

Variação do Momento Linear de Lajes de Concreto Armado em Ensaios Experimentais com PBX

Fausto Batista Mendonça¹, Girum Urgessa², Luiz Eduardo Nunes de Almeida³, Koshun Iha⁴, Roberta Jachura Rocha³ e José Atílio Fritz Fidel Rocco⁴

¹IAOp - Instituto de Aplicações Operacionais – Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento – Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – Campus do CTA – S. J. dos Campos – SP, CEP: 12228-970

²George Mason University - Civil, Environmental, and Infrastructure Engineering - 4400 University Drive, MS 6C1, Fairfax, VA 22030, USA

³Avibras Indústria Aeroespacial S.A – Rodovia dos Tamoios, km 14 – Estrada do Viradouro, 1200, Viradouro – Jacareí – SP, CEP: 12315-020, Brasil

⁴ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Departamento de Química – Pça. Mal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – S. J. dos Campos – SP CEP: 12228-900

Resumo – Ameaças terroristas ou armamentos militares tem se tornado eventos comuns que podem gerar danos severos a estruturas e até ceifar vidas. As respostas das estruturas precisam ser entendidas para um correto dimensionamento. Este artigo apresenta resultados de ensaios experimentais com explosivos, comparando a variação do momento linear de lajes de concreto armado variando a massa de equivalente TNT e o peso das lajes. Três lajes de 50 MPa, e mesma taxa de armadura, foram sujeitas a explosivo plástico não confinados de peso similar. Uma das lajes foi revestida com 5 cm de espuma na face superior. Sensores registraram o deslocamento das lajes e o tempo de duração do movimento, a velocidade foi calculada com base nesses dados. Tendo o peso das lajes, calculou-se o momento linear. As comparações mostraram que variações de massa de equivalente TNT e do peso da laje seguiram a variação do momento linear. Entretanto, isso não ocorreu para a laje revestida com a espuma.

Palavras-chave – Explosivo plástico, momento linear, lajes de concreto armado.

I. INTRODUÇÃO

Explosivos são substâncias simples ou misturas, capazes de produzir uma decomposição rápida o suficiente para gerar pressões e onda de choque autossustentáveis [1], [2], que podem gerar danos a edificações e perda de vidas. Podem ser classificados como alto ou baixo explosivo, em função da energia de ativação que possuem para serem detonados ou deflagrados. Em geral, os altos explosivos são mais estáveis, precisando ser iniciados pela deflagração de um baixo explosivo, que é menos estável. Os altos explosivos começaram a ser desenvolvidos na Alemanha com adição de alumínio devido à escassez de TNT (trinitrotolueno) na Primeira Grande Guerra. O RDX ($C_3H_6N_6O_6$), Ciclotrimetileno Trinitroamina, foi descoberto em 1920 por von Herz e utilizado em conflitos pela primeira vez pelos britânicos na Segunda Grande Guerra. PETN (Tetranitrato de Pentaeritrina) foi outro explosivo a base de TNT muito utilizado na referida guerra [3]. Os explosivos plásticos do tipo PBX (*plastic bonded explosive*) começam a ser elaborados em 1952, e consistem na mistura de dois explosivos numa matriz, permitindo que sejam moldados de acordo com a forma do artefato, compondo cabeças de guerra [4], [5].

Fausto Batista Mendonça, fausto@ita.br, Tel. +55-12-98173-6600, Girum Urgessa, gurgessa@gmu.edu, Tel. +1-703-268-9183, Luiz Eduardo Nunes de Almeida, eduardo_nunesalmeida@hotmail.com, Tel. +55-12-99605-2233, Koshun Iha, koshun@ita.br, Tel. +55-11-97142-9751, Roberta Jachura Rocha, robertajr@gmail.com, +55-12-98114-8086, José Atílio Fritz Fidel Rocco, friz@ita.br, +55-12-99605-2233

O explosivo principal do PBX é geralmente HMX (ciclotetrametileno tetramina) ou RDX (ciclotrimetilenotritramina) que são dispersos em um ligante elastomérico [2]. É importante ressaltar que as duas Grandes Guerras do século passado impulsionaram os estudos sobre artefatos bélicos, principalmente na Europa e Estados Unidos [6]. Ensaios experimentais utilizando explosivos, confinados ou não, vem sendo desenvolvidos em diversas partes do mundo nas últimas décadas, com a finalidade de gerar conhecimento sobre os comportamentos dos explosivos e de possíveis alvos [7]–[9].

A forma de padronizar as cargas dos diferentes tipos de explosivos, para efeito de comparação, é relativizar pela massa do equivalente TNT. A fim de que os ensaios em modelos reduzidos pudessem ser comparados, e para que os resultados pudessem ser considerados em diferentes testes, adotou-se a normalização da distância do artefato ao ponto considerado em função da carga explosiva, tendo o TNT como referência, conforme pesquisas de Brode em 1955 [10]. Dessa forma, surgiu a distância padronizada em escala (Z), apresentada em (1) [11], [12]. O valor de Z depende da distância do explosivo ao ponto considerado (R) em m e da massa do equivalente TNT (W) em kg.

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

O explosivo não confinado gera calor e elevação de pressão quando detonado. O efeito mais nocivo para o concreto armado é gerado pela sobre pressão, uma vez que o calor gerado no instante da detonação ocorre num intervalo de tempo extremamente curto, da ordem de ms [6], [13], logo, as barras de aço do concreto armado não chegam a ser comprometidas pelo calor da detonação. O que gera ruína da peça de concreto é o valor da pressão (P) que atua num intervalo de tempo (t), o que gera o impulso específico (I), apresentado em (2) [12], [14].

$$I = \int_{t_{oi}}^{t_{of}} P dt \quad (2)$$

O objetivo deste trabalho é verificar a variação que ocorre no momento linear desenvolvido na laje bi apoiada quando sofre o impacto da onda de choque gerado por detonação de corpos de prova de PBX, com massa em equivalente TNT diferentes e peso das lajes diferentes. Além disso, verificar qual a mudança no comportamento da laje gerada pela presença de um revestimento de espuma de EPS. Uma vez que

tal mudança de comportamento já tem sido verificada utilizando-se outras espumas [15], [16].

II. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três testes com explosivo plástico não confinado (PBX) suspensos a 2,0 metros acima da laje de concreto armado bi apoiada. A laje possuía armadura positiva para suportar tensões de tração desenvolvidas na face inferior da peça durante o carregamento. Transdutores de deslocamento foram fixados na face inferior da laje, registrando movimentos da peça gerados pela passagem da pressão da detonação e o tempo de duração. Essas informações permitiram obter a velocidade média de deslocamento da laje no pico de deslocamento.

A. O explosivo PBX utilizado

Nos ensaios destrutivos experimentais, foram avaliados três CP (corpo de prova) de PBX (80/20) moldados na ASD do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço), com massa descrita na Tabela I. O PBX utilizado possuía 80% de HMX na composição. A dimensão adotada para os cilindros dos CP foram de 10,5 cm de diâmetro e 20 cm de altura, aproximando-se da forma de cabeças de guerra de armamentos [17]. Essas dimensões permitiram que a velocidade inicial da detonação não fosse prejudicada, pois a razão entre comprimento e diâmetro deve estar entre 1 e 3, porém quanto mais próximo de 1 menor a velocidade inicial [18]. A razão do CP utilizado estava em 1,9, isso permitia o uso na área de ensaio disponível com segurança. As massas de explosivo, adotadas nos corpos de prova, se aproximam dos valores encontrados em alguns mísseis na atualidade.

TABELA I. MASSA EM EQUIVALENTE TNT E DISTÂNCIA EM ESCALA DOS CORPOS DE PROVA DOS EXPLOSIVOS

CP	Massa em Equiv. TNT (kg)	Z (m/kg ^{1/3})
1	2,718	1,433
2	2,585	1,457
3	2,723	1,432

B. A laje de concreto armado

As peças de concreto possuíam as dimensões de 1,0 × 1,0 × 0,08 m totalizando um volume de 0,08 m³ de concreto cada uma. O concreto possuía 50 MPa de resistência à compressão. Uma das lajes recebeu uma camada de 5 cm de poliestireno expandido (EPS), também conhecido como isopor®, na face superior. A taxa de armadura das lajes possuía duas configurações (0,175% e 0,37%), sendo uma em cada direção principal. A taxa de armadura é dada pela razão entre a área da seção transversal de aço e a área da seção transversal de concreto [19]. O cobrimento da armadura foi de 2,5 cm obedecendo ao que estabelece a NBR 6118/14 de concreto armado, para concretos em laje localizada em ambientes de moderada agressividade, classe II, ou seja, moderado risco de deterioração da estrutura.

C. O sitio do ensaio

As lajes foram bi apoiadas em cavaletes de madeira, distando do solo 40 cm, permitindo assim que o transdutor de deslocamento fosse colocado abaixo da laje e protegido por uma caixa metálica (Fig. 1). O explosivo ficou suspenso por um braço de madeira na distância de 2,0 m da face superior da laje (Fig. 2).



Fig. 1. Caixa metálica protegendo o transdutor de deslocamento posicionada sob a laje.

Os transdutores são potenciômetros que, por meio do fio tensionado preso ao fundo da laje, registram movimentos para cima ou para baixo, pela variação do comprimento do fio tensionado. O equipamento ainda registra o tempo de duração desses deslocamentos. O gancho (Fig. 3) foi fixado na face inferior da laje, utilizando-se uma cola a base de resina epóxi. A função dos ganchos é de fixar o fio tensionado no fundo da laje.



Fig. 2. Dispositivo do ensaio.



Fig. 3. Fixação dos ganchos no fundo das lajes.

A detonação do explosivo foi iniciada pela extremidade superior, proporcionando o deslocamento da onda de choque

em direção à face superior da laje posicionada abaixo do cilindro de PBX. A Fig. 4 apresenta o explosivo montado com o dispositivo de iniciação da queima.



Fig. 4. Explosivo com o iniciador montado.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As leituras de deslocamento máximo e tempo de duração foram extraídas dos dados registrados pelo transdutor de deslocamento. A Fig. 5 apresenta o gráfico de leitura desses dados para o ensaio 1.

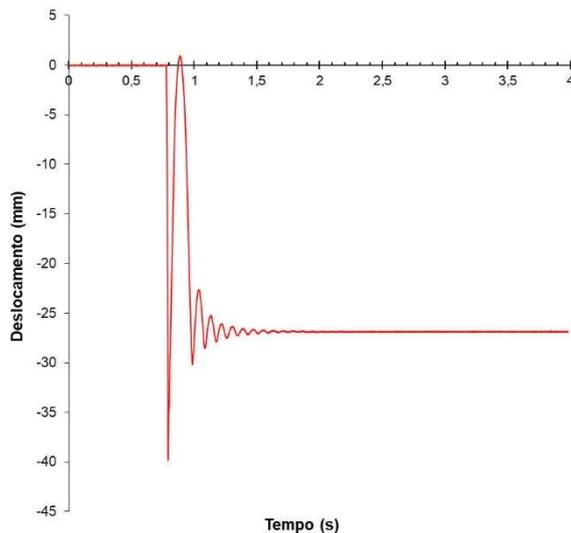


Fig. 5. Dados do Transdutor de deslocamento para o teste 1.

Os valores lidos pelo transdutor são apresentados na Tabela II, onde m é a massa da laje em kg e o tempo, indicado como Δt , em milissegundos. O valor de momento linear (q) foi obtido pelo produto entre velocidade média (v - calculada com base nos dados do sensor) e a massa da laje verificada antes do ensaio.

TABELA II. RESUMO DOS VALORES LIDOS PELO TRANSDUTOR E CALCULADOS PARA OBTENÇÃO DO MOMENTO LINEAR.

Teste	Deslocamento (mm)	Δt (ms)	m (kg)	$q = m v$ (kg m/s)
1	39,82	27	180	268,8
2	24,63	45	175	96,7
3	212,37	84	175	439,4

Comparou-se a relação existente entre a massa de equivalente TNT (W), de cada explosivo, com o momento linear gerado nas lajes, o resultado consta no gráfico da Fig. 6.

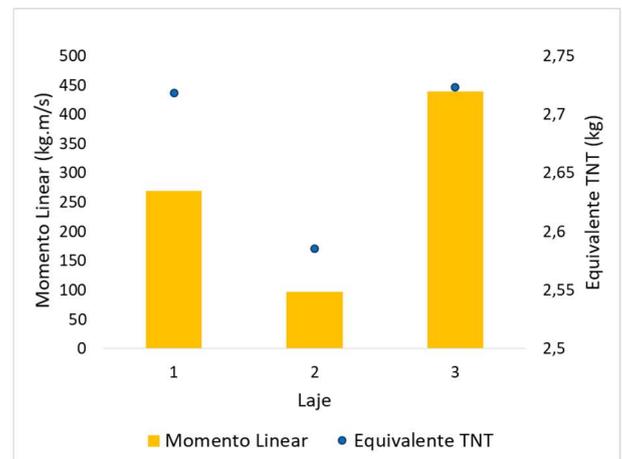


Fig. 6. Comportamento do momento linear em comparação ao equivalente TNT.

Nota-se que as variações de massa de equivalente TNT ocorreram casadas nessas duas grandezas apenas nas lajes sem revestimento de EPS. Os equivalentes TNT das lajes 1 e 3 foram valores muito semelhantes, conforme descrito na Tabela I, porém, os resultados de momento linear completamente diferentes. A laje 3 estava revestidas de EPS e, no gráfico da Fig. 6, o valor do momento linear desenvolvido foi muito maior que nas outras lajes, especialmente na laje 1 que possui um corpo de prova de explosivo com valor muito semelhante de massa em equivalente TNT.

As lajes apresentavam a mesma resistência de concreto e armadura, porém nota-se que não foi apenas a presença de EPS na laje 3 que proporcionou uma grande variação do resultado do momento linear. Havia uma diferença de 4,8% entre os equivalentes TNT das lajes 1 e 2, o que proporcionou uma variação de 64% no momento linear gerado. Logo, variações de equivalente TNT próximo de 5% proporcionaram diferenças em torno de 60% do momento linear gerado.

A relação entre massa do alvo deve se mostrar diretamente proporcional à variação do momento linear, por definição. Entretanto, a presença do EPS proporcionou comportamento anormal nessa relação, conforme Fig. 7. Nota-se que conforme o peso das lajes se reduz o valor do momento linear acompanha, à exceção da laje 3 que possuía revestimento de EPS, onde é possível verificar a elevação do momento linear, indicando que esse revestimento proporcionou uma velocidade maior na movimentação da laje. Os resultados na laje com revestimento de EPS indicaram que esse material não é capaz de mitigar os efeitos da onda de choque sobre estruturas, quando posicionado junto às mesmas, voltado para o explosivo e sem proteção térmica. A espuma absorve a energia por meio de sua deformação, pois possui um patamar de escoamento maior que do concreto, além de absorver calor, e a libera em forma de energia cinética após sua ruptura [20].

O aumento da fase positiva da onda de choque é outro fator observado nesse experimento com o revestimento de

EPS, o que proporciona elevação do impulso específico. Esse fato gerou a elevação do tempo de duração do deslocamento da laje, conforme observado na Tabela II no valor de Δt para a laje 3.

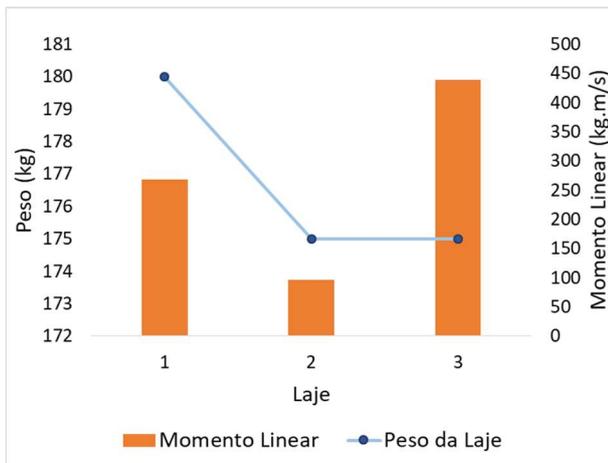


Fig. 7. Comportamento do momento linear em comparação ao peso da laje de concreto armado.

IV. CONCLUSÕES

Avaliou-se a capacidade de 5,0 cm de revestimento de espuma de EPS influenciar os resultados do momento linear gerado em lajes de concreto armado, submetidas a efeito de onda de choque de detonação de explosivo plástico não confinado (PBX). Além da verificação da variação do momento linear gerado no alvo, variando os valores de equivalente TNT e do peso do alvo. O aumento do peso do alvo proporcionou elevação do momento linear gerado. Da mesma forma, a elevação de massa em equivalente TNT proporcionou aumento do momento linear gerado no alvo. O uso de EPS, como revestimento de proteção do alvo, se mostrou ineficaz, trabalhando de forma contrária, ou seja, aumentando o dano gerado na peça de concreto armado.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Kubota, *Propellants and Explosives - Thermochemical Aspects of Combustion*, 2nd ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2007.
- [2] E. Kirchhof, "Estimativa de Vida Útil de Explosivo PBX no Envelhecimento Acelerado," Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- [3] P. S. Bulson, *Explosive loading of engineering structures*, 1st ed., vol. 1. London: E e FN Spon, 1997.
- [4] J. Carleone, *Tactical Missile Warheads*, Progress in Astronautics and Aeronautics, V-155. Kharagpur: AIAA, 1993.
- [5] S. Fordham, *High Explosives and Propellants*, 2nd ed. Pergamon Press, 1980.
- [6] 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.
- [7] B. M. Luccioni and M. Luege, "Concrete pavement slab under blast loads," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 8, pp. 1248–1266, 2006.
- [8] G. Urgessa, A. Maji, and J. Brown, "Analysis and Testing of Blast Effects on Walls Strengthened with GFRP and Shotcrete," in *Proceedings of Fiftieth International Society for the Advancement of Materials and Process Engineering Symposium and Exhibition*, 2005,

- pp. 1135–1144.
- [9] 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.
- [10] H. L. Brode, "Numerical solutions of spherical blast waves," *J. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 6, pp. 766–775, 1955.
- [11] 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.
- [12] V. Karlos, G. Solomos, and M. Larcher, "Analysis of the blast wave decay coefficient using the Kingery–Bulmash data," *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 7, no. 3, pp. 409–429, 2016.
- [13] 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.
- [14] ASCE, *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities*, 2nd ed. Reston: ASCE, 2010.
- [15] 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.
- [16] H. Zhou, G. Ma, J. Li, Z. Zhao, and M. Asce, "Design of Metal Foam Cladding Subjected to Close-Range Blast," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 4, pp. 1–11, 2015.
- [17] A. C. Anastacio and C. Knock, "Radial Blast Prediction for High Explosive Cylinders initiated at Both Ends," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 41, no. 4, pp. 682–687, 2016.
- [18] R. E. Ball, *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*, 2nd ed. Califórnia: AIAA, 2003.
- [19] F. B. Mendonça, G. S. Urgessa, and J. A. F. F. Rocco, "Blast Response of 60 MPa Reinforced Concrete Slabs Subjected to Non-Confining Plastic Explosives," in *Proceedings of Structures Congress 2017 - ASCE*, 2017, pp. 15–26.
- [20] D. K. Lee and B. J. O'Toole, "Energy absorbing sandwich structures under blast loading," 8th Int. LS-DYNA Users Conf., pp. 13–24, 2004.