizada no Nordeste do Brasil confirmou sua eficácia em operações em escala real. A metodologia foi conduzida levando em consideração o ambiente operacional, de modo que o processo de mineração não foi impactado negativamente, e a aquisição de dados pôde ser realizada com precisão.

Em outubro de 2020, foi realizado um teste em grande escalada em uma mina de minério de ouro localizada no norte do Brasil (Figura 6). 7 de 291 furos a serem detonados foram monitorados com corpos de prova no fundo e topo da coluna de perfuração. Com o objetivo de obter vários resultados de dados, selecionamos furos com diâmetros de 4 e 5,5 polegadas, uma

vez que o minério e o estéril tinham especificações de diâmetro diferentes. Foram também selecionados furos com água. A Figura 7 mostra o procedimento de aquisição de dados.



Figura 6: Operação de detonação da lavra de minério de ouro no Norte do Brasil



Figura 7: Aquisição de dados em uma mineração de ouro, localizada no Norte do Brasil

## 2.5 Processamento de dados

Uma vez recolhidos todos os dados, estes foram processados e depois interpretados, gerando uma análise do processo de carregamento de explosivos na exploração de minério de ouro. Para cada corpo de prova e respectiva densidade final do explosivo ao longo da coluna de detonação, é produzido um relatório de monitorização, como mostra a Figura 8.

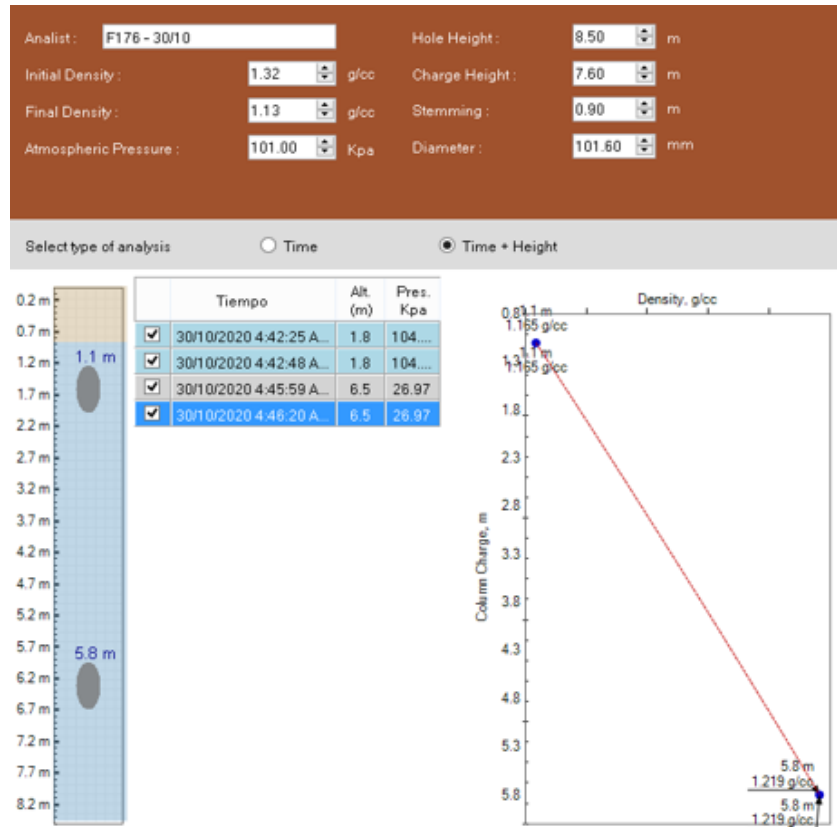


Figura 8: Relatório de controle da densidade dos furos

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados na Tabela 1 estão em conformidade com a base teórica. 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 tinha uma maior quantidade de água na mistura de emulsão devido à mangueira soprada ao fim do carregamento da bancada, 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, provavelmente, no VOD do explosivo.

Tabela 1: Resultado de monitoramento dos corpos de prova e parâmetros de cada furo

ID do Furo	A0 (m)	A2 (m)	h (m)	Ø (in)	W	T (m)	Dbg (g/cc)	Dag (g/cc)	ρA0 (g/cc)	ρA2 (g/cc)
------------	--------	--------	-------	--------	---	-------	------------	------------	------------	------------





54	1,7	6,2	8,4	4,0	Sim	1,6	1,32	1,13	1,207	1,154
125	1,8	5,8	7,8	5,5	Sim	1,6	1,32	1,13	1,219	1,154
176	1,8	6,5	8,5	4,0	Não	0,9	1,32	1,13	1,219	1,165
249	2,3	6,0	8,2	4,0	Não*	1,7	1,32	1,13	1,189	1,141
82	1,7	6,6	8,6	5,5	Sim	1,8	1,31	1,15	1,213	1,167
117	1,1	5,4	7,3	5,5	Sim	1,4	1,31	1,15	1,201	1,155
194	2,0	6,5	7,9	4,0	Não	1,0	1,31	1,15	1,212	1,157

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)  
 $\emptyset$  = diâmetro do furo (pol)  
 W = presença de água  
 T = altura 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 da gaseificação (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).

#### 4 CONCLUSÃO

- a) A utilização de sensores de pressão para verificação da conformidade de emulsões explosivas em furos de desmonte de rochas se demonstrou eficiente e em consonância com as bases teóricas.
- b) Em contrapartida, a limitação de dois sensores por furo não permite avaliar se a variação de densidade ao longo da coluna se comporta de maneira linear.
- c) 85,7% das amostras se demonstraram confiáveis para análise do resultado. Os dados do furo de ID 249 foram comprometidos em virtude de um desvio operacional.
- d) As demais densidades medidas nas emulsões explosivas estavam abaixo do valor de 1,27 g/cc definido como crítico para o VOD, conforme definido por Mishra et al. (2017).
- e) Os valores de densidade medidos na sonda instalada no topo dos furos de detonação, com exceção do furo de ID 249, demonstraram uma variação média de 0,75% em relação à densidade alvo da emulsão após gaseificação (1,15 g/cc).
- f) A ferramenta desenvolvida é uma solução de baixo custo, viabilizando assim o desenvolvimento tecnológico que visam a excelência operacional nas operações mineiras que enfrentam dificuldades em investimentos desta natureza, conforme citado por Rocha et al. (2018).

#### 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, H., & Mishra, A.K. (2018). A study on influence of density and viscosity of emulsion explosive on its detonation velocity. *Model Meas Control*, C78(3), 316-336.



- Bhandari, S. (1997). Engineering Rock Blasting Operations. *Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema*.
- Campbell, A. (2018). Effect of explosive density and ring burden of recovery on fragmentation and ore recovery in sublevel cave mines. *Caving Conference*, 457-470.
- Canto, V.H. (2018). Medición de la densidad de explosivos gasificables en el fondo de taladro a través de un dispositivo de monitoreo de presión hidrostática em minería superficial. *Universidad Nacional de Trujillo*.
- Cavanaugh, G., & Onederra, I. (2011). Development of pressure and temperature gauges to monitor in situ performance of commercial explosives. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology 120(2)*, 74-79.
- Cheng, Y., Meng, X., Feng, C., Wang, Q., Wu, S., Ma, H., & Shen, Z. (2017). The effect of hydrogen containing material TiH<sub>2</sub> on the detonation characteristics of emulsion explosives, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 42(6).
- Cudzilo, S., Kohlicek, P., Trzcinski, V.A., & Zeman, S. (2002). Performance of emulsion explosives. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 38(4), 463-469.
- Egly, R.S., & Neckar, A.E. (1964). Water-resistant sensitizers for blasting agents, *US Patent*, (31)615.
- Hansson, H. (2009). Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and FEM simulation. *Tese – Swedish Blasting Research Centre (SWEBREC)*.
- Medina, R. (2014). Evaluación técnico-económica-ecológica de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas em Cuajone – Southern Perú. *Tese – Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Miranda, V., Leite, F.S., Brito, P., Frank, G., & Soeiro, J. (2019). Borehole Deviation Control Using Electronics: An Euler's Approach, *International Society of Explosives Engineers – 45th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*.
- Mishra, A.V., Rout, M., Singh, D.R., & Jana, S.P. (2017). Influence of gassing agent and density on detonation velocity of bulk emulsion explosive. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4-5), 89-94.
- Sitonio, F. F. (2020). Avaliação de plugues de tamponamento em desmontes de bancadas à céu aberto. *HOLOS*, 7.
- Rocha, S.S., Souza J.C., Carmo I.M., & Rodrigues H.C. (2018). Estudo comparativo de ferramentas computacionais para modelagem geométrica e cubagem de maciços rochosos. *HOLOS*, 2.
- Wilches, W., & Scovira, D. S., 2014. Implementation of High Density Ammonium Nitrate Prill in Emulsion Blends in an Open Pit Coal Mining Application. *International Society of Explosives Engineers – 40th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*.
- Yunoshev, A.S., Plastinin, A.V., & Silvestrov, V.V. (2012). Effect of the Density of an Emulsion Explosive on the Reaction Zone Width. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 48(3), 319-327.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Sitonio, F. F., & Jair Carlos Koppe. DENSITY MONITORING OF BULK EMULSION EXPLOSIVES IN CONFINED BLASTHOLES. HOLOS, 1(40). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/14671>

## **SOBRE OS AUTORES**

### **F.F. SITONIO**

Com 10 anos de experiência em operações de mina à céu aberto (ferro, ouro, cobre e agregados), trabalha atualmente como Coordenador de Engenharia na Lundin Mining. Bacharel e mestre em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (2013 e 2016), é candidato à PhD pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, tendo a tese em desenvolvimento com ênfase em técnicas de desmonte de rochas e avaliação das propriedades de emulsões explosivas.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

E-mail: [felipe.sitonio@ufrgs.br](mailto:felipe.sitonio@ufrgs.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0992-6200>

### **J.C. KOPPE**

Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (1979), graduação em Geologia pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS (1977), mestrado em Engenharia Civil-Mecânica dos Solos pela UFRGS (1982) e doutorado em Geociências pela UFRGS (1990). Foi cientista convidada pela University of Western Ontario, Canadá, no período de Jan/1986 a Jul/1986 e fez Pós-doutorado no JKMRC da University of Queensland, Austrália, no período de Nov/1997 a Out/1998. Atualmente é professor titular convidado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul atuando junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Tem experiência na área de Engenharia de Minas, atuando principalmente nos seguintes temas: pesquisa mineral, mecânica de rochas, planejamento de lavra, desmonte de rochas com emprego de explosivos, estudos ambientais em áreas de mineração.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

E-mail: [jkoppe@ufrgs.br](mailto:jkoppe@ufrgs.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3662-016X>

**Editor:** Franciulli Araújo

**Ad Hoc Reviewer:** Leandro de Vilhena Costa e Julio Cesar Pontes



Submetido 17/01/2023

Aceito 08/02/2024

Publicado 16/04/2024

