



Sistema de Armas e Aplicações Espaciais: Engenharia de Sistemas

Comportamento de uma laje de concreto armado submetida aos efeitos da onda de choque oriunda da detonação de explosivo plástico de uso militar

Reinforced concrete slab behavior when submitted to blast effect developed during military explosive detonation

Fausto Batista Mendonça¹, Koshun Iha¹, Glaci F. M. Pinheiro², Caio Barbosa Amorim² e José Atilio Fritz Fidel Rocco¹¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil² Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos/SP - Brasil

Article Info

Article History:

Received	29 March	2021
Revised	28 April	2021
Accepted	09 Jun	2021
Available online	30 September	2021

Palavras Chave:

Explosivo plástico
Laje de concreto armado
Efeito blast

Keywords:

Plastic Explosive
 Reinforced concrete slab
 Blast effect

E-mail addresses:

fausto@ita.br (F.B. Mendonça),
koshun@ita.br (K. Iha),
glacifmp@iae.cta.br (G. F. M. Pinheiro),
caio.b.amorim@gmail.com (C. B. Amorim),
friz@ita.br (J.A.F. F. Rocco)

Resumo

Este trabalho apresenta resultados de um ensaio experimental ao se colocar uma peça de concreto armado próxima a um explosivo de alto poder de destruição, o PBX (*plastic-bonded explosive*). O foco do trabalho consiste em verificar a capacidade da estrutura de concreto armado suportar os efeitos de uma detonação de um explosivo de alto poder de destruição de aplicação militar. Uma análise qualitativa foi feita após as explosões para constatar a capacidade destrutiva do explosivo. Os resultados mostraram que o PBX foi capaz de gerar danos severos a edificações de concreto armado, encontradas em construções que configuram possíveis alvos militares, onde se verificou que uma carga de 4,0 kg de PBX detonada a 1,5 m de uma laje de concreto armado de 70 x 70 x 10 cm é capaz de causar um colapso estrutural.

Abstract

This paper presents results of a blast field test using a reinforced concrete slab close to a molded non-confined PBX (*plastic-bonded explosive*). The aim of this work was to verify reinforced concrete capacity to deal with blast effects of a military high explosive. Qualitative analysis was done after explosion to verify PBX capacity to develop damages to the structure. The explosive could develop severe damages to reinforced concrete structures. Potential military targets are generally made from reinforced concrete. 4.0 kg of PBX with standoff distance of 1.5 meters from a reinforced concrete slab measuring 70 x 70 x 10 cm could collapse the structure during detonation.

I. INTRODUÇÃO

Ataques terroristas com explosivos, explosões acidentais em grandes centros urbanos, ataques com bombas aéreas guiadas ou não, são alguns dos fatos a que a humanidade aprendeu a conviver nas últimas décadas. Entender como as explosões, acidentais ou não, podem afetar a vida do homem é essencial para garantir a segurança de um Estado. Para compreender os mecanismos geradores dos efeitos de explosões é essencial buscar ensaios instrumentados e simulações por computador, o que vem a ser um recurso da tecnologia atual. A busca por artefatos mais potentes deve caminhar lado a lado com o desenvolvimento de tecnologias de controle deste poder de destruição, para que haja garantia de vida, inclusive dos desenvolvedores.

Poder sem controle não confere segurança a quem o detém. Conhecer como os alvos respondem aos esforços a que serão submetidos, durante o curto período de tempo que uma explosão proporciona, é essencial para dimensionar o poder de fogo necessário para gerar o dano desejado e, quando for o caso, para proporcionar proteção às forças

amigas, suas tropas, equipamentos e instalações de grande valor operacional.

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 supersônica, conforme descrito por [1].

O poder de destruição de diversos explosivos químicos tem sido avaliado em ensaios experimentais ao longo de várias décadas, principalmente após a Segunda Grande Guerra mundial [2], [3].

Com o aperfeiçoamento dos métodos construtivos e as novas tecnologias de materiais de construção, as edificações modernas também têm sido submetidas a experimentos para a verificação de seus comportamentos ante os efeitos dos artefatos que são desenvolvidos [4], [5]. Esse trabalho visa verificar a capacidade do PBX (*plastic-bonded explosive*) afetar uma peça de concreto armado, apenas pela ação da onda de choque durante sua detonação, comprometendo sua funcionalidade.

II. MATERIAL E MÉTODO

Os efeitos oriundos de uma explosão que configuram o foco deste trabalho são o efeito sopro (*blast effect*) e o impulso de pressão. Esses efeitos são capazes de deslocar objetos e ferir pessoas em função da distância do epicentro (local exato da detonação) e da carga explosiva [6]. Foi posicionada uma peça de concreto armado próximo o suficiente do explosivo para que ela sofra a ação da onda de choque, vindo a romper.

Uma placa de laje é apoiada sobre duas bases de forma a deixá-la afastada do solo, a carga de explosivo é posicionada acima da laje em distâncias pré-determinadas conforme a pressão que se pretende gerar sobre a face superior da laje. O dispositivo pode ser observado no esquema da Fig. 1.



Fig. 1. Dispositivo para o ensaio experimental.

A equação mais utilizada na literatura para a verificação da pressão máxima que atinge um alvo após detonação de carga explosiva é a obtida por [7] e pode ser vista em (1).

$$P_{so} = P_0 \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2 \right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

Onde P_0 é a pressão atmosférica ambiente e P_{so} o pico de pressão máxima gerada pela detonação na distância considerada. Z é a distância escalonada que é definida por (2).

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

Onde R é a distância do epicentro medida em metros e W é a massa do explosivo em equivalente TNT, medida em kg.

No ensaio preliminar, o concreto utilizado possui uma resistência a compressão característica de 32,6 MPa e a placa de laje possui as dimensões de 0,7 x 0,7 x 0,10 m. A armadura positiva é composta por uma malha de aço de 5,0 mm de espessura espaçada a cada 15 cm. Em relação a composição química, o PBX é a base de HMX, correspondendo a 86 % da massa total, além do ligante elastomérico.

Medidores de pressão são dispostos em volta do dispositivo de ensaio para obter os valores de pressão gerados durante a detonação, conforme Fig. 2. Os medidores foram colocados a uma distância de 3,0 metros para evitar que sofressem algum dano e não registrassem leitura.



Fig. 2. Medidores de pressão posicionados em volta da carga explosiva. O braço de madeira suspenso a carga explosiva na altura determinada para o ensaio acima da placa de concreto.

É possível realizar uma análise qualitativa da peça após a explosão, pois se a massa de concreto estiver rompida significa que a estrutura entrou em falência estrutural, uma vez que não existe mais a garantia de sua rigidez para suportar as cargas de utilização (peso dos equipamentos e pessoas).

Os valores experimentais obtidos podem ser comparados com os valores teóricos por meio das equações (1-2). Um tratamento estatístico permite inferir se a média dos valores lidos está dentro de um intervalo de confiança.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

Após um ensaio preliminar, utilizando uma carga de 4,0 kg de PBX a distâncias de 3,0 e 1,5 metros, além de posicionar o explosivo sobre uma das peças de concreto, foram verificados resultados que apontam a capacidade do PBX destruir uma peça de concreto com 10 cm de espessura quando detonado em contato com uma de suas faces, conforme Fig. 3.

A mesma carga a 3,0 m de uma das faces da placa gerou fissuras na peça comprometendo sua capacidade de carga, porém não levando à ruína da peça. As fissuras podem ser observadas na Fig. 4.

Ao posicionar a carga a 1,50 m de distância de uma das faces observa-se o efeito de ruptura do concreto da laje. A malha de aço no seu interior ainda permaneceu íntegra sem escoar a ponto de romper completamente a placa, conforme Fig. 5.

Abaixo da placa de laje da Fig. 5 foi possível verificar que várias partes do concreto que se soltaram foram lançadas, se desprendendo da laje, conforme Fig. 6.



Fig. 3. Resultado da explosão do PBX posicionado sobre a laje de concreto.



Fig. 4. Fissuras geradas na laje de concreto na explosão a 3,0 m da laje.

Foram observados danos severos nas peças de concreto armado que sofreram efeitos da detonação de explosivo plástico PBX.

Na parte superior da laje que teve o explosivo posicionado a 1,5 m, nota-se que o concreto rompeu por compressão, pois foi expulso material pela curvatura que a laje sofreu durante a sua flexão sob a ação da carga da onda de choque.



Fig. 5. Ruptura do concreto. Visão da face inferior da laje após a detonação a 1,5 m da laje.



Fig. 6. Fragmentos que se desprenderam da placa de laje durante a ação da onda de choque na detonação a 1,5 m da laje. As setas indicam alguns dos fragmentos.

A Fig 7 permite a visualização da face superior da laje após a detonação do explosivo afastado 1,5 m. Nota-se também o registro do calor dissipado sobre a face da placa pelas áreas com tonalidades diferentes.



Fig 7. Face superior da laje onde é possível observar perda de material, indicado pela seta, devido ao encurvamento côncavo a que a laje é submetida durante a carga da onda de choque na detonação a 1,5 m.

A ruptura por compressão se dá nessa face devido à curvatura côncava que a placa é submetida durante o carregamento.

Após uma avaliação visual é possível inferir os danos que seriam causados a elementos estruturais e, conseqüentemente, a edificações sujeitas às cargas de onda de choque observadas nesse experimento. As inferências podem ser verificadas na Tabela I.

A) Comparação entre resultado teórico e experimental

Como os medidores de pressão ficaram posicionados a 3,0 m, para a segurança do equipamento, os valores de pressão que romperam a laje na distância de 1,5 m do explosivo não foram medidos, mas apenas inferidos por (1), conforme observado na Tabela II. Os valores obtidos pelos medidores de pressão na detonação do explosivo a 3,0 m da laje coincidem com os valores obtidos por meio de (1).

A Tabela II permite visualizar a comparação entre os valores medidos e os calculados por meio de (1) e (2).

TABELA I INFERÊNCIA DA CONDIÇÃO DAS ESTRUTURAS APÓS SUBMETIDAS A ONDA DE CHOQUE DEVIDO A DETONAÇÃO DE UMA CARGA DE 4,0 KG DE PBX A UMA DADA DISTÂNCIA DA LAJE.

Distância do explosivo (m) até o alvo	Danos observados	Inferência da situação da edificação após avaliação visual
3,0	Pequenas fissuras distribuídas pela face superior e inferior da peça.	Comprometimento da capacidade de carga da edificação.
1,5	Rompimento da seção de concreto, mantendo as armaduras na posição original.	Colapso da peça estrutural.
0,0	Destruição completa da peça.	Destruição do elemento estrutural.

TABELA II COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E CALCULADOS DE PRESSÃO INCIDENTE

Distância do explosivo (m) até o alvo	Distância em escala "Z" (m/kg ^{1/3})	Pressão medida (kPa)	Pressão calculada* (kPa)
3,0	1,77	249	276
1,5	0,88	-	1.310
0,0	0,08**	-	37.558

* Valores obtidos por meio de (1).

** Valor calculado levando em consideração que o centro da massa do explosivo seria a distância da carga até a face da laje.

A diferença encontrada ao se colocar o explosivo a 3,0 m da laje referente à pressão medida e a calculada corresponde a 10,8 %. Entretanto, nos ensaios em que o explosivo ficou a 1,5 m do alvo e junto ao alvo, os sensores continuavam a 3,0 m de distância do explosivo, desta forma é possível verificar alguns valores de pressão medidas a 3,0 m do explosivo e obter a média amostral conforme Tabela III. Alguns dos cinco sensores não fizeram a leitura correta, pois não apresentaram variação de pressão durante a detonação e assim tiveram os seus resultados descartados, logo, os dados utilizados são dos sensores que trouxeram valores coerentes.

Essas falhas nas medições não ocorreram em sensores específicos, ou seja, quais sensores foram capazes de realizar a medição de uma dada detonação ocorreu de forma randômica. O sensor 3 forneceu resultados em dois eventos, por isso aparece repetido na Tabela III, os outros sensores trouxeram valores de leitura em apenas um evento.

TABELA III VALORES MEDIDOS DE PRESSÃO INCIDENTE E MÉDIA FINAL.

Sensores	1	2	3	3	4	5	MÉDIA (kPa)
Leitura (kPa)	249	221	238	226	292	220	241

Tratamento estatístico

Para adotar o valor médio encontrado é necessário determinar o intervalo de confiança da amostra, para isso adota-se o parâmetro *t* de *student*, pois o grau de liberdade da amostra é baixo ($\nu = 5$). Adota-se significância de 5 % ($\alpha = 0,05$). Os valores que compreendem o intervalo de confiança são obtidos por (3) [8].

$$\left[\left(\bar{x} - t \frac{S}{\sqrt{n}} \right); \left(\bar{x} + t \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \right] \quad (3)$$

Onde "S" é o desvio padrão amostral, "n" é o número de amostras, "t" é o valor tabelado e "x" é a média amostral.

O desvio padrão amostral é dado por (4) e apresentou o valor de 27,34 kPa.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Na tabela de *t* de *student*, entrando com o valor de significância de 5% e graus de liberdade $\nu = 5$, obtém-se o valor de $t = 2,015$, aplicando (3) obtém-se o seguinte intervalo de confiança [219 ; 264]. A média encontrada de 241 kPa está dentro do intervalo de confiança, logo pode ser considerada como o valor médio de pressão encontrado nos experimentos [8].

A diferença entre o valor médio obtido e o valor obtido pela equação (1), apresentado na Tabela II, ficou em 12,7 %.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A explosão que ocorreu em contato com a placa de laje demonstrou que o explosivo, com uma massa relativamente baixa, que pode ser transportado por um motor foguete, por exemplo, tem poder para destruir uma peça de concreto armado de 70x70 cm com 10 cm de espessura se detonado em contato com o elemento estrutural. Se a detonação ocorrer a até 1,50 m de distância a estrutura poderá ficar comprometida, além de proporcionar danos a outros equipamentos que possam estar abrigados pela edificação, em virtude da projeção de estilhaços de concreto que ocorre na face oposta a explosão.

Os resultados apontam para a capacidade real do PBX causar danos a edificações de concreto armado, podendo ser avaliada a sua aplicação em operações para neutralizar equipamentos abrigados por edificações de concreto armado comumente encontrado, pois a resistência característica do concreto que foi utilizado como alvo é facilmente encontrada em edificações de pequeno e médio porte.

Essas edificações poderão abrigar equipamentos eletrônicos como: fontes de energia elétrica ou transformadores, além de centrais de computadores de relevante importância estratégica.

Após uma detonação a 3,0 metros de distância do alvo a estrutura pode ou não continuar sendo utilizada para abrigar equipamentos ou pessoas, irá depender de uma avaliação das condições de segurança em função da importância estrutural do elemento atingido. A 1,5 metros o dano causado poderá gerar um colapso progressivo se a função estrutural do elemento atingido for essencial para manter a edificação em condições de uso. A detonação do PBX junto à peça estrutural causará a sua destruição por completa, pelo menos numa área correspondente ao tamanho do corpo de prova ensaiado, podendo gerar a ruína de edificação dependendo da sua função de sustentação.

O intervalo de confiança obtido pode ser refinado se o grau de liberdade da amostra for elevado, e assim verificar se os valores tendem ao valor teórico obtido. Porém, a média dos valores lidos está dentro do intervalo de confiança encontrado, validando as leituras para um nível de significância de 5%.

A pesquisa continua em andamento, atualmente está sendo implementado um modelo simulado de alvo e carga de efeito de onda de choque para verificar, por análise computacional, o comportamento do alvo antes do ensaio e assim comparar os resultados reais com a modelagem. Outro ensaio está sendo planejado para verificar a ação do PBX em uma laje de concreto com área e resistência característica a compressão maiores do que aqueles empregados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio oferecido pela Divisão de Sistemas de Defesa do IAE na realização dos ensaios experimentais, sem o qual não seria possível o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. O. Keller, M. Gresho, A. Harris, e A. V. Tchouvelev, "What is an explosion?", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 9, p. 1–8, 2014.
- [2] C. F. Zhao e J. Y. Chen, "Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading", *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 63–64, p. 54–62, 2013.
- [3] D. O. Dusenberry, *Handbook for blast-resistant design of buildings*, 1º ed. New Jersey: John Wiley e Sons, 2010.
- [4] P. A. Buchan e J. F. Chen, "Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures - A state-of-the-art review", *Compos. Part B Eng.*, vol. 38, p. 509–522, 2007.
- [5] A. G. Hanssen, L. Enstock, e M. Langseth, "Close-range blast loading of aluminium foam panels", *Int. J. Impact Eng.*, vol. 27, nº 6, p. 593–618, 2002.
- [6] W. C. L. Silva, "Blast – efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas." São José dos Campos, p. 107, 2007.
- [7] G. F. Kinney e K. J. Graham, *Explosive shocks in air*, 2 nd. New York: Springer Science, 1985.
- [8] P. L. Meyer, *Probabilidade - Aplicações a Estatística*, 2º ed. Rio de Janeiro, 1983.