Revista Eletrônica
Paulista de Matemática

ISSN 2316-9664
Volume 10, dez. 2017
Edição Ermac
Iniciação Científica

Vinícios Munari Dewes
Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC
viniciosdewes@gmail.com.br

Estimação da energia dissipada e dos parâmetros da onda de choque na fase positiva com uso de baixo-explosivos

Estimation of dissipated energy and shock wave parameters in the positive phase using low-explosives

Resumo

É crescente o número de ocorrências envolvendo o uso de explosivos, seja na explosão de máquinas (em bancos) ou abandono em via pública. Existem modelos que garantem uma distância mínima de segurança para explosivo com grande potencial energético (alto-explosivo). Porém, para baixo-explosivos, não existem muitas referências de distância segura. A intenção deste texto é desenvolver um modelo empírico que delimita a dissipação da energia liberada com o uso de baixo-explosivos, baseado em modelos já existentes e propor o dimensionamento dos parâmetros característicos da onda de choque na fase positiva. O modelo criado para dimensionamento da energia por área possibilita estimar a energia liberada em regiões próximas ao epicentro. O adaptação dos modelos já existentes permitem caracterizar a onda de choque, conforme o tipo de baixo-explosivo.

Palavras-chave: Baixo-explosivos. Dissipação Energética. Ondas de Choque.

Abstract

The number of occurrences involving the use of explosives, the explosion of machines (in banks) or abandonment on public roads is increasing. Models that guarantee a minimum safety distance for explosive with great energetic potential (high-explosive). However, for low-explosives, there are not many safe distance references. The intention of this text and development is an empirical model that delimit a dissipation of the energy released with the use of low-explosives, downloaded in already existing models and propose the dimensioning of the characteristic parameters of the shock wave in the positive phase. The model created for sizing the energy by area allows estimating the energy released in regions near the epicenter. The adaptation of existing models specifies a shock wave, depending on the type of low-explosive.

Keywords: Low-explosives. Energy Dissipation. Blast Waves.

1 Introdução

A incidência de ocorrências com envolvimento de explosivos químicos sólidos tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, como pode ser visualizado em mídias televisivas, encontrados nos mais diversos tipos de embalagens (SILVA, 2007). O mau uso e a quantificação exacerbada por parte dos criminosos acaba muitas vezes inviabilizando o próprio sucesso da ação, a exemplo dos caixas eletrônico em agências bancárias. Além disso, fábricas de produtos pirotécnicos podem ser acometidas por incêndios, ocasionais ou não, e ainda, a confecção de artefatos ilegais, tal como pólvora negra, podem gerar problemas.

Os agentes do estado que primeiro chegam ao local do crime são, em geral, policiais militares responsáveis pelo serviço de policiamento ostensivo motorizado. Nesse âmbito, existe um procedimento que regulamenta as atividades das unidades especializadas (SANTA CATARINA, 2016). Indicam os materiais que serão utilizados, assim como a cadeia de comando a ser seguida e demais necessidades da atuação. No texto do documento, um item é responsável pela indicação do isolamento da área, porém não especifica a área segura.

Neste texto é desenvolvido um modelo que correlaciona a quantidade de alto-explosivos com a quantidade de baixo-explosivos reduzindo o viés apresentado pelo método da equivalência ao TNT, que assemelha a dispersão energética de materiais com distintas características. A nova relação permite reformular a estimativa da dissipação da energia num ambiente livre de barreiras apresentada segundo Dewes (2017), além de incluir modelos que determinam os principais parâmetros que caracterizam a onda de choque na fase positiva. A adaptação dos parâmetros para os baixo-explosivos foi desenvolvida com base no novo modelo de equiparação da distribuição energética.

A nossa realidade indica que grande parte do uso destes materiais ocorre em ambientes fechados, tais como bancos ou salas total ou parcialmente fechadas, muitas vezes noticiados. Porém, a suspeita destes objetos ocorre também em via pública, onde a dissipação da energia poderia atingir muitas pessoas.

2 Revisão de conceitos

O conceito de explosivo químico utilizado indica que é uma mistura de substâncias ou substância única, em qualquer estado físico, que quando interagem com calor ou choque mecânico, com valores mínimos suficientes, converte a matéria em gás, gerando uma enorme quantidade de energia e altíssimas pressões, no mínimo intervalo de tempo. São divididos em baixo-explosivos e alto-explosivos (MORAIS, 2004; SILVA; IHA; FERREIRA, 2007).

O efeito dos explosivos vem do volume que o gás ocupa quando comparado a um objeto sólido. Na transformação do sólido para o gasoso são liberadas ondas de choque (SILVA, 2007; NEGRINI NETO, 2010). Segundo Silva (2007) e Silva, Iha e Ferreira (2007) a energia liberada é diretamente proporcional a massa do explosivo utilizado.

Quando possuem velocidade de queima suficiente, os explosivos detonam, gerando também calor. Caso contrário, apenas ocorre a deflagração (queima rápida) com a liberação do calor (SILVA; IHA; FERREIRA, 2007). Iniciada a detonação, ondas de choque partem da locação inicial dos explosivos em forma hemisférica, modificando a forma conforme chegam na zona de estragos nula, assumindo uma forma cada vez menos definida, propagam-se em todas as direções, a partir do epicentro (SILVA, 2007). Atrás da onda de choque, ocorre uma pressão dinâmica, proveniente da movimentação sofrida pelo ar (SILVA, 2007; COSTA NETO, 2015).

Em geral, quanto mais longe do centro da explosão, menores serão os efeitos destrutivos, pois a energia é dissipada conforme são propagadas a onda de choque e a energia calorífica (BARROS, 2008). Casagrande (2006) afirma que alterações no tipo de explosivo, relevo ou altitude modificam a onda de choque e sua relação com estruturas durante a colisão. A caracterização usual é válida para os diversos tipos de explosivos.

Bauer e Crosby (1990 apud Barros, 2008, p. 51) assumem que o fator de escala é proveniente do efeito da dispersão geométrica do movimento da detonação. Esparza (1985, apud Barros, 2008, p. 51) conduziu experiências com seis tipos de alto-explosivos e foi utilizada raiz cúbica ao invés da quadrada mensuração da distância escalonada.

Conforme Silva, Iha e Ferreira (2007), os efeitos da explosão são proporcionais ao cubo do raio $D(W)^3/Z^3$ da esfera formada pela detonação de W indicando a propagação hemisférica das ondas de choque. $D(W)$ é dado em metros, medidos do final da explosão ao epicentro. W é a quantidade de alto-explosivos, em kg, e Z é dado em $m/\sqrt[3]{kg}$ representa a distância em escala, para uso na comparação dos tipos de alto-explosivo. Esta é a lei denominada "Hopkinson-Cranz law of blast scaling" e é obtida elevando as equações na potência $1/3$ e isolando Z na descrição inicial.

$$W = \frac{D(W)^3}{Z^3} \Rightarrow D(W) = Z\sqrt[3]{W} \Rightarrow Z = \frac{D(W)}{\sqrt[3]{W}}. \quad (1)$$

A classificação em baixo-explosivos é proveniente do comportamento do material, que possui baixa velocidade de reação e queima em aberto rápida, produzindo muito calor e poucas ondas de choque (NEGRINI NETO; 2010). A principal diferença, se comparado ao alto-explosivo, é a velocidade de queima, quando deflagrados (SILVA; IHA; FERREIRA, 2007). Como exemplo, Valença et al (2013) cita propelentes ou pólvoras (negra, base simples, base dupla, base tripla).

Os efeitos da onda de choque podem comprometer a estrutura do ambiente assim como ceifar vidas. Conforme Negrini Neto (2010) subdivide em três sub-regiões em zonas de estrago: forte ($0 < Z \leq 5$), moderada ($5 < Z \leq 10$) e fraca ($10 < Z \leq 15$), conforme proximidade do local da explosão.

A detonação pode ser iniciada devido a deflagração conforme Valença et al (2013), num processo transitório, com a aceleração das chamas até a produção da onda de choque. A maneira mais fácil de entender este fenômeno é imaginar o material confinado, de forma que não vaze o gás e este comprima o material. Quando o valor do coeficiente de velocidade de queima (verificado na Lei de Vieille) é próximo de 1,0 ou se este é maior na alta pressão do que na baixa, a queima atinge a velocidade sônica e o processo de liberação das ondas é iniciado, terminando com a detonação do resto do material. Outro método é quando se utiliza de uma onda de choque proveniente de material já detonando (VALENÇA et al, 2013).

O modelo matemático empírico para delimitação das zonas de estrago e distância de segurança para baixo-explosivos, denotado por Q , mensurado em kg, é descrito por Negrini Neto (2010), é distinto do utilizado por Silva (2007) e Silva, Iha e Ferreira (2007) para alto-explosivos.

$$D(Q) = Z\sqrt{Q}. \quad (2)$$

Observa-se que a zona de estragos nula não é citada por Negrini Neto (2010), porém é plausível que se a pessoa se encontra a uma distância maior que a distância máxima numa zona de estrago fraca, o risco tende a ser nulo. Silva (2007) assume que para um pico de sobrepressão, denotado por ΔP , menor que 0,07 bar não ocasiona lesões significativas.

Se o modelo que estima D for muito complexo, elaborado com muitas regras de associação

que a relacionam com a quantidade de explosivos, algum cuidado deve ser tomado devido convergência individual dos termos quando os valores tendem a ser muito grandes ou muito pequenos. Por exemplo, conforme Lima (2011), a convergência do produto de sequências, que individualmente convergem para infinito e zero, não pode ser definida se não por análise individual de cada modelo finalizado.

Para qualquer quantidade de explosivos representado por um valor contido no conjunto dos números reais, a sequência $\sqrt[i]{W} = W^{1/i}$, com $1/i$ representando uma potência pertencente ao conjunto dos números reais, vai resultar numa menor explicação de D por parte de W se i assumir um valor muito alto. Pode-se dizer que se a razão $1/i$ for muito pequena (i muito grande), a sequência $\sqrt[i]{W}$ vai se aproximar de 1 e a distância mínima de segurança vai ser explicada somente pela distância escalada, gerando um absurdo pois as pesquisas indicam que é proporcional a quantidade de explosivos.

Para Barros (2008), quando a sobrepressão é menor que a pressão ambiente, P_0 , a sobrepressão refletida (quando ocorre a colisão frontal entre a onda de choque e a superfície do material) ΔPr é aproximada como sendo duas vezes a valor da sobrepressão causada pela explosão sem reflexão. Quando a sobrepressão causa pela explosão for maior que P_0 , a sobrepressão refletida pode chegar até oito vezes o valor da sobrepressão inicial.

2.1 A equivalência ao TNT

Dado o comportamento da raiz quadrada no intervalo quando $0 < Q < 1$, será considerado válido para toda quantidade de explosivos maior ou igual que 1 kg para explosivos com velocidades de queima mais altas, o modelo que delimita o afastamento mínimo, proveniente de modificações no desenvolvimento da equação (1) (MORAIS, 2004; SILVA, 2007; SILVA; IHA; FERREIRA, 2007):

$$D(W) = 120\sqrt[3]{W}. \quad (3)$$

Quando W representa o TNT, o calor de explosão, E_0 , gera 4520 kJ/kg de energia a cada quilo (SILVA, 2007). No entanto, para Valença et al (2013) o TNT possui calor de explosão é de 4080 kJ/kg. Valença et al (2013) garante que a determinação experimental apresenta valores divergentes, variando conforme as condições laboratoriais e da quantidade de oxigênio envolvido. Como objetivo é delimitar a distância mínima de segurança, o maior valor será considerado. Para abranger os diversos tipos de explosivos, será mantido a variável E_0 , ao invés do valor de 4520 kJ/kg que representa o TNT. A viabilidade disso esta na coerência ao se utilizar a equivalência ao TNT para diversos alto-explosivos. Para clarear, o E_0 referente ao alto-explosivo C4 é $1,185 \times 4520 = 5356,2$ kJ/kg. A tabela 1 apresenta algumas relações de equivalência ao explosivo TNT.

Tabela 1: Relação de equivalência ao TNT de alguns explosivos.

Explosivos	Relação de Equivalência
RDX	1,600
Dinamite de Nitroglicerina	0,600
C4	1,185
Pólvora	0,550

Fonte: extraída de Silva (2007).

Ainda, Silva (2007) assegura que para este tipo de material, em zona aberta, a distância mínima é de 90 metros. Novamente, quando $0 < W < 1$ a função apresenta comportamento diferenciado, por se tratar de raiz cúbica. Por ser um dos tipos de alto-explosivos mais estudados, uma relação de equivalência entre a quantidade de baixo-explosivos e alto-explosivos pode ser estabelecida, considerando os valores energéticos do TNT (W) já apresentados.

O único baixo-explosivo identificado na tabela 1 com valores extraídos de (SILVA, 2007; BARROS, 2008) é a pólvora, mas não é especificado nenhum tipo específico deste material. Isso pode representar um viés nas características dos baixo-explosivos existentes, pois para Valença et al (2013) existem pelo menos quatro tipos de pólvora: negra, base simples, base dupla e base tripla.

Com base na tabela 1, aplicado ao método da equivalência do TNT, pode-se dizer que os mesmos efeitos causados por 1kg de TNT a 120 metros ($Z = 120$) podem ser comparados a aproximadamente $D_{0EQ} = 98,32$ metros utilizando-se a pólvora:

$$Z = \frac{120}{\sqrt[3]{1}} = \frac{D_{0EQ}}{\sqrt[3]{0,55}} \Rightarrow D_{0EQ} = \frac{120 \times \sqrt[3]{0,55}}{\sqrt[3]{1}} \Rightarrow D_{0EQ} = 98,32. \quad (4)$$

Baseado na velocidade de reação de um baixo-explosivo, o valor de 98,32 metros aparenta estar superestimado. Veja que, se utilizado a dinamite de nitroglicerina, que possui fator de equivalência ao TNT de 0,6, próximo ao da pólvora, obteríamos uma distância equivalente $D_{0EQ} = 101,21$ metros, gerando um absurdo conceitual ao tornar muito próximas as diferentes características dos alto e baixo-explosivos.

2.2 Os parâmetros da onda de choque

Para Goel et al (2012), os principais parâmetros que descrevem a onda de choque são o pico de sobrepressão na fase positiva ΔP , tempo de duração da fase positiva t_0 , a sobrepressão na fase negativa ΔP^- , o tempo de duração da fase negativa t_0^- , o coeficiente de decaimento exponencial b e o impulso na fase positiva I . O estudo das ondas e choque no tempo de duração da fase negativa não será abordado nesse texto.

A compreensão da relação da pressão em função do tempo de duração da onda de choque é muito importante. Além de permitir um maior detalhamento da onda de choque, verifica a interação entre a onda de choque e obstáculos.

2.2.1 Considerações sobre o tempo de chegada

O tempo de chegada corresponde ao início da explosão até a colisão com o material conforme Costa Neto (2015). Para Ullah et al (2017), este período normalmente não é computado nos estudos desenvolvidos, mesmo existindo alguns modelos. A figura 1, extraída de Ullah et al (2017) apresenta um comparativo dos métodos. Fica visível que o modelo de IqBal e Ahmad (2009 apud Ullah et al 2017, p.8) apresenta valores intermediários se comparado aos demais pesquisadores. O modelo é da forma:

$$ta = 560 \frac{D^{1,40}}{a_0 W^{0,2}}. \quad (5)$$

Figura 1: Estimação do tempo de chegada.
Fonte: extraído de Ullah et al (2017).

A velocidade do som fica representada por $a_0 = 340 \text{ m/s}$, a 15 graus Celsius, densidade do ar de $1,225 \text{ kg/m}^3$, no nível do mar (altitude zero).

2.2.2 Considerações sobre a fase positiva

A fase positiva fica caracterizada pela máxima pressão ocorrida durante a chegada das ondas de choque ao objeto colidido, no tempo de chegada t_a , decaindo a pressão e perdurando até a pressão ambiente (SILVA; 2007).

Através de Sadoskiy (2004 apud Goel et al 2012, p. 302) o tempo de duração da fase positiva pode ser estimado pela equação (6), dada em milissegundos (ms):

$$t_0 = 1,2\sqrt[6]{WD^3}. \quad (6)$$

Assim, uma estimativa de t_0 é obtida para alto-explosivos. Apesar de existirem diversos métodos expostos no trabalho Goel et al (2012) visualizados na figura 2 o modelo descrito na equação (6) apresenta resultados centralizados se comparados a outros métodos.

Figura 2: Estimação do tempo de duração da fase positiva.
Fonte: extraído de Goel et al (2012).

2.2.3 O Coeficiente de Decaimento Exponencial

O coeficiente de decaimento exponencial é uma grandeza empírica que descreve a redução do pico de sobrepressão incidente, utilizado na curva da pressão e impulso no decorrer do fenômeno, ambos na fase positiva (SILVA, 2007; GOEL et al, 2012).

Por apresentarem resultados similares, se comparados a outros métodos apresentados, o coeficiente de decaimento exponencial b será estimado por dois modelos distintos provindo dos estudos de Larcher, et al e Teich and Gebekken, respectivamente:

$$b[27] = \frac{5,277}{Z^{1,1975}} \text{ e } b[28] = \frac{1,500}{Z^{0,38}}. \quad (7)$$

A notação entre colchetes é aqui considerada para posterior diferenciação na utilização para mensuração dos parâmetros da onda. A figura 3 exprime a diferença entre os modelos apresentados por Goel et al (2012).

Figura 3: Coeficientes de decaimento exponencial.
Fonte: extraído de Goel et al (2012).

2.2.4 A sobrepressão

Para Silva (2007) o conhecimento de como ocorre a variação da pressão é por muitas vezes suficiente para caracterização de uma explosão, podendo inclusive dispensar a definição de outros parâmetros.

Conforme Goel et al (2012), quando em função do tempo a pressão é modelada pela equação modificada de Friedlander's, dada em bar por milissegundos:

$$P(t, \Delta P, P_0, b, t_a, t_0) = P_0 + \Delta P \left(1 - \frac{t - t_a}{t_0} \right) e^{-b \left(\frac{t - t_a}{t_0} \right)}. \quad (8)$$

Para Guzas e Earls (2010) existem restrições ao intervalo do modelo: a pressão é considerada nula quando $t < t_a$ e quando $t > t_a + t_0$, sendo válida apenas quando $t_a < t < t_a + t_0$.

Em distâncias escalonadas muito próximas do epicentro da explosão ($1 \text{ metro/kg}^{1/3}$) fica muito difícil estimar a sobrepressão, dada a complexidade do fenômeno. A quantificação do fluxo de gases, fenômenos termodinâmicos e a relação destes com a produção de ondas, conforme Costa Neto (2015).

Busca-se no modelo de Newmark e Hansen (1961 apud Costa Neto, 2015, p. 33), o valor que indica a sobrepressão em alto-explosivos é inversamente proporcional ao cubo da distancia ao epicentro e proporcional a quantidade de explosivos (TNT) em tonelada, sendo o valor da sobrepressão obtido em bar. Para Hussein (2010) esse modelo calcula a máxima sobrepressão de alto-explosivos detonados na superfície terrestre. O modelo original pode ser visualizado na equação abaixo:

$$\Delta P(W, D) = 6784 \frac{W_t}{D^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{D^3}}. \quad (9)$$

Necessário corrigir a quantidade de W_t , fazendo $W = 1000W_t \Rightarrow W = W_t/1000$, pois as quantidades usuais estão em kg e a equação (9) está em tonelada.

$$\Delta P(W, D) = 6,78 \frac{W}{D^3} + 2,94 \sqrt{\frac{W}{D^3}}. \quad (10)$$

Outros modelos para mensuração da pressão são apresentados por Hussein (2010), Goel et al (2012) e Costa Neto (2015). No entanto, a escolha do modelo de Newmark e Hansen foi devido ao mesmo apresentar valores intermediários se comparada a outros modelos. A figura 4 extraída de Costa Neto (2015) mostra esta comparação.

Figura 4: Modelos para estimação da sobrepressão .
Fonte: extraído de Costa Neto (2015).

2.2.5 O Impulso na Fase Positiva

O estudo do impulso na fase positiva é de fundamental importância devido a capacidade medir os danos que a explosão que causa em estruturas. É um parâmetro de controle de ondas cujo período de duração é curto.

O impulso é definido como a área sob o eixo do tempo na equação (8) conforme Goel et al (2012). Pode ser obtido pela integral da equação (8) quando assumido a similaridade entre sobrepressão normalmente refletida e a sobrepressão lateral, conforme especificado por Guzas e Earls (2010).

A figura 5, extraída de Goel et al (2012), apresenta a comparação entre diversos modelos empíricos, não estão em função do tempo, responsáveis por estimar o valor do impulso pela distância escalonada Z .

Figura 5: Comparação dos modelos impulso.
Fonte: extraído de Goel et al (2015).

Integrando a equação (8), o impulso é obtido pela equação (11):

$$I = \frac{\Delta P(t_0 e^{-b}) (be^b - e^{-b} + 1)}{b^2}. \quad (11)$$

O comportamento da explosão é simulado utilizando o conceito de pressão-tempo, definido em função dos parâmetros: ΔP , ta , t_0 , b segundo Goel et al (2012), sendo válido para a fase positiva.

3 Estudo de caso

Mantendo a sequência próxima da que foi apresentada na revisão de conceitos os valores serão adaptados conforme valores iniciais.

3.1 A equivalência ao TNT

Para determinação de uma referência segura sobre a equivalência do TNT com qualquer baixo-explosivo, vai ser igualado na equação (3) e na equação (2), considerando a distância de segurança com danos não significativos obtemos:

$$120\sqrt[3]{W} = 15\sqrt{Q}. \quad (12)$$

Obtêm-se as relações entre quantidade de baixo e alto-explosivos :

$$Q = 64(W^{2/3}). \quad (13)$$

$$W = \frac{Q^{3/2}}{512}. \quad (14)$$

Na equação (13) fica visível a comparação entre as quantidades de explosivo para que haja a distância de segurança em cada caso. Nesse caso, como a igualdade envolve raiz cúbica e quadrada, ocorre uma relação não linear no trato das equivalências com relação ao poder destrutivo do TNT. Especificamente, quando $W = 64^3 = 8^6$, os valores Q e W se igualam, o que novamente gera um resultado contraditório devido as propriedades físico-químicas deste material.

3.1.1 Considerações referentes a equivalência ao TNT

De fato, no desenvolvimento das equações há uma suposição de que a energia já liberada no decorrer da explosão pelos alto e baixo-explosivos seja muito similar, convergindo para igualdade quando o explosivo já foi totalmente detonado. No entanto, divergem quanto à equivalência quantitativa e a velocidade de detonação.

O modelo de equivalência ao TNT e o modelo proposto pela igualdade das equações (2) e (3) apresentam amplitude da sobrepressão muito distintos, sendo que o modelo que se utiliza da equivalência ao TNT apresenta comportamento semelhante ao próprio, como era de se esperar, corrigido apenas por uma constante.

Apesar de possuir maiores valores de sobrepressão quando mais próximo do epicentro, o método de equivalência ao TNT apresenta um decaimento muito alto da sobrepressão, concentrando altíssimos valores no entorno da explosão, fatores característicos de alto-explosivos, onde

há uma grande expansão gasosa e detonação, além de outros fatores não elencados neste trabalho. Ainda, a elevação cúbica da distância é fator determinante para a grande baixa dos valores medidos referentes a sobrepressão quando ocorre afastamento do epicentro.

Do contrário, no modelo proposto há um menor viés dos valores de sobrepressão, com amplitude menor, que pode estar associado a explosivos com baixa velocidade de detonação, muitas vezes apenas deflagrados ou detonados com velocidade limite entre a deflagração e detonação.

Quando ocorre a deflagração, muita energia é dissipada apenas em forma de calor, com a queima do material, sem possuir a mesma expansão gasosa dos alto-explosivos.

3.2 Os primeiros parâmetros da onda

As primeiras adaptações com relação aos parâmetros da onda de choque são referentes ao tempo de chegada e tempo de duração da fase positiva. Por estar em função direta da distância escalonada, o coeficiente de decaimento exponencial permanece da mesma forma. O tempo de duração da fase positiva adaptado para uso com baixo-explosivos é representado pela equação (15), quando substituída a equação (13) na equação (6) e assim obtemos:

$$t_0 = 0,42Q^{0,50}D^{0,50}. \quad (15)$$

O tempo de chegada é descrito pela equação (16).

$$ta = 1950,03 \frac{D^{1,40}}{a_0 Q^{0,30}}. \quad (16)$$

3.3 A mensuração da energia dissipada

Considerando que a variação da energia dissipada E no entorno do epicentro após detonação é inversamente proporcional ao cubo da distância R do epicentro, pode-se inferir que a energia total descrita E é dada inicialmente pelo produto da energia liberada por cada quilo de explosivo W e sua energia específica E_0 sendo dispersada ao cubo do hemisfério de raio $R = D$ na equação (17):

$$\frac{dE}{dR} = -\frac{3E_0W}{2\pi R^3}. \quad (17)$$

Resolvendo a integral indefinida pelo método de separação de variáveis, quando $R = D$ temos:

$$E \pm A = -\frac{3E_0W}{2\pi} \left(-\frac{1}{2D^2} \pm C \right). \quad (18)$$

Uma possível primitiva da equação (17) esta representada na equação (18). A constante $\pm A$ representaria uma variação da energia dissipada dE não seria contemplado neste texto, sendo considerado zero. Modelos que envolvem a perda de energia devido ao tipo específico de explosivo ou barreiras retentoras podem considerar este valor e outras constantes ou variáveis, porém necessitam de maiores recursos para elaboração.

A constante $\pm C$ é proveniente da integração dos termos $1/D^3$ e aponta uma variação da distância ao epicentro e por isso será considerada zero, ou seja, assim como modelos para alto-explosivos é assumido que a distância que atingem as ondas de choque é a mesma em qualquer direção e para qualquer quantidade infinitesimal do material. Em situações análogas as descritas A , poderá ser diferente de zero. Logo:

$$E(D) = \frac{3E_0W}{4\pi D^2}. \quad (19)$$

Na equação (19) a energia é estimada fixando a energia específica E_0 que pode representar qualquer alto-explosivo, sua carga e a distância ao epicentro. Similar ao Impulso, a energia é dada em kJ/m^2 .

Quando a integral é resolvida em intervalos de distâncias, com $0 < d < D$, isto é, pode ser estimada a energia em intervalos através de integrais definidas usando a distância menor d :

$$\frac{dE}{dR} = -\frac{3E_0W}{2\pi R^3}.$$

Resolvendo com a distância R no intervalo $(E(d), E(D))$, com $d > 0$ obtemos:

$$dE = -\frac{3E_0W}{2\pi} \frac{dR}{R^3}.$$

Integrando ambos os lados da equação acima:

$$\begin{aligned} \int_{E(d)-E(D)}^0 dE &= -\frac{3E_0W}{2\pi} \int_d^D \frac{dR}{R^3}. \\ E(D) - E(d) &= -\frac{3E_0W}{4\pi} \left(-\frac{1}{D^2} + \frac{1}{d^2} \right). \\ E(D) - E(d) &= \frac{3E_0W}{4\pi D^2} - \frac{3E_0W}{4\pi d^2}. \end{aligned} \quad (20)$$

O sinal negativo na equação (20) é devido a energia ser liberada, pois $D > d$ e qualquer constante multiplicada por $1/D^2$ é menor que $1/d^2$. Quando D converge para o infinito, $E = E(D)$ converge para zero e a equação (20) resume-se a parcela energética distribuída a partir de uma distância d do epicentro, isto é:

$$E_{d \rightarrow \infty} = \frac{3E_0W}{4\pi d^2}. \quad (21)$$

Supondo que a máxima energia no epicentro é a que vai ser liberada têm-se $E = E(R = 0) = E_0W$ subtraída pela parcela liberada no diâmetro d metros até D metros obtêm-se a energia dissipada por área $E_{0 \rightarrow d}$, considerando a distância do epicentro ao raio d , isto é,

$$\begin{aligned} E_{0 \rightarrow d} &= E(0) - (E(D) + E(d)) = E_0W - \left(\frac{3E_0W}{4\pi D^2} - \frac{3E_0W}{4\pi d^2} \right). \\ E_{0 \rightarrow d} &= \frac{E_0W}{4\pi} \left(\frac{4\pi d^2 + 3}{d^2} - \frac{3}{D^2} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Quando D converge ao infinito o modelo descrito na equação (22) é aproximado pela equação (23).

$$E_{0 \rightarrow d} = \frac{E_0W(4\pi d^2 + 3)}{4\pi d^2}. \quad (23)$$

Substituindo o valor da distância para o valor da distância escalonada a energia dissipada pode novamente ser aproximada, porém de uma forma que não envolva a quantidade de explosivos, isto é,

$$\frac{dE}{dZ} = -\frac{3E_0}{2\pi Z^3} \rightarrow E(Z) = \frac{3E_0}{4\pi Z^2}. \quad (24)$$

Para distâncias e, intervalos do epicentro a Z , sendo z uma distância escalonada menor que Z , com $0 < z < Z$. Assim,

$$E(Z) - E(z) = \frac{3E_0}{4\pi Z^2} - \frac{3E_0}{4\pi z^2}. \quad (25)$$

Da mesma forma, para distâncias escalonadas muito grandes, a equação (25) é aproximada pela equação (26) e mede a parcela energética liberada a partir de uma distância escalonada qualquer, com $0 < z < Z$. Logo,

$$E_{z \rightarrow \infty} = \frac{3E_0}{4\pi z^2}. \quad (26)$$

Para mensurar a energia liberada a uma distância escalonada z do epicentro, com $0 < z < Z$ pode ser substituída a energia escalonada na distância $Z = 0$ que é $E(Z = 0) = E_0$. Assim,

$$E_{0 \rightarrow z} = \frac{E_0}{4\pi} \left(\frac{4\pi z^2 + 3}{z^2} - \frac{3}{Z^2} \right). \quad (27)$$

Quando Z converge para o infinito temos:

$$E_{0 \rightarrow z} = \frac{E_0(4\pi z^2 + 3)}{4\pi z^2}. \quad (28)$$

3.3.1 A quantidade de explosivos em função da energia liberada

Isolando W na equação (19) pode ser estimada a carga de explosivos, em kg, considerando a distância do epicentro e a energia requisitada nessa distância como sendo:

$$W(D, E) = \frac{4\pi D^2 E}{3E_0}. \quad (29)$$

Quando igualamos a equação (14) e a equação (29) e reordenamos, podemos estabelecer os valores energéticos através das variáveis quantidade de baixo-explosivos e distância, obtendo assim as equações (30) e (31):

$$E(Q, D) = \frac{3E_0 Q^{3/2}}{20148\pi D^2}. \quad (30)$$

$$Q(D, E) = \sqrt[3]{\left(\frac{2048\pi D^2 E}{3E_0} \right)^2}. \quad (31)$$

Através da equação (30) podemos estimar a quantidade energética baseada na quantidade de TNT sem necessariamente utilizar o método de equivalência ao TNT. Do contrário, poderia simplesmente adaptar o fator E_0 conforme o tipo de explosivo, multiplicando pelo fator equivalente e substituindo em modelos já existentes.

3.4 O cálculo das pressões e impulso na fase positiva

A sobrepressão incidente foi adaptada para baixo-explosivos. Substituindo a equação (14) em (10) obtemos:

$$\Delta P(Q, D) = \frac{0,01Q^{3/2}}{D^3} + \frac{0,13Q^{3/4}}{D^{3/2}}. \quad (32)$$

Usando o valor da sobrepressão medidos na expressão (32) podemos substituí-lo na equação (8) e obter:

$$P(t, Q, D, t_0, ta, P_0, b) = P_0 + \left(\frac{0,01Q^{3/2}}{D^3} + \frac{0,13Q^{3/4}}{D^{3/2}} \right) \left(1 - \frac{t - ta}{t_0} \right) e^{-b \left(\frac{t - ta}{t_0} \right)}. \quad (33)$$

Assim, como feito anteriormente, ocorrerá a determinação da medida do impulso na fase positiva através dos parâmetros já verificados e condições simplificadoras.

Substituindo os resultados obtidos com a equação (32) em (11) obtêm-se a equação (34):

$$I(E, Z, t_0, b) = \left(\frac{0,01Q^{3/2}}{D^3} + \frac{0,13Q^{3/4}}{D^{3/2}} \right) \frac{(t_0 e^{-b}) (be^b - e^{-b} + 1)}{b^2}. \quad (34)$$

4 A generalização dos modelos para uso com baixo-explosivos

Generalizando o algoritmo iniciado na equação (12) pode-se escrever:

$$kZ\sqrt[3]{W} = Z\sqrt{Q}. \quad (35)$$

O qual obtém:

$$W = \frac{Q^{3/2}}{k^3}. \quad (36)$$

$$Q = W^{2/3}k^2. \quad (37)$$

$$k = \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[3]{W}}. \quad (38)$$

Uma restrição ao valor de k de ver ser feita, para que a quantidade de baixo-explosivo seja sempre maior que a de alto-explosivo, pois afinal rendem menos e uma maior quantidade deve ser considerada para, pelo menos, igualar o fenômeno quando explodido. Partindo do fato que Q e W representam massas, com $Q > W$, deve-se chegar num valor já estabelecido para obtenção de um parâmetro: elevando ambos os lados da desigualdade na potência $3/2$ e dividindo por k^3 , chega-se num valor já visualizado na equação (36) reordenada e resulta em $k > \sqrt[3]{W}$.

Analogamente, conduzindo a restrição para que ela fique em função de Q , pela hipótese inicial: $Q > W$, elevando dois lados da desigualdade em $2/3$ e multiplicando por k^2 , obtêm-se a equação (37), que resulta no fato de que $k > \sqrt[3]{Q}$: Se por hipótese, $Q > W$, então $\sqrt[3]{Q} > \sqrt[3]{W}$.

Uma análise criteriosa de outras quatro desigualdades envolvendo k confirmam o resultados obtidos acima. Supondo $k < \sqrt[3]{Q}$ e $k < \sqrt[3]{W}$ substituindo na equação (35) apresenta a quantidade

de alto-explosivo estritamente maior que a quantidade de baixo-explosivos. Quando $k = \sqrt[6]{Q}$ e $k = \sqrt[6]{W}$ o desenvolvimento indica o valor de $Q = W$.

Assim, a interseção das soluções corretas $k > \sqrt[6]{W}$ e $k > \sqrt[6]{Q}$, indica que k deve ser sempre maior que a raiz sexta da quantidade de baixo-explosivos, pois mesmo sendo maior que a raiz sexta da quantidade de alto-explosivos, pode ser menor ou igual a raiz sexta de baixo-explosivos. Isso significa que o limite máximo, em kg, de baixo-explosivos, que o valor de k comporta sem gerar contradições, $Q < W$, é definido pelo valor de k^6 , sendo k qualquer valor real maior que 1. Nota-se que o valor de k no intervalo limita apenas a quantidade máxima de baixo-explosivo que se pode estimar através da quantidade de alto-explosivos, pelo método proposto, não sendo referente a qualidade do baixo-explosivo quando comparado ao alto-explosivo.

Cada explosivo comparado é testado empiricamente, corresponderá a um valor de k , e a quantidade, em kg, utilizada por este deverá respeitar a limitação do intervalo $Q : (1, k^6] \rightarrow \mathbb{R}$.

Quando k converge para 1, Q converge para W . Se $k=1$ representa o modelo idealizado na equação (19) para W .

O tempo de chegada para as diversas relações entre alto e baixo-explosivos pode ser descrito pela equação abaixo:

$$ta = 560k^{0,6} \frac{D^{1,40}}{a_0 Q^{0,3}}. \quad (39)$$

De maneira similar, o tempo de duração da fase positiva é relacionado pela equação (40):

$$t_0 = \frac{1,20Q^{0,50}D^{0,50}}{k^{0,5}}. \quad (40)$$

Substituindo a equação (36) na equação (19), resulta em mais uma variável para determinação do valor energético dissipado, respeitando os intervalos $E : (1, k^6] \rightarrow \mathbb{R}_+$, $D : (1, Z\sqrt{k^6}] \rightarrow \mathbb{R}_+$, $Q : (1, k^6] \rightarrow \mathbb{R}_+$ e $k \in (1, \infty)$:

$$E(Q, D, k) = \frac{3E_0Q^{3/2}}{4\pi k^3 D^2}. \quad (41)$$

A distância do epicentro ao raio d é estimada pela equação abaixo:

$$E_{0 \rightarrow d} = \frac{E_0Q^{3/2}}{4k^3\pi} \left(\frac{4\pi d^2 + 3}{d^2} - \frac{3}{D^2} \right). \quad (42)$$

Quando D converge ao infinito o modelo descrito na equação (42) é aproximado pela equação (23).

$$E_{0 \rightarrow d} = \frac{E_0Q^{3/2}(4\pi d^2 + 3)}{4k^3\pi d^2}. \quad (43)$$

Os modelos envolvendo distâncias escalonadas serão mantidos os mesmos já desenvolvidos anteriormente. Contudo, os intervalos e dissipação energética serão desenvolvidos para as três zonas de estrago e para a distância de um metro do epicentro. Para este feito, uma aproximação utilizada para π de 3,1415. As respostas são dadas em kJ/m^2 .

A a medição da energia dissipada, considerando a distância de um metro escalonado do epicentro e variando do epicentro até $z=1$ é feita pela equação abaixo:

$$E_{0 \rightarrow 1} = \frac{4520[(4 \times 3,1415 \times 1^2) + 3]}{4 \times 3,1415 \times 1^2} = 5.599, 10. \quad (44)$$

A energia por área incidindo na zona de estrago forte (variando do epicentro até $z=5$):

$$E_{0 \rightarrow 5} = \frac{4520[(4 \times 3,1415 \times 5^2 + 3)]}{4 \times 3,1415 \times 5^2} = 4.563,16. \quad (45)$$

A energia por área incidindo na zona de estrago moderada (variando do epicentro até $z=10$):

$$E_{0 \rightarrow 10} = \frac{4520[(4 \times 3,1415 \times 10^2 + 3)]}{4 \times 3,1415 \times 10^2} = 4.530,79. \quad (46)$$

A energia por área incidindo na zona de estrago fraca (variando do epicentro até $z=15$):

$$E_{0 \rightarrow 15} = \frac{4520[(4 \times 3,1415 \times 10^2 + 3)]}{4 \times 3,1415 \times 10^2} = 4.524,80. \quad (47)$$

Considerando o intervalo de $z = 5$ e $Z = 10$ a energia estimada por área é dada por:

$$E(10) - E(5) = \frac{3 \times 4520}{4 \times 3,1415 \times 10^2} - \frac{3 \times 4520}{4 \times 3,1415 \times 5^2} = -32,37. \quad (48)$$

$$E(15) - E(10) = \frac{3 \times 4520}{4 \times 3,1415 \times 15^2} - \frac{3 \times 4520}{4 \times 3,1415 \times 10^2} = -6,00. \quad (49)$$

Por último, a parcela energética máxima que dissipada na zona de estragos nula (com $Z > 15$):

$$E_{z \rightarrow \infty} = \frac{3 \times 4520}{4 \times 3,1415 \times 15^2} = 4,80. \quad (50)$$

Percebe-se que $E_{0 \rightarrow 15} = E_0 + E_{z \rightarrow \infty}$ implicando que $E_{z \rightarrow \infty} = E_{0 \rightarrow 15} - E_0$. Conforme teoria aplicada e desenvolvida esta parcela energética é inofensiva ao ser humano e pode ser inferior a mínima energia por área associada as variações de pressão ambiente mínimas citada por Silva (2007) como responsáveis por lesões a seres humanos.

A sobrepressão fica representada pela equação (51) quando a equação (36) é substituída na equação (10) e dividida por 1000, limitada ao intervalo: $\Delta P : (1, k^6] \rightarrow \mathbb{R}_+$, $D : (1, Z\sqrt{k^6}] \rightarrow \mathbb{R}_+$, $Q : (1, k^6] \rightarrow \mathbb{R}_+$ e $k \in (1, \infty)$.

$$\Delta P(Q, k, D) = 6,78 \frac{Q^{3/2}}{k^3 D^3} + 2,94 \frac{Q^{3/4}}{k^{3/2} D^{3/2}}. \quad (51)$$

O pico de sobrepressão pode ser definido em função da energia por área que será inserida, isolando $Q^{3/2}/k^3$ na equação (41) e substituído na equação (52). Como inicialmente foi desenvolvida com unidade de quilo Joule, a energia por unidade de área deverá ser inserida com estas unidades.

$$\Delta P(E, D) = 9,04 \frac{\pi E}{E_0 D} + 3,39 \frac{(\pi E)^{0,5}}{(E_0 D)^{0,5}}. \quad (52)$$

Quando inserido o valor da parcela energética de $E_{z \rightarrow \infty} = 4,80 \text{ kJ/m}^2$ na equação (52) pode ser estimado o pico de pressão quando distanciado a 15 metros escalonados do epicentro.

$$\Delta P(E, D) = 9,04 \frac{3,1415 \times 4,80}{4520 \times 15} + 3,39 \frac{(3,1415 \times 4,80)^{0,5}}{(4520 \times 15)^{0,5}} = 0,05. \quad (53)$$

Como visto, a distância escalonada de 15 metros apresenta um pico de pressão $\Delta P = 0,05$ bar, menor que o 0,07 bar apresentado por Silva (2007).

Agora podem ser obtidos os valores da pressão conforme o tempo t , substituindo a equação (51) em (8), sendo visualizada na equação (54). Os intervalos são $D \in (1, Z\sqrt{k^6})$, $Q \in (1, k^6)$, $k \in (1, +\infty)$, t, b, ta e $t_0 \in \mathbb{R}_+$.

$$P(P_0, k, D, Q, ta, t_0, b, t) = P_0 + \left(6,78 \frac{Q^{3/2}}{k^3 D^3} + 2,94 \frac{Q^{3/4}}{k^{3/2} D^{3/2}} \right) \left(1 - \frac{t - ta}{t_0} \right) e^{-b \left(\frac{t - ta}{t_0} \right)}. \quad (54)$$

Assim como elaborado anteriormente, o impulso pode ser determinado em função de k . Substituindo a equação (51) na equação (11) obtêm-se a equação (55).

$$I(Q, k, D, t_0, b) = \left(6,78 \frac{Q^{3/2}}{k^3 D^3} + 2,94 \frac{Q^{3/4}}{k^{3/2} D^{3/2}} \right) \frac{(t_0 e^{-b}) (b e^b - e^{-b} + 1)}{b^2}. \quad (55)$$

Assim, a equação (55) é limitada pelo intervalo: $D \in (1, Z\sqrt{k^6})$, $Q \in (1, k^6)$, $b \in \mathbb{R}_+$, $t_0 \in \mathbb{R}_+$ e $k \in (1, +\infty)$.

5 Considerações finais

As definições utilizadas sobre o fenômenos explosão e sobre os materiais componentes da reação ajudaram na composição dos modelos. Fatores como quantidade de oxigênio na reação influenciam a determinação da energia específica, assim como a altitude, o tipo de explosivo e o relevo alteram o tipo de onda de choque liberada. É visível ainda que há divergência entre autores sobre a dinâmica da explosão, desde a composição de materiais, reação química e dissipação energética. A divergência entre os pesquisadores se amplia conforme se torna complexa mensuração da dissipação energética.

A nova proposta para mensuração da sobrepressão sugere uma modificação do método comparativo em equivalência a quantidade de TNT e propõe uma relação não linear na comparação destes quantitativos. Para mesmas quantidades de baixo-explosivos, os dois métodos estimam distintos valores de sobrepressão, a uma mesma distância.

A amplitude do pico de pressão entre os métodos também difere, de modo que no modelo proposto há uma menor variação da sobrepressão, enquanto que no método que usa equivalência o baixo-explosivo apresenta comportamento característico dos alto-explosivos, o que gera um viés conceitual, dada velocidade da queima e expansão gasosa dos materiais componentes dos dois tipos de explosivos.

A medição da sobrepressão em função da energia dissipada pela área permite estimar a área aberta a ser varrida. No caso de explosões em aglomerações, os seres humanos acabam fazendo o papel de barreira e os impactos nestes podem ser estimados pela relação entre pico de sobrepressão e energia, e devem ser admitidos a reflexão das ondas e o arremesso de projéteis devido a objetos danificados ou soltos.

A obtenção de um pico de sobrepressão inferior ao mínimo suportado por seres humanos (que não cause lesões significativas) é um indício que a dissipação energética esta sendo aproximada de maneira correta e corrobora com os modelos usados para medir a distância mínima quando detonados baixo-explosivos.

Devido as limitações impostas pela não linearidade de k , uma relação empírica com distância escalonada e Q elevado na potência de $1/3$ pode ser obtida. No entanto, a legislação burocrática

e os custos de um projeto de pesquisa podem inviabilizar um projeto de pesquisa nesse porte.

O método para estimação da energia liberada em intervalos próximos ao epicentro da explosão pode ser usado para delimitar a energia incidente, mas deve ser utilizado com cautela devido a complexidade do fenômeno nessas distâncias.

Estes valores também podem ser utilizados em incêndios de fábricas que utilizam produtos pirotécnicos, onde a quantidade de explosivos estocada é muito grande, assim como em artefatos caseiros feitos com materiais com comércio liberado.

Recomenda-se a mensuração dos valores com a utilização de softwares específicos e máquinas de alto rendimento para apuração de resultados. Além disso, a análise da sensibilidade dos fatores k , D e Q , assim como a exploração multivariada dos dados obtidos em simulações utilizando técnicas estatísticas podem explicar as variações mais importantes no modelo.

6 Referências

- [1] BARROS, Márcio Luiz de Siqueira Campos. **Modelo de aferição da velocidade de partículas através do parâmetro energético**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2008.
- [2] CASAGRANDE, André Schaan. **Estudo de cargas impulsivas com ênfase em explosões: estratégias de análises utilizando métodos numéricos**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [3] COSTA NETO, Murilo Limeira da. **Um estudo de fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília/ DF, 2015.
- [4] DEWES, Vinícios Munari. Estimação da dissipação energética e da sobrepressão com uso de baixo-explosivos. In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 4., 2017, Bauru. **Caderno de trabalhos e resumos**. Bauru: Unesp, Faculdade de Ciências, 2017. p. 131-138. Disponível em: <<http://www.fc.unesp.br/#!/departamentos/matematica/eventos2341/ermac/cadernos-de-trabalhos-completos-e-resumos/>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- [5] GOEL, Manmohan Dass et al. An abridged review of blast wave parameters. **Defence Science Journal**, v. 62, n. 5, p. 300-306, 2012.
- [6] HUSSEIM, Assal T. Non-linear analysis of SODF system under blast Load. **European Journal of Scientific Research**, v. 45, n. 3, p. 430-437, 2010.
- [7] GUZAS, Emily L.; EARLS, Christopher J. Air blast load generation for simulating structural response. **Steel and Composite Structures**, v. 10, n. 5, p. 429-455, 2010.
- [8] LIMA, Elon Lages. **Curso de análise**. 11. ed. Rio de Janeiro: Associação do Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, 2011. v. 1, p. 99-160.

- [9] MORAIS, Juarez Lopes de. **Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos**. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [10] NEGRINI NETO, Osvaldo. Análises físicas e químicas de explosivos químicos. In: ARAGÃO Ranvier Feitosa (Coord). **Incêndios e explosivos: uma introdução a engenharia forense**. Campinas: Millenium Editora, 2010. p. 398-423.
- [11] SANTA CATARINA (Estado). Polícia Militar de Santa Catarina. **Procedimento em ocorrências com bombas e artefatos explosivos** -POP 701.3. Disponível em: <<https://framework.pm.sc.gov.br/intranet/>>. Acesso em: 15 maio 2016.
- [12] SILVA, Wilson Carlos Lopes. **Blast**: efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- [13] SILVA, Wilson Carlos Lopes; IHA, Koshun; FERREIRA, Paulo Cesar Mischow. Dimensionando explosivos em cabeça de guerra para o efeito de sopra. In: SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA, 9., 2007, São José dos Campos. **Anais...** Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://www.sige.ita.br/anais/IXSIGE/Artigos/AA_01.pdf>. Acesso em: 15 maio. 2016.
- [14] ULLAH, Aleem et al. Review of analytical and empirical estimations for incident blast pressure. **KSCE Journal of Civil Engineering**. v. 21, n. 6, p. 2211-2225, 2017.
- [15] VALENÇA, Ubirajara da Silva et al. **Engenharia dos explosivos: um enfoque dual**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia; Fundação Ricardo Franco, 2013.

Artigo recebido em maio 2017 e aceito em nov. 2017.