

Dimensionando Explosivos em Cabeça de Guerra para o Efeito de Sopro

Sizing Explosives in War Head for Blast Effect

*Major Especialista Armamento Wilson Carlos Lopes Silva^{1,2}

Koshun Iha³

Paulo Cesar Miscow Ferreira^{1,4}

1 Divisão de Sistemas de Defesa do Instituto de Aeronáutica do Espaço (IAE)

2 Mestre em Armamento Aéreo - Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais - PPGAQ (ITA)

3 Professor Doutor do Departamento de Química do ITA

4 Engenheiro Mecânico - Mestre (ITA)



RESUMO

A detonação de um explosivo resulta na produção e na conseqüente liberação violenta de gases comprimidos. A energia produzida propaga-se rapidamente através do meio (ar ou água), provocando variações de pressão, formando uma onda explosiva, que se propaga com velocidade superior à do som. Esta frente de onda, com elevada pressão dinâmica e velocidade supersônica, é conhecida como onda de choque e confere à detonação um enorme poder de ruptura. O efeito terminal desta onda de choque é denominado Sopro ou *blast effect*. Este trabalho estuda o efeito de sopro gerado por uma onda de choque sobre alvos militares, descreve a relação entre pressão de detonação e massa de explosivo, visando otimizar a quantidade de explosivos, bem como a sua distância ao alvo que se pretende neutralizar. Conhecendo-se, através de métodos e equações matemáticas, a pressão gerada pela onda de choque resultante da detonação de certa quantidade de explosivo químico a uma determinada distância do foco, bem como os limites suportados por determinadas estruturas, é possível, com o relacionamento desses parâmetros, elaborar tabelas dinâmicas em planilhas eletrônicas, gerando gráficos de rápida leitura que possam auxiliar no dimensionamento da massa de explosivos para o efeito de sopro em cabeças de guerra para a provocação de danos em um alvo específico.

Palavras-chaves: Cabeça de guerra. Efeitos da pressão. Explosivos. Onda de choque.

Recebido: 09/04/2008

Revisado: 14/07/2008

Aceito: 29/07/2008

***Autor:** Major Especialista Armamento Wilson Carlos Lopes Silva, Mestrado em Armamento Aéreo - Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais - PPGAQ, Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais. (ITA - 2007). **Contatos:** Divisão de Sistemas de Defesa do IAE; Instituto de Aeronáutica e Espaço; Divisão de Sistemas de Defesa; Subdivisão de Ensaios; Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Campus do CTA - Vila das Acácias; CEP 12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil; tel: (12) 3947-4733; Fax (12) 3947-4797; e-mail: wilcls@gmail.com.



ABSTRACT

The detonation of an explosive results in the production and the consequent violent release of compressed gases. The produced energy spreads quickly through the way (air or water), provoking pressure variations, forming an explosive wave, that if propagates with superior speed of the sound. This front of wave, with raised ram pressure and supersonic speed, is known as shock wave and confers the detonation an enormous one to be able of rupture. The terminal effect of this shock wave is called blast effect. This work studies the effect blast generated for a shock wave on military targets, describes the relation between detonation pressure and explosive mass, aiming at to optimize the amount of explosives, as well as its distance to the target that if it intends to neutralize. Knowing themselves, through methods and mathematical equations, the pressure generated for the wave of resultant shock of the detonation of certain amount of chemical explosive to one determined distance of the focus, as well as the limits supported for determined structures, it is possible, with the relationship of these parameters, to elaborate dynamic tables in electronic spread sheets, generating graphical of fast reading that can assist in the sizing of the explosive mass for the effect of blow in heads of war for the provocation of damages in a specific target.

Keywords: Warhead. Blast effect. Explosives. Shock wave.

INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, tem-se cada vez mais em pauta o assunto “explosão”, nas mais diversas áreas de atuação, principalmente nas de segurança pública e militar, e os objetivos desse interesse são quase sempre os mesmos. Estudar e conhecer o fenômeno da explosão, para poder avaliar riscos e danos, e desenvolver formas de proteção ao ser humano e a todos os bens que ele possa usufruir em seu meio ambiente. Já no aspecto militar, o principal interesse é otimizar os requisitos de força para neutralizar alvos específicos.

Este artigo sugere o uso de equações matemáticas que definam a vulnerabilidade dos alvos ao efeito de sopro com a finalidade de dimensionar uma cabeça-de-guerra e seu explosivo para a neutralização de tais alvos.

As cabeças-de-guerra são invólucros carregados com explosivos e conferem aos mísseis, foguetes ou munições, de um modo geral, a capacidade de destruir alvos. Em síntese, é a razão da existência de qualquer artefato bélico. É a sua carga útil, por isso é inquestionável a necessidade do conhecimento mais aprofundado sobre o assunto.

Conhecendo-se a pressão gerada pela propagação da onda de choque resultante da detonação de um explosivo químico a uma determinada distância do foco, bem como os limites suportados por determinadas estruturas, é possível, relacionando-se esses parâmetros,

elaborar tabelas dinâmicas em planilhas eletrônicas, gerando-se gráficos de rápida leitura e que possam auxiliar no dimensionamento de uma cabeça-de-guerra que cause no alvo o dano desejado, de acordo com a distância máxima entre o ponto de detonação e o alvo.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 ENERGIA LIBERADA NA DETONAÇÃO DE EXPLOSIVOS SÓLIDOS

Em termos de energia liberada na detonação, é comum admitir que ela é dependente apenas da massa de explosivo utilizado (W).

Devido à grande diferença de densidade dos explosivos sólidos em relação às misturas gasosas, para cargas semelhantes, o volume torna-se muito menor. Isso permite a consideração de carga concentrada nestas situações, gerando, então, uma onda de pressão esférica no ar. Com isso, o volume atingido pelos efeitos da explosão no tempo vai depender da distância ao cubo (R^3) até o epicentro.

A partir desses argumentos, determina-se uma distância em escala (Z), a qual representa uma Lei de escala para explosivos sólidos, conhecida como “Hopkinson-Cranz law of blast scaling” (KINNEY; GRAHAM, 1985):

$$Z = R / W^{1/3}$$

Para qualquer variação de distância e quantidade de explosivo, desde que mantidos o explosivo e a mesma distância em escala, produzir-



se-á efeito semelhante de sobrepressão sobre um alvo (BAKER, 1983). Reforça-se aqui a hipótese de propagação esférica da onda de choque no ar.

Como essa lei de escala e outras considerações estão bem definidas, apresenta-se uma regra geral para a definição da distância mínima segura, utilizando os mesmos fundamentos (KINNEY; GRAHAM, 1985):

$$r_{seg} = 120 W^{1/3}$$

Onde r_{seg} é uma distância radial [m] do local do centro da explosão, mínima para garantir a segurança de pessoas e estruturas. Serve como uma rápida indicação para casos experimentais sem a necessidade de cálculos mais aprofundados.

Com a lei de escala definida, passa-se a utilizar o TNT como referência para explosivos devido a sua boa reprodutibilidade em ensaios de detonação e, principalmente, quanto à sua constituição química pura (KINNEY; GRAHAM, 1985). Com isso, os estudos e publicações passaram a se referir sempre como “massas equivalentes” a um “padrão”, o TNT, utilizando-se então W_{TNT} [kg] como símbolo e unidade, respectivamente. A tabela 1 contém alguns desses outros explosivos com suas equivalências de massas. Outros parâmetros de caracterização de explosões também podem utilizar equivalências relacionadas ao TNT, como o “impulso equivalente”, por exemplo.

Tabela 1 - Relação de Alguns Explosivos com suas Equivalências em TNT

Nome do Explosivo	Energia Específica Mássica Q_x (kJ / Kg)	TNT Equivalente (Q_x / Q_{TNT})
Amatol 80/20 (nitrato de amônio / TNT)	2650	0,586
RDX	5360	1,185
Nitroglicerina (Líquida)	6700	1,481
PETN	5800	1,282
Pentolite 50/50 (PETN / TNT)	5110	1,129
Tetril	4520	1,000
Dinamite de Nitroglicerina	2710	0,600

Fonte: SMITH; HETHERINGTON, 1994.

1.2 ONDA DE CHOQUE

Quando um explosivo é detonado no ar, a energia é liberada em torno do material explosivo forçando o volume a se expandir, causando o “*shock up*” que forma a onda de choque (CHAPMAN, 1995).

Em geral, essa região de pressão alterada, iniciada normalmente em forma hemisférica, desloca-se radialmente do centro da explosão (epicentro) com uma velocidade que supera à do som e assume a forma apresentada na figura 1, na medida em que se afasta desse ponto central. Esta frente de onda com velocidade supersônica é conhecida como onda de choque.

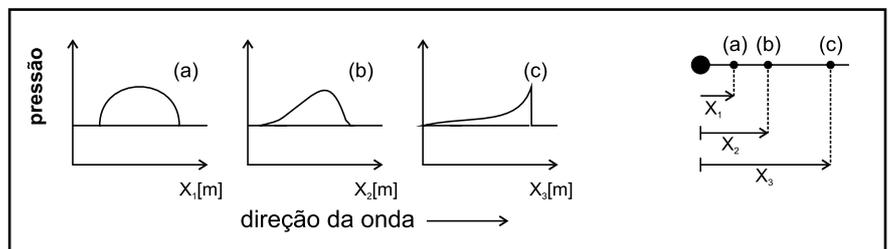


Figura 1 - Desenvolvimento da Onda de Choque Gerada por uma Detonação
Fonte: KINNEY; GRAHAM, 1985.

1.3 PARÂMETROS DA ONDA DE CHOQUE

A onda de choque pode ser caracterizada através de parâmetros independentes que são, conforme Kinney e Graham (1985):

a) Tempo de chegada (t_a ou *arrival time*) é o tempo que a onda de choque leva, contado a partir do instante da ignição, para atingir um determinado ponto a certa distância da origem da explosão;

b) Tempo de duração ou *duration time* [t_d , t_0 ou t_0^+] da fase positiva, que é o período que vai do início da passagem da onda de choque pelo ponto

estudado até o instante em que a pressão nele decai pela primeira vez até o valor da pressão atmosférica, antes de entrar no período de pressão subatmosférica. É o aspecto da capacidade da onda de sopro em causar danos. A força deve agir durante um tempo suficiente para vencer a inércia e deformar o alvo suficientemente para causar o dano necessário;



c) Período de pressão subatmosférica é aquele durante o qual a pressão cai abaixo da atmosférica devido à inércia dos gases em expansão, também chamado de fase negativa da onda de choque;

d) Pico de pressão (sobrepessão) [P_{so} , P_{so+} , P_0] é a força máxima exercida pela onda de sopro contra o alvo. É igual à quantidade de pressão exercida multiplicada pela área sobre a qual atua. Para causar danos, o sopro deve ser grande o suficiente para vencer a resistência estrutural do alvo e deformá-lo. Esse valor, associado ao tempo de duração da fase positiva e ao formato da onda de choque, será usado para calcular o impulso por unidade de área durante a fase positiva. Para uma onda com o formato da mostrada na figura 2, esta área seria aproximadamente $(t_0 \cdot P_{so+}) / 2$; e

e) Impulso por unidade de área [I/A] - o **impulso do sopro**. Essas duas grandezas combinadas proporcionam os efeitos destrutivos nas estruturas. É claro que cada tipo de estrutura necessita de valores diferentes para serem destruídas. Os vidros requerem uma curta duração da fase positiva e moderado pico de pressão. As paredes são demolidas através de um pico de pressão moderado e uma longa duração na fase positiva. Os estudos nessa área são conhecidos como estudos de letalidade. A partir de modelos matemáticos ou ensaios, são obtidas

relações entre o tipo de dano desejado e os valores de pico e duração da fase positiva.

A figura 2 ilustra com mais detalhes a nomenclatura e a seqüência cronológica das fases de passagem de uma onda de choque generalizada.

Onde o t_A é o tempo de chegada da onda de choque e, a partir daí, segue a forma da onda de choque já citada. Esse tempo vai depender basicamente da distância (do ponto ao epicentro), da turbulência do ambiente e da velocidade de propagação da onda.

2 MODO DE REPRESENTAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE

Diversos são os métodos utilizados atualmente para estimar a função pressão-tempo, gerada a partir de uma explosão (principalmente explosões no ar) a uma determinada distância do epicentro da mesma. Alguns destes levam em conta o efeito da turbulência dos gases, o local da explosão, a riqueza da mistura, entre outros fatores. Outros fazem considerações simplificadoras que reduzem sensivelmente o tempo para obtenção da resposta. Com o uso cada vez mais abrangente de técnicas computacionais, os métodos numéricos também devem ser citados, os quais apresentam excelentes resultados em tempos cada vez menores.

Para a obtenção das pressões geradas a partir de uma detonação de um explosivo sólido, as equações que fornecem os parâmetros têm como variável de entrada a distância em escala.

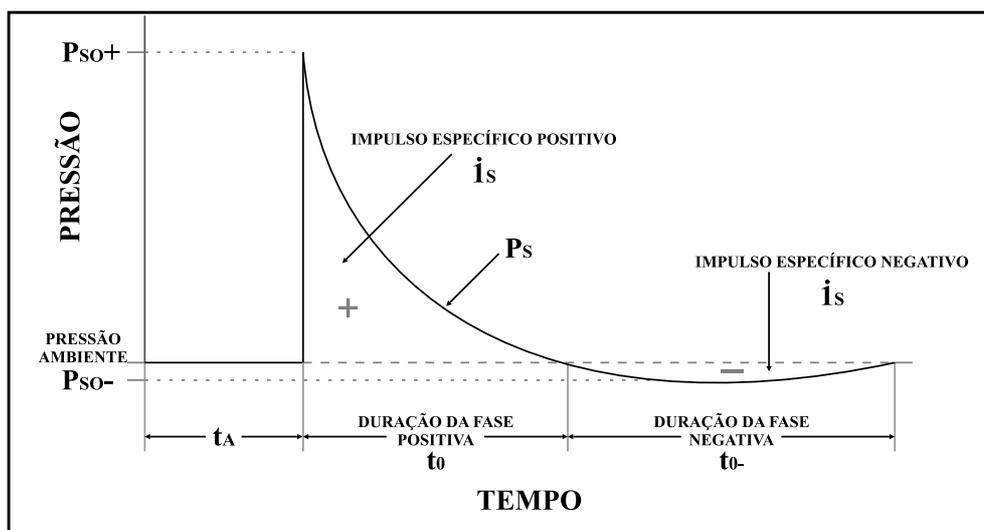


Figura 2 - Comportamento da Pressão no Tempo para uma Onda Explosiva Genérica do Ponto de Vista de um Observador ou Alvo
Fonte: BAKER, 1983.



Para explosões químicas, Kinney e Graham (1985) fornecem equações para determinação desses parâmetros, sendo para ambientes abertos as seguintes:

$$\frac{P_{so}}{P_a} = \frac{808 \left[1 + (Z/4,5)^2 \right]}{\sqrt{1 + (Z/0,048)^2} \sqrt{1 + (Z/0,32)^2} \sqrt{1 + (Z/1,35)^2}}$$

$$W = 1,2 \times (F \times CF \times C)$$

onde

F = Fator de eficiência do explosivo em relação ao TNT;

C = Massa do explosivo em questão;

CF = Fórmula de Fano (fator de casco);

1,2 = Fator para máximo efeito direcional.

Sendo:

$$CF = 0,6 + 0,4 \times \left(1 + \frac{2}{C/M} \right)^{-1}$$

A Fórmula de Fano considera que parte da energia química do explosivo liberada na detonação é utilizada para romper o invólucro metálico. Portanto, deve-se considerar o efeito de confinamento. Nessa fórmula, M = massa metálica do invólucro e C = massa do explosivo.

3 ESTIMATIVA DE EFEITOS

3.1 EFEITO DE CRATERA

O diâmetro médio de uma cratera causada pela detonação de um explosivo é dado por:

$$d = 0,8 \cdot W^{1/3}$$

Essa relação foi obtida experimentalmente (estudo estatístico de cerca de 200 explosões acidentais), onde W = massa de explosivo em kilogramas de TNT e d = diâmetro da cratera em metros (KINNEY; GRAHAM, 1985).

Essa expressão acima admite desvios de até 1/3. Para explosões abaixo da superfície, o diâmetro da cratera aumenta inicialmente com a profundidade da explosão, atinge um máximo e, então, diminui substancialmente.

3.2 ESTIMATIVA PARA RUPTURA DE PAREDES DE CONCRETO (DETONAÇÃO EM CONTATO COM A PAREDE)

A quantidade de explosivo para romper paredes de concreto é dada por:

$$W = \beta \cdot r^{1/3}$$

Relação Empírica onde W = quantidade de explosivo em kg TNT (quantidade mínima de explosivo necessária para abrir a parede), b = coeficiente de ruptura, que para concreto comum é igual a 15 kg TNT/m³ e para concreto reforçado vale 27 kg TNT/m³ e r = espessura da parede em metros.

3.3 CRITÉRIO DE DESTRUIÇÃO: AERONAVES, CAMINHÃO E ANTENAS

Westine (1972) definiu, através de experimentos, o uso de equações na estimativa de vulnerabilidade de alguns alvos ao efeito de uma onda de choque, sendo o resumo dos resultados apresentado a seguir para três alvos, como exemplos:

Aeronave (caça):

$$R = \frac{8,748 \cdot W^{1/3}}{\left(1 + \frac{2498}{W} \right)^{1/6}}$$

Caminhão:

$$R = \frac{6,481 \cdot W^{1/3}}{\left(1 + \frac{45,06}{W} + \frac{6045}{W^2} \right)^{1/6}}$$

Antena:

$$R = \frac{6,295 \cdot W^{1/3}}{\left(1 + \frac{103,8}{W^2} \right)^{1/6}}$$



4 EFEITO DA ONDA DE CHOQUE SOBRE ESTRUTURAS

4.1 MECANISMO DE DANO DO EFEITO DE SOPRO

A maior parte dos danos resultantes da detonação de um alto explosivo ou de uma explosão nuclear é devida, tanto direta como indiretamente, à **onda de sopro** (onda de choque) que acompanha a detonação.

A detonação de altos explosivos pode gerar pressões de até 700 ton / pol² e temperaturas da ordem de 3000° a 4500° C, antes da ruptura do corpo.

Aproximadamente metade da energia dos gases produtos da detonação é utilizada para expandir o corpo em cerca de 1,5 vezes o seu diâmetro antes da fragmentação e ejeção dos fragmentos; a energia restante é gasta para comprimir o meio circundante e é a responsável pelo efeito de sopro (*blast*). Destruição ocorre através da geração de uma sobrepressão, de tal forma que o alvo não resiste estruturalmente.

Fatores tais como a resistência estrutural do alvo, sua resiliência (capacidade de se deformar e retornar ao estado original), seu tamanho e sua orientação em relação à detonação influenciam o efeito de sopro sobre a estrutura. O sopro deve ser concentrado e precisamente direcionado contra os elementos vitais para produzir um dano significativo.

A tabela 2 exemplifica a variação de pressão, causada pela onda de choque, com os respectivos danos sofridos pelas diversas estruturas.

5 CABEÇAS DE GUERRA

A cabeça de guerra é a carga útil de todo artefato bélico propulsado ou lançado. É constituído de um invólucro, geralmente metálico, carga explosiva, espoleta e um mecanismo de segurança e armação. O seu invólucro e a carga explosiva constituem os agentes destrutivos que efetivamente causam danos ao inimigo. Pode apresentar os efeitos terminais de sopro, fragmentação, carga oca, incendiário, etc. O foco deste artigo é sobre o efeito de sopro (*blast effect*).

Seu projeto leva em consideração vários fatores como peso permissível, tamanho e forma do compartimento destinado à cabeça de guerra, velocidade do míssil (foguetes, bomba), erro de guiamento, tamanho, forma e velocidade do alvo.

Os dados obtidos pelas equações são transferidos para gráficos da distância do foco da detonação até o alvo versus a massa de explosivo detonado.

O gráfico formado pela curva R-W representa um nível constante do dano para um determinado alvo, de acordo com o relacionamento entre a quantidade de explosivo e a distância do alvo.

Devido ao pouco espaço disponível na formatação deste artigo, os gráficos apresentados a seguir serão meramente ilustrativos.

Tabela 2 – Efeito da onda de choque sobre estruturas

DANO	Variação de Pressão	
	Bar	psi
Quebra de janelas	0,01 - 0,015	0,15 - 0,22
Danos mínimos em construções	0,035 - 0,075	0,52 - 1,12
Danos em painéis metálicos	0,075 - 0,125	1,12 - 1,87
Falha de painéis de madeira (construções)	0,075 - 0,15	1,12 - 2,25
Falha em paredes de tijolos	0,125 - 0,2	1,87 - 3
Rompimento de tanques de refinarias	0,2 - 0,3	3 - 4,5
Danos em edifícios (estruturas metálicas)	0,3 - 0,5	4,5 - 7,5
Danos em estruturas concretadas	0,4 - 0,6	6,0 - 9,0
Destruição total da maioria das construções	0,7 - 0,8	10,5 - 12

Fonte: KINNEY; GRAHAM, 1985.



Na figura 3 é visualizada a curva *isodamage*, que representa um único tipo de dano, neste caso destruição, de três alvos distintos, conforme equações do terceiro item 3 do capítulo 3.

Através de interpolação, pode-se deduzir imediatamente qual seria a distância máxima do foco da detonação para se destruir um caminhão com uma massa M de explosivo ou vice-versa. Da mesma forma pode-se calcular a massa explosiva necessária a um artefato baseado na precisão com que atingirá ou se aproximará do alvo.

Deve-se lembrar que se está considerando somente o efeito terminal de sopro; o efeito de fragmentação não está sendo abordado.

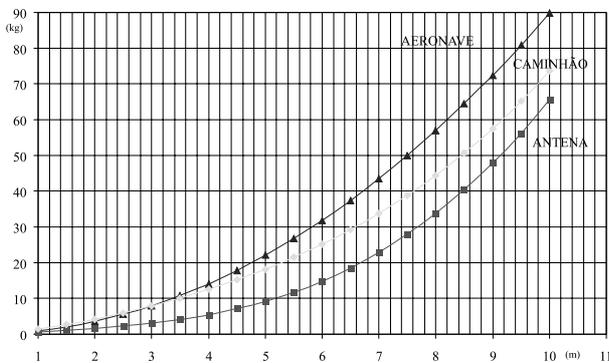


Figura 3 – Critério de Destruição de Aeronaves, Caminhões e Antenas
Fonte: O Autor.

Da equação, obtém-se a curva da figura 4 com o efeito de crateramento, podendo-se estimar a quantidade de explosivo necessária para atender à finalidade desejada como interdição de pista clandestina de pouso, estradas, criação de trincheiras, etc.

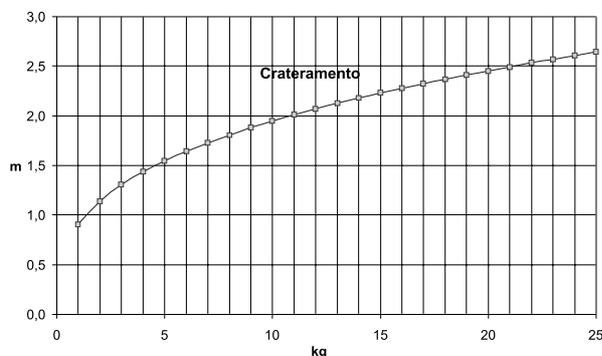


Figura 4 – Estimativa de Efeito de Crateramento.
Fonte: O Autor.

A figura 5, baseada na tabela 2 e nas equações do capítulo 2, representa três diferentes tipos de danos causados pela onda de choque sobre uma estrutura. Observa-se que, para uma mesma quantidade de explosivo, a severidade do dano é inversamente proporcional à distância do foco.

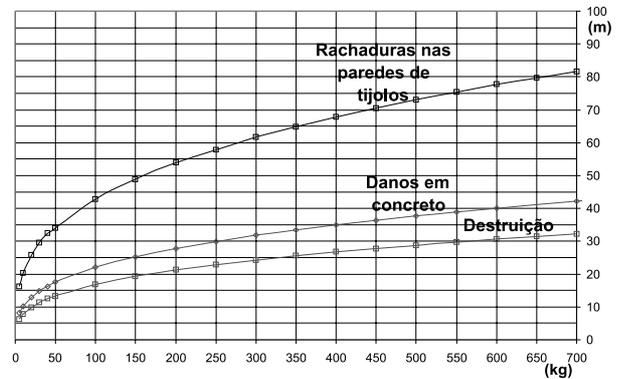


Figura 5 – Estimativa de Danos Sobre uma Edificação
Fonte: O Autor.

A figura 6 representa a curva, gerada pela equação do segundo item do capítulo 3, para romper paredes de concreto comum e reforçado. Para o efeito esperado, é necessário que a detonação do explosivo ocorra em contato com a parede a ser rompida.

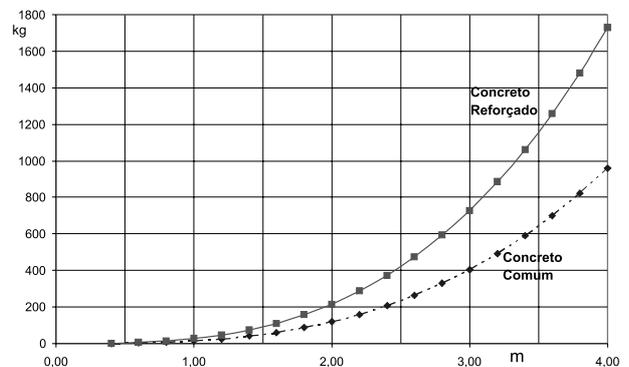


Figura 6 – Estimativa para ruptura de paredes de concreto comum e reforçado
Fonte: O Autor.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma exploração das técnicas numéricas existentes, as quais permitem simular diferentes aspectos relacionados a carregamentos impulsivos enfatizando as ondas de choque geradas em detonações.



Modelos numéricos são ferramentas que poderão auxiliar de forma eficaz na modelagem de uma solicitação explosiva e na simulação da resposta das estruturas frente a estes tipos de solicitações.

Assim, será possível demonstrar que, através de técnicas numéricas, poderemos obter respostas que auxiliem a resolver problemas relacionados com o dimensionamento de explosivos na cabeça de guerra

para se atingir o dano desejado em determinados alvos sob o efeito de sopro. Tais respostas devem ser apresentadas como planilha eletrônica e gráficos conforme os modelos apresentados neste artigo.

Cabe salientar que problemas destes tipos são complexos, razão pela qual os modelos numéricos a serem utilizados deverão ser calibrados com ensaios ou com modelos analíticos mais simples.

REFERÊNCIAS

BAKER, W. E. et al. **Explosion hazards and evaluation**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983

CHAPMAN, T. C.; ROSE, T. A.; SMITH, P. D. Reflected blast wave resultants behind cantilever walls: a new prediction technique. **International Journal of Impact Engineering**, Pergamon, USA, v.16, p. 397-403, 1995.

CRANZ, C. **Lehrbuch der ballistik**. Berlin: Springer-Verlag, 1926.

KINNEY G. F.; GRAHAM, K. J. **Explosive shocks in air**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1985.

WESTINE, Peter S. **R-W plane analysis for vulnerability of targets to air blast**. San Antonio, Texas: Southwest Research Institute, 1972.

SMITH, P.D.; HETHERINGTON, J.G. **Blast and ballistic loading of structures**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.

