

Comparação entre métodos empíricos para obtenção do equivalente TNT de explosivo plástico

Caio Barbosa Amorim, Rene Francisco Boschi Gonçalves, Koshun Iha
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Os parâmetros de efeito de sopro de uma detonação podem ser determinados pela literatura a partir de fatores que equiparam diferentes cenários. Um deles mede o quanto um explosivo libera de energia em relação a uma massa similar de trinitrotolueno (TNT), explosivo utilizado como referência. Assim, determinar essa razão, denominada equivalente TNT (eq_{TNT}), é essencial para estimar o impacto de uma detonação e, a partir disso, verificar seu potencial letal e como lidar com ele. Esse cálculo é difícil de ser realizado apenas com dados da literatura no caso de explosivos compostos por diversos elementos explosivos e inertes. Dessa forma, este artigo apresenta uma comparação entre formas empíricas para a determinação do equivalente TNT de um explosivo plástico de octogênio (HMX). Os métodos apresentaram resultados próximos para o equivalente TNT, em torno de 1,20. Esse valor serve de base para análises de dano de armamentos que envolvam a formulação estudada.

Palavras-Chave – equivalente TNT, explosivo plástico, método empírico.

1. INTRODUÇÃO

Estimar o potencial de dano causado por uma detonação de material explosivo é essencial para o planejamento do seu emprego, para garantir a segurança de um teste ou para defender-se de uma potencial ameaça. Isso pode ser realizado por meio de simulações, o que demanda o uso de *software* específico, além de homem-hora especializado e tempo de processamento. Testes reais também podem ser empregados, mas esses muitas vezes são inviáveis devido ao custo e os recursos necessários para a sua realização. Assim, a forma mais simples e rápida é usar os modelos disponíveis na literatura, que podem não ser tão precisos quanto os outros métodos citados, mas proporcionam uma boa estimativa para muitos casos.

Para prever os possíveis impactos oriundos de uma detonação, a literatura utiliza os parâmetros de efeito de sopro da onda de choque gerada. A Fig. 1 apresenta o perfil de pressão por tempo decorrente da passagem de uma onda de choque por um determinado ponto. Dentre os parâmetros de efeito de sopro, os principais utilizados para avaliar o dano causado pela passagem de uma onda de choque são o pico de sobrepressão e o impulso da fase positiva.

Para estimar o impacto potencial causado pelo efeito de sopro de uma detonação, costuma-se empregar o diagrama PI, em que são traçadas curvas de grau de dano conforme o pico de sobrepressão e o impulso da fase positiva da onda de choque. Essas curvas podem se referir a efeitos sobre pessoas [2], construções [3], etc. A Fig. 2 apresenta um diagrama PI para o pulmão humano.

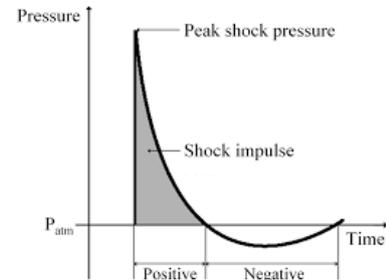


Fig. 1. Perfil de pressão por tempo de uma onda de choque e seus parâmetros de interesse: pico de sobrepressão e impulso da fase positiva [1].

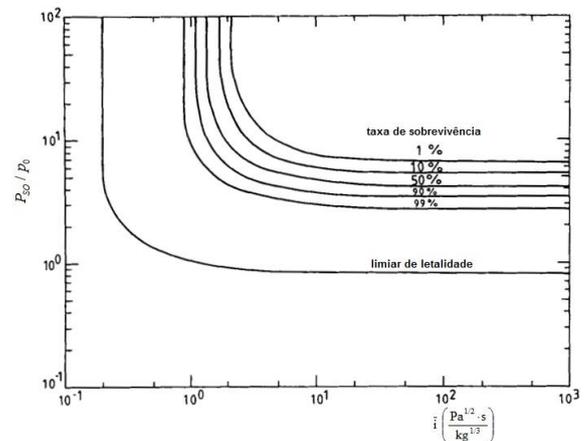


Fig. 2. Diagrama PI para níveis de dano de sopro ao pulmão humano [2].

Os modelos disponíveis para obtenção dos parâmetros de efeito de sopro de uma detonação se valem de alguns fatores de ajuste para fazer a equivalência entre diferentes cenários. Um desses fatores traduz o quanto um determinado explosivo possui de poder de sopro em relação ao TNT (explosivo referência), sendo por isso denominado equivalente TNT. Assim, calcular essa razão é essencial para que seja realizada uma boa estimativa do impacto causado pelo efeito de sopro num cenário real a partir dos modelos da literatura.

Diante disso, foram produzidos estudos de determinação do valor do equivalente TNT para diferentes tipos de explosivos por métodos diversos [4]-[6]. Tais resultados são disponibilizados e não são difíceis de encontrar para os explosivos mais comuns. Para formulações específicas, que envolvem mistura de explosivos e elementos inertes, porém, muitas vezes não se encontram informações necessárias para a realização desse cálculo. Nesse caso, resta empregar métodos experimentais para estimar o valor do equivalente TNT da formulação.

Há autores que afirmam que o equivalente TNT pode variar de acordo com a distância do ponto de detonação em que se avalia seu desempenho [6]. Outros pesquisadores compararam os vários métodos de obtenção desse fator e obtiveram resultados distintos para um mesmo explosivo [4].

Neste trabalho, será buscado avaliar o explosivo a partir da hipótese de que seu equivalente TNT tem um valor fixo ou oscila em torno de uma faixa estreita de valores.

Uma das formas de calcular do equivalente TNT (eq_{TNT}) é a partir das velocidades de detonação do explosivo sob avaliação (VoD_{exp}) e do TNT (VoD_{TNT}), conforme a seguinte equação [4]:

$$eq_{TNT} = (VoD_{exp} / VoD_{TNT})^2 \quad (1)$$

Outra forma de se calcular é partir da medição do pico de sobrepressão (P_{so}) de uma onda de choque num ambiente em que a pressão atmosférica local (P) é conhecida [5]. Nesse caso, pode-se estimar o valor da distância escalonada (Z) necessária para gerar a razão entre P_{so} e P segundo algum modelo da literatura, como o de detonação esférica sem reflexão de (2, 3) com constantes segundo a Tabela I [7]. Com isso, a partir da temperatura (T) do local de ensaio e da pressão (P_0) e temperatura (T_0) referência do modelo, bem como a distância da detonação em que foi realizada a medida de pressão, encontra-se a massa de explosivo em equivalente TNT (W) necessária para atingir a pressão medida a partir de (4). Por fim, sabendo-se a massa de explosivo empregado (m) o equivalente TNT é calculado por (5).

$$\log_{10} \left(\frac{P_{max}}{P} \right) = \sum_{i=0}^8 A_i \cdot U^i \quad (2)$$

$$U = K_0 + K_1 \cdot \log_{10}(Z) \quad (3)$$

$$Z = \frac{D \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3}}{W^{1/3}} = \frac{D \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/3}}{W^{1/3}} \quad (4)$$

$$eq_{TNT} = W/m \quad (5)$$

TABELA I. CONSTANTES PARA CÁLCULO DO PICO DE SOBREPRESSÃO RESULTANTE DE DETONAÇÃO DE CARGA ESFÉRICA AO AR LIVRE.

Parâmetro	Valor ($0,05 < Z < 40 \text{ m/kg}^{1/3}$)
K_0	-0,214362789151
K_1	1,35034249993
A_0	0,611368669
A_1	-1,69012801396
A_2	0,00804973591951
A_3	0,336743114941
A_4	-0,00516226351334
A_5	-0,0809228619888
A_6	-0,00478507266747
A_7	0,00793030472242
A_8	0,0007684469735

Neste artigo, são empregadas 2 (duas) metodologias experimentais para o cálculo do equivalente TNT de uma formulação de explosivo plástico com 80% de HMX. Uma a partir de dados de velocidade de detonação do explosivo e outra por meio de dados de pico de sobrepressão. Por fim, os

resultados obtidos são comparados quanto à coerência entre eles.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O explosivo sob avaliação é composto por 80% de massa de HMX, sendo 56% de classe 3 e 24% de classe 5. Além disso, ele possui 14,4% de massa de resina de polibutadieno hidroxilado (PBLH), cerca de 4,3% de plastificante, aproximadamente 1% de agente de cura e 0,3% de agente molhante. Sua maceração foi feita nos formatos cilíndrico e esférico. No formato cilíndrico, sua massa é de aproximadamente 200 gramas, com diâmetro de cerca de 3 cm e comprimento aproximado de 15 cm. Já no formato esférico, a massa do explosivo é de cerca de 140 gramas, com um furo radial para possibilitar sua detonação pelo centro. Em ambos os casos, a iniciação foi feita com reforçador tipo R-18 e espoleta tipo elétrica nº 8.

Tanto a maceração do explosivo quanto a realização dos ensaios de detonação foram feitas no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) pela equipe do próprio IAE, da Divisão de Tecnologias Sensíveis e de Defesa (ASD). A seguir, serão descritas as metodologias empregadas na determinação do equivalente TNT para cada uma das formas escolhidas.

A. Estimativa pela velocidade de detonação

Para medir o valor da velocidade de detonação do explosivo, ele foi empregado no formato cilíndrico e iniciação por uma das pontas. O tempo de passagem da onda de detonação foi medido em pontos espaçados de 20 mm ao longo de uma linha longitudinal na superfície do explosivo a partir de sensores de ionização, cujos contatos estão em aberto no início e fecham quando da passagem da onda de detonação. A configuração do explosivo com a instrumentação é apresentada na Fig. 3.

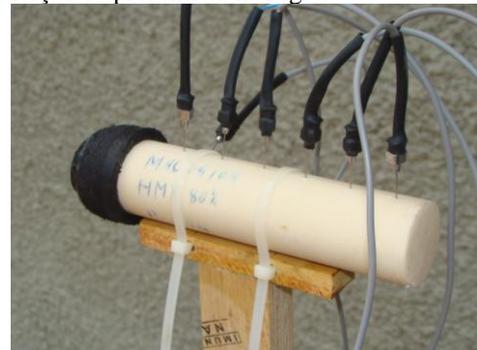


Fig. 3. Configuração de ensaio de medida de velocidade de detonação.

O equipamento para medida de tempo é um cronômetro digital de 24 canais, com fundo de escala de 10 MHz, empregado no modo COMUM, quando o sinal de início do primeiro canal serve para todos os demais. Assim, cada canal empregado fornece a medida de tempo entre a passagem da onda de detonação pelo sensor de início e o seu sensor de fim. Dessa forma, a velocidade média da onda pode ser calculada pela razão entre distância entre o sensor de início

único e o sensor de fim de cada canal e o tempo registrado pelo respectivo canal.

Foi realizado um total de 5 (cinco) ensaios, cada um deles com o uso de 5 (cinco) canais do cronômetro. A partir de cada medida de velocidade média de detonação, foi calculado o equivalente TNT usando o valor de 6.950 m/s para a velocidade de detonação do TNT [4].

B. Estimativa pela medida de pico de sobrepressão

Para essa avaliação, foi utilizado o explosivo em formato esférico com iniciação pelo centro, de modo a produzir resultados comparáveis com o modelo escolhido. Para a medida do pico de sobrepressão, foram empregados instrumentos da marca *High Pressure Instruments (HPI)*, modelo B251. Nele, o perfil de onda de choque é medido a partir de um sensor piezoelétrico. Os ensaios foram realizados a uma pressão atmosférica medida de 953,8 hPa e temperatura de 21 °C. Foram empregados 6 (seis) sensores, posicionados um par por distância, a 1,5 m, 2,0 m e 2,5 m, conforme Fig. 4.



Fig. 4. Setup de ensaios de medida de pico de sobrepressão.

C. Tratamento de dados

Conforme já implementado em outro estudo [8], foi empregada a simulação Bootstrap para encontrar o intervalo de confiança de 95% para o equivalente TNT de cada um dos métodos.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos para a medida de velocidade média de detonação e cálculo do equivalente TNT referente a cada medida são apresentados na Tabela II. Já os resultados referentes às medidas de pico de sobrepressão são mostrados na Tabela III. Por fim, os limites do intervalo de confiança de 95% obtidos a partir da simulação Bootstrap constam na Tabela IV.

TABELA II. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MEDIDA DE VELOCIDADE DE DETONAÇÃO.

Ensaio	Parâmetro	Posição (mm)				
		20	40	60	80	100
1	Tempo (μ s)	2,80	5,20	7,80	10,30	12,80
	VoD (km/s)	7,14	7,69	7,69	7,77	7,81
	eqTNT	1,06	1,23	1,23	1,25	1,26
2	Tempo (μ s)	2,40	5,40	7,70	10,40	12,70
	VoD (km/s)	8,33	7,41	7,79	7,69	7,87
	eqTNT	1,44	1,14	1,26	1,23	1,28
3	Tempo (μ s)	2,70	5,30	7,70	10,10	12,60
	VoD (km/s)	7,41	7,55	7,79	7,92	7,94
	eqTNT	1,14	1,18	1,26	1,30	1,30
4	Tempo (μ s)	2,40	5,40	7,70	10,40	12,70
	VoD (km/s)	8,33	7,41	7,79	7,69	7,87
	eqTNT	1,44	1,14	1,26	1,23	1,28
5	Tempo (μ s)	2,70	5,10	7,50	10,10	12,60
	VoD (km/s)	7,41	7,84	8,00	7,92	7,94
	eqTNT	1,14	1,27	1,32	1,30	1,30

TABELA III. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MEDIDA DE PICO DE SOBREPRESSÃO.

Ensaio	m (g)	Parâmetro	Distância (m)					
			2,5	2,5	2	2	1,5	1,5
1	147,2	P _{so} (bar)	0,40	0,40	0,60	0,60	1,04	1,00
		eqTNT	1,29	1,29	1,26	1,26	1,19	1,12
2	137,0	P _{so} (bar)	0,36	0,38	0,57	0,55	1,01	0,99
		eqTNT	1,16	1,27	1,25	1,18	1,23	1,19
3	144,3	P _{so} (bar)	0,39	0,40	0,59	0,57	0,95	0,95
		eqTNT	1,26	1,32	1,25	1,19	1,07	1,07

TABELA IV. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO BOOTSTRAP.

Parâmetro	eqTNT pela VoD	eqTNT pela P _{so}
Média	1,25	1,21
IC _{mín}	1,22	1,18
IC _{máx}	1,28	1,25

Os resultados demonstram que os equivalentes TNT calculados pelos dois métodos para o explosivo sob análise possuem boa aderência entre si, com diferença de médias de cerca de 3%. Assim, os métodos analisados possuem uma boa concordância entre eles. Vale ressaltar, também, conforme pode ser visualizado na Tabela III, que o equivalente TNT variou pouco com a distância.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

O equivalente TNT é um fator de grande importância para a estimação de danos por efeito de sopro. Por meio dele é possível estabelecer uma conexão entre a força de um

explosivo sob análise e a referência (TNT) para os modelos para os parâmetros da onda de choque. O cálculo desse fator pode ser realizado por dados já disponíveis, mas é particularmente mais complicado no caso de explosivos com formulações específicas que contenham elementos inertes. Nesse caso, uma alternativa interessante é recorrer a métodos experimentais.

Nesse trabalho, foram comparadas duas formas empíricas de obtenção do equivalente TNT para uma formulação de explosivo plástico com carga ativa de 80% de HMX. Uma delas usa a medida da velocidade de detonação do explosivo. Já a segunda se baseia na aferição do pico de sobrepressão gerado pela passagem da onda de choque a uma distância conhecida do ponto de detonação. Os dados obtidos pelos dois métodos foram tratados estatisticamente para serem comparados entre si. Além disso, a partir da análise foi possível analisar se esse fator varia consideravelmente ou não na faixa de distâncias das medidas de sobrepressão realizadas.

Como resultado, verificou-se que os valores obtidos foram bem próximos, com erro de cerca de 3% entre as médias encontradas. Com isso, verifica-se uma boa concordância entre os resultados dos métodos. Observou-se, ainda, uma variação pequena entre as medidas de equivalente TNT para diferentes distâncias, o que aponta para o fato de que esse parâmetro, se não for constante, varia pouco dentro do intervalo analisado.

Por fim, com a determinação do equivalente TNT para o explosivo sob análise, tem-se a partir de então um valor confiável para prever o efeito do seu emprego. Isso se traduz em análises de segurança, estudos de letalidade e levantamento de medidas de proteção mais precisas quando do emprego desse explosivo em um ensaio ou armamento.

REFERÊNCIAS

- [1] T. T. N. Nguyen, D. R. Sory, H. D. Amin, S. M. Rankin, W. G. Proud, "Platform development for primary blast injury studies", In: *Trauma*, vol. 21, n. 2, p. 141-146, Abril 2019. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1460408618776035>>. Acesso em: 13/07/2023.
- [2] Center for Chemical Process Safety. In: American Institute of Chemical Engineers. "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs", Wiley, Nova York, vol. 1, Apêndice B, p. 347-349, 1994.
- [3] T. Krauthammer, S. Astarlioglu, J. Blasko, T. B. Soh, P. H. Ng, "Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components", In: *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, n. 8, p. 771 - 783, Agosto 2008.
- [4] Cooper, Paul W. "Explosives engineering". John Wiley & Sons, 2018.
- [5] R. Panowicz, M. Konarzewski, M. Trypolin, R. Panowicz, M. K. M. Trypolin, "Analysis of criteria for determining a TNT equivalent", In: *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 63, n. 11, p. 666-672, 2017.
- [6] M. J. Hargather; Gary S. SETTLES, "Optical measurement and scaling of blasts from gram-range explosive charges", In: *Shock waves*, vol. 17, p. 215-223, 2007.
- [7] C. N. Kingery; G Bulmash, "Airblast parameters from spherical air burst and hemispherical surface burst", Aberdeen, 1984.
- [8] C. B. Amorim, K. Iha, W. M. de Melo, F. R. S. Moreira; "Estudo experimental da dinâmica e dos parâmetros de efeito de sopro da onda de Mach", In: *Simpósio de Aplicações Operacionais nas Áreas de Defesa*, XVIII, 2016, São José dos Campos. Disponível em: <