

# Metodologia para estimativa de pico de sobrepressão a partir de vídeo em alta velocidade por diferenciação numérica

Caio Barbosa Amorim<sup>1</sup>, Rene Francisco Boschi Gonçalves<sup>1</sup>, Koshun Iha<sup>1</sup>, Wandeclyat Martins de Melo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – A onda de choque resultante de uma explosão tem potencial associado, em especial, ao pico de sobrepressão que origina quando da sua chegada. Esse parâmetro está fisicamente associado à velocidade da onda, que pode ser estimada por diferenciação numérica de dados de vídeo em alta velocidade, com o óbice de que tal operação acarreta em elevada incerteza. Neste artigo, é proposta uma metodologia para definição e redução dos limites da incerteza do cálculo do pico de sobrepressão a partir de vídeo de alta velocidade por diferenciação numérica para uma propagação sem reflexão, e em que o equivalente TNT do material que gerou a explosão é aproximadamente constante na faixa em análise. Tal metodologia foi avaliada por meio de um estudo de caso que atende às condições necessárias, obtendo-se um resultado com média menos de 10% diferente do obtido por outros métodos e limite de incerteza menor que 15%.

**Palavras-Chave** – pico de sobrepressão, diferenciação numérica, vídeo de alta velocidade

## I. INTRODUÇÃO

Seja por motivos pacíficos ou bélicos, por acidente ou de maneira proposital, por terrorismo ou por legítima defesa, as explosões são parte do cotidiano da sociedade moderna. Elas são caracterizadas pela elevada liberação de energia em um curto período de tempo que, quando no ar, produz uma onda de choque que se expande em velocidade supersônica. Essa onda pode gerar grandes efeitos no ambiente, desejados ou não, em decorrência da energia que a originou e da distância entre sua origem e o local que ela atingiu. Assim, seja para se proteger da ação da uma onda de choque, seja para usá-la em favor próprio, é necessário mensurar seus parâmetros associados ao seu poder de exercer força.

Nesse âmbito, as relações de salto de Rankine-Hugoniot revelam que, quanto mais supersônica for uma onda de choque, maior será a elevação repentina de pressão decorrente da sua chegada. Esse salto em relação à pressão atmosférica local que ocorre na interface com a onda de choque é denominado pico de sobrepressão ( $P_{so}$ ) [1].

O  $P_{so}$  pode ser considerado como o principal parâmetro de avaliação de potencial destrutivo da onda de choque, sendo responsável por si pelo dano em estruturas de baixa resistência mecânica, como o tímpano humano [2]. Ainda, muitas tabelas simplificadas de dano por efeito de sopro da literatura apresentam como parâmetro de entrada apenas o pico de sobrepressão, como o exemplo apresentado na Tabela I. No caso de avaliação de danos em estruturas, o  $P_{so}$  é a base para calcular a pressão refletida, que é resultante da resistência do alvo à propagação da onda de choque e a torna mais intensa, ou seja, aumenta seu potencial destrutivo [3].

C. B. Amorim, caiocba@fab.mil.br; R. F. B. Gonçalves, renefbg@ita.br; K. Iha, koshuniha@gmail.com; W. M. de Melo, wandeclyatwmm@fab.mil.br.

TABELA I. DANOS POR PICO DE SOBREPRESSÃO, ADAPTADO DE [1].

Dano causado	$P_{so}$ (mbar)
Dano mínimo a painéis de vidro	1 - 3
Quebra de janela de vidro comum	10 - 15
Estilhaçamento de janelas e danos mínimos a prédios	35 - 75
Pessoas derrubadas	70 - 100
Falhas em muros de concreto	125 - 200
Ruptura do tímpano	350 - 1000
Provável destruição da maioria dos prédios	700 - 800
Dano ao pulmão	2000 - 5000
Letalidade (ser humano)	7000 - 15000

A medição direta do pico de sobrepressão de uma onda de choque requer um sensor, como um do tipo piezoelétrico. Nesse caso, tal sensor deve possuir uma estrutura capaz de suportar o aumento de temperatura e a pressão potencialmente elevada gerada por uma explosão. Por sua vez, para fazer a medida indireta do pico de sobrepressão de uma onda de choque a partir da sua velocidade, pode ser empregada uma câmera de alta velocidade, capaz de registrar a posição da onda de choque em função do tempo. Nesse caso, não é necessário que ela esteja posicionada no ponto em que se deseja fazer a medida, podendo fazê-la de uma distância em que a onda de choque estará bem mais fraca quando chegar. Com isso, diminui-se a necessidade de robustez do instrumento, o que barateia e simplifica a realização de experimentos. Mais que isso, a câmera também pode prover dados para a estimativa do pico de sobrepressão em diversos pontos a partir dos dados de um único ensaio, o que se traduz em economia de recursos e diminuição de riscos. Atualmente, com a popularização das câmeras por meio dos telefones celulares e a possibilidade de compartilhamento de vídeos via redes sociais, tem sido possível fazer estimativas básicas de explosões a partir de registros realizados por pessoas comuns e publicados na internet [4].

Uma das formas de estimar a velocidade da onda de choque a partir dos dados da câmera de alta velocidade é a diferenciação numérica [5]-[6]. O ponto forte de tal método é sua simplicidade, pois a velocidade é calculada sem a necessidade de se registrar todo o histórico de propagação da onda de choque desde a ocorrência da explosão que a originou. Basta apenas medir o deslocamento em relação a pontos imediatamente anteriores e posteriores durante intervalos de tempo conhecidos. O registro da posição por tempo pode ser feito por uma câmera de alta velocidade, que grava quadros em intervalos de tempo fixos de acordo com uma taxa pré-estabelecida pelo seu operador. Isso é especialmente interessante em cenários complexos em que a onda sofre diversas reflexões.

Por outro lado, o grande desafio associado à estimativa da velocidade da onda de choque a partir da diferenciação numérica dos dados de posição por tempo é a alta incerteza associada à operação. No caso em questão, isso se deve especialmente ao fato de que as câmeras possuem uma resolução limitada por um número finito de píxeis, que são convertidos em distância a partir da calibração de sua imagem conforme o ensaio realizado. Dessa maneira, quadros subsequentes apresentam normalmente uma pequena diferença de píxeis na posição do fenômeno, uma vez que a câmera normalmente está posicionada para cobrir uma região maior relativa ao tempo de ensaio total a ser gravado. Assim, a incerteza mínima da posição da onda de choque por quadro de um pixel tende a se traduzir numa incerteza de velocidade de apenas uma ordem de grandeza abaixo da medida calculada. Isso torna o resultado do cálculo muito incerto para ser aplicado a estimativas de dano referentes à explosão que a originou ou para extrapolação em cenários diferentes que considerem a explosão de um material similar ao avaliado.

Este artigo apresenta uma proposta de metodologia para reduzir a incerteza de estimativa do pico de sobrepressão a partir da diferenciação numérica. Ele é aplicável aos casos em que se sabe a posição da onda de choque em relação ao seu ponto de detonação no vídeo de alta velocidade e a propagação é do tipo *Free Air Burst*, ou seja, a onda não sofreu qualquer tipo de reflexão. Além disso, assume-se como hipótese que o explosivo possui um equivalente TNT constante com a distância. Isso é importante ser verificado, uma vez que há pesquisadores que afirmam contra a constância desse parâmetro com a distância ao ponto de detonação para alguns explosivos [7]-[8], enquanto outros observaram uma constância nele, ao menos para além do campo próximo da detonação [9]-[10].

Para embasar a viabilidade da metodologia proposta, ela foi verificada a partir de ensaios realizados com explosivo plástico em que a constância do equivalente TNT além do campo próximo à detonação já foi verificada [11]. Tais ensaios foram registrados com câmeras de alta velocidade cujas imagens foram devidamente calibradas. Os resultados obtidos foram avaliados em termos de precisão do pico de sobrepressão estimado. Além disso, foi analisada a média do resultado obtido em relação à média de medidas diretas de pico de sobrepressão realizadas por sensores de pressão piezoelétricos, e em relação à avaliação pela velocidade de detonação do mesmo tipo de explosivo [11].

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

O esquema do *setup* de ensaio é apresentado na Fig. 1, com os valores dos principais parâmetros elencados conforme a Tabela II. A calibração da imagem foi feita a partir do quadro de referência da Fig. 2, com marcações de posições horizontais e verticais, com procedimento realizado conforme [12]. Como já verificado, o equivalente TNT do explosivo no campo de distâncias a ser avaliado é aproximadamente constante e de cerca de 1,2 [11]. Nos testes realizados, foram empregadas câmeras de alta velocidade do tipo Olympus

iSpeed TR. Os explosivos foram macerados em formato esférico e iniciados pelo centro.

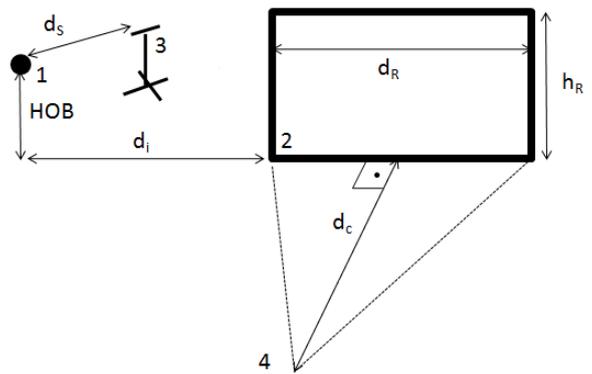


Fig. 1. Setup genérico de ensaio e parâmetros envolvidos. O explosivo, a estrutura retangular em madeira, o sensor de pressão e a câmera de alta velocidade são indicados pelos números de 1 a 4, respectivamente.

TABELA II. PARÂMETROS DO SETUP DE ENSAIO CONFORME A FIG. 1.

Parâmetro	Valor(es)
$d_R$	2,00 m
$h_R$	1,50 m
$d_c$	23,0 m
$d_s$	1,5 m; 2,0 m e 2,5 m
$d_i$	0,60
HOB	0,30

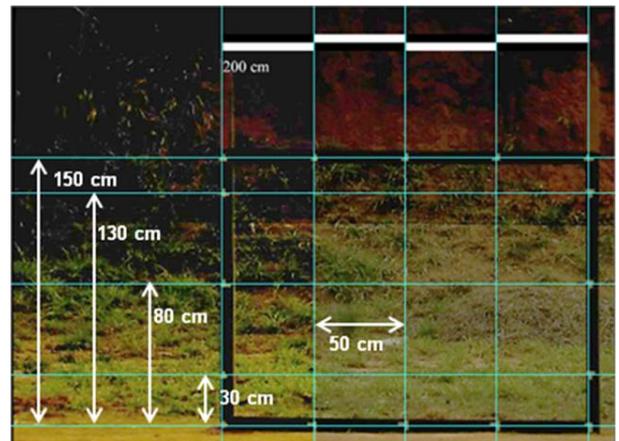


Fig. 2. Quadro de referência para verificação da presença de distorções na imagem e calibração com as marcações de distância [12]. As alturas indicadas são em relação ao solo.

A posição da onda de choque, levantada a partir do vídeo do ensaio após tratamento de imagem [12], foi medida como sendo a distância entre a sua interface com o ambiente, como mostrado na Fig. 3, e o centro do explosivo no momento da sua iniciação. A partir disso, a velocidade da onda de choque, determinada por diferenciação numérica em cada ponto, foi computada como a diferença entre a posição da imagem no quadro subsequente e o antecessor ao do ponto em análise dividido por duas vezes o período entre quadros da câmera

(T), que é o inverso da taxa de aquisição de quadros da gravação (fr).

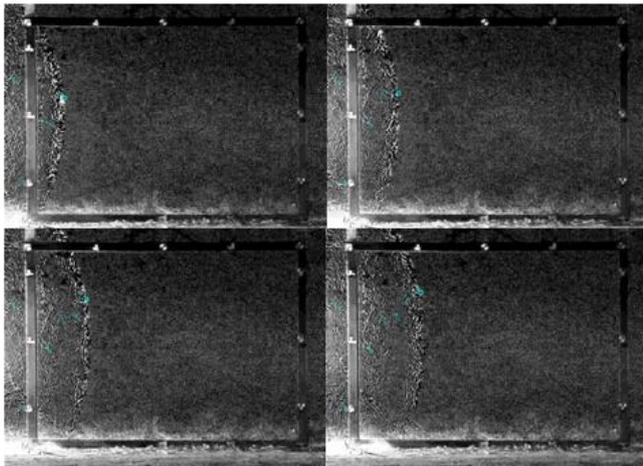


Fig. 3. Determinação da posição da onda de choque em quadros sucessivos, da esquerda para a direita e de cima para baixo, a partir do vídeo tratado.

Ao se analisar a propagação das incertezas da velocidade por esse método, verificou-se que a incerteza de posição devida ao tamanho do píxel da gravação era bastante superior às demais, sendo apenas essa considerada. Isso inclui a incerteza no intervalo de tempo entre quadros da câmera, de  $2 \cdot 10^{-4}$  s. Sendo  $e_p$  a incerteza máxima da determinação da posição da onda de choque, em píxeis, a incerteza máxima da diferença de posição entre dois quadros é de  $2e_p$  píxeis. Dessa forma, denominando  $r_{p-d}$  a razão entre o número de píxeis pela distância equivalente da filmagem, em centímetros, a incerteza máxima da velocidade por diferenciação numérica ( $e_v$ ), em m/s, pode ser calculada conforme (1), com valores dos parâmetros para o ensaio empregado segundo a Tabela III.

$$e_v = \frac{2 \cdot e_p \cdot \frac{fr}{2}}{(100 \cdot r_{p-d})} = \frac{e_p \cdot fr}{100 \cdot r_{p-d}} \quad (1)$$

TABELA III. PARÂMETROS DO SETUP DE ENSAIO CONFORME A FIG. 1.

Parâmetro	Valor(es)
$e_p$	2 píxeis
fr	5000 quadros/s
$r_{p-d}$	557 píxeis / 200 cm
$e_v$	35,9 m/s

Dado que o explosivo possui equivalente TNT aproximadamente constante na região em análise, chegou-se a uma proposta de metodologia para diminuir a incerteza associada à sua determinação por diferenciação numérica. Primeiramente, devem ser calculados os equivalentes TNT para cada ponto cuja velocidade foi estimada. Tal cálculo é feito pelo cômputo do pico de sobrepressão ( $P_{so}$ ) a partir da velocidade da onda de choque (v), além da velocidade do som ( $a_0$ ) e da pressão atmosférica ambiente ( $P_0$ ), por meio das relações de Rankine-Hugoniot, conforme (2). Depois, é usada a equação empírica de pico de sobrepressão de Kingery e

Bulmash [13] para encontrar a distância escalonada equivalente e, então, achar o equivalente TNT para a distância em questão, conforme procedimento realizado em [11].

$$P_{so}/P_0 = 7/6 \cdot [(v/a_0)^2 - 1] \quad (2)$$

Uma vez que o valor do equivalente TNT do explosivo pode ser considerado constante, e não é menor nem maior que os equivalentes experimentais calculados para a velocidade mínima e máxima em cada ponto, respectivamente, usa-se o maior equivalente TNT mínimo e o menor equivalente TNT máximo em relação a todos os pontos calculados, para reduzir a incerteza da diferenciação numérica da posição. Em seguida, calcula-se a nova velocidade limite mínima e máxima em cada ponto, que são usadas para obter o pico de sobrepressão por (2). Com isso, obtêm-se as estimativas máximas e mínimas do pico de sobrepressão para cada distância, que foram posteriormente comparadas em relação à aplicabilidade.

### III. RESULTADOS E ANÁLISES

No ensaio realizado, o explosivo em questão possuía massa de 140,6 g, a pressão ambiente era de 0,95 bar e a temperatura ambiente era de 15,4 °C, o que resulta numa velocidade do som ambiente de 340,5 m/s. Os dados de posição (x) por quadro, com as estimativas das velocidades mínima (v-) e máxima (v+) para cada ponto, além do equivalente TNT relativo a cada uma delas, denominados  $eq_{TNT-}$  e  $eq_{TNT+}$ , respectivamente, são apresentados na Tabela IV.

TABELA IV. DADOS DO ENSAIO E CÁLCULO DE VELOCIDADE DA ONDA DE CHOQUE E TNT EQUIVALENTE DOS SEUS LIMITES MÍNIMO E MÁXIMO.

Quadro	x (cm)	v (m/s)	v- (m/s)	$eq_{TNT-}$	v+ (m/s)	$eq_{TNT+}$
1	143,0	-	-	-	-	-
2	152,7	457	421	0,59	493	1,7
3	161,3	426	390	0,3	462	1,38
4	169,7	440	404	0,54	476	1,93
5	178,9	455	419	0,91	491	2,68
6	187,9	449	413	0,92	484	2,9
7	196,8	400	364	0,13	436	1,683
8	203,9	389	353	0,03	425	1,53
9	212,4	425	389	0,65	461	3,11
10	220,9	412	376	0,41	447	2,9
11	228,8	389	353	0,05	425	2,16
12	236,5	-	-	-	-	-

A partir da Tabela IV, verifica-se que o máximo equivalente TNT dentre os limites mínimos é de 0,92, enquanto o mínimo entre os limites superiores dos equivalentes TNT máximos é de 1,38. A média entre esses valores é de 1,15, valor com diferença menor que 10% em relação à média encontrada a partir de análises feitas anteriormente para o mesmo explosivo, tanto por ensaios de velocidade de detonação quanto por medidas diretas do pico de sobrepressão em ensaios de detonação [11]. A partir

desses limites, foram calculados os respectivos limites mínimo ( $P_{so-}$ ) e máximo ( $P_{so+}$ ) para o pico de sobrepressão, além da média desses valores ( $mP_{so}$ ), apresentados na Tabela V junto com um compilado das medidas dos sensores de pressão durante os testes. As diferenças entre os limites de estimativa e a média ficam abaixo de 15%, o que torna a estimativa interessante para avaliar os possíveis impactos da onda de choque, que, em geral, considera faixas de pico de sobrepressão com pelo menos 30% de diferença entre os limites mínimo e máximo, conforme apresentado na Tabela I.

TABELA V. DADOS DO ENSAIO E CÁLCULO DE VELOCIDADE DA ONDA DE CHOQUE E TNT EQUIVALENTE DOS SEUS LIMITES MÍNIMO E MÁXIMO.

Quadro ou Sensor	x (cm)	$P_{so-}$ (bar)	$P_{so+}$ (bar)	$mP_{so}$ (bar)
Sensor	150	0,95	1,04	0,99
2	152,7	0,79	1,05	0,92
3	161,3	0,71	0,93	0,82
4	169,7	0,64	0,84	0,74
5	178,9	0,58	0,75	0,67
6	187,9	0,52	0,68	0,60
7	196,8	0,48	0,62	0,55
Sensor	200	0,55	0,60	0,58
8	203,9	0,45	0,58	0,52
9	212,4	0,42	0,54	0,48
10	220,9	0,39	0,50	0,45
11	228,8	0,36	0,47	0,42
Sensor	250	0,36	0,40	0,39

#### IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

O pico de sobrepressão gerado pela onda de choque ao chegar a determinado ponto é um parâmetro chave para a determinação do poder de impacto do efeito de sopro. Por isso, aferir tal parâmetro com precisão é essencial. Para tanto, pode-se usar tanto métodos de medida direta, como o uso de sensores piezoelétricos, como de estimativa indireta, caso do levantamento da velocidade da onda de choque com dados de câmera de alta velocidade para estimativa do pico de sobrepressão pela relação física entre os parâmetros. As vantagens da obtenção indireta são a possibilidade do afastamento do instrumento do ponto de medida, a necessidade de menos testes e a menor exposição ao risco do pessoal envolvido.

Para estimar a velocidade da onda de choque com o uso de uma câmera de alta velocidade, a forma mais simples é a diferenciação numérica dos dados de posição por tempo por ela providos. O grande problema desse método, porém, é a elevada incerteza da estimativa encontrada. Para diminuir esse intervalo, foi proposta neste artigo uma metodologia a partir da hipótese de que o equivalente TNT do explosivo é aproximadamente constante na faixa analisada, bem como se tem disponível a distância do explosivo à região sob análise e que a detonação é do tipo *Free Air Burst*, ou seja, a onda de choque não sofreu reflexão em qualquer superfície. A proposta consiste em levantar os equivalentes TNT para as velocidades limite mínima e máxima levantadas pelo método da diferenciação numérica em cada ponto para, então, usar o

máximo limite mínimo e o mínimo limite máximo dos equivalentes TNT encontrados e usá-los para estimar o pico de sobrepressão com menor incerteza.

Como resultado, numa aplicação a um caso em que já havia sido verificada a constância do equivalente TNT na faixa em análise, chegou-se a um valor médio de equivalente TNT do explosivo com menos de 10% de diferença em relação à média levantada em trabalho de caracterização anterior [11]. Além disso, a diferença entre a média do pico de sobrepressão calculado pelo método e os seus limites mínimo e máximo ficaram abaixo de 15%, o que torna a estimativa interessante para aplicações como a da verificação do dano causado pela onda de choque.

#### REFERÊNCIAS

- [1] G. F. Kinney, Kenneth J. Graham. "Explosive Shocks in Air", 2 ed. New York, NY: Springer-Verlag, 1985.
- [2] GUIDELINES for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers 1994. v.1, Apêndice B, p. 347-349.
- [3] F. Mendonça, G. Urgessa, M. Galizia Domingues, K. Iha, e J. Atílio Fritz Fidel Rocco, "Efeitos do EPS na leitura de pico de pressão refletida em ensaio de campo com explosivo militar", Spectrum, vol. 24, n° 1, p. 49–53, set. 2023.
- [4] S. E. Rigby, T. J. Lodge, S. Alotaibi, et al, "Preliminary yield estimation of the 2020 Beirut explosion using video footage from social media", Shock Waves, vol. 30, p. 671–675, 2020.
- [5] K. L. McNesby, M. M. Biss, R. A. Benjamin e R. A. Thompson, "Optical Measurement of Peak Air Shock Pressures Following Explosions", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 39, p. 59-64, 2014.
- [6] T. Mizukaki, K. Wakabayashi, T. Matsumura, et al, "Background-oriented schlieren with natural background for quantitative visualization of open-air explosions", Shock Waves, vol. 24, p. 69–78, 2014.
- [7] R. Panowicz, M. Konarzewski, M. Trypolin, R. Panowicz, M. K. M. Trypolin, "Analysis of criteria for determining a TNT equivalent", Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol. 63, n. 11, p. 666-672, 2017.
- [8] M. J. Hargather, G. S. Settles, "Optical measurement and scaling of blasts from gram-range explosive charges", Shock waves, vol. 17, p. 215-223, 2007.
- [9] H. Kleine, K. Ohashi, T. Mizukaki e K. Takayama, "Characteristics of Blast Waves Generated by Milligram Charges", 23rd international symposium on shock waves, Fort Worth, USA, pp. 187–193, 22-27 jul. 2020.
- [10] S. E. Rigby e P. W. Sielicki, "An Investigation of TNT Equivalence of Hemispherical PE4 Charges", Engineering Transactions, vol. 62, p. 423-435, 2015.
- [11] C. B. Amorim, R. F. B. Gonçalves, K. Iha, "Comparação entre métodos empíricos para obtenção do equivalente TNT de explosivo plástico", Simpósio de Aplicações Operacionais nas Áreas de Defesa, São José dos Campos, 2023. Disponível em: <[https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2023/st/235402\\_1.pdf?x34048](https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2023/st/235402_1.pdf?x34048)>. Acesso em: 28/06/2024.
- [12] W. M. Melo, et al, "A pixel-wise image processing method for shock wave detection in high speed video", Simpósio de Aplicações Operacionais nas Áreas de Defesa, XVIII, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <[https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2016/st/ST\\_04\\_3.pdf](https://www.sige.ita.br/edicoes-antiores/2016/st/ST_04_3.pdf)>. Acesso em: 28/06/24.
- [13] C. N. Kingery; G Bulmash, "Airblast parameters from spherical air burst and hemispherical surface burst", Aberdeen, 1984.