

Verificação Experimental do Fator de Incremento da Pressão Refletida Gerada por Detonação de Explosivo Plástico não Confinado

Fausto Batista Mendonça¹, Girum Solomon Urgessa², Marcela Galizia Domingues¹ e José Atílio Fritz Fidel Rocco¹

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

² George Mason University (GMU), Fairfax/VA – USA

Resumo – Prever os efeitos e magnitudes de cargas geradas em edificações oriundas de detonações de artefatos são de grande utilidade aos planejamentos de projetos de edificações, principalmente para estruturas de possíveis alvos militares e indústrias onde esse tipo de acidente pode ocorrer. Este trabalho apresenta resultados de leitura de pressão gerada por onda de choque, mais especificamente pressão refletida. Três lajes de concreto armado medindo 1,0×1,0×0,08 metros foram submetidas à detonação de explosivo plástico não confinado, a uma distância de 2,0 metros, tendo sensores de pressão posicionados sob essa mesma distância. Os valores de leitura de pressão permitiram verificar a magnitude do valor de pressão refletida que foi comparado com o incremento no valor da pressão incidente esperada. Os resultados trouxeram valores que estão de acordo com a literatura disponível atualmente, comprovando experimentalmente o fator de incremento a ser utilizado de forma segura em projetos de proteção contra explosões.

Palavras-Chave – pressão refletida, onda de choque, laje de concreto armado.

I. INTRODUÇÃO

Sejam acidentais ou intencionais, como terrorismo ou ataques militares, as explosões de artefatos próximos a estruturas de edificações têm sido a cada ano mais frequentes. Nas últimas décadas muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no intuito de compreender as ações das forças geradas numa explosão contra edificações [1]–[3]. Experimentos, efetuados por simulação computacional ou ensaios de campo com modelos reduzidos, têm apresentado resultados que permitem verificar o comportamento de diversos tipos de materiais, quando sujeitos a onda de choque gerada por uma detonação. A intensidade do dano causado pela onda de choque sobre painéis de concreto armado foi verificada em trabalho apresentado por Syed *et al* [4], onde foi possível comparar ensaio experimental com simulação computacional utilizando o programa LS-DYNA. A forma de ruptura dos painéis foi estudada através do mapeamento das concentrações de tensões geradas pela onda de choque que incidiu sobre a estrutura. Foi possível verificar ainda os picos de sobrepressão refletida (P_r) que atuaram contra a face dos painéis, demonstrado nos gráficos de pressão por tempo registrados pelos sensores de pressão. Trabalhos utilizando espumas de alumínio como revestimento de estruturas de concreto armado foram apresentados recentemente [5]–[7], demonstrando a capacidade da espuma reduzir efeitos de onda de choque oriunda de detonação de explosivos sobre a estrutura na ordem de 50%.

F.B. Mendonca, fausto@ita.br; G.S. Urgessa, gurgessa@gmu.edu; M.G. Domingues, marcelagalizia@hotmail.com; J.A.F.F. Rocco, friz@ita.br.

Experimento realizado por Nam *et al.* [8] pode verificar o comportamento de painel de laje de concreto armado de 1,0×1,0×0,07 metros, com 42 MPa de resistência à compressão e reforçado com GFRP (plástico reforçado com fibra de vidro), quanto a capacidade do GFRP aumentar a rigidez da laje para suportar onda de choque gerada pela detonação de 33,4 kg de ANFO (que possui massa em equivalente TNT de 0,82) a uma distância de 3,0 metros da face superior da laje. O modelo estrutural trazia as lajes engastadas nos quatro bordos e o reforço de GFRP foi colocado nas duas faces com espessura de 1,3 mm em cada uma. A armadura da laje possuía 25,8 mm² de seção transversal. Os resultados de deslocamento do painel apontaram boa aceitação do modelo matemático desenvolvido em Elementos Finitos comparado com os resultados experimentais. As diferenças ficaram por conta de valores de temperatura e pressão que foram adotados no modelo que não correspondiam aos mesmos do local do ensaio experimental. O revestimento de painéis de 5,0 cm de EPS (poliestireno expandido) numa das faces de uma laje de concreto armado com 50 MPa de resistência à compressão, possuindo taxa de armadura de 0,37% numa direção e 0,175% na direção perpendicular, foi a configuração do ensaio experimental realizado por Mendonça *et al.* [9], que submeteram a laje de 1,0×1,0×0,08 metros ao efeito de 2,7kg de explosivo plástico não confinado a uma distância de 2,0 metros. A laje foi biapoiada em cavaletes de madeira e sensores de pressão foram dispostos em volta do explosivo, sob a distância de 2,0 metros e junto à face superior da laje. Os resultados apontaram a capacidade do EPS reduzir o valor da pressão refletida registrada nos sensores piezoelétricos. O revestimento de EPS em estruturas de construção civil vem sendo usado há alguns anos [10], dessa forma, conhecer a resposta da interação entre ondas de choque oriunda de detonações de explosivo com esse tipo de material se mostra uma boa prática para auxiliar os projetistas a preverem cargas sobre as edificações, e assim proporcionarem oportunidade de salvar vidas ou equipamentos e até mesmo, evitar colapsos em caso de pequenas detonações acidentais.

O resultado da integração da curva de pressão (P) gerada por uma detonação de explosivo, no intervalo de tempo entre início (t_{oi}) e final (t_{of}) da fase positiva de pressão, é o impulso específico (I), apresentado em (1), esse valor costuma ser o responsável pelo colapso de edificações sujeitas à onda de choque de explosão [11]. Entretanto, a ocorrência de picos de pressão refletida, indicados por picos repetidos de onda no início da curva de pressão [12], elevam o valor do impulso específico positivo, aumentado a carga que age sobre a edificação.

$$I = \int_{t_{oi}}^{t_{of}} P dt \quad (1)$$

A curva apresentada na Fig. 1 permite observar como os picos de pressão refletida aumentam a área sob a curva de pressão. O valor teórico esperado do pico de pressão refletida vem sendo considerado como duas a oito vezes o valor da pressão incidente [11], [13], [14]. Este trabalho apresenta resultados de leitura de pressão refletida observados em três ensaios experimentais com configurações que seguem a mesma linha de ensaios que vêm sendo publicados nas últimas décadas, no intuito de agregar conhecimentos sobre os possíveis valores de pressão refletida a serem considerados em projetos de edificações que podem vir a sofrer impactos de onda de choque de explosão.

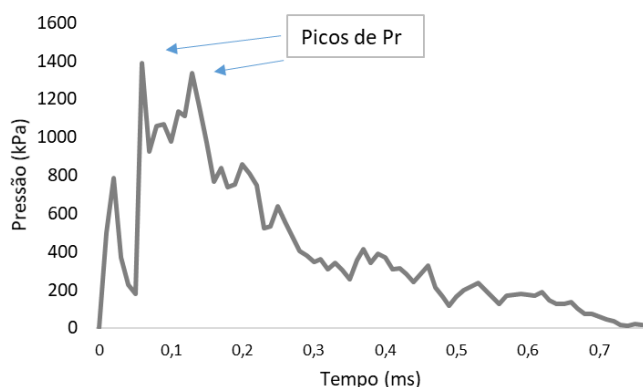


Fig. 1. Curva de pressão por tempo registrada numa detonação [15].

II. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na área de ensaio de explosivos do DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial). Três lajes de concreto armado medindo 1,0×1,0 metro com 8,0 cm de espessura e biapioida foram submetidas ao efeito de explosão de aproximadamente 2,7 kg de explosivo plástico PBX (*plastic-bonded explosive*), não confinado, que foi suspenso 2,0 metros acima das lajes. As lajes possuíam resistência característica à compressão (f_{ck}) de 50 MPa (Lajes L1 e L2) e de 60 MPa (Laje L3). O explosivo possuía um formato cilíndrico medindo 20 cm de altura por 10,5 cm de diâmetro. Sensores piezoelétricos de pressão foram dispostos em volta do explosivo e da laje a uma distância de 2,0 metros do explosivo (Fig. 2). A pressão atmosférica local (pressão ambiente) indicava 1017 mbar no dia do experimento. O explosivo não confinado evitou a geração de fragmentos.

A. Cálculo da sobrepressão refletida (P_r)

Para a obtenção do valor teórico esperado da pressão refletida é necessário obter o valor teórico da pressão incidente. Existem diversas equações para o cálculo deste valor, cada uma com suas particularidades, onde fatores como ambiente da detonação, tipo e formato do explosivo influenciam em qual equação usar. As equações adotadas

neste trabalho são indicadas para explosões em ambiente aberto sendo o explosivo moldado em carga esférica. Resultados de detonação de explosivos cilíndricos, nas proporções das dimensões utilizadas aqui, em comparação com detonações de explosivos esféricos, sob as mesmas condições atmosféricas, indicaram elevada similaridade nos parâmetros gerados pela explosão nas comparações publicadas em trabalho recente [16]. Sendo assim, equações utilizadas para explosões esféricas se mostram adequadas para predição de parâmetros de explosivos cilíndricos.



Fig. 2. Dispositivo do ensaio com laje, explosivo e sensores de pressão posicionados.

Para a obtenção do valor de pressão incidente faz-se necessário calcular o valor da distância em escala (Z) de cada explosão. A Equação (2) fornece o valor da distância em escala, sendo R a distância do explosivo ao sensor em metros e W a massa do explosivo em equivalente TNT, em quilos.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

Para a obtenção do valor de pressão incidente (P_{so}) foram adotadas duas equações que são facilmente encontradas na literatura [3], [15], [17]. A Equação (3) foi obtida por Kinney e Graham [18] após análises de experimentos com explosões químicas, onde P é a pressão ambiente.

$$P_{so} = P \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2 \right]}} \quad (3)$$

De posse dos valores de P_{so} é possível estimar o valor da sobrepressão refletida (P_r), por meio de (4) que é verdadeira para condição de gás ideal ($C_p/C_v = 7/5$) [3].

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

No manual publicado pela ONU denominado IATG (*International Ammunition Technical Guideline*) [19] foi divulgada (5), desenvolvida por Kingery e Bulmash [20], onde o valor estimado de P_{so} é obtido para uma carga

esférica de TNT em ambiente aberto e Y é o log de P_{so} . Sua aplicação é para valores de distância em escala entre 0,05 e 40 metros/kg^{1/3}. O valor da variável U é obtido por (6), onde T_k é o log de Z .

$$Y = 2,611368669 - 1,69012801396 U + 0,00804973591951 U^2 + 0,336743114941 U^3 - 0,00516226351334 U^4 - 0,0809228619888 U^5 - 0,00478507266747 U^6 + 0,00793030472242 U^7 + 0,0007684469735 U^8 \quad (5)$$

$$U = -0,214362789151 + 1,35034249993 T_k \quad (6)$$

Para a obtenção da pressão refletida, o IATG utiliza (7), tomando o mesmo valor de U obtido em (6) e sendo Y o log de Pr .

$$Y = 3,22958031387 - 2,21400538997 U + 0,035119031446 U^2 + 0,657599992109 U^3 + 0,0141818951887 U^4 - 0,243076636231 U^5 - 0,0158699803158 U^6 + 0,0492741184234 U^7 + 0,00227639644004 U^8 - 0,00397126276058 U^9 \quad (7)$$

B. Comparação entre valor teórico e experimental

A razão entre o valor de Pr lido e o de P_{so} teórico esperado permitiu encontrar o fator multiplicador da P_{so} teórica para a predição da pressão refletida. Estes passos foram realizados para as duas P_{so} teóricas consideradas. Posteriormente, os valores de Pr estimados foram comparados com os valores lidos pelos sensores piezoelétricos, e assim foi obtida porcentagem de diferença entre o esperado e o experimental registrado.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

Efetando-se a detonação do explosivo, foi possível obter as leituras dos sensores de pressão. A Fig. 3 apresenta a detonação de um dos testes, observando-se a incidência de uma frente de onda refletida, conforme indicada.



Fig. 3. Detonação do explosivo captada em alta velocidade.

De posse das leituras dos picos de pressão máxima, que foram considerados como sendo os valores de Pr lidos, e tendo calculado os valores teóricos de P_{so} segundo (3) para

cada experimento, foi possível obter a razão entre Pr e P_{so} de cada teste, conforme apresentado na Tabela I.

TABELA I. RESULTADO DA RAZÃO Pr LIDO / P_{SO} ESPERADO, USANDO (3)

Laje	Z (m/kg ^{1/3})	P_{so} Teórica (kPa)	Pr Lido (kPa)	Razão Pr/P_{so}
L1	1,43	451	3801	8,4
L2	1,46	434	2114	4,9
L3	1,45	436	2654	6,0

Aplicando os valores de P_{so} esperado por meio de (5) e (6), obtém-se os valores da Tabela II.

TABELA II. RESULTADO DA RAZÃO Pr LIDO / P_{SO} ESPERADO, USANDO (5) E (6)

Laje	Z (m/kg ^{1/3})	P_{so} Teórica (kPa)	Pr Lido (kPa)	Razão Pr/P_{so}
L1	1,43	414	3801	9,2
L2	1,46	398	2114	5,3
L3	1,45	401	2654	6,6

Nota-se que os valores da razão Pr/P_{so} encontrados estão de acordo com aqueles apontados pela literatura. Entretanto, os resultados de P_{so} obtidos por meio de (5) e (6) se mostraram menores, o que proporcionou um aumento no valor da razão em comparação com aquela encontrada por meio da P_{so} de (3). No entanto, apenas uma leitura de um teste ficou fora do intervalo indicado pela literatura como valor de Pr esperado, a da laje L1, ultrapassando o limite de oito vezes o valor de P_{so} teórico em 5%, para o processo comparativo usando (3) e (4), e em 15% usando (6) e (7).

Comparando-se os valores de Pr teórico esperado obtido por (4) com aquele obtido por (7), foi possível verificar que os valores teóricos estão compatíveis (Fig. 4). Entretanto, nos três testes o valor real lido ultrapassou o teórico esperado. Nota-se que o teórico esperado obtido pelos dois métodos, não apresenta o valor máximo esperado de oito vezes P_{so} , mas um valor médio dentro do intervalo entre dois e oito vezes.

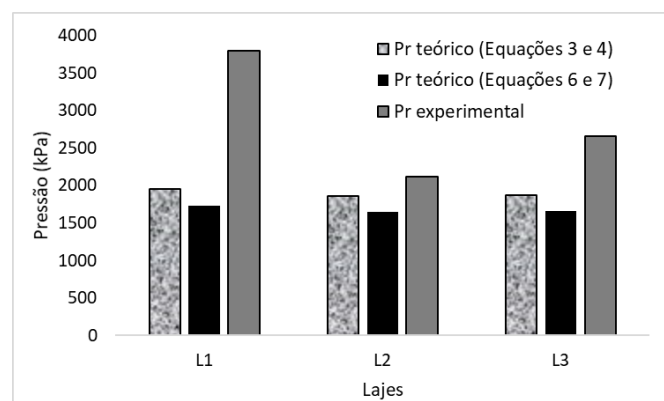


Fig. 4. Comparação entre Pr teórica e experimental.

Os valores obtidos experimentalmente indicam que é mais indicado trabalhar com valores previstos de Pr próximo ao valor máximo indicado pela literatura, que seria oito vezes o valor de P_{so} . Dessa forma, para efeito de dimensionamento, torna-se mais segura a opção de utilizar valores de oito vezes

Pso, acrescido de 15% como fator de segurança, para a predição de Pr máxima possível. É importante salientar que, esta predição, e indicação de uso de fator de segurança, só pode ser aplicada para condições de contorno semelhantes às apresentadas neste trabalho.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Ensaio experimental de campo, submetendo três lajes de concreto armado biapoiadas ao efeito de onda de choque gerada por detonação de explosivo plástico não confinado, foi realizado, no intuito de verificar o incremento a ser indicado sobre uma pressão incidente prevista para a predição da pressão refletida a ser registrada num evento de explosão. O valor desse fator de incremento permitiu propor um fator de segurança para projeto de edificação sujeita à ação de pressão refletida, oriunda de detonação de explosivo plástico não confinado. O valor maximizado foi considerado como um valor máximo possível para eventos de explosão em condições de contorno semelhantes às apresentadas neste trabalho. Ressalta-se que novos testes são necessários para refinar o valor do fator de segurança encontrado. A pesquisa sobre o tema segue ainda em curso.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Z. I. Syed, S. N. Raman, T. Ngo, P. Mendis, and T. Pham, "The Failure Behaviour of Reinforced Concrete Panels Under Far-field and Near-field Blast Effects," *Structures*, vol. 14, pp. 220–229, 2018.
- [5] A. Schenker *et al.*, "Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, no. 3, pp. 184–198, 2008.
- [6] C. Wu and H. Sheikh, "A finite element modelling to investigate the mitigation of blast effects on reinforced concrete panel using foam cladding," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 55, pp. 24–33, 2013.
- [7] 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.
- [8] J. W. Nam, H. J. Kim, S. B. Kim, N. H. Yi, and J. H. J. Kim, "Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 5, pp. 1212–1222, 2010.
- [9] F. B. Mendonça, G. S. Urgessa, R. L. Dutra, R. F. Boschi, K. Iha, and J. A. F. F. Rocco, "EPS foam blast attenuation in full-scale field test of reinforced concrete slabs," *Acta Sci. Civ. Eng.*, vol. 42, pp. 1–7, 2020.
- [10] M. Orçati, "ICF - Sistema de fôrmas termoacústicas de EPS para paredes autoportantes de concreto," *PINI*, Oct-2016.
- [11] ASCE, *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities*, 2nd ed. Reston: ASCE, 2010.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] J. Trajkovski, R. Kunc, J. Perenda, and I. Prebil, "Minimum mesh design criteria for blast wave development and structural response – MMALE method," *Lat. Am. J. Solidis Struct.*, vol. 11, no. 11, pp. 1999–2017, 2014.
- [15] 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.
- [16] J. Artero-guerrero, J. Pernas-sánchez, and F. Teixeira-dias, "Blast wave dynamics: The influence of the shape of the explosive," *J. Hazard. Mater.*, vol. 331, pp. 189–199, 2017.
- [17] 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.
- [18] G. F. Kinney and K. J. Graham, *Explosive shocks in air*, 2nd. New York: Springer Science, 1985.
- [19] UNODA, "International Ammunition Technical Guideline (United Nations SaferGuard)," New York, 2011.
- [20] C. N. Kingery and G. Bulmash, "Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. US Technical Report ARBRL-TR-02555. April 1984.," Maryland, 1984.