

Previsão dos efeitos de detonação de alto explosivo em chapas de aço durante ensaios usando análise de elementos finitos

Anselmo S. Augusto¹, Fausto B. Mendonça¹, Girum Urgessa², Jose A. Fritz Fidel Rocco¹ e Koshun Iha¹.

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP – Brasil

²George Mason University, Fairfax/VA – USA

Resumo - A investigação dos efeitos de alto explosivos em estruturas metálicas é de suma importância para o desenvolvimento de novos elementos de proteção ou para a avaliação da capacidade das estruturas existentes. Com o intuito de alcançar esses objetivos, será realizado um conjunto de testes de detonação utilizando cargas de TNT, observando-se os impactos resultantes em chapas de 2 mm de aço estrutural A36. No entanto, antes de conduzir esses testes, é crucial realizar previsões precisas dos efeitos das detonações nas chapas, garantindo a segurança do evento e assegurando que as detonações estão sendo efetivas. Para se atingir esse objetivo, uma série de simulações utilizando o método dos elementos finitos (MEF) foi realizada no software Abaqus®, variando-se as distâncias de detonação esperadas. Os resultados obtidos nas simulações mostraram que as chapas sofreram deformações acima do limite de elasticidade do material, porém, sem provocar a ruptura. Isso atende ao objetivo da pesquisa, pois deformações pequenas ou catastróficas não permitiriam a medição dos efeitos do sopro sobre as estruturas.

Palavras-chave – Efeito de sopro, MEF, análise dinâmica.

I. INTRODUÇÃO

A. Contextualização

O uso de explosivos é frequente em diversas áreas das atividades humanas, incluindo aplicações civis, militares e na indústria aeroespacial [1], [2]. Ademais, há uma preocupação global com os efeitos de atos terroristas [3], [4]. Além de suas aplicações específicas, os explosivos possuem um potencial letal se utilizados de forma inadequada, seja em explosões acidentais, atos terroristas ou em ações militares mal executadas. Como resultado, várias instituições e pesquisadores, tanto civis quanto militares, têm se dedicado ao estudo dos efeitos destrutivos dos explosivos, tanto em relação ao corpo humano quanto às estruturas e construções [5], [6].

Dentre os elementos que podem ser afetados pelos explosivos, as construções civis, militares e aeroespaciais são de particular importância. Essas edificações estão constantemente expostas a ações militares, atos terroristas ou explosões acidentais. A possível destruição dessas estruturas não apenas resulta em perdas econômicas significativas, mas também em perdas materiais e humanas [6], [7].

Portanto, o estudo dos efeitos dos explosivos em edificações é importante por dois motivos: no projeto de instalações resistentes a explosões; e para a seleção adequada de armamentos em ações militares visando atingir alvos de valor estratégico [5], [7].

Este estudo é uma continuação das pesquisas realizadas por Mendonça et al. [7] - [14] e Augusto et al. [15], [16].

B. Objetivos e visão geral

No trabalho apresentado por Augusto et al. [16], foram realizadas simulações MEF com o intuito de se escolher a melhor espessura de chapa de aço e distância de detonação. Embasado nesses resultados foram adquiridas chapas de aço A36 com espessura média de 2,14 mm e atribuídas distâncias de detonação de 300 mm até 600 mm. Em tais condições, há a previsão que os ensaios apresentem resultados que sejam válidos para condução da pesquisa.

Já no presente artigo são apresentados os resultados de simulações MEF mais próximas da realidade do ensaio de campo e considerando as seguintes evoluções na pesquisa: mudanças no suporte do ensaio, remoção do aparato de medição no centro da chapa, definição da espessura da chapa em 2 mm, mudança no vão para 431 mm e carga com 327 g de TNT. Com essas simulações mais similares aos ensaios, o **objetivo** é um melhor embasamento para a equipe de detonação no campo de ensaio, permitindo que observem se os ensaios estão ocorrendo dentro do projetado. É possível, assim, concluir se o explosivo foi iniciado de forma correta, se as distâncias definidas foram bem atribuídas ou até mesmo concluir se as cargas estão dentro dos parâmetros esperados.

Foram realizadas 4 simulações MEF variando-se a distância entre a chapa de aço de teste e o ponto central da detonação. Essa variação foi de 300 mm até 600 mm, em um passo de 100 mm. O principal parâmetro de saída medido foi o deslocamento no centro da chapa de aço.

Para a análise acima descrita, utilizou-se o software Abaqus® em seu módulo explícito, adequado para análises dinâmicas. A automação das diversas simulações foi realizada por meio de um macro em Python desenvolvida especificamente para o Abaqus. Essa macro possibilitou a modificação do arranjo, execução das simulações de MEF, leitura dos resultados relevantes e exportação de gráficos para distância [17], [18].

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Modelos constitutivos do material

O modelo de Johnson e Cook (JC) [19] foi o utilizado no presente estudo para caracterizar a chapa de aço. Tal modelo constitutivo foi desenvolvido em 1983 para metais em diferentes temperaturas, altas torções e taxas de deformação elevadas. Ele é adequado para situações em que um material dúctil sofre grandes deformações em alta velocidade, como em explosões. A Equação (1) apresenta a tensão de Von Mises utilizado no modelo JC, que leva em consideração a taxa de deformação e o efeito da temperatura na redução da resistência do metal [19]. O presente trabalho desconsiderou o efeito da temperatura na simulação, de acordo com os estudos de [20] e [21].

$$\sigma_v = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - (T_m^*)^m) \quad (1)$$

onde:

σ_v – Tensão de Von Mises;

ε – Deformação plástica equivalente;

$\dot{\varepsilon}$ – Taxa de deformação;

$\dot{\varepsilon}^*$ – Taxa de deformação equivalente adimensional, igual a $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$;

$\dot{\varepsilon}_0$ – Taxa de deformação de referência em s^{-1} ;

A, B, C, n e m – Constantes do modelo, obtidas em testes para cada material; e

T_m^* – Temperatura homóloga.

Seguindo a mesma linha teórica, Johnson e Cook apresentaram um novo modelo [22] que incorpora a falha em metais. Esse modelo considera uma acumulação de danos nos materiais ao longo dos ciclos de integração da simulação numérica. A deformação plástica equivalente para falha é apresentada em (2).

$$\varepsilon_{fp} = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

onde:

ε_{fp} – Deformação plástica equivalente de falha;

D_1 to D_5 – Constantes de dano obtidas em testes para cada tipo de material;

σ^* – Tensão adimensional igual a σ_m / σ_v ; e

σ_m – Média das três tensões principais.

Uma vez que o valor de ε_{fp} apresentado em (2) é variável, é necessário implementar uma variável de dano (D) que acumula o valor ao longo dos ciclos de integração do modelo, sendo definida em (3). Uma vez que essa variável atinja o valor de 1, o material é considerado rompido.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_{fp}} \quad (3)$$

onde $\Delta \varepsilon_p$ é a deformação plástica acumulada em cada ciclo de integração.

B. Testes de detonação na arena de ensaios

Os testes deverão ser realizados em 2023 na arena de ensaios de detonação do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). O layout proposto para os testes é exibido na Fig. 1. Um suporte mecânico de aço com altura de 900 mm será fixado em uma base de concreto. Dimensionou-se tal estrutura de forma que seja completamente rígida, sem sofrer deformações durante os testes de explosão. Serão utilizadas cargas de TNT na forma de esferas nuas com um diâmetro de 75 mm e massa média de 327 g. As chapas de aço A36, com dimensões de 600 x 400 mm x 2,14 mm, serão substituídas em cada teste. Tais chapas possuem duas dobras nas bordas, além de furos para passagem de parafusos. Serão fixadas ao suporte mecânico utilizando barras de aço espessas e seis parafusos. O vão livre da chapa que sofrerá ação das cargas de sopro será de 431 mm. As deformações serão medidas através de uma câmera de alta velocidade, instalada a uma distância segura.

As distâncias do centro do explosivo até a face da chapa irão variar durante os ensaios de 300 até 600 mm.

C. Modelagem do ensaio no programa de elementos finitos

Para representar as chapas de aço A36, utilizaram-se elementos de casca Lagrangiana S4R, levando em conta sua pequena espessura em relação às outras dimensões. O modelo constitutivo escolhido foi o JC, conforme definido anteriormente no item A. Os parâmetros JC para o A36 foram obtidos na literatura [23], [24] e estão resumidos na Tabela I.

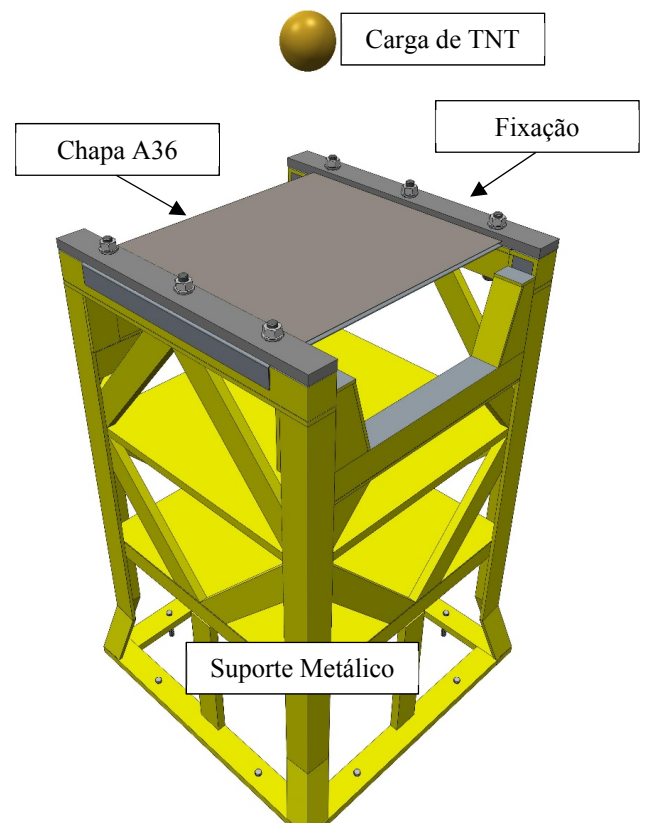


Fig. 1. Layout dos ensaios

TABELA I. PARÂMETROS DE JOHNSON-COOK PARA O AÇO A36 [23], [24]

Dimensional		Adimensional	
Densidade (kg/m ³)	7850	v	0.26
E (GPa)	200	n	0.228
A (MPa)	285.9	m	0.917
B (MPa)	499.8	C	0.0171
Tm (K)	1811	D1	0.4025
To (K)	300	D2	1.107
$\dot{\epsilon}_0$	1.00	D3	-1.899
		D4	0.00961
		D5	0.3

Condições de contorno adequadas foram aplicadas durante a simulação.

Para calcular as cargas de explosão que impactam a chapa de aço, utilizou-se o plug-in do CONWEP® [25] no software Abaqus®, que é uma ferramenta amplamente validada para explosões superficiais com base em dados empíricos das equações de Kingery e Bulmash [26]. Essas equações são utilizadas em diversos manuais de defesa e instituições internacionais [6], [27].

A malha de elementos possuía dimensões de cerca de 3mm, resultando em simulações com 23.810 nós e 23.454 elementos quadriláteros lineares do tipo S4R. Testes com uma malha mais refinada de 2mm não mostraram melhorias nos resultados, apenas aumentaram o esforço computacional.

A Fig. 2 apresenta a configuração final da simulação implementada no software Abaqus®, e a Fig. 3 exibe os detalhes do refinamento da malha. Como as dobras nas pontas da chapa não interferem no ensaio, foram suprimidas da simulação.

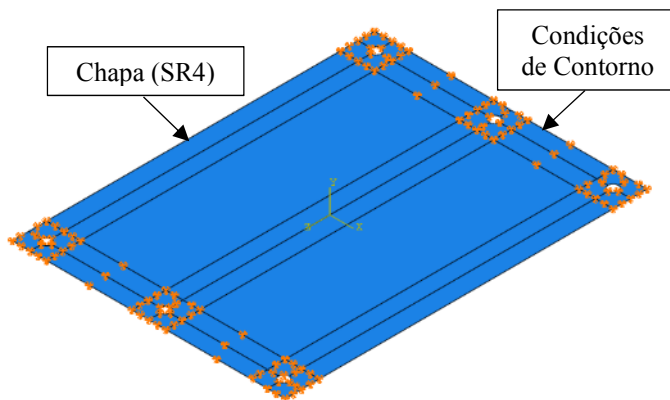


Fig. 2. Configuração da simulação no software MEF

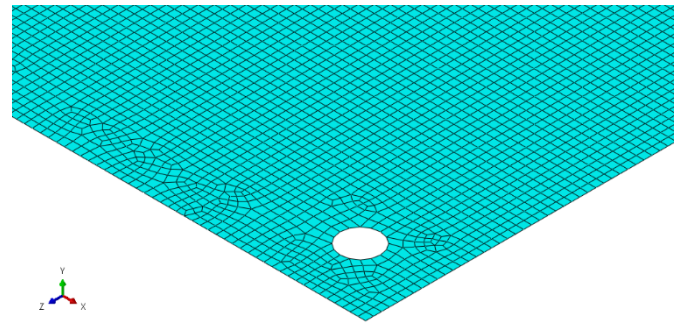


Fig. 3. Detalhes do refinamento da malha

D. Processo de simulação

Cada simulação foi realizada com um intervalo de tempo de 100 ms após a detonação, o que foi suficiente para observar os principais efeitos de resposta na chapa de aço. Cada uma demorou cerca de 2,5 horas para ser processada, utilizando 4 processadores paralelos de 2,2 GHz e 16 GB de RAM.

Foram realizadas para quatro distâncias de afastamento da detonação de 300 mm a 600 mm, com incremento de 100 mm.

Desenvolveu-se uma Macro em Python específica para o software Abaqus®, a fim de alterar as características de cada caso, executar a simulação, abrir os arquivos de resultados, extrair as informações e exportar dados e arquivos de imagem. No total, o esforço computacional para todas as simulações exigiu de 10 horas.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

A. Resultados

Um resumo dos principais resultados obtidos nas simulações é apresentado na Tabela II. O significado de cada um desses parâmetros será descrito nos próximos parágrafos.

Um dos resultados mais relevantes consiste no deslocamento (U) no centro da chapa de aço. Utiliza-se tal deslocamento para prever o grau de danos em estruturas, conforme estabelecido por [5] e [6]. A Fig. 4 ilustra o deslocamento no centro da chapa para cada distância de detonação. Considera-se negativo o movimento para baixo, ou seja, no sentido de deslocamento da onda de choque. Umin representa a deformação com maior magnitude observada no centro da chapa enquanto deformando para baixo. Ou seja, a deformação sofrida inicialmente pela chapa quando atingida pela onda de choque. Já Umax representa o pico de deformação positiva, que ocorre quando a chapa sofre uma vibração e acaba movendo-se para cima por um período de tempo. Devido ao amortecimento e dano no material, o módulo de Umin sempre será maior do que Umax,

O tempo para que a chapa atinja Umin é representado por tUmin. A Fig. 5 detalha, com uma vista isométrica para cada distância de detonação, as deformadas das chapas de aço, exibindo os deslocamentos (U) em um tempo de simulação próximo de tUmin.

Outro dado de grande importância utilizado na análise é a Deformação Plástica Equivalente (PEEQ), que reflete o nível de deformações definitivas além do limite elástico. Quanto maior o valor de PEEQ, maior é o dano irreversível ao

material. A Fig. 7 apresenta o PEEQ máximo acumulado na chapa ao longo de toda simulação, com uma vista superior para cada distância de detonação.

PEEQmaxt e PEEQmaxc representam, respectivamente, a máxima Deformação Plástica Equivalente observada em toda a chapa e apenas no seu centro.

O último parâmetro mecânico lido, mas que não será esmiuçado no presente trabalho, é a tensão equivalente ou tensão de Von Mises experimentada pela chapa. MISESmxt e MISESmxc representam, respectivamente, a máxima tensão de Von Mises sofrida em toda a chapa e apenas no seu centro.

Por fim, $|V \max|$ e $|A \max|$ são o máximo do módulo da velocidade e aceleração observados no centro da chapa.

TABELA II. RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Parâmetro	Unidade	Distância da detonação até a chapa (mm)			
		300	400	500	600
U min	(mm)	-47,24	-36,01	-28,74	-23,83
t Umin	(ms)	0,96	1,06	1,16	1,28
U max	(mm)	-	-	-	13,07
$ V \max $	(m/s)	73,99	48,85	39,38	33,92
$ A \max $	(m/s ²)	1,61E+06	1,18E+06	5,33E+05	3,43E+05
PEEQmaxt	%	23,04	18,93	17,43	11,81
PEEQmaxc	%	5,19	3,79	4,32	4,33
MISESmxt	MPa	683,20	663,92	652,55	623,44
MISESmxc	MPa	571,54	553,88	560,18	553,56

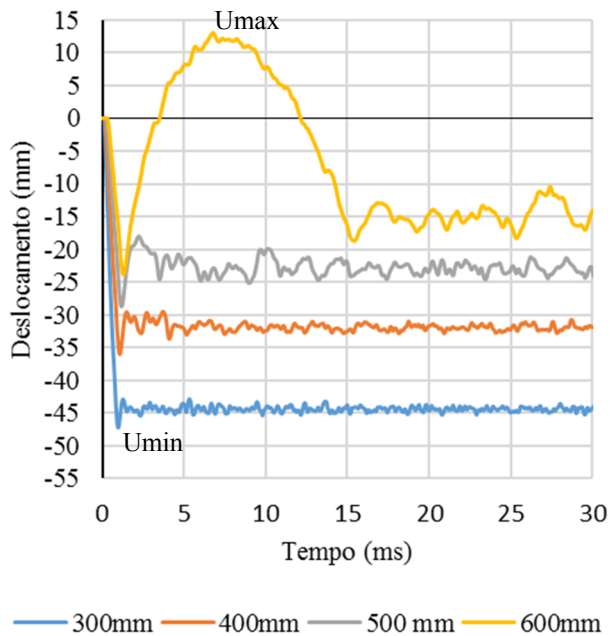


Fig. 4. Deslocamentos no centro da chapa de aço em função do tempo e da distância de detonação.

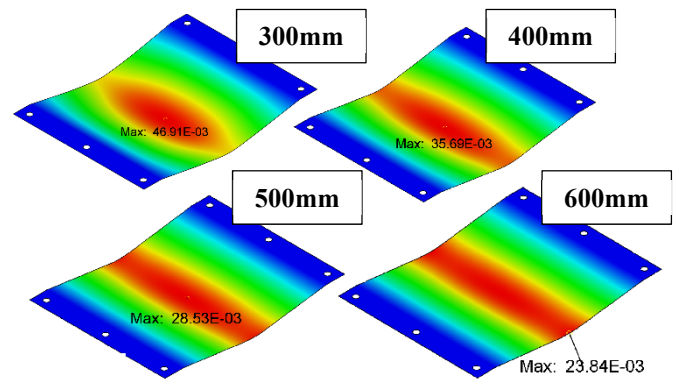


Fig. 5. Deslocamentos nas chapas no momento de maior deformação registrada na simulação, para cada distância de detonação (destacadas nos quadros). Vista isométrica.

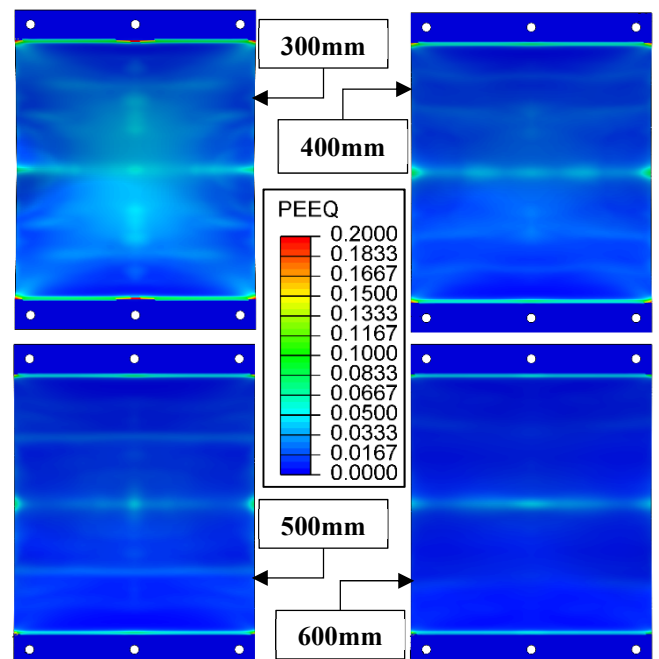


Fig 6. PEEQ acumulado na chapa ao longo da simulação, para cada distância de detonação (destacadas no quadro com seta). Vista superior.

B. Análise

O objetivo principal deste estudo é observar os impactos das cargas de TNT em chapas de aço antes de realizar um experimento real de explosão. Os resultados obtidos neste estudo são resumidos na Tabela II. Conforme esperado, quanto mais próxima a detonação da chapa, mais intenso são os efeitos.

A curva da Fig. 4 mostra o comportamento de deslocamento da chapa no seu centro. Observa-se que até a distância de detonação de 500 mm a chapa deformou-se para baixo e não teve nenhum movimento ondulatório. Após atingir um pico de deslocamento de 28 até 47 mm permaneceu-se uma deformação negativa um pouco menor que esse pico. Já para a distância de 600 mm, a menor intensidade dos efeitos permitiu

que a chapa iniciasse um movimento ondulatório. Após atingir um pico de deformação negativo de 23 mm, a chapa deformou-se para cima, atingindo até 13 mm. Após isso, retornou para sua posição inferior, permanecendo com uma deformação negativa de cerca 15 mm.

Esse efeito ocorre, pois, em intensidades maiores de explosão, as deformações plásticas são mais acentuadas. Em tais deformações o material perde a capacidade de retornar à sua posição original. Já na maior distância, o efeito elástico da chapa ainda teve um impacto significativo, levando ao comportamento mais ondulatório esperado nesse regime de deformação.

Analisando a deformação plástica (PEEQ) observa-se que deformações irreversíveis ocorreram em diversas regiões da chapa. Essas foram mais acentuadas em detonações mais próximas. Na observação da Fig. 6, fica evidente que as maiores deformações plásticas ocorreram nas proximidades dos apoios das chapas. Ou seja, mesmo que os maiores deslocamentos ocorram no centro da chapa, o fato dos apoios serem rígidos levou a uma maior concentração de deformações plásticas naquelas regiões. Ou seja, há um maior risco de ruptura das chapas próximo dos apoios.

Ainda analisando a Tabela II e a Fig. 6, pode-se concluir o quanto próximo da ruptura o material se aproximou. Como referência, testes em barras de aço A36 falham com 20% de deformação [28]. As regiões das chapas que passaram de 20% de PEEQ foram marcadas em vermelho na Fig. 6. A única condição na qual o PEEQmax ultrapassou o limite em alguns pontos, foi na distância de detonação de 300 mm. Ou seja, para essa distância, há risco de ruptura, principalmente próximo dos apoios.

Examinando os picos de tensão, observa-se que a chapa sofrerá tensões elevadas, em alguns pontos passando do limite de escoamento do aço A36 que é de 250 MPa [28]. Conclui-se, assim, que para todos os ensaios, o aço irá escoar. Isso já era esperado, uma vez que ocorreram deformações plásticas.

Por fim, ressalta-se a magnitude da velocidade, aceleração e tempo para se atingir os picos de deslocamento experimentos no centro da chapa durante a simulação. Os picos de velocidades foram de 33 m/s até 74 m/s. A aceleração chegou a atingir a ordem de grandeza de 10^6 m/s². Já o tempo para atingir o pico de deslocamento ficou na ordem de 1 ms. Observa-se a velocidade e agressividade dos efeitos provocados pela detonação.

IV. CONCLUSÃO

Com base nos resultados e nas análises realizadas (item III), pode-se concluir que as distâncias de detonação irão provocar os efeitos esperados para a pesquisa: a chapa irá sofrer danos e deslocamento significativos, mas sem risco de ser obliterada.

O objetivo principal deste trabalho foi prever os efeitos durante ensaios de detonação a serem executados, ajudando a equipe em campo a observar se há alguma falha no procedimento em andamento. É importante ressaltar que testes com explosivos são custosos em termos de materiais, equipe e espaço seguro. Nesse sentido, o método dos elementos finitos

se mostrou uma solução econômica e eficiente, cuja capacidade já foi comprovada em outros estudos acadêmicos, como [29], [30].

Agradecimentos

Ao *Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE* pelo apoio com software, laboratório e equipe.

REFERÊNCIAS

- [1] P. W. COOPER, *Explosives Engineering*, New York: Wiley-VCH, 1997.
- [2] Department of the army, TM 9-1300-214 - Military Explosives, Washington, D.C.: Department of the army, 1984.
- [3] A. Nazarian and C. Presser, "Forensic analysis methodology for thermochemical characterization of ANNM and ANFO homemade explosives," *Thermochim. Acta* 608, pp. 65-75, 2015.
- [4] A. M. REMENNIKOV, The state of the art of explosive loads characterisation, Wollongong: University of Wollongong, 2016.
- [5] D. CORMIE and M. GEOFF, *Blast effects on buildings*, London: Thomas Telford, 2009.
- [6] USDOD, "Structures to resist the effects of accidental explosions - UFC 3-340-02," Department of Defense (USDOD), Washington, 2008.
- [7] F. Mendonça, Avaliação da capacidade do explosivo plástico PBX gerar danos a uma laje de concreto armado biapoiada por efeito de onda de choque, São José dos Campos: Tese de doutorado em Ciências e Tecnologias Espaciais - ITA, 2017.
- [8] F. Mendonça, G. Urgessa, K. Iha, R. Rocha and J. 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.
- [9] F. Mendonça, R. Gonçalves, G. Urgessa, K. Iha, R. Rocha, M. Domingues and J. Rocco, "Emprego de química computacional na verificação e validação da pressão de detonação de explosivo plástico-PBX," *Quim. Nova*, vol. 41, no. 3, pp. 310-14, 2018.
- [10] F. Mendonça, G. Urgessa and J. Rocco, "Blast Response of 60 MPa Reinforced Concrete Slabs Subjected to Non-Confined Plastic Explosives," in *Structures Congress, American Society of Civil Engineer*, Denver, CO, 2017.
- [11] F. Mendonça, G. Urgessa and J. Rocco, "Experimental investigation of 50 MPa reinforced concrete slabs subjected to blast loading," *Ingeniería e Investigación*, vol. 38, no. 2, pp. 27-33, 2018.
- [12] F. Mendonça, G. Urgessa, R. Dutra, R. Gonçalves, K. Iha and J. Rocco, "EPS foam blast attenuation in full-scale field test of reinforced concrete slabs," *Acta Sci.*, vol. 40, no. 1, p. e40020, 2020.
- [13] F. B. Mendonça, G. S. Urgessa, K. Iha and J. A. F. F. Rocco, "Comparação Entre os Critérios de Projeto de Carga de Vento e Efeito Sopro de uma Detonação – Caso das Torres de Alta Tensão," *Spectrum*, vol. 22, no. 1, p. 42-46, 2021.
- [14] F. B. Mendonça, K. Iha, G. Pinheiro, C. B. Amorim and 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, 2021.
- [15] A. 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.
- [16] A. S. Augusto, F. B. Mendonça, G. Urgessa and K. Iha, "Pre-test input optimization of high explosive blast effects on steel sheets using finite element analysis," in *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, São José dos Campos, 2022.
- [17] SIMULIA, "Abaqus Version 6.10," Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, 2010.
- [18] SIMULIA, "Abaqus Theory Manual Version 6.10," Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, 2014.

- [19] G. Johnson and W. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," in *International Symposium on Ballistics, 7*, The Hague, 1983.
- [20] H. Jama, M. Bambach, G. Nurick and et al, "Numerical modeling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads," *Thin-Wall Struct*, vol. 47, p. 1523–34, 2009.
- [21] Y. Ding, M. Wanga, Z.-X. Li and H. Hao, "Damage evaluation of the steel tubular column subjected to explosion and post-explosion fire condition," *Engineering Structures*, vol. 55, pp. 44-55, 2013.
- [22] G. Johnson and W. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, pp. 31-48, 1985.
- [23] M. Gomah and M. Demiral, "An Experimental and Numerical Investigation of an Improved Shearing Process with Different Punch Characteristics," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 6, p. 2020, 2020.
- [24] S.-W. Lee and S.-H. Chang, "Experimental investigation of pull-through force of wing-type fastening inserts co-cured in long fiber prepreg sheet (LFPS)," *Composite Structures*, vol. 206, no. 2018, pp. 978-986, 2018.
- [25] D. W. Hyde, "Conventional weapons effect (CONWEP) - Application of TM5-855-1.," Department of the Army, Vicksburg, 1988.
- [26] C. N. KINGERY and G. BULMASH, "Technical report ARBRL TR-02555 - Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst," Aberdeen Proving Ground, Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, Maryland, US, 1984.
- [27] NAÇÕES UNIDAS, "Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator," NAÇÕES UNIDAS, 2023. [Online]. Available: <https://unsafeguard.org/un-safeguard/kingery-bulmash> [Accessado 24 Maio 2023].
- [28] ArcelorMittal, "Rolled Products Catalogue - 2015 Edition," ArcelorMittal, Jardim Limoeiro Serra - ES, 2015.
- [29] M. Abdallah, "Numerical Study of Steel Structures Responses to External Explosions," in *International Conference on Civil Engineering and Architecture 2017*, Berlin-Germany, 2020.
- [30] E. L. Eskew and S. Jang, "Remaining capacity estimation for buildings after an explosion using the adaptive alternate path analysis," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 630-641, 2019.