

Simulação computacional do comportamento de chapa metálica para proteção de estruturas sujeitas à onda de choque de explosão

Karoline de Sousa Felix¹, Anselmo da Silva Augusto², Koshun Iha², José A. Fritz Fidel Rocco², Fausto Batista Mendonça² e Girus Urgessa³

¹Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE - Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

³George Mason University (GMU), Fairfax/VA - EUA

Resumo – Diversos materiais têm sido estudados como possíveis mecanismos de proteção a estruturas sujeitas ao efeito de artefatos explosivos. Este trabalho apresenta os resultados iniciais, de uma série de estudos que estão em andamento, nos quais uma chapa metálica foi submetida ao efeito de onda de choque de explosão. Sua finalidade é verificar, através de simulação computacional, a capacidade do material em absorver parte da energia gerada por uma detonação, podendo possivelmente, ser utilizado como um elemento de sacrifício próximo a membros estruturais primários de edificações. Para isto, foi simulado o impacto de detonação de uma carga de explosivo em 1 kg de TNT sobre uma chapa metálica de 5 mm de espessura e dimensões 0,5 x 0,5 m, situada a distâncias do epicentro que variam entre 1 a 1,5 m. Os resultados deste estudo preliminar apontam um comportamento satisfatório da chapa ao resistir aos efeitos de detonação propostos.

Palavras-Chave – Explosivos, chapa metálica, onda de choque.

I. INTRODUÇÃO

Explosões acidentais, ataques terroristas e detonação de artefatos em conflitos armados e guerras, sempre foram ameaças contra pessoas e edificações. A detonação de um artefato explosivo é caracterizada pela geração de uma onda de choque, que é capaz de ferir pessoas ou causar danos a elementos sensíveis situados próximos o suficiente dos alvos [1]. A intensidade do impacto varia de acordo com a distância entre o alvo e o epicentro, bem como com a intensidade da carga explosiva e sua composição. O comportamento de explosivos militares atuando contra peças estruturais vem sendo estudado nos últimos anos [2], [3] e foram observados comportamentos de alguns elementos estruturais que podem auxiliar nas concepções de projetos de edificações capazes de reduzir o efeito sofrido por estruturas e pessoas.

Elementos estruturais podem gerar colapsos das edificações ao serem solicitados por efeitos gerados nas explosões [4]. Materiais absorvedores da energia da onda de choque de explosão vem sendo estudados e ensaiados há alguns anos [5], [6], alguns resultados alcançados apontam a capacidade de reduzir os danos a edificações.

K. S. Felix, felix.karoline23@gmail.com; A. S. Augusto, anselmo@ita.br; K. Iha, koshun@ita.br; J. A. F. Rocco, friz@ita.br; F. B. Mendonca, fausto@ita.br; G. Urgessa, gurgessa@gmu.edu.

Concretos de alta resistência, adicionando limalha de aço ou polímeros no traço, têm sido outra opção de incremento da proteção de edificações contra efeitos de explosões [7], [8], esses estudos têm demonstrado boa elevação da resistência das edificações contra efeitos de explosões, entretanto, elevam o custo do material a ser empregado nos elementos estruturais.

Simulações com elementos finitos têm sido uma opção para a busca de materiais absorvedores da energia emanada nas explosões em diversos estudos [9], [10], pois reduzem os riscos de acidentes e os custos que envolvem um ensaio de campo com artefatos.

Todavia, uma das formas de promover a proteção de elementos estruturais principais em edificações sujeitas ao efeito de explosivos é através das chamadas estruturas de sacrifício. Nesta conjectura, uma estrutura secundária seria utilizada no entorno de membros estruturais primários, protegendo-os do impacto gerado por eventuais explosões. Dessa forma, este mecanismo torna-se extremamente interessante para proteção de entidades privadas ou governamentais [11], [12], especialmente sob as ameaças mais comuns na atualidade, como ataques terroristas, explosões acidentais e conflitos armados [1].

Para se alcançar os objetivos desejados, é necessário o desenvolvimento de estudos acerca do comportamento de materiais capazes de absorver parte da energia dissipada em uma explosão. Este trabalho propõe a utilização de uma chapa metálica como elemento de sacrifício, em uma simulação computacional utilizando elementos finitos, no intuito de verificar a capacidade da chapa suportar os efeitos de onda de choque oriunda de detonação de explosivo sem a geração de fragmentos.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com (1), proposta por [13], o movimento causado por eventos de detonação é caracterizado pelo somatório de três parcelas. A primeira é dada pelo produto da aceleração (\ddot{u}) pela massa do corpo (m), a segunda associa o coeficiente de amortecimento (C) com a velocidade do deslocamento (\dot{u}) e, por fim, a terceira parcela apresenta o produto entre o deslocamento (u) e a rigidez (k).

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + ku = P(t) \quad (1)$$

Para este trabalho foram realizadas três simulações, nas quais uma chapa metálica é submetida ao efeito de onda de choque. A chapa em estudo possui 5 mm de espessura e dimensões 0,5 x 0,5 m. As condições de contorno adotadas foram dois bordos do elemento engastados e dois livres. A carga de explosivo esférico (W_{esf}), tendo 1 kg em equivalente TNT, foi posicionada a diferentes distâncias do centro da placa metálica, conforme ilustrado na Fig. 1.

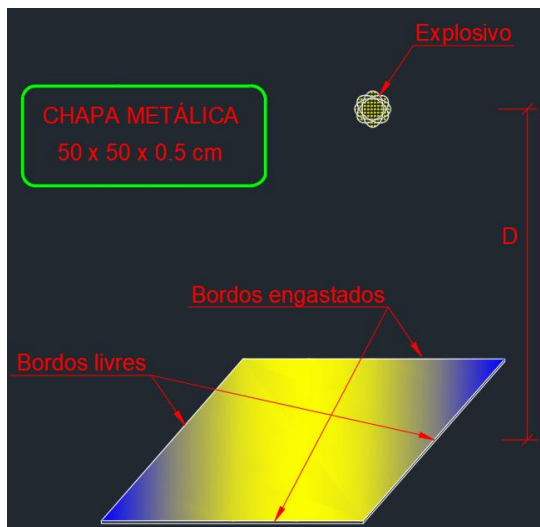


Fig. 1. Esquema da simulação em estudo.

As três distâncias do explosivo ao anteparo, indicadas como D na tabela I, utilizadas nas simulações foram de 1,0, 1,3 e 1,5 m. Como a carga possuía o valor unitário em equivalente TNT, a distância escalonada (Z) corresponde ao valor da distância em stand-off, ou seja, a distância real do explosivo até a chapa, considerando que a densidade do ar não variava nessa distância. Na Tabela I podem ser encontradas as principais variáveis testadas no estudo.

TABELA I. PRINCIPAIS VARIÁVEIS TESTADAS NO ESTUDO

Simulação	W_{esf} (kg)	D (m)	Z (m/kg ^{1/3})
1	1,0	1,5	1,5
2	1,0	1,3	1,3
3	1,0	1,0	1,0

Baseado em [14], utilizou-se para a chapa o metal WELDOX 460E, cujas propriedades do material foram estudadas por Børvik *et al.* e podem ser encontradas em [15].

As simulações foram realizadas no software Abaqus Learning Edition. Por se tratar da versão estudante do software, era possível criar apenas modelos estruturais que comportem, no máximo, mil nós. Devido a esta limitação, utilizando-se o máximo de recursos computacionais disponíveis, foi definida uma malha de 1,7 cm, conforme observado na Fig. 2.

Ainda, é importante ressaltar que a precisão dos resultados está intimamente conectada ao refinamento da malha definida na simulação, uma vez que o software utiliza o método dos elementos finitos nas análises realizadas. Isso mostrou-se evidente, pois para valores abaixo da malha adotada, os deslocamentos percebidos sofreram um decréscimo de seu valor. Contudo, como não se dispunha da versão profissional do software, a discretização da malha limitou-se ao valor já descrito acima.

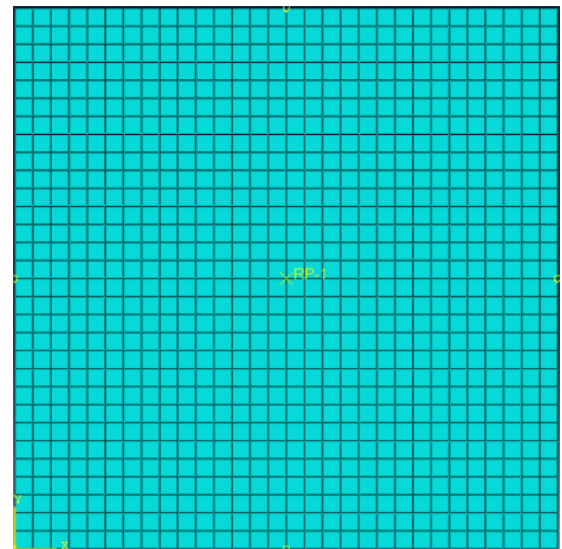


Fig. 2. Malha utilizada nas simulações.

Tendo em vista que uma explosão se trata de um fenômeno ocorrido sob uma altíssima velocidade [1], [16], [17], foi adotado para cada simulação um período de tempo equivalente a 60 ms.

Depois de realizadas as simulações, foi analisado o comportamento do material dentro do intervalo de tempo especificado, a fim de investigar sua viabilidade como um elemento de proteção a edificações sujeitas ao efeito de onda de choque.

É importante salientar que este estudo se trata de um ensaio piloto. Uma série de pesquisas atreladas ao tema estão em andamento, logo este trabalho é caracterizado como uma primeira etapa para o levantamento da viabilidade de uma tecnologia, utilizada em edificações de sacrifício, voltada para proteção de elementos estruturais ou elementos sensíveis à segurança contra algum tipo de ataque terrorista ou explosão acidental.

Destaca-se ainda que este estudo utilizou o trabalho desenvolvido em [18] como referência para o início de sua realização. Contudo, ressalta-se que não é válida a possibilidade de comparação entre os trabalhos, uma vez que estes apresentam propostas distintas de materiais considerados.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

Para cada simulação foram analisados os deslocamentos do ponto central da chapa metálica ao longo do tempo, sendo o deslocamento máximo aquele ocorrido no momento exato do pico de pressão.

A distribuição dos deslocamentos dos pontos da chapa referentes à simulação 1, no instante de máximo deslocamento, pode ser observada na Fig. 3.

Conforme esperado, em razão da simetria do problema, é possível perceber uma gradação crescente nos deslocamentos dos pontos da chapa, de forma que, aqueles localizados próximos dos bordos engastados deslocam-se menos em relação àqueles situados no entorno central da chapa. O mesmo fenômeno ocorreu para as simulações 2 e 3.

Já os deslocamentos do ponto central da chapa ao longo do tempo para as simulações 1, 2 e 3 estão mostrados nas Fig. 4, 5 e 6, respectivamente.

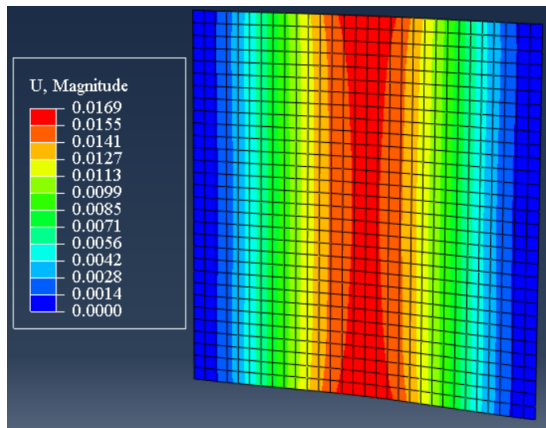


Fig. 3. Distribuição de deslocamentos dos pontos da chapa metálica na simulação 1.

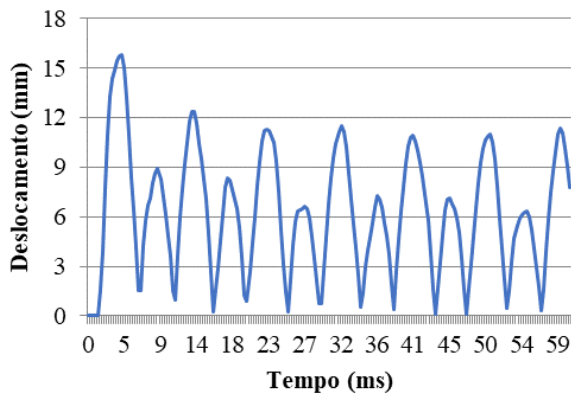


Fig. 4. Deslocamentos do ponto central da chapa na simulação 1.

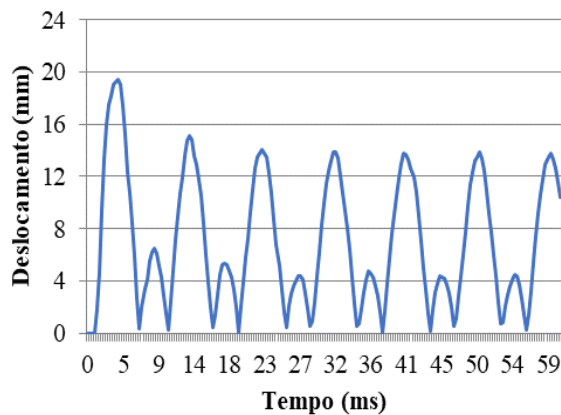


Fig. 5. Deslocamentos do ponto central da chapa na simulação 2.

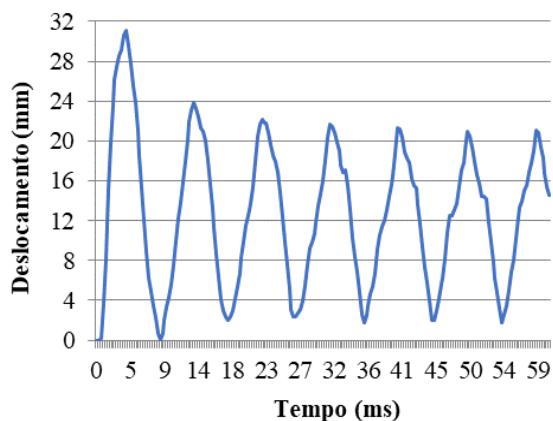


Fig. 6. Deslocamentos do ponto central da chapa na simulação 3.

Nota-se que, inicialmente, os gráficos apresentam um pico, ocorrido geralmente entre 3 e 6 ms, seguido de deslocamentos cíclicos que caracterizam movimentos harmônicos. Isso acontece uma vez que, para eventos dinâmicos de curtíssima duração, a parcela devido ao amortecimento é considerada nula [19] em (1). Para a carga simulada, nota-se que a chapa não rompeu, mas apresentou comportamento de vibração.

Na Tabela II, são mostrados o deslocamento máximo para cada simulação e o respectivo instante em que este ocorreu.

TABELA II. DESLOCAMENTO MÁXIMO DO PONTO CENTRAL DA CHAPA

Simulação	Tempo (ms)	Deslocamento máximo (mm)
1	4,2	16
2	3,9	19
3	3,6	31

Conforme esperado, à medida em que o explosivo se aproxima da chapa, o efeito de onda de choque torna-se mais perturbador, produzindo assim deslocamentos maiores no centro da chapa. Contudo, ressalta-se que estes são pequenos, logo a chapa, possivelmente, poderia ser utilizada como elemento de proteção a ser fixada em estruturas de sacrifício, a fim de minimizar danos aos elementos principais de edificações, conferidos por explosões sob as mesmas condições simuladas neste trabalho.

Nota-se, ainda na Tabela II, que quanto mais próximo o explosivo se encontra da chapa, mais cedo observa-se a deformação máxima no centro do alvo. Isso ocorre pelo fato de o tempo de chegada da onda de choque ser menor, pois a distância a percorrer foi reduzida em comparação à simulação anterior.

Entretanto, explosões reais geram outros efeitos que não foram considerados nesse experimento, como efeito de fragmentação do corpo do artefato. Logo, é importante ressaltar que os resultados aqui apresentados ainda não são indicação do uso deste material para a proteção de edificações contra explosões, pois outros efeitos de detonação ainda precisam ser estudados.

Diversas pesquisas e estudos a respeito do tema seguem em andamento, com novas simulações para verificar a capacidade de outras chapas suportarem cargas explosivas mais elevadas, bem como experimentos capazes de considerar, por exemplo, efeitos de fragmentação do corpo do artefato que não foram contemplados neste trabalho. A ação de fragmentos contra a chapa metálica configura uma fase futura do estudo em andamento.

IV. CONCLUSÕES

Simulações computacionais utilizando elementos finitos foram realizadas para verificar a capacidade de chapas metálicas de 5 mm de espessura suportarem efeitos de detonação de 1,0 kg de TNT, a distâncias entre 1,0 e 1,5 metros. Para as distâncias ensaiadas, verificou-se de forma satisfatória a capacidade da chapa de 5,0 mm de espessura, com as dimensões de 0,5 x 0,5 metros, suportar a onda de choque gerada pela detonação do explosivo proposto.

Como parte de uma série de estudos em desenvolvimento a respeito do tema, este trabalho caracteriza-se como uma primeira etapa das pesquisas para levantamento da viabilidade da utilização de uma chapa metálica para a

possível proteção de membros estruturais principais contra algum tipo de ataque terrorista ou explosão acidental.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] DUSENBERRY, D. O. Handbook for blast-resistant design of buildings. 1. ed. New Jersey: John Wiley e Sons, 2010.
- [3] F. B. Mendonça, K. Iha, G. Pinheiro, C. B. Amorim, e J. A. F. F. Rocco, “Comportamento de uma laje de concreto armado submetida aos efeitos da onda de choque oriunda da detonação de explosivo plástico de uso militar”, *Spectrum*, vol. 22, nº 1, p. 25–29, set. 2021.
- [4] ASCE. Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities. 2nd. ed. Reston: ASCE, 2010.
- [5] SHIM, C.; SHIN, D.; YUN, N. Pressure-impulse diagram of Multi-layered aluminium foam panels. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 8, n. 3, p. 284–295, 2013.
- [6] F. B. Mendonça, G. S. Urgessa, R. L. Dutra, R. F. B. Gonçalves, K. Iha, & Rocco, J. A. F. F. Rocco, “EPS foam blast attenuation in full-scale field test of reinforced concrete slabs,” *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 42, no. 1, e40020, 2019. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v42i1.40020>
- [7] MAO, L. et al. Numerical simulation of ultra high performance fibre reinforced concrete panel subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, v. 64, p. 91–100, 2014.
- [8] LI, J. et al. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions. *International Journal of Impact Engineering*, v. 93, p. 62–75, 2016.
- [9] DHARMA RAO, V. et al. Theoretical and experimental studies on blast wave propagation in air. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, v. 1, n. 40, p. 138–143, 2015.
- [10] A. d. S. Augusto, F. Medonça, G. Urgessa and I. Koshun, "Finite Element Analysis of Experimentally Tested Concrete Slabs Subjected to Airblast," *Defence Science Journal*, vol. 71, no. 5, pp. 630-638, 2021.
- [11] F. Mendonça, G. Urgessa, and J. Rocco, “Experimental Investigation of 50 MPa reinforced concrete slabs subjected to blast loading,” *Ing. e Investig.*, vol. 38, no. 2, pp. 27-33, 2018.
- [12] G. Urgessa, A. Maji, “Dynamic response of retrofitted masonry walls for blast loading,” *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*,” vol. 136, no. 7, pp. 858-864, 2010.
- [13] P. D. Smith, J. G. Hetherington, Blast and ballistic loading of structures. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [14] A. S. Augusto, “Modelagem computacional do efeito de onda de choque de alto explosivo sobre laje de concreto armado,” Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.
- [15] T. Børvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, M. Langseth, “Numerical simulation of plugging failure in ballistic penetration,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 34-35, pp. 6241-6264, 2001.
- [16] J. Keller, M. Gresho, A. Harris, and A. Tchouvelev, “What is an explosion?,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 5, pp. 1-8, 2014.
- [17] 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*, pp. 98-101, 2016.
- [18] A. S. Augusto, F. B. Mendonça, G. S. Urgessa, K. Iha, “Finite Element Analysis of Experimentally Tested Concrete Slabs Subjected to AirBlast,” *Defense Science Journal*, vol. 71, no. 5, pp. 630-638, 2021.
- [19] A. K. Maji, J. P. Brown, G. S Urgessa, “Full-scale testing and analysis for blast-resistant design,” *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 217-225, 2008.