

# DIMENSIONANDO EXPLOSIVOS EM CABEÇA DE GUERRA PARA O EFEITO DE SOPRO

Wilson Carlos Lopes Silva, Koshun Iha e Paulo Cesar Miscow Ferreira.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA – Praça Mal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – São José dos Campos – SP CEP 12228-900.

**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 a do som. Esta frente de onda, com elevada pressão dinâmica e velocidade supersônica, é conhecida como onda de choque e confere a 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** — Efeito de sopro. Onda de choque. explosivo. Cabeça de guerra. blast.

## I. 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.

### A. Objetivo

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.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Energia liberada na detonação de explosivos sólidos

Em termos de energia liberada na detonação, é comum admitir que 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”. [3] e [4] :

$$Z = R / W^{1/3} \quad (1)$$

onde, para qualquer variação de distância e quantidade de explosivo, desde que mantidos o explosivo e a mesma *distância em escala*, produzirá efeito semelhante de sobrepressão sobre um alvo [1]. Reforça-se aqui a hipótese de propagação esférica da onda de choque no ar.

Como esta 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 [5]:

$$r_{\text{seg}} = 120 W^{1/3} \quad (2)$$

onde  $r_{\text{seg}}$  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 [5]. Com isto, 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 I 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 I - RELAÇÃO DE ALGUNS EXPLOSIVOS COM SUAS EQUIVALÊNCIAS EM TNT [8].

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 (Cyclonite)	5360	1,185
Nitroglicerina (Líquida)	6700	1,481
PETN	5800	1,282
Pentolite 50/50 (PETN / TNT)	5110	1,129
Tetryl	4520	1,000
Dinamite de Nitroglicerina	2710	0,600

## B. 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 [2].

Em geral, esta região de pressão alterada, iniciada normalmente em forma hemisférica (Fig. 2.1a), desloca-se radialmente do centro da explosão (epicentro) com uma velocidade que supera a do som e assume a forma apresentada na Fig. 2.1c, na medida que se afasta deste ponto central. Esta frente de onda com velocidade supersônica é conhecida como onda de choque.

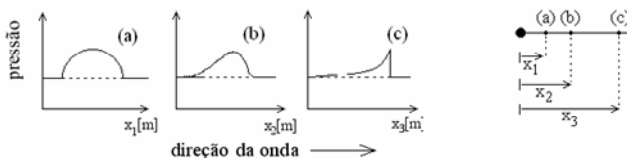


Fig. 2.1 - Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma detonação [5].

### 1) Parâmetros da Onda de Choque

A onda de choque pode ser caracterizada através de parâmetros independentes que são: [5]

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) [ $P_{so}$ ,  $P_{so+}$ ,  $P_0$ ] - Força máxima exercida pela onda de sopro contra o alvo. É igual a 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. Este 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 projetada resultante da passagem da onda, cujo valor corresponde à área entre a curva e a linha de pressão atmosférica (o zero da Fig. 2.2) durante a fase positiva. Para uma onda com o formato da mostrada na Fig. 2.2, esta área seria aproximadamente ( $t_0 \cdot P_{so+}$ ) / 2;

e) Impulso por unidade de área [ $I/A$ ] - O impulso é uma medida combinada da pressão e da duração 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. Através 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 Fig. 2.2 ilustra com mais detalhes a nomenclatura e seqüência cronológica das fases de passagem de uma onda de choque generalizada.

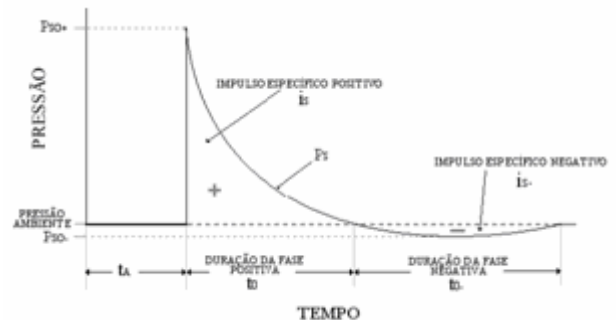


Fig.2.2 - Comportamento da pressão no tempo para uma onda explosiva genérica do ponto de vista de um observador ou alvo [1].

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.

### III. MODOS DE REPRESENTAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE

Diversos são os métodos utilizados atualmente para estimar a função pressão-tempo, geradas 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, local da explosão, 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.

Para explosões químicas Kinney & Graham [5] fornecem equações para determinação destes parâmetros, sendo para ambientes abertos as seguintes:

$$\frac{P_{so}}{P_a} = \frac{808 \left[ 1 + (Z/4,5)^2 \right]}{\sqrt{1 + (Z/0,048)^2} \sqrt{1 + (Z/0,32)^2} \sqrt{1 + (Z/1,35)^2}} \quad (3)$$

$$W = 1.2 \times (F \times CF \times C) \quad (4)$$

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

$$CF = 0.6 + 0.4 \times \left( 1 + \frac{2}{C/M} \right)^{-1} \quad (5)$$

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. Nesta fórmula, M = Massa metálica do invólucro e C = Massa do explosivo.

### IV. ESTIMATIVA DE EFEITOS

#### A. Efeito de Cratera

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

$$d = 0,8.W^{1/3} \quad (6)$$

Essa relação foi obtida experimentalmente (estudo estatístico de cerca de 200 explosões acidentais), onde W = massa de

explosivo em kilogramas de TNT, d : diâmetro da cratera em metros.[5]

A expressão (6) 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.

B. Estimativa para ruptura de paredes de concreto (detonação em contato com a parede)

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

$$W = \beta \cdot r^{1/3} \quad (7)$$

Relação Empírica onde W = quantidade de explosivo em kg TNT (quantidade mínima de explosivo necessária para abrir a parede),  $\beta$  = coeficiente de ruptura que para concreto comum é igual a 15 kg TNT/m<sup>3</sup> e para concreto reforçado vale 27 kg TNT/m<sup>3</sup> e, r = Espessura da parede em metros.

C. Critério de Destruição: Aeronaves, caminhão e antenas

Westine [7] 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):

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

Caminhão:

$$R = \frac{6,481.W^{1/3}}{\left( 1 + \frac{45,06}{W} + \frac{6045}{W^2} \right)^{1/6}} \quad (9)$$

Antena:

$$R = \frac{6,295.W^{1/3}}{\left( 1 + \frac{103,8}{W^2} \right)^{1/6}} \quad (10)$$

### V. EFEITO DA ONDA DE CHOQUE SOBRE ESTRUTURAS

A. 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 / pol<sup>2</sup> 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 II exemplifica a variação de pressão, causada pela onda de choque, com os respectivos danos sofridos pelas diversas estruturas.

TABELA II – 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

## VI. CABEÇAS DE GUERRA

A cabeça de guerra, conforme descrito no item I, 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 (foguete,

bomba), erro de guiamento, tamanho, forma e velocidade do alvo.

Os dados obtidos pelas equações foram 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.

Na Fig. 6.1 é visualizada a curva “isodamage”, que representa um único tipo de dano, neste caso destruição, de três alvos distintos.

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 estamos considerando somente o efeito terminal de sopro, o efeito de fragmentação não está sendo abordado.

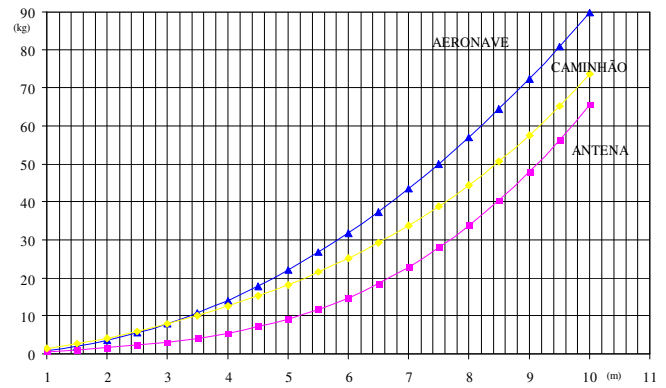


Fig. 6.1 – Critério de destruição de aeronaves, caminhões e antenas.

Da equação (6), obtém-se a curva da Fig. 6.2 com o efeito de crateramento, podendo-se estimar a quantidade de explosivo necessária para atender a finalidade desejada como interdição de pista clandestina de pouso, estradas, criação de trincheiras, etc.

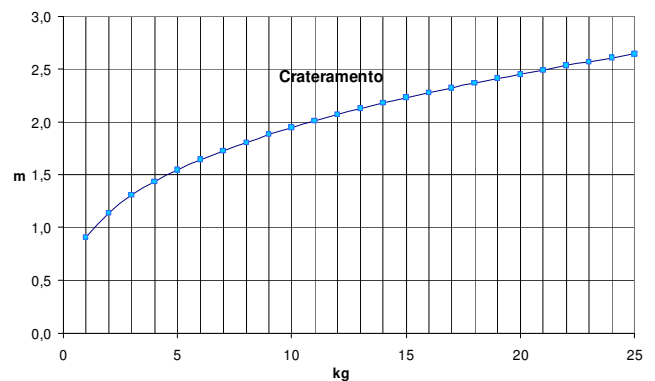


Fig. 6.2 – Estimativa de efeito de crateramento

A Fig. 6.3, baseada na Tabela II, 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.

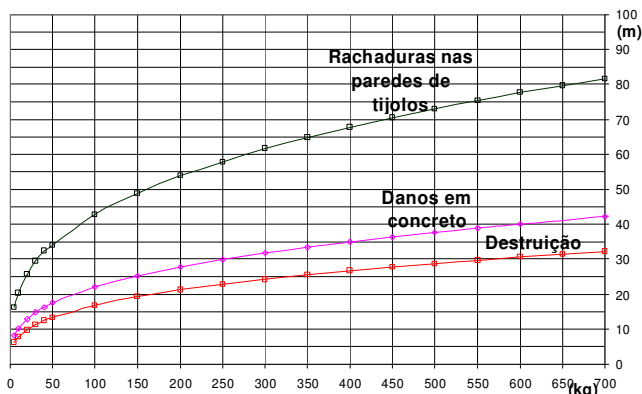


Fig. 6.3 – Estimativa de danos sobre uma edificação

A Fig. 6.4 representa a curva 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.

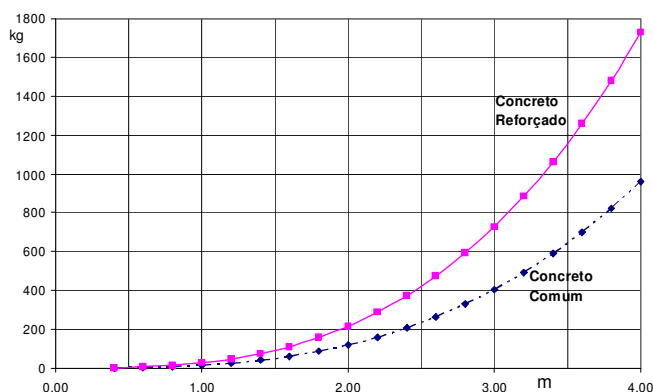


Fig. 6.4 – Estimativa para ruptura de paredes de concreto comum e reforçado

## VII. CONCLUSÕES

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.

Wilson Carlos Lopes Silva, [wilcls@gmail.com](mailto:wilcls@gmail.com), Koshun Iha, [koshun@ita.br](mailto:koshun@ita.br), Paulo Cesar Miscow Ferreira, [miscow@iae.cta.br](mailto:miscow@iae.cta.br).

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. Trabalho este, cujo produto será apresentado como planilha eletrônica e gráficos conforme os modelos.

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

- [1] Baker, W.E. et al... "Explosion Hazards and Evaluation", Elsevier, 1983.
- [2] Chapman, T. C., Rose, T. A., Smith, P.D., 1995. "Reflected Blast Wave Resultants Behind Cantilever Walls: A New Prediction Technique", International Journal of Impact Engineering, vol.16, p. 397-403, Pergamon..
- [3] Cranz, C. "Lehrbuch der Ballistik", Springer-Verlag, Berlin, 1926.
- [4] Hopkinson, B., "British Ordnance Board Minutes", 13565, 1915.
- [5] Kinney G. F. & Graham, K. J., 1985. "Explosive Shocks in Air", 2ª.ed. Springer-Verlag.
- [6] Miscow, P.C. F., 2006. "Letalidade", Notas de Aula da matéria Letalidade do Curso de Extensão em Engenharia de Armamento Aéreo. ASD/IAE/CTA.
- [7] Peter S. Westine., 1972. "R-W Plane Analysis for Vulnerability of Targets to Air Blast".
- [8] Smith, P.D. e Hetherington, J.G., "Blast and Ballistic Loading of Structures", Butterworth-Heinemann, 1994.