



Caracterização de parâmetros de desempenho explosivos: ANFO e emulsão explosiva

Characterization of explosive performance parameters: ANFO and explosive emulsion

DOI: 10.56238/isevmjv1n2-008

Recebimento dos originais: 03/04/2023

Aceitação para publicação: 24/04/2023

Fabício Thiengo Vieira

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: fabricio.t.vieira@ufes.br

ORCID: 0000-0002-1365-5298

Júlio D'Auria Braga

OPEX Serviços de Mineração, Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil

E-mail: juliодаuriabraga@hotmail.com

ORCID: 0000-0003-4245-939X

RESUMO

Os explosivos mais utilizados, para fins civis, na construção e mineração são o óleo combustível de nitrato de amônio (ANFO) e as emulsões explosivas. Ambos são à base de nitrato de amônio e detonam sob a mesma reação química entre nitrato e óleo mineral, uma vez que o ANFO é composto de minúsculos grãos de nitrato poroso com óleo difuso, e a emulsão está na forma de uma fase líquida, contínua, viscosa e oleosa e a fase aquosa descontínua. O estudo de parâmetros que medem o desempenho explosivo é fundamental para compreender o comportamento da explosão. Parâmetros importantes são a velocidade e pressão de detonação, o calor da explosão (energia), e o volume de gás produzido. Estas propriedades ajudam a julgar se um determinado explosivo é conveniente ou não para a situação em questão, pois, em algumas aplicações, é necessária alta velocidade para aumentar a capacidade de fragmentação, por exemplo, quando se deseja fragmentar rochas duras. Entretanto, não há necessidade de fragmentar em alguns momentos, mas de deslocar. Outras propriedades, como o volume de gás, tornam-se mais relevantes em tais casos.

Palavras-chave: Explosivo, Emulsão, ANFO.

1 INTRODUÇÃO

Os explosivos são amplamente utilizados na mineração para soltar rochas da exploração da natureza, e em obras civis como túneis para abrir o buraco de passagem para o mesmo; em obras de transposição, para abrir o caminho do rio, e em obras rodoviárias, para remover/abrir rochas que estão na forma da estrada. Os explosivos mais utilizados na construção e mineração

para fins civis são ANFO e emulsões. Os explosivos são baseados em nitrato de amônio e detonam sob a mesma reação química entre o nitrato e o óleo mineral.

ANFO aparece como grãos minúsculos de nitrato poroso com óleo difuso. Tem baixo custo e simplicidade de fabricação, segurança no manuseio e baixa emissão de gases tóxicos quando há oxigênio em quantidade estequiométrica. Entretanto, se o balanço de oxigênio (OB) for negativo, a formação de CO se formará, enquanto que para um OB positivo, a formação de NO_x ocorrerá (WANG, 1994). As substâncias tóxicas podem resultar em um ambiente de trabalho pouco saudável, particularmente em operações subterrâneas onde a circulação de ar é ineficaz. Além disso, o ANFO tem uma baixa densidade e baixa resistência à água. O OB está de acordo com a Equação 1, onde O, C, H, e M representam oxigênio, carbono, hidrogênio e massa molar explosiva (Valença, 2013).

$$OB = \left(O - 2C - \frac{H}{2} \right) \cdot \frac{1600}{M} \quad (1)$$

A emulsão explosiva tem a forma de uma fase líquida viscosa, oleosa contínua e aquosa descontínua. Tem algumas vantagens sobre outros explosivos, pois podem ser aplicados através do sistema bombeável, que oferece a possibilidade de preparar e carregar o explosivo no local do incêndio, além das vantagens econômicas comprovadas sobre os explosivos embalados, principalmente na mineração em larga escala, considerando que não requerem embalagens, carregam mais rápida e eficientemente, preenchem o buraco, têm excelente resistência à água e produzem pouca fumaça e poucos gases (Valença, 2013). Entretanto, ao contrário da ANFO, a emulsão sofre decomposição oxidativa da fase de óleo quando em contato com o ar atmosférico (Jones et al., 1999).

Um terceiro explosivo é amplamente utilizado, que é a mistura entre ANFO e emulsão, o conhecido ANFO pesado ou emulsão misturada. A mistura pode ocorrer em diferentes proporções de cada explosivo de modo que as propriedades do explosivo variam com a variação do equilíbrio (de MORAES, 2004). Por exemplo, GANEC et al. (2016) mostraram que quanto maior a porcentagem de emulsão, maior a velocidade de detonação (VoD).

O estudo das propriedades químicas dos explosivos é vital para entender como controlar o desempenho da detonação e a validade dos explosivos. Podem ser usados diferentes reagentes em sua composição, sejam flocos de alumínio ou outros tipos de nitratos, tais como cálcio ou sódio, além de outras composições que serão exemplificadas no trabalho. Todos eles influenciam o desempenho e a validade explosiva. O cálculo das propriedades explosivas é fundamental para

prever o comportamento. É possível, por exemplo, prever a energia explosiva e o volume de gás gerado após a detonação. Estas propriedades são essenciais para a tomada de decisões.

O detonador analisa a rocha sobre a qual o explosivo será aplicado e, de acordo com a finalidade da descarga, o explosivo mais adequado. O processo de jateamento das rochas com explosivos ocorre em três etapas: O furo de explosão se expande para rachar as paredes da rocha na primeira etapa. Isto acontece devido à alta pressão causada pela detonação; no segundo estágio, ondas de choque de compressão emanam em todas as direções. Do furo de explosão, com velocidade igual à velocidade do som na rocha. Quando esta compressão das ondas de choque reflete contra uma frente de rocha livre, ocorrem tensões de tração na rocha entre o furo de explosão e a frente livre. Se a força de tensão da pedra for excedida, a rocha se fragmenta nesta região, o que é o caso de uma detonação plana correta; na terceira etapa, a liberação do volume gasoso entra nas fendas formadas pelas altas pressões, expandindo as fendas (Kabwe, 2018). Se a distância entre o furo da explosão e a face livre for calculada corretamente, a massa rochosa entre o furo e a face livre se destacará e será projetada (Olofsson, 1990).

1.1 PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

Diferentes condições de trabalho tornaram necessária a fabricação de explosivos com outras propriedades adequadas para diversos requisitos e propósitos. Neste sentido, a escolha do explosivo mais adequado requer a consideração de várias características.

1.1.1 Velocidade de detonação (VoD)

É a velocidade com que a explosão percorre o explosivo. A velocidade de detonação é mais incrível quando o explosivo está confinado do que quando não está confinado. O VoD alto é necessário para gerar um impacto poderoso, para causar a tensão responsável pela fragmentação da rocha, principalmente para pedras duras (Olofsson, 1990). Quanto maior o VOD, maior a capacidade explosiva (Cameron & Hagan, 1996). Explosivos como nitroglicerina e emulsões são adequados para rochas duras como granito, gnaisse e basalto, enquanto ANFO é adequado para pedras macias como calcário e arenito. De acordo com Miyake et al. (2001), a velocidade de detonação do ANFO aumenta com a redução do tamanho das partículas, ou seja, com o aumento da área de superfície. Ganec et al. (2016) destacam que o tipo de primer também influencia a VoD.

Um aspecto que influencia significativamente o VoD é a estabilidade e o tamanho das gotas de emulsão. Como o processo de separação de fases em uma emulsão é espontâneo, o uso de surfactantes é essencial para manter a emulsão estável, evitando a coalescência, ou seja, o aumento

do tamanho das gotas, considerando que quanto menor o diâmetro das gotas, maior a área de contato entre as fases e, conseqüentemente, maior a taxa de reação, resultando em pressão e velocidade de detonação mais significativas (Zhang et al., 2018).

1.1.2 Energia de detonação

A energia ou força de um explosivo é igual à diferença entre o calor de formação dos produtos explosivos e o calor do explosivo, representando o trabalho teórico do explosivo. Na realidade, a eficiência do explosivo varia de 30% a 90% da energia disponível. No momento da detonação, o poder do explosivo resultará em efeitos desejáveis, tais como esmagamento das paredes dos furos, formação de fendas e fragmentação de rochas, e efeitos indesejáveis, tais como vibração do solo, ruído e sobrepressão atmosférica (Hustrulid, 1999).

Inicialmente, a medida da energia explosiva era determinada em função da porcentagem de nitroglicerina no explosivo, já que os explosivos industriais modernos não têm mais nitroglicerina, um novo padrão de comparação. De acordo com Scott et al. (1996), a energia é expressa em termos de massa ou volume pelos parâmetros: AWS (Absolute Weight Strength (Força de Peso Absoluta)): Ele mede a energia total (em calorías) disponível em cada grama de explosivo. Os valores típicos variam de 2847kJ/kg a 3223kJ/kg para emulsão explosiva e 3768 kJ/kg para ANFO; ABS (Absolute Bulk Strength): a energia total (em calorías) disponível em cada centímetro cúbico do explosivo. É obtida multiplicando o AWS (cal/g) pela densidade explosiva (g/cm³). Os valores típicos são 3556 a 4016 kJ/L para a emulsão explosiva de densidade 1,25kg/L e 3071 kJ/L para ANFO. Uma maneira de aumentar a energia de detonação da emulsão é adicionar alumínio, que atua como um energizador (Crosby, 1998); RWS (Relative Weight Strength): é uma medida da energia disponível por unidade de massa de um explosivo em comparação com um peso igual de um explosivo padrão. O explosivo comum é tipicamente o ANFO. Portanto, o RWS de qualquer explosivo é obtido dividindo o AWS do explosivo pelo AWS do ANFO. O valor do RWS é sempre dado multiplicando o resultado desta divisão por 100. Os valores típicos são 75 a 85 para emulsão explosiva; RBS (Relative Bulk Strength): é uma medida da energia disponível por unidade de volume comparada a um volume igual de ANFO com uma densidade de 0,81. É calculada dividindo o ABS do explosivo pelo ABS do ANFO e multiplicando por 100. Os valores típicos são de 115 a 130 para emulsão explosiva.

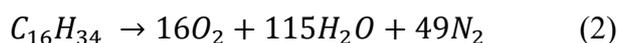
Quando dois explosivos podem ser semelhantes em sua energia em termos de massa, eles podem diferir em sua potência em termos de volume devido a sua densidade. Para aplicações

práticas, a energia em uma base volumétrica será crucial para decidir o explosivo utilizado (Mahadevan, 2013).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CÁLCULO DA ENERGIA POTENCIAL DO EXPLOSIVO

A energia liberada pela explosão foi calculada em uma formulação como uma base com saldo zero de oxigênio. ANFO compreende 94,5% de nitrato de amônio poroso e 5,5% de óleo diesel, enquanto a emulsão consiste em 77,3% de nitrato de amônio denso, 16,7% de água, 4,5% de óleo diesel e 1,5% de emulsificante. Esta formulação foi desenvolvida como padrão para comparar a Resistência Relativa a Granel (RBS) e a Resistência Relativa ao Peso (RWS). A reação que representa a detonação é mostrada na Equação 2



O nitrato é a fonte de oxigênio (oxidante), e o combustível é o hidrocarboneto. As detonações são caracterizadas por altas pressões, em torno de 200GPa (Crosby, 1998). De acordo com Bjarnholt (1980), a força é proporcional à densidade explosiva mais o VoD quadrado. Quando há oxigênio no explosivo para oxidar completamente o carbono e hidrogênio para dióxido de carbono e água, o balanço de oxigênio é igual a zero. O calor da explosão será ótimo, enquanto qualquer desvio do equilíbrio ideal de oxigênio, positivo ou negativo, levará o calor da explosão a um valor mais baixo (Valença, 2013).

A entalpia da reação foi calculada a partir da reação XX com base na entalpia de formação padrão dos componentes (NIST). Para calcular a energia por unidade de massa (RWS), a entalpia da reação para ANFO é dividida pela soma da massa molecular dos reagentes. Em contraste, para calcular a energia por unidade de volume (RWS), a entalpia da reação mostrada para ANFO é multiplicada pela densidade, 0,85. Para a estimativa relativa de RWS e RBS, a energia liberada pelo explosivo foi dividida pela energia liberada pelo ANFO. No caso da emulsão, o cálculo do RWS é semelhante ao utilizado para o ANFO, pois eles detonam através da mesma reação química. A diferença é que a emulsão tem uma composição inerte, o que não contribuirá para a detonação. Estes inertes são água (16,7%) e emulsificante (1,5%). Portanto, para encontrar a energia da emulsão, multiplique a energia associada à ANFO pelo fator de um conteúdo menos inerte.

Da mesma forma, para a RBS, a energia de emulsão foi multiplicada pela densidade, que varia de 1 a 1,25 (Valença, 2013). No caso do ANFO pesado, por ser uma mistura de ANFO e



emulsão, a energia liberada pela explosão é ponderada de acordo com a composição. No caso do cálculo da RBS, em que a energia é multiplicada pela densidade, os dados desta propriedade em função da composição foram obtidos junto à empresa ENAEX.

2.2 CÁLCULO DO VOLUME DE GÁS

O volume dos produtos gasosos foi calculado em condições padrão de pressão e temperatura (STP). Uma vez terminada a reação de detonação, são gerados 180 moles de produtos gasosos. Como o STP (22,4L/mol) é considerado, o volume de gás é facilmente determinado pela proporção direta. Especificamente, como o volume gasoso por unidade de volume depende da massa específica, o volume gasoso por unidade de massa é multiplicado por esta propriedade, que para ANFO é de 0,85 kg/L (Valença, 2013).

No caso da emulsão (que contém água e um emulsionante), considerando a composição de massa de 4,5% de $C_{16}H_{34}$ e 77,3% de NH_4NO_3 , o volume gasoso por unidade de massa será de 81,8% do volume determinado para o ANFO. Além disso, para o volume gasoso por volume de emulsão, o volume gasoso por unidade de massa é multiplicado pela densidade da emulsão, que varia de 1 a 1,25 kg/L, dependendo de sua composição. No caso do ANFO pesado, o volume gasoso por unidade de massa (L/kg) é uma média ponderada entre os valores dos volumes gasosos encontrados para o ANFO e a emulsão, dependendo da proporção destes explosivos na composição do ANFO pesado. O volume gasoso por unidade de volume de explosivo também dependerá da densidade, cujo valor foi obtido do catálogo da empresa ENAEX.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENERGIA LIBERADA PELA EXPLOSÃO: ANFO E EMULSÃO

Considerando a composição da ANFO mencionada na seção 2.1 e o consumo total de reagentes, a energia liberada na explosão foi de 3797,2 KJ/kg ou 3227,6 kJ/L, e $RWS=RWS=1$. Estes valores estão de acordo com Valência (2013), que encontrou valores típicos de energia para ANFO de 3768 kJ/kg e 3071 kJ/L.

No caso da emulsão explosiva, a energia liberada pela explosão foi de 3160,1 kJ/kg e $RWS=0,818$. Tais valores também concordam com o observado por Valença (2013), entre 2847 e 3223 kJ/kg. Entretanto, a energia por volume varia porque a densidade da emulsão varia de acordo com a consciência. Como discutido anteriormente, a emulsão matricial não é considerada o princípio de um explosivo, somente quando sensibilizada por micro balões, pequenos espaços vazios criados junto com a massa. Portanto, a densidade diminui após a sensibilização, variando

de 1 a 1,25 kg/L. A energia correspondente a esta faixa de densidade varia linearmente de 3106,11 a 3882,637 J/L, como mostra a Tabela 1. A energia típica para a emulsão é de 3556 a 4016 kJ/L em uma emulsão de densidade de 1,25 kg/L.

Tabela 1. Energia por volume de acordo com a densidade

Densidade da emulsão (kg/L)	Energia (kJ/L)	RBS
1.00	3106.11	0.96
1.05	3261.42	1.01
1.10	3416.72	1.06
1.15	3572.03	1.11
1.20	3727.33	1.15
1.25	3882.64	1.20

Analisando os resultados da Tabela 1, é possível afirmar que quanto maior a densidade, maior é a energia disponível por volume da emulsão. Entretanto, a densidade da emulsão está diretamente ligada à sensibilização. Neste sentido, a inserção de micro balões de ar reduz a densidade e sensibiliza o explosivo. Portanto, quanto mais densa a emulsão, mais energia será necessária para realizar a detonação, que é menos sensibilizada. Os resultados de Mishra (2018) mostram que a velocidade máxima de detonação pontual da emulsão testada está a uma densidade de 1,15 kg/L e que a falha explosiva ocorreu a uma densidade de 1,27 kg/L devido à dessensibilização causada por altas densidades de emulsão (acima de 1,20 kg/L), o que resultou em uma queda acentuada na velocidade de detonação a estas densidades. Ao comparar emulsão e ANFO, nota-se também que a emulsão, mesmo com menor energia por unidade de massa, pode ter maior energia por unidade de volume, pois é mais densa. A energia da emulsão por unidade de volume excede a do ANFO em densidades acima de 1,05 kg/L. A emulsão tem uma densidade maior que o ANFO porque preenche toda a casca na qual está contida, já que sua forma física é de um líquido viscoso, enquanto o ANFO está na forma de pequenos grãos sólidos, o que resulta em muitos espaços vazios entre os grãos.

3.2 ENERGIA LIBERADA PELA EXPLOSÃO: ANFO PESADO

Quando a emulsão é misturada com ANFO, a densidade do ANFO é aumentada porque preenche todo o espaço entre os grãos de ANFO; por isso a mistura é chamada de ANFO pesado,

que preenche todo o espaço do buraco. Como a energia liberada pelo ANFO e a emulsão são diferentes, a energia liberada pelo ANFO pesado dependerá da fração de ANFO e da emulsão utilizada. A tabela 2 mostra a energia liberada pelo ANFO pesado em função da fração de massa de ANFO na mistura. Quanto maior a fração de ANFO, maior a energia por unidade de massa, pois a emulsão conta com 16,7% de água, inerte à reação de detonação. Em ANFO, toda a composição participa da reação de detonação.

Tabela 2. Energia por kg de acordo com a composição pesada da ANFO

Emulsão%	ANFO %	Energia (kJ/kg)	RWS
0.90	0.10	3175.22	0.84
0.80	0.20	3244.33	0.85
0.70	0.30	3313.44	0.87
0.60	0.40	3382.55	0.89
0.50	0.50	3451.65	0.91
0.40	0.60	3520.76	0.93
0.30	0.70	3589.87	0.95
0.20	0.80	3658.98	0.96
0,10	0,90	3728,09	0,98

A energia do ANFO pesado também pode ser expressa por unidade de volume. Entretanto, depende também da densidade, como mostra a Tabela 3. Cada composição pesada do ANFO tem sua densidade operacional específica. A maioria das composições de emulsão tem densidades de operação mais amplas porque a emulsão varia a densidade, enquanto a maioria das composições de ANFO tem densidades de operação desde que o ANFO tem uma densidade fixa. Observa-se que as condições mais energéticas estão nas misturas dominantes de ANFO, na relação emulsão/ANFO de 25/75, 40/60 e 50/50, já que quanto mais emulsão houver na composição, mais substâncias inertes também estarão presentes. Também é possível observar que a energia por unidade de volume em densidades elevadas é maior do que em densidades baixas. Em densidades mais altas, mais explosivos estarão contidos no mesmo volume. Também é importante observar que quanto maior a densidade, mais energia é necessária para ativar a coluna explosiva. Neste contexto, o iniciador deve ser dimensionado para iniciar toda a massa explosiva.

Tabela 3. Energia por volume para ANFO pesado em diferentes composições de acordo com a densidade

Densidade (kg/L)	RBS(emulsão/ANFO)						
	(25/75)	(40/60)	(50/50)	(60/40)	(70/30)	(80/20)	(90/10)
0.90	-	-	-	-	0.92	0.90	0.89
0.95	-	-	-	-	0.98	0.95	0.93
1.00	-	-	-	-	1.03	1.01	0.98
1.05	-	-	-	-	1.08	1.06	1.03
1.10	-	-	-	1.15	1.13	1.11	1.08
1.15	-	-	-	1.21	1.18	1.16	1.13
1.20	1.35	1.31	-	1.26	1.23	1.21	1.18
1.25	1.40	1.36	-	1.31	1.28	1.26	1.23
1.30	-	1.42	1.39	-	-	-	-

3.3 VOLUME GASOSO GERADO POR ANFO E EMULSÃO

O volume dos produtos gasosos desenvolvidos pela explosão é calculado a uma pressão de 1 bar e a uma temperatura de 0°C (273K). Desta forma, é possível considerar 1 mol correspondente a 22,4L. Para o ANFO, considerando a composição do ANFO mencionada na metodologia, densidade 0,85kg/L, e reação completa dos reagentes, o volume de gás gerado foi de 979,46 L/kg. Em comparação, para a emulsão, o volume de gás foi de 801,37 L/kg. Tais resultados concordam com o que foi observado por Valença (2013) para a emulsão (882 L/kg). Comparando emulsão e ANFO, ANFO produz maior volume de gás e energia por unidade de massa, já que o ANFO é puro explosivo. Em contraste, a emulsão tem uma composição inerte (água) de 16,7%. O fato de que a emulsão varia em densidade quando sensibilizada implica que o volume de gás gerado por unidade de volume de explosivo irá variar de acordo com a densidade.

Neste contexto, a densidade variou de 1 a 1,25 kg/L; os resultados são mostrados na Tabela 4. Ao comparar o ANFO e a emulsão, observa-se que apesar da emulsão ter um volume menor de gás gerado por unidade de massa, quando analisada por unidade de volume, a emulsão tem um volume de gás mais significativo que o ANFO quando em densidades acima de 1,05 kg/L.

Tabela 4. Volume gasoso gerado pela emulsão

Densidade (kg/L)	Volume gasoso (L/L)
1.00	801.38
1.05	841.45
1.10	881.52
1.15	921.58
1.20	961.65
1.25	1001.72

3.4 VOLUME GASOSO GERADO POR ANFO

Como ANFO e emulsão produzem diferentes volumes gasosos, isto dependerá da fração de cada componente. O volume gasoso por unidade de massa do explosivo pode ser calculado a partir da média ponderada do volume gerado pelos explosivos de sua composição. Os resultados são mostrados na Tabela 5. Como esperado, quanto maior a quantidade de ANFO, maior o volume de gás por massa, uma vez que o ANFO não tem inerte, enquanto a emulsão tem.

Tabela 5. Volume gasoso gerado por ANFO pesado de acordo com a composição

Emulsão %	ANFO %	Volume gasoso (L/kg)
0,90	0,10	819,19
0,80	0,20	836,99
0,70	0,30	854,80
0,60	0,40	872,61
0,50	0,50	890,42
0,40	0,60	908,23
0,30	0,70	926,04
0,20	0,80	943,85
0,10	0,90	961,65

No caso de ANFO pesado, o volume gasoso por unidade de volume explosivo dependerá da fração ANFO/emulsão e da densidade final do explosivo, que pode variar de acordo com o sensibilizador inserido na presente emulsão. O volume gasoso por unidade de volume gerado em função da densidade é mostrado na Tabela 6. O volume gasoso por unidade de explosivo é mais

significativo em situações com uma fração ANFO maior nas composições: 25/75, 40/60, e 50/50. Também é possível perceber que o volume de gás liberado em densidades maiores é mais significativo porque se o explosivo for mais denso, mais gases resultantes da detonação serão liberados. É essencial mencionar que altas densidades também representam um problema para iniciar este explosivo. Sob estas condições, o iniciador deve ter potência suficiente para acionar toda esta massa explosiva sem falhas.

Tabela 6. Volume gasoso por volume gerado por ANFO pesado para diferentes composições e densidades

Densidade (kg/L)	Volume gasoso (L/L)						
	(25/05)	(40/60)	(50/50)	(60/40)	(70/30)	(80/20)	(90/10)
	% Emulsão / % ANFO						
0.90	-	-	-	-	769.32	753.30	737.27
0.95	-	-	-	-	812.06	795.15	778.23
1.00	-	-	-	-	854.80	836.99	819.19
1.05	-	-	-	-	897.54	878.84	860.15
1.10	-	-	-	959.87	940.28	920.69	901.11
1.15	-	-	-	1003.50	983.02	962.54	942.06
1.20	1121.93	1089.87	-	1047.13	1025.76	1004.39	983.02
1.25	1168.68	1135.29	-	1090.76	1068.50	1046.24	1023.98
1.30	-	1180.70	1157.55	-	-	-	-

4 CONCLUSÕES

Ao comparar os resultados do ANFO e da emulsão, pode-se ver que o ANFO tem maior energia por unidade de massa, já que a emulsão tem 16,7% de água na composição, uma fração considerável de inerte, enquanto o ANFO é puro explosivo. O ANFO tem um RWS mais alto do que a emulsão. Entretanto, uma vez que a emulsão é mais densa que o ANFO quando a densidade está acima de 1,05 kg/L, ela tem maior energia por unidade de volume que o ANFO e maior RBS que o ANFO. Quando a densidade aumenta, os valores teóricos de energia por volume (RBS) são maiores. Ainda assim, não necessariamente altas densidades levarão a um bom desempenho da emulsão, pois a densidade da emulsão está diretamente ligada à sensibilização, uma vez que este processo é feito através da inserção de espaços vazios junto com a massa. Quando o explosivo não é totalmente inflamado, os parâmetros de desempenho como energia, volume de gás e outros são reduzidos.



Sobre o ANFO pesado, já que mistura características de ambos os explosivos, observou-se que as proporções majoritárias de ANFO são as de maior valor energético, seja em unidades de massa e volume, RWS e RBS, respectivamente. Além disso, esta mistura majoritária de ANFO proporciona densidades maiores do que a praticada em proporções de emulsão mais elevadas. Ao comparar os resultados de ANFO e emulsão sobre o volume de gás gerado, é possível ver que o ANFO tem um volume de gás gerado por unidade de massa maior do que a emulsão porque o ANFO é um explosivo puro. Em contraste, a emulsão tem a composição inerte. Entretanto, ao analisar o volume gasoso gerado por unidade do volume explosivo, é possível notar que a emulsão tem um volume gasoso maior que o ANFO em densidades acima de 1,05 kg/L.

A mistura entre ANFO e emulsão mostra que o volume de gás cresce à medida que a fração ANFO cresce porque o ANFO é puro explosivo e a emulsão é inerte. O volume gasoso por unidade de volume de explosivo também é maior para proporções majoritárias de ANFO devido à inexistência de inerte no ANFO e às densidades mais altas praticadas nestas composições.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFES e à OPEX por apoiarem a pesquisa.



REFERÊNCIAS

- Bjarnholt, G. (1980). Suggestion On Standards for Measurement and Data Evaluation in the Underwater Explosion Test (Sugestão sobre Normas de Medição e Avaliação de Dados no Teste de Explosão Subaquática). *Propulsores, Explosivos, Pirotecnia*, 5 (2-3), 67-74.
- Cameron, A., Hagan, T. (1996). Curso Internacional: Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas. IBRAM, Belo Horizonte.
- Crosby, W.A. (1998). Perfuração e Jateamento a Céu Aberto e Pedreiras, Engenharia de Recursos Minerais Ltda., Crosby, W.A. (1998). Ontário: MREL.
<https://cccbdb.nist.gov/>. Acesso em 15 de maio de 2022.
<http://www.britanite.com.br/site2019/wp-content/uploads/2019/04/produtos1.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2022.
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining (Princípios de jateamento para mineração a céu aberto)*. Rotterdam: Balkema.
- Jones, D.E.G., Feng, H., Mintz, K.J., Augsten, R.A., 1999. Parâmetros que afetam o comportamento térmico dos explosivos de emulsão. *Thermochemica Acta* 331, 37-44.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00660-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00660-1)
- Moraes, J. L. de (2004). *Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Kabwe, E., 2018. A velocidade da medição da detonação e análise da fragmentação para avaliar a eficácia da detonação. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10, 523-533.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003>
- Mahadevan, E.G. (2013). *Explosivos de Nitrato de Amônio para Aplicações Civas: Polpas abrasivas, emulsões e óleos combustíveis de nitrato de amônio*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Mishra, A.K., Rout, M., Singh, D.R., Jana, S.P., 2018. Influência do Agente de Gaseamento e Densidade na Velocidade de Detonação de Explosivos de Emulsão a Granel. *Engenharia Geotécnica e Geológica* 36, 89-94. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0308-7>
- Miyake, A., Takahara, K., Ogawa, T., Ogata, Y., Wada, Y., Arai, H., 2001. Influência das propriedades físicas do nitrato de amônio sobre o comportamento de detonação do ANFO. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14, 533-538. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(01\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(01)00041-9)
- Olofsson, S.O. (1990). *Tecnologia Aplicada a Explosivos para construção e mineração*. Ärla: APPLEX.
- Scott, A., Cocker, A., Djordjevic, N., Higgins, M., la Rosa, D., Sarma, K., Wedmaier, R. (1996). *Desenho de explosão de poço aberto: Análise e Otimização*. Queensland: JKMRC.
- Valença, U. da S., Reis, S. S., Palazzo, M., Rocha, J. F., Athayde, A. A. C. (2013). *Engenharia dos explosivos: um enfoque duplo*. Rio de Janeiro: IME.



WANG, X. (1994). Explosivos de emulsão. Pequim: Imprensa da Indústria Metalúrgica.

Āganec, S., Bohanek, V., Dobrilović, M. (2016). Influência de um Primer sobre a velocidade de detonação de misturas de ANFO e ANFO pesado. *Jornal Central Europeu de Materiais Energéticos* 13, 694-704. <https://doi.org/10.22211/cejem/65017>

Zhang, K., Ni, O., Huang, J., Dai, Y., Zhao, H. (2018). Um método fácil e eficiente para investigar o efeito da natureza do surfactante e da fase contínua sobre o desempenho do explosivo de emulsão. *Journal of Molecular Liquids* 249, 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.149>