



Sistemas de Armas e Aplicações Espaciais: Engenharia de Sistemas

Efeitos do EPS na leitura de pico de pressão refletida em ensaio de campo com explosivo militar

Effects of EPS on peak pressure reading reflected in field test with military explosive

Fausto Batista Mendonça¹, Girum Urgessa², Marcela Galizia Domingues¹, Koshun Iha¹ e José Atílio Fritz Fidel Rocco¹¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil²George Mason University - Civil, Environmental, and Infrastructure Engineering - 4400 University Drive, MS 6C1, Fairfax, VA 22030, USA

Article Info

Article History:

Received	27 April	2023
Revised	19 July	2023
Accepted	17 August	2023
Available online	22 September	2023

Palavras Chave:

**Pressão refletida
PBX
poliestireno expandido.**

Keywords:

**Reflected pressure
PBX
Expanded polystyrene**

E-mail addresses:

fausto@ita.br (F. B. Mendonça),
gurgessa@gmu.edu (G. Urgessa),
marcelagalizia@hotmail.com (M. G.
Domingues),
koshun@ita.br (K. Iha),
friz@ita.br (J. A. F. F. Rocco)

Resumo

Resultados alcançados em ensaios experimentais, utilizando quatro lajes de concreto armado bi apoiadas como alvos de explosivo plástico de uso militar PBX (plastic-bonded explosive), são apresentados neste trabalho. Foi verificada a capacidade de revestimento de espuma de EPS (poliestireno expandido) atenuar o valor de pico de pressão refletida registrada em sensores piezoelétricos. Foram realizadas análises estatísticas nos resultados de leitura de pressão refletida para verificar a atenuação gerada pela espuma. Os resultados apontaram redução de 38% do pico de pressão refletida experimental em comparação com a pressão refletida teórica esperada, na laje que recebeu revestimento de uma camada de 5 cm de EPS.

Abstract

Results achieved in experimental tests, using four reinforced concrete slabs supported as targets of military plastic explosive PBX (plastic-bonded explosive), are presented in this work. The ability of EPS (expanded polystyrene) foam coating to attenuate the peak value of reflected pressure recorded in piezoelectric sensors was verified. Statistical analyzes were performed on the reflected pressure reading results to verify the attenuation generated by the foam. The results showed a 38% reduction in the experimental reflected peak pressure compared to the expected theoretical reflected pressure, in the slab that received a 5 cm layer of EPS coating.

I. INTRODUÇÃO

A liberação súbita, repentina e em grande escala de energia pode ser uma das definições de explosão, porém a sua origem confere uma classificação que pode ser física, química ou nuclear, segundo Akhavan [1], Smith [2] e Ngo et al. [3]. A elevação súbita de temperatura e pressão devido a uma reação exotérmica de oxidação sob altíssima velocidade seria outra definição clássica de explosão química. Existem diversas definições de explosão, porém, o que é possível notar em todas elas é que sempre se referem a um fenômeno que acontece sob uma velocidade muitíssimo elevada, conforme descrito por Keller et al. [4] e Sabatini et al. [5].

Os explosivos são substâncias simples ou misturas capazes de produzir uma decomposição rápida o suficiente para gerar pressões e onda de choque, autossustentáveis [6], [7], que podem ser classificados como alto ou baixo explosivo, em função da energia de ativação que possuem para serem detonados ou deflagrados. Em geral, os alto explosivos são mais estáveis, precisando ser iniciados pela deflagração de um baixo explosivo que é menos estável. A detonação de um alto explosivo desprende gases sob

altíssima temperatura, que pode chegar a 7000°C no epicentro que decai rapidamente perdendo calor para o meio, e pressão da ordem de 300.000 bar, que se desloca afastando-se do epicentro, comprimindo o ar que se encontra à sua volta e gerando, assim, uma frente de onda, conhecida com onda de choque ou blast wave [3], [8], [9]. A onda de choque se desloca a uma velocidade supersônica [1], [10].

A frente de onda se desloca gerando uma fase chamada positiva de aumento de pressão, e logo atrás dela segue uma região onde existe vácuo. Isso faz com que logo que a frente de onda passe ocorra uma sucção, ou seja, uma região de sub pressão para suprir o vácuo que foi gerado.

A Fig. 1 apresenta o diagrama da pressão no tempo de uma onda de choque gerada por detonação de explosivo registrada por um sensor piezoelétrico [11]. É possível notar a presença de picos secundários que surgem no decaimento da curva, são picos de pressão refletida [12]. Registros de sensores piezoelétricos com a presença de picos repetidos de onda no início da curva indicam a presença de pressão refletida, conforme verificado por Amorim [13].

Alvos que se apresentam a 90° da direção de propagação da onda de choque, ou seja, a direção de propagação é paralela à normal à superfície, acabam recebendo impacto de

pressão refletida (P_r). O dano é gerado pelo impulso específico (I), que corresponde à integral da curva de pressão, picos de reflexão geram aumento do valor de I [14]. O tempo de duração da fase positiva da curva é outro fator que influencia no resultado final da integral para obter o valor de impulso específico.

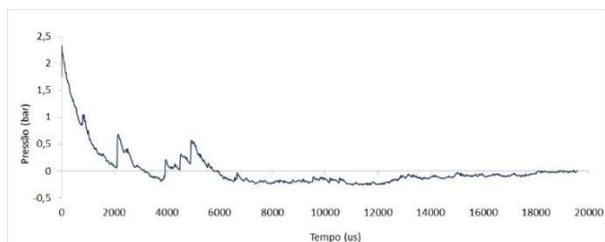


Fig. 1. Diagrama de pressão gerado por um sensor piezoelétrico [11].

Edificações que configuram possíveis alvos militares, por vezes não foram projetadas para suportar carregamentos dinâmicos de pressão e impulso [12]. A importância do comportamento dinâmico de elementos estruturais começa a se tornar objeto de pesquisas após a Segunda Guerra Mundial, porém os projetos de edificações ainda não contemplavam carregamentos dinâmicos. Ao final do século passado, com o aumento de ações terroristas e diversas guerras pelo mundo, os calculistas começam a considerar esse tipo de carregamento [12]. Entretanto, as hipóteses de carregamento no cálculo estrutural convencional, ou seja, com baixa probabilidade de sofrer algum tipo de carregamento por onda de choque, não contemplam ações de efeito de explosão [15].

Materiais para revestirem elementos estruturais, com a intenção de mitigar efeitos de explosão, são alternativas para edificações que não foram submetidas a análise de comportamento sob efeito de onda de choque durante a fase de projeto. As espumas poliméricas são os materiais mais frequentemente utilizados nesses casos [16]–[19]. Resultados obtidos por Langhorst *et al.* [20] mostraram que materiais como perlita, pedra pome e espumas de fibra de vidro são capazes de atenuar efeitos de onda de choque podendo trazer maior proteção às estruturas, pessoas e equipamentos. As reduções alcançadas em picos de pressão incidente variaram entre 32 % e 66 %. Espumas metálicas também vêm sendo estudadas como materiais de revestimento para serem proteção contra efeitos de explosões, conforme relatado por Shim *et al.* [17], em que é descrita a maior eficácia das espumas de alumínio, chegando a reduzir 35 % da pressão refletida. Hajek *et al.* [21] verificaram que materiais deformáveis são capazes de absorver parte da energia refletida que retorna para o ambiente da detonação.

Esse trabalho visa verificar a capacidade da espuma de EPS atenuar o valor do pico de pressão refletida em ensaio experimental de campo com explosivo militar.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho de Ngo *et al.* [3] observa-se um overview dos conceitos e equações já consagradas nos estudos sobre o efeito da onda de choque em edificações, além de conceituar matematicamente os esforços oriundos de uma detonação, como efeito da onda de choque e impulso. Esses conceitos também foram mencionados nos estudos de Silva [8] e Goel

et al. [22]. Na Equação (1) apresentada por Ngo *et al.* [3] obtém-se o valor de pressão refletida. Essa equação é verdadeira para a condição de gás ideal, onde $C_p/C_v = 7/5$ [8].

$$P_r = 2P_{so} \left[\frac{7P + 4P_{so}}{7P + P_{so}} \right] \quad (1)$$

Onde P_{so} é o valor do pico de pressão incidente. Existem várias equações na literatura para calcular o valor de P_{so} teórico. Entretanto, as equações de Kingery e Bulmash [23] tem sido as mais utilizadas para predição de valores dos parâmetros agindo sobre edificações em explosões a céu aberto. Na Equação (2) tem-se o valor de P_{so} segundo Kingery e Bulmash.

$$Y = 2,6113 - 1,6901 U + 0,0080 U^2 + 0,3367 U^3 - 0,0051 U^4 - 0,0809 U^5 - 0,0047 U^6 + 0,0079 U^7 + 0,0007 U^8 \quad (2)$$

Onde o valor de U é dado por (3).

$$U = -0,2143 + 1,3503 T_k \quad (3)$$

Tendo T_k como sendo o valor de log da distância em escala, que é dada por (4).

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4)$$

Onde R é a distância entre o epicentro e o ponto considerado como alvo em metros e W é a massa em kg de equivalente TNT do explosivo. Quanto menor a distância em escala maior a quantidade de picos de pressão refletida serão observados [24].

O manual publicado pela ONU denominado IATG (International Ammunition Technical Guidelines) [14] esclarece que o valor estimado de P_{so} obtido por (2) corresponde a cargas esféricas de TNT em ambiente aberto, onde Y corresponde ao log de P_{so} .

Os valores de P_r máxima refletida foram obtidos por análise visual das curvas de pressão geradas pelos sensores piezoelétricos. Os sensores posicionados junto à face superior da laje foram os que registraram picos secundários significativos [11]. A Fig. 2 apresenta o dispositivo de ensaio onde é possível notar os sensores posicionados junto à face superior da laje de concreto armado, bi apoiada. Observa-se ainda o explosivo que foi suspenso acima da laje a 2,0 m de distância da face superior. O explosivo utilizado, em formato cilíndrico medindo 10,5 cm de diâmetro por 20 cm de altura, foi o PBX (plastic-bonded explosive). A massa em equivalente TNT dos corpos de prova dos explosivos variou entre 2,58 e 2,72 kg. Uma espoleta elétrica no topo do cilindro iniciou a queima do trem explosivo.

As lajes de concreto medindo 1,0x1,0x0,08 m foram armadas com área de aço positiva, ou seja, localizada na parte inferior das lajes, suportando o esforço de momento fletor positivo gerado na face inferior de uma peça biapoiada, quando sujeita a esforço de carregamento sobre sua face superior. Os valores de resistência à compressão do concreto foram de 40 MPa, 50 MPa e 60 MPa, sendo verificados segundo a NBR 12655 pela empresa Qualitec®. Esses valores são comumente utilizados em obras de pontes e prédios comerciais ou militares em diversas partes do

mundo. As características da área de aço e de resistência à compressão do concreto estão na Tabela I. São apresentados dois valores de área de aço, pois estão dispostos perpendicularmente entre si, formando uma tela de malha quadrada no interior das lajes.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS DE ÁREA DE AÇO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO DAS LAJES.

Laje	Área de aço (cm ²)	Resistência à compressão do concreto (MPa)
1	1,4 x 2,96	50
2	2,0 x 2,0	60
3	1,4 x 1,4	40
4	1,4 x 2,96	50

Os sensores de pressão foram posicionados em volta da laje, sendo quatro apontando para o explosivo e quatro juntos à laje, no intuito de captar mais resultados de onda refletida. Sua capacidade de medição é de até 5.000 kPa em intervalos de 0,01 ms.

A laje 4 recebeu na sua face superior um revestimento de 5 cm de EPS (poliestireno expandido) no intuito de verificar a possibilidade deste material atenuar o valor de onda de choque refletida, conforme Fig. 3. Foi utilizada uma camada de cola específica para EPS na fixação da espuma à face superior da laje. Essa laje foi escolhida para receber o revestimento pelo fato de existir outra igual que serviria como corpo de prova de controle, caso da laje 1 conforme Tabela I já apresentada.



Fig. 2. Dispositivo do experimento pronto.

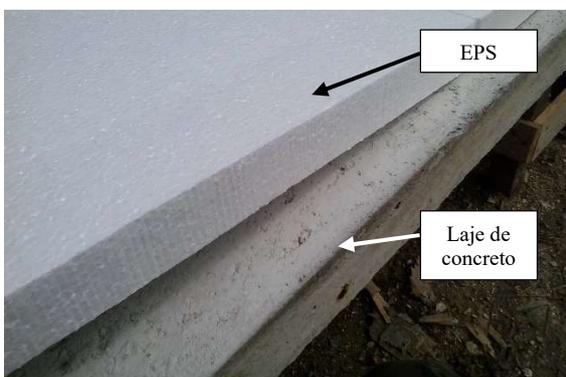


Fig. 3. Revestimento de EPS sendo colado à face superior da laje de concreto.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

A interpretação das curvas de pressão geradas permitiram a verificação dos picos de pressão refletida, observados nos sensores posicionados para captar essa informação. A Fig. 4 traz um dos gráficos gerados na detonação do experimento 3.

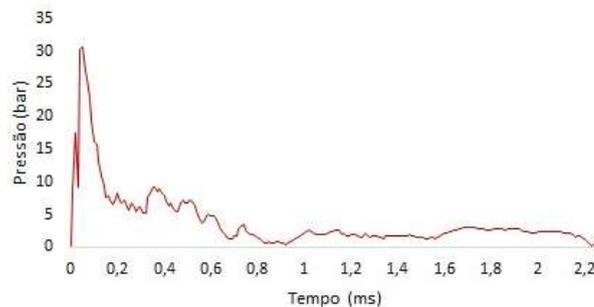


Fig. 4. Diagrama de pressão com registro de pico de pressão refletida no experimento 3.

Nota-se na Fig. 4 que as reflexões ocorrem diversas vezes, pois o alvo localiza-se próximo do explosivo [25]. O desenvolvimento do primeiro impacto da frente de onda no experimento 2 é apresentado na Fig. 5. A formação da onda de choque em explosivo de corpo cilíndrico iniciado por uma extremidade é explicada em [12]. A imagem foi obtida a 0,9 ms após o disparo da espoleta elétrica. Impactos de onda refletida ocorrem na sequência. Um desses impactos é acompanhado na sequência das imagens das Fig 6 e 7, imagens obtidas a 3,2 ms e 3,3 ms do disparo respectivamente, onde a onda refletida se desloca no sentido da seta tracejada. Esse movimento ocorre após o primeiro impacto já ter acontecido.

Por meio das equações apresentadas foram calculados os valores esperados de Pr (pressão refletida). As condições de contorno do experimento foram as mesmas para os quatro testes, conforme visualizado na Fig. 2. A comparação dos valores esperados e obtidos experimentalmente pode ser visualizado na Tabela II.



Fig. 5. Registro da frente de onda incidente contra a face superior da laje 2. Imagem obtida a 0,9 ms do disparo da espoleta.



Fig. 6. Registro de frente de onda refletida se deslocando contra a laje 2. Imagem obtida a 3,2 ms do disparo da espoleta.



Fig. 7. Registro de frente de onda refletida se deslocando contra a laje 2 na sequência da imagem da Fig. 6. Imagem obtida a 3,3 ms do disparo da espoleta.

TABELA II. COMPARAÇÃO ENTRE PICO DE PRESSÃO REFLETIDO ESPERADO (TEÓRICO) E LIDO (EXPERIMENTAL). A LAJE 4 POSSUÍA REVESTIMENTO DE EPS NA SUA FACE SUPERIOR.

Laje	Pr Máxima Calculada (bar)	Pr Máxima lida (bar)	Diferença
1	18,57	21,14	12 %
2	19,57	20,29	3,5 %
3	36,40	30,84	15 %
4	19,57	12,19	38 %

É possível notar que a laje 4, que possuía revestimento de 5 cm de EPS na face superior, registrou a maior diferença entre os valores teórico e experimental. Ressalta-se ainda que a diferença foi reduzindo o valor esperado em quase 40 %. O EPS proporcionou a maior redução de pico de onda de choque refletida registrada pelos sensores, em comparação aos outros três experimentos que não possuíam esse revestimento. Entretanto, é importante ressaltar que o EPS foi perdido pela sua queima, o que não impediu que proporcionasse a redução do pico de pressão refletida. O valor de redução encontrado se aproxima daqueles já verificados em outros experimentos disponíveis na literatura utilizando materiais como espumas de alumínio e pedra porosa.

Todas as lajes romperam sua seção transversal de concreto, porém, a laje 2, que possuía concreto com 60 MPa foi a que apresentou maior integridade após o experimento. A Fig. 8 traz a face inferior da laje onde se desenvolveram trincas, porém a peça não foi totalmente seccionada.



Fig. 8. Face inferior da laje 2. Trincas podem ser observadas, porém a peça não foi seccionada.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Foram realizados quatro experimentos em escala utilizando aproximadamente 2,60 kg de explosivo PBX sendo detonado a 2,0 m de distância da face superior de lajes de concreto armado bi apoiadas e armadas para suportar momento fletor positivo. Uma das lajes possuía revestimento de EPS na sua face superior no intuito de verificar a possibilidade deste material atenuar picos de pressão de onda de choque refletida.

Considerando que todas as lajes possuíam a mesma condição de contorno e os corpos de prova dos explosivos foram moldados no mesmo dia, não possuindo diferenças em sua composição, os testes puderam demonstrar que o EPS pode agir como atenuador de onda de choque refletida para explosões da magnitude ensaiada. A redução alcançada por 5 cm de EPS como revestimento foi de 38 %.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Akhavan, *The Chemistry of Explosives*, 2nd ed. Cambridge: R.S.C, 2004.
- [2] P. D. Smith and J. G. Hetherington, *Blast and Ballistic Loading of Structures*, 1st ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [3] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay, "Blast loading and blast effects on structures - An overview," *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 7, pp. 76–91, 2007.
- [4] J. Keller, M. Gresho, A. Harris, and A. Tchouevlev, "What is an explosion?," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 5, pp. 1–8, 2014.
- [5] J. J. Sabatini, L. A. Wingard, P. E. Guzman, E. C. Johnson, and G. W. Drake, "Bis-Isoxazole dinitrate: A potential propellant and explosive ingredient," in *Proceedings of the 42nd International Pyrotechnics Society Seminar*, 2016, pp. 98–101.
- [6] E. Kirchhof, "Estimativa de Vida Útil de Explosivo PBX no Envelhecimento Acelerado," Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- [7] N. Kubota, *Propellants and Explosives - Thermochemical Aspects of Combustion*, 2nd ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2007.
- [8] W. C. L. Silva, "Blast – efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas," Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- [9] N. Anandavalli, N. Lakshmanan, N. Iyer, A. Prakash, K. Ramanjaneyulu, J. Rajasankar, and C. Rajagopal, "Behaviour of a Blast Loaded Laced Reinforced Concrete Structure," *Def. Sci. J.*, vol. 62, no. 5, pp. 284–289, 2012.
- [10] V. Dharma Rao, A. Srinivas Kumar, K. Venkateswara Rao, and V. S. R. Krishna Prasad, "Theoretical and Experimental Studies on Blast Wave Propagation in Air," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 1, no. 40, pp. 138–143, 2015.

- [11] F. B. Mendonça, “Avaliação da capacidade do explosivo plástico PBX gerar danos a uma laje de concreto armado biapoiada por efeito de onda de choque,” Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.
- [12] F. B. Mendonça, G. Urgessa, K. Iha, R. J. Rocha, and J. A. F. F. Rocco, “Comparison of Predicted and Experimental Behaviour of RC Slabs Subjected to Blast using SDOF Analysis,” *Def. Sci. J.*, vol. 68, no. 2, pp. 138–143, 2018.
- [13] C. B. Amorim, “Estudo experimental da dinâmica e dos parâmetros de efeito de sopro da onda de mach,” Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.
- [14] UNODA, “International Ammunition Technical Guideline (United Nations SaferGuard),” New York, 2011.
- [15] M. J. Lowak, B. L. Bingham, T. J. Mander, and J. R. Montoya, “Blast testing of pre-cast concrete load-bearing wall panels,” in *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, 2016, pp. 1404–1413.
- [16] B. Moore, T. Jaglinski, D. S. Stone, and R. S. Lakes, “On the bulk modulus of open cell foams,” *Cell. Polym.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–10, 2007.
- [17] C. Shim, D. Shin, and N. Yun, “Pressure-impulse diagram of Multi-layered aluminium foam panels,” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 284–295, 2013.
- [18] C. Wu, L. Huang, and D. J. Oehlers, “Blast Testing of Aluminum Foam – Protected Reinforced Concrete Slabs,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 25, no. October, pp. 464–474, 2011.
- [19] Y. Hua, P. K. Akula, and L. Gu, “Experimental and numerical investigation of carbon fiber sandwich panels subjected to blast loading,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 56, pp. 456–463, 2014.
- [20] B. Langhorst, C. Cook, J. Schondel, and H. S. Chu, “Material Systems for Blast-Energy Dissipation,” Idaho Falls, 2010.
- [21] R. Hajek, M. Foglar, and J. Fladr, “Influence of barrier material and barrier shape on blast wave mitigation,” vol. 120, pp. 54–64, 2016.
- [22] M. D. Goel, V. A. Matsagar, A. K. Gupta, and S. Marburg, “An abridged review of blast wave parameters,” *Def. Sci. J.*, vol. 62, no. 5, pp. 300–306, 2012.
- [23] C. N. Kingery and G. Bulmash, “Airblast Parameters From TNT Spherical Air Bursts and Hemispherical Surface Bursts,” Maryland, 1984.
- [24] F. Mendonça, G. Urgessa, and J. Rocco, “Experimental investigation of 50 MPa reinforced concrete slabs subjected to blast loading,” *Ing. e Investig.*, vol. 2018, no. 2, pp. 27–33, 2018.
- [25] D. Bogosian, S. Rigby, and D. Powell, “A comprehensive comparison of methods for clearing effects on reflected airblast impulse,” *Mil. Asp. Blast Shock* 24, no. 3, 2016.