

# BLAST – ONDA DE CHOQUE GERADA EM DETONAÇÕES

Wilson Carlos Lopes Silva – Cap Esp Arm

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

**Resumo** — Este informativo apresenta como proposta a implementação de tabelas eletrônicas e gráficos para apoiar a tomada de decisão no tocante a proteção de pessoal sujeito ao efeito sopro de uma detonação (“Blast Effect”), bem como a quantidade de explosivo necessária para a destruição de uma edificação considerada como alvo em potencial.

Descreve uma detonação e a onda de choque, os danos causados no corpo humano pelo aumento brusco e repentino da pressão atmosférica, distância de segurança para proteção de pessoal contra o efeito de sopro e a relação entre pressão de detonação e volume de explosivo, visando otimizar a quantidade de explosivos de acordo com o alvo estrutural visado.

Este trabalho pretende fornecer uma ferramenta de apoio às Equipes de Neutralização e Destruição de Artefatos Explosivos da FAB, Esquadrões Antibombas das Polícias Estaduais e Federal, Equipes de Demolições, Oficiais de Tiro e Bombardeio dos Esquadrões de Combate, Planejador de Missões de Bombardeio do COMGAR / FAE e outros setores afins.

**Palavras-chaves** — Efeito de sopro, onda de choque, explosivo, blast, pressão, frente de onda.

## I. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, tem-se cada vez mais em pauta o assunto “explosão”, nas mais diversas áreas de interesse, principalmente a Militar, os objetivos 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”, assim como utilizar este fenômeno para destruir alvos estruturais.

Como exemplos mais marcantes das conseqüências de explosões, pelo grande número de perdas de vidas, estão os atentados terroristas freqüentes no Oriente Médio, com carros-bomba que explodem no meio das ruas, causando danos a distâncias da ordem de dezenas e até mesmo centenas de metros.

Apesar de não considerarmos ações terroristas dessas proporções aqui no Brasil, é clara a necessidade do conhecimento mais aprofundado sobre o assunto.

Conhecendo-se a pressão gerada através da onda de choque resultante da detonação de uma certa quantidade de explosivo químico a uma determinada distância do foco, bem como os limites suportados pelo ser humano e por determinadas estruturas, é possível, com o relacionamento desses parâmetros, elaborar tabelas de rápida leitura, inclusive associando o peso de explosivo com os artefatos conhecidos (Bombas, foguetes, etc).

## II. EXPLOSÕES QUÍMICAS

De um modo geral, as explosões podem ser classificadas basicamente em função da sua origem em quatro grupos distintos:

- Mecânica;
- Elétrica;
- Nuclear e
- Química.

Esse trabalho tratará apenas de explosões químicas. Visando uma melhor compreensão do assunto aqui tratado, alguns conceitos também apresentados, como explosão, combustão, deflagração, detonação e onda de choque.

- Explosão: é o resultado de uma reação físico-química, na qual a velocidade extremamente alta é acompanhada por brusca elevação de pressão e temperatura, devido ao fato da energia liberada pela reação em cadeia ser feita num intervalo de tempo muito curto para ser dissipada na medida de sua produção, propaga-se rapidamente através do meio (ar ou água) provocando variações da pressão as quais formam a onda explosiva
- Combustão: é uma reação química de oxidação e geralmente ocorre por conta do oxigênio do ar e em baixas velocidades e tem como exemplo a queima de um pedaço de carvão ou de uma vela.
- Deflagração: Se propaga por condutividade térmica. Normalmente com velocidade subsônica, nesta reação há a participação não só do oxigênio do ar, mas também daquele intrínseco a substância. É o caso das pólvoras/propelentes.
- Detonação – É uma reação de decomposição com a participação exclusiva do oxigênio intrínseco da substância explosiva, ocorrendo com velocidades que variam de 1.500 m/s a 9.000 m/s. Em função da quantidade de energia envolvida no processo, far-se-á sempre acompanhada de uma onda de choque. É esta onda de choque que, com sua frente de elevada pressão dinâmica, confere a detonação um enorme poder de ruptura. Na fig. 2.1 vemos o esquema de uma detonação, onde há formação de onda de choque; A velocidade de avanço da zona de reação é maior que a velocidade do som e A zona de reação e o produto da reação tem o mesmo sentido;

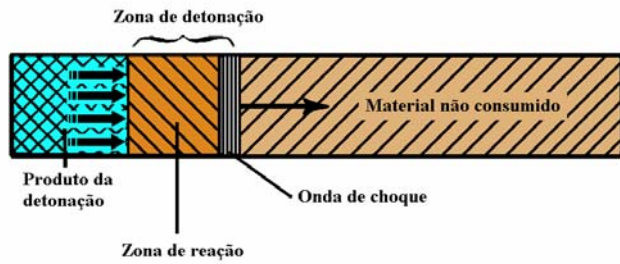


Fig.2.1 Esquema de uma detonação [5].

**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 *et al.*, 1995b].

Em geral, esta região de pressão alterada, iniciada normalmente em forma hemisférica (Figura 2.2a), desloca-se radialmente do centro da explosão (epicentro) com uma velocidade que supera a do som e assume a forma apresentada na Figura 2.2c, na medida que se afasta deste ponto central. Esta frente de onda com velocidade supersônica é conhecida como onda de choque.

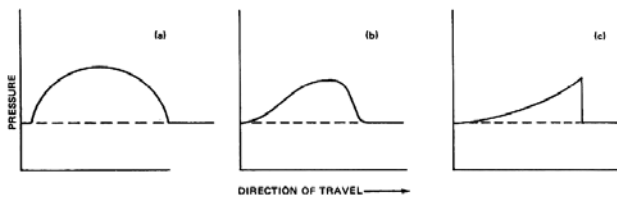


Fig. 2.2. Desenvolvimento da onda de choque gerada por uma detonação [4].

Atrás da onda de choque, o movimento das partículas de ar provoca uma pressão dinâmica, formada pelos ventos gerados na explosão. No caso de grandes eventos (como exemplo explosões nucleares), o vento pode ser de fundamental importância na resposta das estruturas, porém não é fator predominante para os casos menos severos, em geral com explosivos químicos [1].

A onda de choque possui uma forma que vai modificando em função da distância tomada ao epicentro  $e$ , ela assume o comportamento apresentado na Figura 2.2, onde a certa distância ao epicentro passa a apresentar inclusive sucção pressão negativa depois do pico de sobrepressão [4].

A partir disto, define-se uma forma típica de passagem sobre um alvo, como ilustrado na Figura 2.4. Esta figura divide o evento em quatro fases distintas.

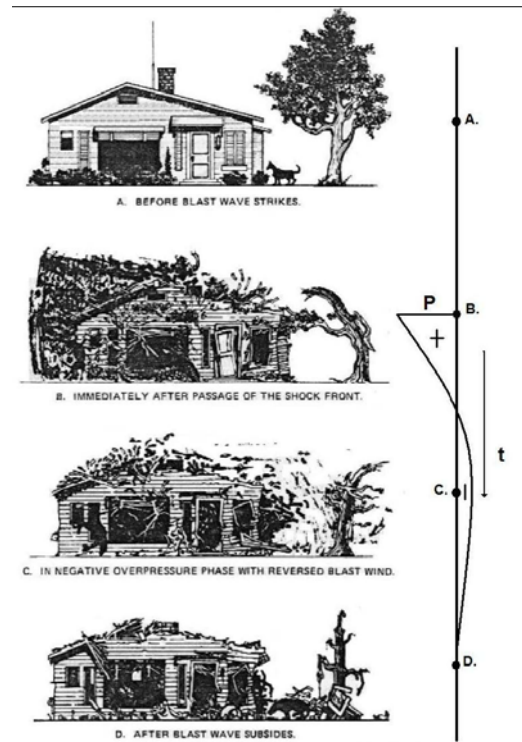


Fig. 2.4: Caso genérico ilustrativo das fases de uma explosão e seus efeitos sobre estruturas alvos [4].

Inicialmente, uma situação normal (A.) sucedida pela detonação do explosivo, acontece o chamado pico de sobrepressão, mostrado na fase (B.), significando um aumento súbito de pressão acima da pressão atmosférica e que irá determinar a forma da onda de choque. Segue um decréscimo em forma similar à logarítmica até uma fase de pressão “negativa”, fase (C.). Por fim, a tendência natural é a estabilização, atingindo novamente a pressão atmosférica (D.).

Este efeito de pressão “negativa” (sucção), na verdade, é a diminuição da pressão abaixo da atmosférica, ocorrendo devido à contração dos fluidos que expandiram na explosão para proporcionar o equilíbrio do sistema.

A incidência da onda de choque sobre corpos gera reflexões que também devem ser consideradas, modificando a forma como a pressão é aplicada a diferentes pontos de tal corpo.

Definida a forma genérica da onda de choque, caracteriza-se a mesma através de três parâmetros independentes [4]:

- Pico de sobrepressão [ $P_{so}, P_0$ ];
- Duração da onda [ $t_d, t_o$  ou  $t_0^+$ ] e;
- Impulso por unidade de área [ $I/A$ ].

A Figura 2.5 ilustra com mais detalhes a nomenclatura e as fases existentes na onda de choque generalizada.

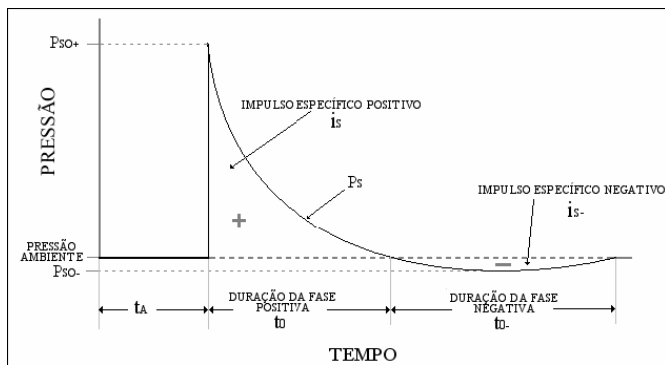


Fig.2.5: Comportamento da pressão no tempo para uma onda explosiva genérica do ponto de vista de um observador ou alvo [1].

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.

A detonação de uma bomba ocorre em aproximadamente  $10^{-4}$  seg, gerando uma pressão da ordem de  $10^{10}$  Pa e temperaturas superiores a  $3000^\circ$  C. O casco metálico expande-se rapidamente até 1,5 vezes o seu tamanho original antes de se fragmentar. A energia da detonação é consumida em parte para a expansão do casco e para projetar os fragmentos (aproximadamente 50%). A energia restante é dissipada na compressão do meio circunvizinho. Em uma detonação feita na atmosfera, a espessura da camada de ar comprimido da onda de pressão é da ordem de  $10^{-5}$ m.

A duração da fase positiva da onda de pressão é aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da fase negativa. A variação de pressão, com relação a pressão atmosférica, na fase positiva é muito maior que na fase negativa.

Na análise do efeito sopro de uma explosão é necessário avaliar os seguintes fatores:

- Pico de pressão (sobrepessão)** - 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.
- Duração do pico de pressão** - 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. O impulso é uma medida combinada da pressão e da duração do sopro.

$$I / A = \int_0^{t_d} p dt \quad (1)$$

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 experimentais são obtidas relações

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

### III. EFEITOS SOBRE AS PESSOAS E ESTRUTURAS

Quando acontece uma explosão e a conseqüente propagação da onda de pressão ou de choque, muitos danos podem ser causados, seja em estruturas, solos, alvos em geral, seja em seres humanos. Segundo Baker *et al.* [1983], são duas as formas básicas que acabam atingindo pessoas resultantes de explosões, os efeitos diretos e os indiretos.

Admite-se que uma variação de pressão inferior a 0,1 bar é suportada sem perigo. Uma variação de 1 bar causa lesões nos ouvidos e 15 bar é letal.

TABELA 1 – Efeito sobre as pessoas

DANO	Variação de Pressão		
	Bar	kPa	psi
Suportável (não causa danos)	Até 0,0001	0,1	0,0015
Queda	0,07 - 0,1	7,0 - 10	1,05 - 1,5
Ruptura do tímpano	0,35 - 1,0	35 - 100	5,25 - 15
Lesões nos pulmões	2,0 - 5,0	200 - 500	30 - 75
Morte	7,0 - 15,0	700 - 1500	105 - 225

TABELA 2 – Efeito sobre as estruturas

DANO	Variação de Pressão		
	Bar	kPa	psi
Quebra de janelas	0,01 - 0,015	1,0 - 1,5	0,15 - 0,22
Danos mínimos em construções	0,035 - 0,075	3,5 - 7,5	0,52 - 1,12
Danos em painéis metálicos	0,075 - 0,125	7,5 - 12,5	1,12 - 1,87
Falha de painéis de madeira (construções)	0,075 - 0,15	7,5 - 15,0	1,12 - 2,25
Falha em paredes de tijolos	0,125 - 0,2	12,5 - 20	1,87 - 3
Rompimento de tanques de refinarias	0,2 - 0,3	20 - 30	3 - 4,5
Danos em edifícios (estruturas metálicas)	0,3 - 0,5	30 - 50	4,5 - 7,5
Danos em estruturas concretadas	0,4 - 0,6	40 - 60	6,0 - 9,0
Destruição total da maioria das construções	0,7 - 0,8	70 - 80	10,5 - 12

Mecanismo de dano - Valores mínimos de pico de pressão e impulso

Dependem do tipo de estrutura do alvo. Para romper uma parede de tijolo com 15 pol. de espessura será necessário um pico de pressão de 3 a 4 lb/in<sup>2</sup> atuando pelos menos durante 100 a 120 milissegundos. A pressão é baixa porque a parede é estruturalmente frágil sob a ação de uma força lateral. Por outro lado, o impulso é relativamente alto por causa da inércia considerável da parede.

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.

#### IV. ESTIMATIVA DO EFEITO DE SOPRO

Para as explosões químicas o pico de pressão é obtida pela seguinte fórmula :

$$P = P_a \frac{808 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2} \times \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2} \times \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (2)$$

onde: P ⇒ pico de pressão; P<sub>a</sub> – pressão atmosférica  
Z ⇒ distância escalonada em metros (equivalente a detonação de 1Kg de TNT).

Lei de escalonamento

Aplicando o princípio da semelhança para explosões, duas explosões podem ser consideradas idênticas às distâncias que são proporcionais a raiz cúbica da energia liberada. Dessa forma, para produzir o mesmo efeito sopro a uma distância duas vezes maior é necessária uma carga de explosivo oito vezes maior. O pico de pressão da onda de choque será o mesmo a 1 metro de uma carga de 1 Kg de TNT e a 2 metros de uma carga de 8 Kg de TNT.

$$Z = f \times \frac{D}{W^{1/3}} \quad (3)$$

onde: D ⇒ distância a partir do centro da explosão, em metros

W ⇒ massa de TNT equivalente ao explosivo (eq.5)

$$f = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (4)$$

onde: ρ ⇒ densidade do ar ao nível do mar  
ρ<sub>0</sub> ⇒ densidade do ar no local da detonação

Massa de TNT equivalente ao explosivo:

$$W = 1.2 \times (F \times CF \times C) \quad (5)$$

onde: F ⇒ fator de eficiência do explosivo em relação ao TNT

C ⇒ massa do explosivo em questão

CF ⇒ fórmula de Fano (fator de casco – eq. 6)

1,2 ⇒ fator para máximo efeito direcional

Parte da energia química do explosivo liberada na detonação é utilizada para romper o invólucro metálico. Portanto, deve-se considerar o efeito de confinamento.

$$CF = 0.6 + 0.4 \times \left( 1 + \frac{2}{C/M} \right)^{-1} \quad (6)$$

onde: M ⇒ massa metálica do invólucro

C ⇒ massa do explosivo

Reflexão da onda de choque

As ondas de choque são refletidas em superfícies sólidas, aumentando consideravelmente o seu poder destrutivo. A onda incidente e a refletida formam um ângulo que diminui a medida que se afastam do ponto de detonação. Quando este ângulo é inferior ao ângulo limite (aprox 40°), as ondas de choque incidente e refletida se fundem em uma única onda, chamada onda de Mach. O ponto de encontro entre as duas ondas é chamado de ponto triplo. Acima do ponto triplo as ondas incidente e refletida permanecem separadas. A zona existente entre a reta que define a trajetória do ponto triplo e o solo é chamada de Zona de Mach.

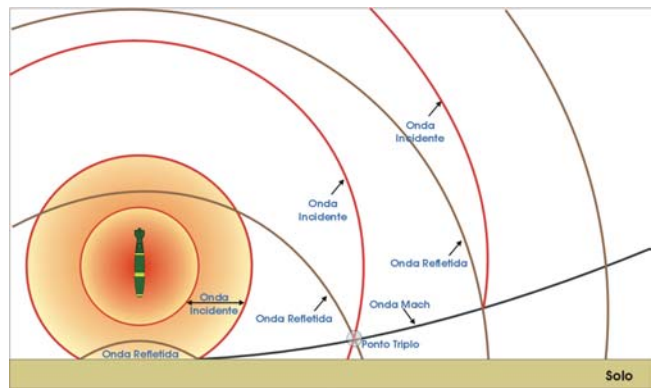


Fig. 4 - Efeito da detonação no ar sobre a pressão e impulso [5].

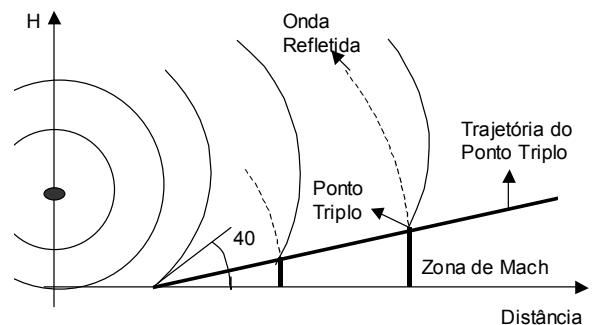


Fig. 5 – Trajetória do Ponto Triplo [5].

A pressão da região da Zona de Mach é praticamente duplicada. A pressão máxima ocorre no ponto triplo. Dessa forma, uma carga detonada acima do solo tem um comportamento aproximadamente semelhante a uma carga com massa de explosivo duas vezes maior detonada no solo.

Na figura 6 temos o modelo de um gráfico da sobrepressão gerada pela onda de choque distante Y ft do foco da detonação de X lbs de TNT.

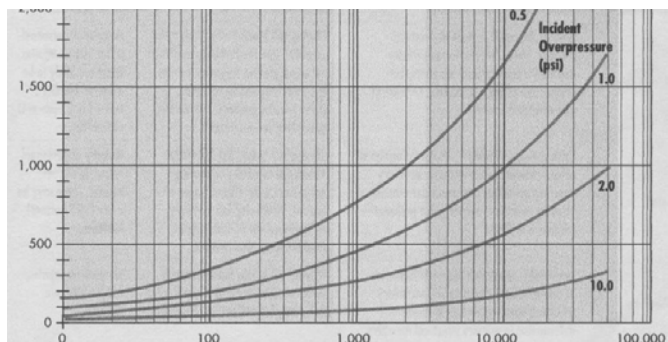


Fig. 6 – Incidência da sobrepressão medida em libras por polegadas ao quadrado (psi) em função da distância escalonada em ft e do peso líquido do explosivo (TNT) em libras. [3]

Observa-se que o valor da pressão para proteção de pessoal, deve estar abaixo de 1 psi, conforme a Tabela 1, logo a distância de segurança deverá estar acima da curva, correspondente ao peso de explosivo envolvido.

Por outro lado, se a pretensão é destruir uma determinada construção conhecendo-se, basicamente, sua resistência estrutural, com o auxílio da Tabela 2 pode-se então obter a distância máxima onde a respectiva massa de explosivo deverá ser colocada ou lançada.

TABELA 3 – Trecho do modelo de planilha relacionando a sobrepressão com a distância e o peso de explosivo.

Distância = 100 m		Distância = 200 m	
Massa (kg)	Pressão bar	Massa (Kg)	Pressão bar
1	0,0083	1	0,0041
50	0,0313	50	0,0153
100	0,0400	100	0,0194
150	0,0463	150	0,0223
200	0,0516	200	0,0246
250	0,0561	250	0,0266
300	0,0602	300	0,0283
350	0,0639	350	0,0299
400	0,0673	400	0,0313
450	0,0705	450	0,0326
500	0,0736	500	0,0338
550	0,0765	550	0,0350
600	0,0793	600	0,0361
650	0,0820	650	0,0371
700	0,0846	700	0,0381
750	0,0870	750	0,0391
800	0,0895	800	0,0400
850	0,0918	850	0,0409
900	0,0941	900	0,0417
950	0,0964	950	0,0426
1000	0,0985	1000	0,0434
1050	0,1007	1050	0,0441

## V. OBSERVAÇÕES FINAIS

Para implementação das tabelas eletrônicas e seus gráficos, serão considerados alguns fatores relevantes causado pelo efeito de sopro tais como:

- Mecanismo de danos envolvendo:
  - Pico de pressão (sobrepressão)
  - Pressão dinâmica
  - Tempo de chegada
  - Duração da fase positiva da sobrepressão ( $t_D$ )
  - Impulso por unidade de área
  - Reflexão
- Critérios de destruição segundo Westine e Held;
- Curva de sobrepressão e impulso das bombas tipo MK e BAFG e;
- Critério de danos para o efeito de sopro.

O produto será apresentado como planilha eletrônica e gráficos conforme os modelos.

Neste trabalho será realizado 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 a determinação do Raio de Segurança e a do Raio Letal.

Cabe salientar, como será ilustrado nas aplicações, 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] Autoridad Regulatoria Nuclear, 1998. “Efectos de Explosiones y Acciones Mitigantes Aplicables a Estructuras, Sistemas y Componentes de Instalaciones Civiles”, Buenos Aires, Argentina.
- [2] Casagrande, A. S., 2006. “Estudo de Cargas Impulsivas com Ênfase em Explosões: Estratégias de Análises Utilizando Métodos Numéricos”, Dissertação de Mestrado – PROMEC-UFRGS, Porto Alegre.
- [3] Federal Emergency Management Agency FEMA 428 , December 2003. “Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks”
- [4] Kinney G. F. & Graham, K. J., 1985. “Explosive Shocks in Air”, 2. ed. Springer-Verlag.
- [5] Miscow, P.C. F., 2006. “Letalidade”, Notas de Aula da matéria Letalidade do Curso de Extensão em Engenharia de Armamento Aéreo. ASD/IAE/CTA