

Comportamento de Fachadas Envidraçadas sob a Ação de Explosões – Desenvolvimento de uma Solução de Proteção

Rui Rita

Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas
CINAMIL, Academia Militar
Lisboa, Portugal
rita.rjl@exercito.pt

José Pedro

Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos; Ceris
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal
jose.oliveira.pedro@tecnico.ulisboa.pt

Pedro Matias

Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas
CINAMIL, Academia Militar
Lisboa, Portugal
matias.pjsg@exercito.pt

Resumo — A Engenharia Militar e a Engenharia Civil têm realizado investigação no sentido de promover o dimensionamento de infraestruturas às ações dinâmicas de explosões. Têm também investido na investigação, desenvolvimento e implementação de sistemas de proteção capazes de mitigar os impactos das explosões, tanto na estrutura em si como nos seus ocupantes.

O vidro constitui-se como um material transparente e sustentável, amplamente utilizado em sistemas de fachadas envidraçadas modernas, nomeadamente em edifícios civis e militares. Tem carácter estratégico, como por exemplo, nos edifícios governamentais, quartéis, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, hospitais e universidades.

Quando uma explosão atinge um edifício, as fachadas são um dos elementos mais vulneráveis. O sistema de proteção estudado para as fachadas envidraçadas consiste num dissipador de energia inserido num sistema de fixação pontual. O dissipador é fabricado em metamateriais de geometria alveolar hexagonal capaz de se deformar plasticamente e de absorver grande parte dos efeitos dinâmicos que seriam transmitidos para a estrutura portante do edifício. A fachada tem também o papel de proteger do exterior quem se encontra inserido dentro do espaço protegido e nesse sentido, é de extrema importância que as fachadas envidraçadas sejam compostas por vidro laminado.

Palavras-chave: Sistemas de proteção; Fachadas envidraçadas; Sistemas de fixação; Metamateriais.

I. INTRODUÇÃO

A segurança de um indivíduo é um direito humano básico e a proteção dos indivíduos é uma obrigação fundamental dos Estados. Por conseguinte, os Estados têm a obrigação de garantir os direitos humanos tomando medidas positivas de proteção contra a ameaça de atos terroristas e de levar os perpetradores de tais atos à justiça [1].

Tradicionalmente, os terroristas têm escolhido edifícios como o seu alvo preferido para ataques. Os edifícios são construídos tendo em consideração os códigos estruturais. Na maioria dos projetos a prevenção e minimização do impacto de ataques químicos, biológicos, radiológicos e nucleares (CBRN) e de engenhos explosivos está ausente na conceção [2].

A utilização do vidro como material de construção não é recente, mas nas últimas décadas têm sido propostas novas funções e desafios para a utilização do vidro com carácter estrutural. Contudo, o vidro apresenta características mecânicas que representam limitações a ter em consideração, sendo que a sua pouca capacidade de deformação a principal [3], [4].

Quando o impacto de uma explosão fratura um vidro, os estilhaços projetados representam um grande risco para aqueles que estão por perto. A utilização de vidros à prova de explosão ou protegidos contra explosões em edifícios suscetíveis de serem sujeitos a tal carga, pode reduzir significativamente, se não eliminar, os riscos associados [5].

O principal objetivo da investigação consiste no estudo de dissipadores de energia com características mecânicas capazes de mitigar os efeitos transmitidos à estrutura de suporte resultantes da ação de uma explosão próxima de uma fachada de vidro.

II. AÇÃO DE EXPLOSÃO

Uma explosão é definida como uma libertação rápida de energia em grande escala [6]. As explosões podem ser divididas em dois grupos principais de acordo com o confinamento da carga explosiva: confinadas e não confinadas. As explosões não confinadas ou externas, podem ser divididas em 3 tipos, que dependem da posição relativa da fonte da explosão e da estrutura a ser protegida: explosão aérea perfeita; explosão próxima do solo; explosão em contacto com o solo. No caso de explosões confinadas ou interiores, estas serão amplificadas pelo fenómeno de reflexão dentro da própria Construção. Existem 3 tipos de explosões confinadas, de acordo com a dimensão da ventilação em causa: explosão totalmente ventilada; explosão parcialmente confinada/ventilada; explosão totalmente confinada [7], [8].

A definição dos parâmetros de onda de choque mais frequentemente utilizada baseia-se nas expressões de Kinney e Graham [9] e nas propostas de Kingery e Bulmash, em 1984 [10].

Na Figura 1 é apresentado o perfil de variação de pressão idealizado com o tempo da explosão, caracterizando a própria explosão. A fórmula de Friendlander modificada é

frequentemente utilizada para descrever a taxa de decréscimo dos valores de pressão da fase positiva:

$$P_s(t) = P_{so} \times \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

onde, P_{so} [kPa] representa o pico de sobrepressão incidente, t_0 [ms] é a duração da fase positiva, b é o coeficiente de decaimento da curva e t [ms] corresponde ao período entre o instante de chegada (t_a) e o instante em estudo [10]. Esta equação em conjunto com o gráfico apresentado permite então compreender o funcionamento da onda de choque de uma explosão.

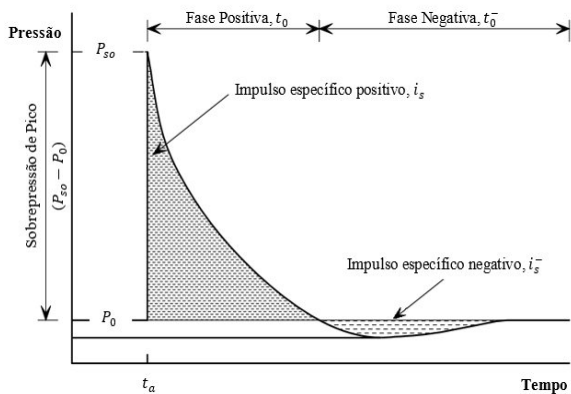


Figura 1. Perfil de pressão idealizado (adaptado de [8]).

A propagação da onda de choque descreve-se em função de um escalar designado de distância reduzida Z , cuja expressão é dada na Equação (1). R corresponde à distância entre a carga e a superfície em estudo e W é a massa de explosivo. A partir de Z (equação (2)) é possível obter a totalidade do perfil de pressões de uma explosão, através das equações de Kinney e Graham [9].

$$Z \left[m/kg^{\frac{1}{3}} \right] = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

A presente equação permitiu calibrar a explosão a modelar, fixando uma das grandezas e aumentando a outra, que por sua vez acresce Z , distância reduzida. O parâmetro Z permite assim ter noção do impacto da carga na estrutura.

III. TECNOLOGIA DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

A. Envidraçados

De acordo com o método de fabrico têm-se 4 tipos de vidro: float, recozido, temperado e termoendurecido. Relativamente à sua utilização em fachadas, o vidro pode ser: monolítico, laminado e isolante.

B. Fixações

Segue-se um diagrama sumário dos sistemas de fixação e dos seus vários tipos (Figura 2):

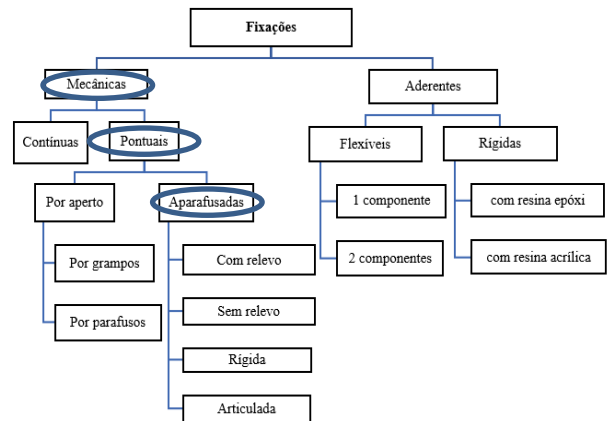


Figura 2. Sistemas de fixação.

IV. CASO DE ESTUDO

A. Descrição

O caso de estudo consiste numa fachada (Figura 3) constituída por 3 colunas IPE200 com 3m de altura e espaçadas de 2m (encastradas na base e apoiadas no topo), que suportam dois painéis de vidro laminado temperado $3 \times 2 \text{m}^2$ e 17.52mm de espessura. A carga de 10kg de TNT encontra-se a 5m de distância da face do vidro e a 1,5m de altura do solo.

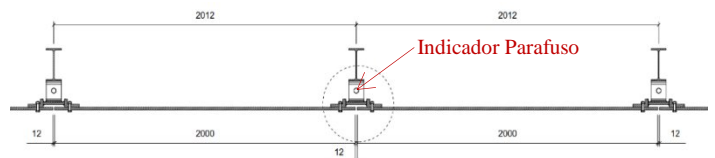


Figura 3. Vista superior da estrutura modelada.

B. Modelação

Todo o modelo tem a sua geometria desenhada à linha média, para trabalhar com elementos finitos de laje. A geometria do modelo foi feita e importada, quase na sua totalidade, do software AutoCAD, de modo que só era necessário caracterizar os elementos, condições de fronteira e carregamento (carga de TNT) no LS-Dyna.

C. Resultados para a ação de uma explosão

Um dos principais indicadores da carga que passa para a estrutura é o esforço axial e de corte nos Parafusos 1, ao longo da fachada. Na Figura 4, Figura 5 e Figura 6, são apresentados gráficos com estes resultados para uma análise de 70 ms.

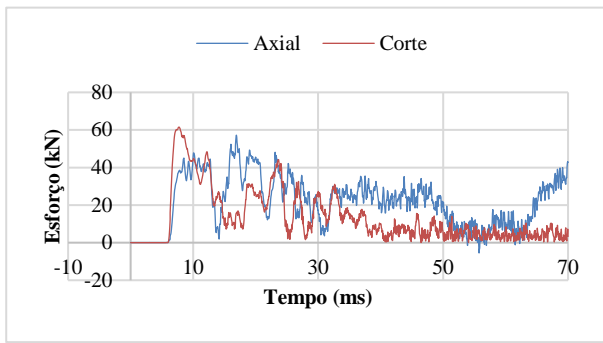


Figura 4. Esforços axial e de corte no Parafuso 1 de topo.

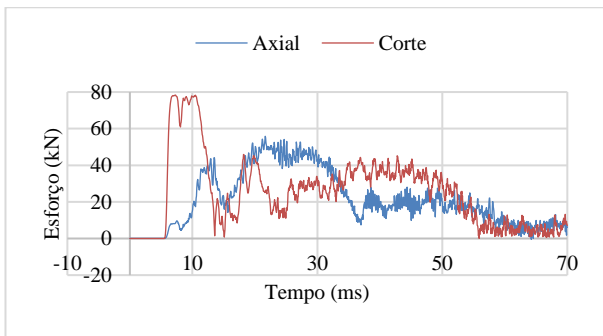


Figura 5. Esforços axial e de corte no Parafuso 1 de meia altura.

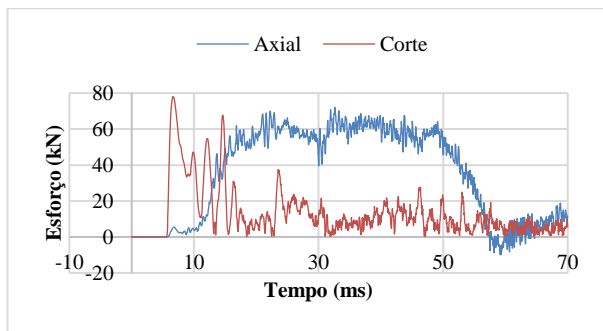


Figura 6. Esforços axial e de corte no Parafuso 1 da base.



Figura 8. Dissipador com estrutura celular hexagonal (100x100x50).

E. Interpretação dos resultados

Como foi dito, o esforço axial e de corte nos Parafusos 1 são indicadores principais da carga que passa para a estrutura, ao longo da fachada (topo, meia altura e base) (Figura 3 e Figura 9). Foram comparados os resultados de um modelo sem dissipador e de outro com dissipador.

No modelo com dissipador verificaram-se os seguintes resultados (Figura 9, Figura 10 e Figura 11).

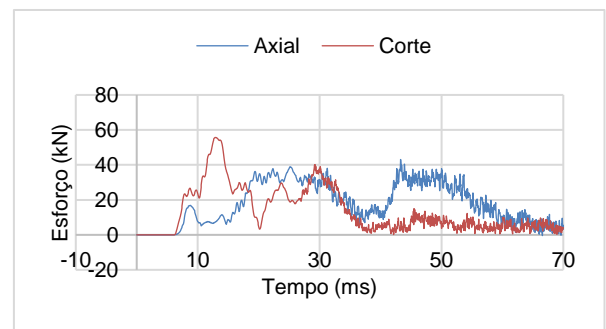


Figura 9. Esforço axial e de corte no Parafuso 1 de topo, com dissipador.

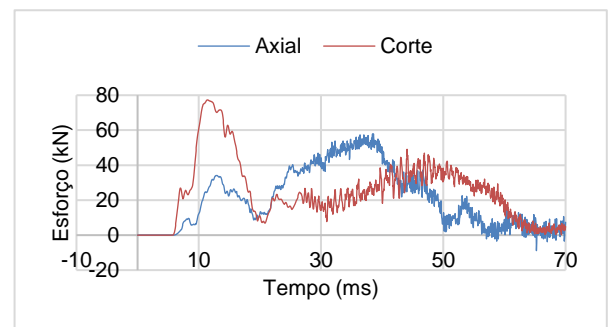


Figura 10. Esforço axial e de corte no Parafuso 1 de meia altura, com dissipador.

D. Estudo do Dissipador

Foi modelado um dissipador em metamaterial de PETg com um patamar de cedência a 2.4MPa e uma rotura a 6MPa (Figura 7 e Figura 8).

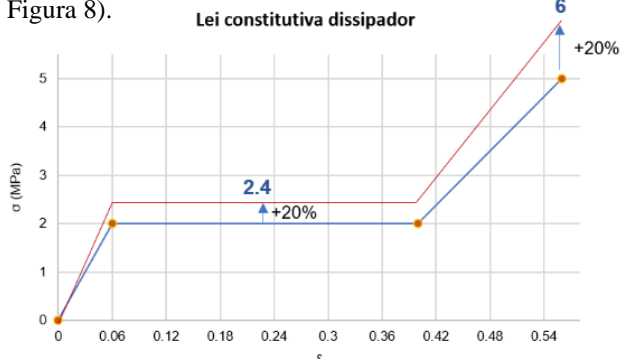


Figura 7. Lei constitutiva do dissipador.

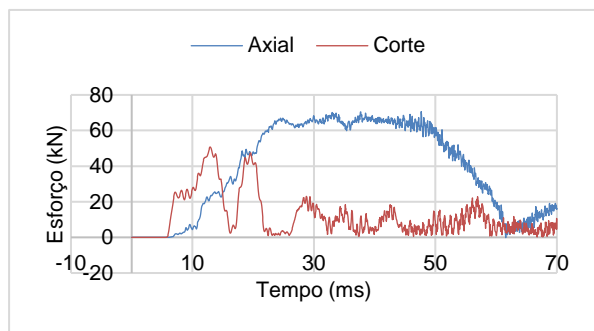


Figura 11. Esforço axial e de corte no Parafuso 1 da base, com dissipador.

De um modelo para outro (Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13) continua a existir um pico de força elevado, nomeadamente de corte nos parafusos, que corresponde à fase em que o máximo de pressão incidente atinge o vidro que posteriormente transmite à estrutura. Continua a dar-se uma plastificação localizada devido à flexão do suporte. Verifica-se que a chapa que une as duas chapas quinadas plastifica totalmente e que a onda de choque é transmitida de uma forma mais controlada.

O vidro no modelo com dissipador, apresenta semelhante padrão de rotura (Figura 12 e Figura 13), sofrendo uma curvatura maior entre a fixação de topo e a de meia altura, do que a que apresentava no modelo de referência. Isto deve-se ao facto de o sistema de fixação com o dissipador ser menos rígido e não dificultar tanto os deslocamentos verticais.

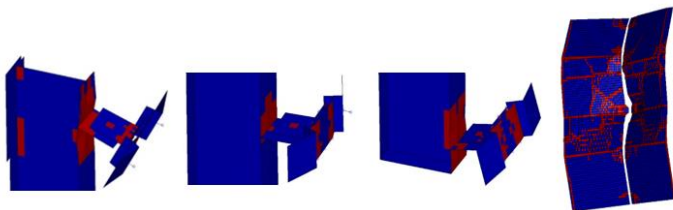


Figura 12. Resultados do modelo sem dissipador.

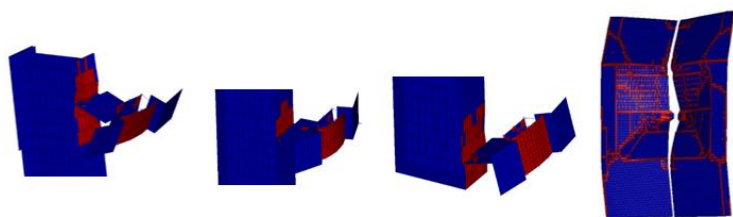


Figura 13. Resultados do modelo com dissipador.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Numa análise de qualquer sistema de proteção de uma estrutura é crucial considerar três elementos: o sistema de fixação, os elementos estruturais e as ações.

No presente estudo foram estudados vários aspetos relativos ao vidro e ao seu comportamento como elemento estrutural. O vidro pode ser um elemento estrutural inserido em fachadas VEC (Vidro Exterior Colado) e VEA (Vidro Exterior Agrafado). Nas fachadas exteriores de vidro agrafado, as possibilidades de soluções de fixação são muito diversas.

Para que os painéis de vidro não apresentem tantos danos, terão de possuir melhores propriedades mecânicas, maior espessura ou diferentes condições de apoio na estrutura de suporte.

Em todos os modelos se detetou uma formação clara do Mach stem, pelas características dadas à explosão, porque a fachada recebe mais carga desde meia altura até à base. Portanto, ocorre uma reflexão no plano do solo e posterior potenciação da onda de choque e do próprio impulso incidente.

Pela análise dos resultados, o dissipador não teve um impacto tão significativo com esperado. Regista-se uma certa capacidade para amortecer a ação dinâmica transmitida à estrutura, mas não consegue amortecer o que seria necessário para reduzir de forma clara os danos estrutura de suporte.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho jamais podia ter acontecido sem o apoio e contributo de um conjunto de pessoas, às quais, quero deixar aqui, palavras sinceras de apreço e gratidão. Não foi uma jornada fácil e tendeu a piorar neste ano de 2020, porém o que concluo é que acabou bem graças a mim e a todos os que daqui para a frente irei enunciar.

Em primeiro lugar quero demonstrar o meu grande agradecimento ao Professor Doutor José Oliveira Pedro, meu orientador científico, pelo empenho, motivação, disponibilidade, pelas suas capacidades técnicas e humanas. Igualmente agradeço ao Tenente-Coronel de Engenharia Pedro Matias, meu coorientador militar pelas suas capacidades, pela abdicção do seu tempo pessoal, empenho e preocupação em prol de me apoiar na minha investigação.

Aos meus amigos e amigas, quero deixar uma palavra sincera de agradecimento.

Finalmente aos meus verdadeiros pilares, a minha família, que sempre esteve presente em todas as alturas que precisei, e que sem ela, não tinha conseguido o que consegui até hoje.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] «Human Rights , Terrorism and Counter-terrorism - Fact Sheet No. 32», New York, 2008.
- [2] Department of Homeland Security, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*, n. outubro. 2011.
- [3] L. Valarinho, F. Branco, G. Chiumiento, e J. Correia, «Instabilidade lateral por flexão-torção de vigas em vidro estrutural. Estudo experimental e analítico.», *5as Jornadas Port. Eng. Estruturas*, pp. 1–16, 2014.
- [4] J. M. C. P. de N. Sanches, «Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro», Universidade Técnica de Lisboa, 2013.
- [5] H. S. Norville e E. J. Conrath, «Simplified Design Procedure for Blast Resistant Glazing», *ResarchGate*, n. junho, pp. 18–21, 2001.
- [6] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, e J. Ramsay, «Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview», *Eletronic J. Struct. Eng.*, n. janeiro, pp. 76–91, 2007.
- [7] Department of Defense, «Unified Facilities Criteria (UFC) - Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions», 2008.
- [8] E. Yandzio e M. Gough, «Protection of Buildings against Explosions», *Steel Constr. Inst.*, p. 120, 2011.
- [9] G. Kinney e K. Graham, *Explosive shocks in air*, 2^a. Nova Iorque: Springer Science + Business Media, LLC, 1985.
- [10] V. Karlos e G. Solomos, «Calculation of blast loads for application to structural components», 2013.