

Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas contra Explosões com Recurso a Tecnologias de Impressão 3D

Fátima Martins; Pedro Matias
CCPI, CINAMIL, Academia Militar
Academia Militar
Lisboa, Portugal

martins.fcc@exercito.pt; matias.pjsg@exercito.pt

José Oliveira Pedro

CERIS, IST-UL

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal

jose.oliveira.pedro@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — O terrorismo é um fenómeno cada vez mais comum na sociedade. O número de eventos registados, de feridos e mortes aumentou muito nos últimos anos. Dada a imprevisibilidade destes eventos, é necessário mitigar as suas consequências, tanto quanto possível.

O vidro é um material de construção que se tornou popular e, cuja utilização tem aumentado significativamente em aplicações estruturais nos últimos anos. Contudo, uma das principais causas de baixas e ferimentos provocadas por engenhos explosivos, advém da projeção de fragmentos de vidro produzidos aquando da explosão.

Assim, procura-se desenvolver soluções capazes de diminuir os efeitos provocados pela ação da explosão, não só através da utilização de soluções de vidro que reduzam a quantidade de fragmentos projetados, como também de sistemas capazes de absorver parte da energia que é libertada pela explosão e, desta forma, reduzir as baixas humanas e os danos materiais.

Palavras-chave — Ação da explosão; Vidro laminado; Dissipador de Energia; Honeycomb; Auxético.

I. INTRODUÇÃO

Tendo em conta que a ocorrência de ataques terroristas é muito difícil de eliminar, torna-se primordial procurar controlar e minimizar os danos patrimoniais, o número de vítimas e o pânico social. A ideia de dimensionar estruturas totalmente resistentes contra explosões é pouco realista e económica. Uma alternativa a esta hipótese será mitigar os efeitos da explosão, usando para isso os conhecimentos adquiridos no âmbito da Engenharia e da Arquitetura para melhorar o comportamento dos edifícios novos e existentes [1]. Desta forma, uma proteção que seja inteligente e localizada afigura-se a melhor opção, ao invés de uma proteção cara, desmedida, contra a maior carga de explosivo que os terroristas poderão, hipoteticamente, utilizar [2]. A estratégia será assim de dimensionar edifícios aptos para proteger as pessoas que vivem e trabalham dentro deles, até um grau razoável. O objetivo nunca poderá ser dimensionar sistemas de proteção excessivos ou insuficientes, mas sim encontrar um equilíbrio que seja razoável. Esta noção de razoável irá depender das funções desempenhadas pelo edifício, da sua importância e da probabilidade de este poder vir a ser um alvo para ataques terroristas [2].

O corpo humano é bastante resistente e possui a capacidade de conseguir sobreviver quando exposto a níveis bastantes elevados de sobrepressão e impulso [3]. A maioria das baixas provocadas por ataques terroristas resultam do impacto de fragmentos e detritos, pelo que é cada vez mais recorrente a solicitação de projeto de ter fachadas de vidro que consigam fazer face aos efeitos da ação da explosão, de forma a proteger os indivíduos que se encontrem dentro dos edifícios [4], [5].

O principal objetivo deste trabalho consiste na avaliação do comportamento de painéis de vidro, inseridos em fachadas envidraçadas, quando sujeitos à ação da explosão, e o estudo de uma solução de proteção, destinada a aumentar a capacidade resistente dos painéis de vidro e de mitigar os efeitos, provocados pela ação da explosão, transferidos à restante estrutura. Esta solução foi desenvolvida através do uso de metamateriais devido às suas boas propriedades de dissipação de energia gerada aquando da explosão. Identifica-se assim um objetivo particular que consiste no estudo de diferentes geometrias de dissipadores, quando submetidos à ação de uma explosão, de forma a avaliar qual a solução mais adequada para ser inserida num sistema de proteção de uma fachada de vidro.

II. AÇÃO DA EXPLOSÃO

Uma explosão consiste numa mudança física ou química repentina do estado da matéria, acompanhada por uma libertação de energia e por movimento [6].

Tendo em conta o confinamento da carga explosiva, esta classificação consiste em dois grupos principais: as explosões confinadas ou não confinadas. O grupo das explosões não confinadas pode subdividir-se em três tipos de explosões, consoante a sua proximidade com o solo, sendo eles: explosão aérea perfeita, próxima do solo e em contacto com o solo. As explosões confinadas são compostas pelas categorias: totalmente ventilada, parcialmente confinada/ventilada e totalmente confinada [7].

Na Fig. 1 é possível observar o perfil idealizado para a variação de pressão, ao longo do tempo de explosão, assumindo que se trata de uma explosão aérea perfeita e, cuja medição ocorreu num elemento que se encontrava a uma determinada distância do local da explosão [8], [9].

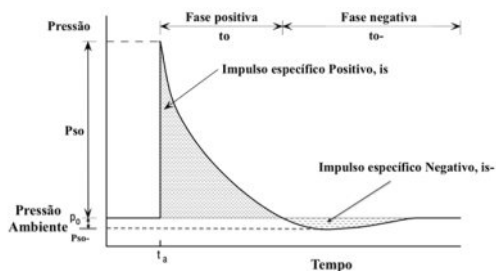


Figura 1 - Perfil idealizado para a variação de pressão (adaptado de [1]).

A curva de decréscimo da pressão da onda de choque, ao longo do tempo, pode ser representada através da expressão modificada de Friedlander (2.1):

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0^+} \right) e^{-bt/t_0^+} \quad (2.1)$$

onde, P_{so} [kPa] corresponde à pressão incidente de pico, t_0^+ [ms] à duração da fase positiva, t [ms] ao período de tempo entre o instante de chegada (t_a) e aquele em que esta a ser realizada a análise e b ao coeficiente de decaimento da curva [2].

A. Ação da Explosão utilizando o Explosive-Driven Shock Tube

Existem duas formas possíveis de estudar o comportamento dinâmico e impulsivo dos explosivos: através de explosões aéreas livres (do inglês free air blast, FAB) ou em laboratório, com recurso a tubos de choque que propagam a ação da explosão (do inglês explosive-driven shock tube, EDST) e que graças ao seu comprimento mínimo, conseguem gerar uma frente de onda planar da explosão. A utilização de EDST permite simular ondas de choque provocadas por explosões, sendo que o seu direcionamento e, posteriormente, a sua medição é feito de forma mais eficaz, o que possibilita que a sua realização possa ocorrer em condições de laboratório [10].

Ousji et al. (2015), desenvolveram um estudo paramétrico numérico, com o objetivo de definir um conjunto de equações analíticas, capazes de prever a pressão incidente e a pressão refletida e o impulso gerado em laboratório, quando se utiliza um EDST, em termos do comprimento do tubo de choque, do diâmetro do tubo, da massa de explosivo e da distância da carga de explosivo à entrada do tubo de choque. Assim, o cálculo da pressão incidente de pico, P_{so} , e da pressão refletida de pico, P_r , podem ser obtidas através das seguintes expressões (2.2) e (2.3):

$$\frac{P_{so}}{P_0} = 31,39 + \left(\frac{5,101}{\pi_1^{0,0314}} \right) \times (-5,108 - 0,0048 \times \pi_2) \quad (2.2)$$

$$\frac{P_r}{P_0} = -3,21 + \left(\frac{6,33}{\pi_1^{-0,40}} \right) \times (4,91 + 0,0954 \times \pi_2) \quad (2.3)$$

sendo que P_0 [kPa] corresponde ao valor da pressão atmosférica ambiente e π_1 e π_2 são dois parâmetros adimensionais que dependem da carga explosiva e das dimensões do EDST.

III. CARACTERIZAÇÃO DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

A. Vidro

O vidro é um produto inorgânico de fusão, que através do arrefecimento atinge uma condição rígida, sem ocorrer cristalização [12]. O vidro é isotrópico, o que significa que as suas propriedades não dependem da direção ou orientação [13].

O comportamento do vidro é diferente dos restantes materiais frequentemente utilizados como materiais estruturais, pelo facto de apresentar um comportamento frágil, pelo que a sua fratura e falha são difíceis de prever [14].

Os tipos de vidro mais comuns utilizados em aplicações estruturais são o vidro recozido, o vidro termo-endurecido e o vidro temperado [15]. Este pode ser classificado em vidro monolítico, que consiste num painel de vidro composto por um único painel de vidro ou vidro laminado, que possui pelo menos dois painéis de vidro e uma camada intermédia, constituída por um polímero [16], [17]. O vidro laminado foi criado no sentido de melhorar as propriedades estruturais do vidro, de forma a compensar o seu comportamento frágil. Por este motivo, é possível classificar, na sua maioria, o vidro laminado como um “vidro de segurança” [16]. O material mais utilizado para a película intermédia do vidro laminado é o PVB, sendo este o utilizado no presente trabalho.

IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A. Caracterização da Ação da Explosão

Foram realizados três grupos de ensaios distintos: o primeiro, destinado à medição da pressão incidente de pico, P_{so} , e os restantes, orientados para a caracterização da pressão refletida, P_r . Para cada um destes grupos foram realizados vários ensaios, em que se variou a carga explosiva e a distância da mesma à entrada do EDST. Para os primeiros dois grupos, foi utilizado um EDST de dimensões 250x250x1500 mm³ e duas cargas explosivas, 10 g e 20 g, a três distâncias à boca do tubo, 0 cm, 10 cm, 20 cm. Para o terceiro, utilizou-se um EDST de dimensões 80x80x1000 mm³ e para além das distâncias usadas anteriormente, foram ainda utilizadas mais duas distâncias à boca do tubo, com a carga de 10 g, mais concretamente, 5 cm e 7,5 cm, uma vez que, estas distâncias irão ser importantes para os ensaios de calibração do dissipador com metamaterial.

Os dados obtidos foram calibrados e ajustados, a partir da expressão modificada de Friedlander (2.1). A partir desta metodologia tornou-se possível obter a pressão incidente de pico e a pressão refletida de pico e comparar os resultados experimentais obtidos com as expressões analíticas (2.2) e (2.3).

Conforme mostrado nas Tabelas 1, 2 e 3 e nas Fig. 2, 3 e 4, a ordem de grandeza dos valores é coerente para distâncias superiores a 10 cm. No entanto, quando as distâncias são menores, as expressões analíticas produzem resultados muito diferentes. A razão desta diferença pensa-se que resulta do facto de as expressões analíticas utilizadas não estarem bem calibradas para explosões tão próximas, em que a distância reduzida, Z_{EDST} , apresente valores tão baixos.

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE VALORES PARA OS ENSAIOS DE PRESSÃO INCIDENTE.

Tubo	Carga, W [kg]	d [m]	P_{so} , eq. (2.2) [MPa]	P_{so} , médio [MPa]	Desvio [%]	Z_{EDST} [m ³ /kg]
250 X 250	0,01	0,0	0,362	0,631	-	9,91
		0,1	0,283	0,308	8,86	23,51
		0,2	0,205	0,194	5,38	54,24
250 X 250	0,02	0,0	0,419	1,228	-	5,18
		0,1	0,342	0,476	39,07	12,29
		0,2	0,266	0,278	4,62	28,34

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DE VALORES PARA OS ENSAIOS DE PRESSÃO REFLETIDA NO TUBO 250X250 MM².

Tubo	Carga, W [kg]	d [m]	P_r , eq. (2.3) [MPa]	P_r , médio [MPa]	Desvio [%]	Z_{EDST} [m ³ /kg]
250 X 250	0,01	0,1	0,684	0,792	15,73	18,47
		0,2	0,404	0,540	32,96	42,60
	0,02	0,0	1,503	5,082	-	4,07
0,1		0,976	1,179	20,75	9,65	
		0,2	0,613	0,779	28,26	22,27

TABELA 3 - COMPARAÇÃO DE VALORES PARA OS ENSAIOS DE PRESSÃO REFLETIDA NO TUBO 80X80 MM².

Tubo	Carga, W [kg]	d [m]	P_r , eq. (2.3) [MPa]	P_r , médio [MPa]	Desvio [%]	Z_{EDST} [m ³ /kg]
80 X 80	0,01	0,000	3,757	36,745	-	0,53
		0,050	2,058	5,944	-	2,06
		0,075	1,563	4,144	-	3,71
		0,100	1,236	1,174	5,02	6,00
		0,200	0,617	0,642	4,05	21,67
	0,02	0,100	1,693	4,714	-	3,14
		0,200	0,891	0,947	6,31	11,33

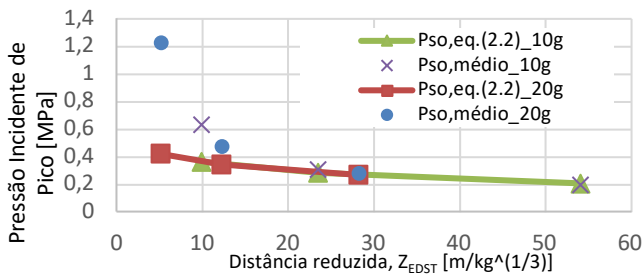


Figura 2 - Comparação de valores para os ensaios de pressão incidente.

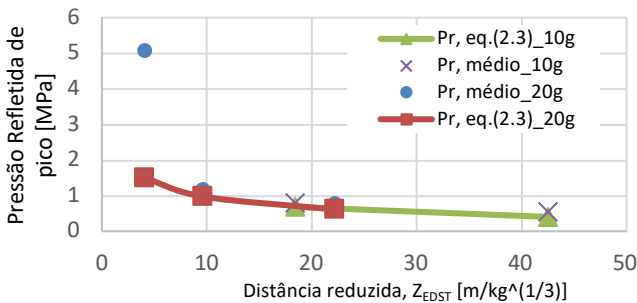


Figura 3 - Comparação de valores para os ensaios de pressão refletida no tubo 250x250 mm².

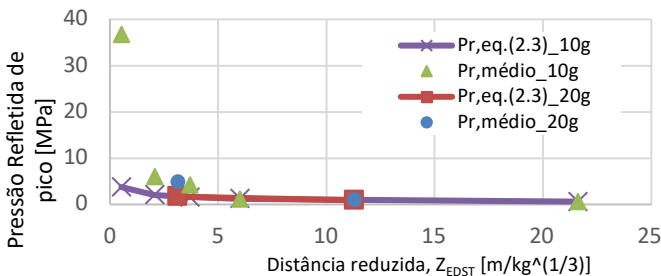


Figura 4 - Comparação de valores para os ensaios de pressão refletida no tubo 80x80 mm².

B. Ensaio de Dissipador com Metamaterial

A campanha de ensaios prosseguiu para a caracterização do comportamento dinâmico de dois tipos de dissipadores que se pretende utilizar na proteção de fachadas envidraçadas contra explosões. Para tal, foram utilizadas duas geometrias de núcleos esmagáveis impressos em 3D, através da impressora Original Prusa i3 MK3S, com recurso ao metamaterial PETg. O principal objetivo consiste em analisar a capacidade de absorção de energia dos dissipadores, quando inseridos num sistema de fachadas envidraçadas.

Para o dissipador com a geometria *honeycomb*, foram adotadas dimensões 80x80x50 mm³ e, para o dissipador com a geometria auxética, foram adotadas dimensões 82,17x80x50 mm³.

Comparando os valores máximos de força registados, com e sem dissipador, verifica-se que para as situações em que a carga se encontra a 10 cm e a 7,5 cm, os valores obtidos com ambas as geometrias de dissipadores são superiores aos registados nos ensaios sem dissipador. Este facto pode indicar que quando o dissipador não tem danos, não consegue cumprir a sua função, podendo inclusivamente amplificar a força e o impulso transmitido.

Já nos ensaios em que a carga foi posicionada a 5 cm da entrada do EDST, ambas as geometrias do dissipador sofreram grandes danos, e os valores máximos das forças e impulsos registados são inferiores aos obtidos sem dissipador, o que permite concluir que os dissipadores só são eficazes quando ocorrem grandes danos, que permitem absorver energia gerada pela explosão.

Afigura-se assim ser difícil conceber um dissipador que seja eficiente para todas as solicitações, em termos da distância reduzida, Z_{EDST} , uma vez que, consoante o tipo de ação o dissipador tem um comportamento diferente em termos dos danos sofridos, a que correspondem diferentes incrementos ou reduções do valor da força transmitida para a estrutura de suporte.

De qualquer forma, o importante será conceber um dissipador que reduza as ações transmitidas à estrutura no caso de explosões de maior intensidade, sendo que para esses casos é que se pretende que o dissipador cumpra a sua função. Nas situações de explosões de menor intensidade poderá admitir-se que o dissipador não cumpra tão bem a sua função, mas também nesses casos a estrutura deve ser dimensionada para uma solicitação inferior ao cenário anterior de uma grande explosão. Assim, em termos absolutos, o importante para o dimensionamento da estrutura será procurar não ultrapassar o valor limite de força de dimensionamento da estrutura, pelo que desde que as amplificações que se verificam para explosões de menor intensidade ou maior distância, se encontrem abaixo deste valor limite, pode numa primeira análise concluir-se que os dissipadores cumprem a sua função, ainda que para confirmar esta tese seja necessário realizar mais ensaios.

Por fim, ao comparar os valores obtidos nestes ensaios com os obtidos nos ensaios de pressão refletida, realizados aquando da calibração da ação da explosão, observa-se que se obtêm valores superiores nos ensaios de força. Afigura-se que este fenómeno ocorra devido ao facto do sistema vibrar e, por este

motivo, o que se regista através do sensor de força, não é apenas a resultante da pressão incidente, provocada pela ação da explosão, mas sim uma conjugação entre esta força incidente e as forças de inércia, que advêm da vibração da própria estrutura quando é atuada pela explosão. Possivelmente por este facto, os valores registados serão sempre mais elevados do que os obtidos a partir da multiplicação da pressão refletida, obtida anteriormente, pela área que é atuada pela explosão.

V. CASO ESTUDO – PAINÉL DE VIDRO LAMINADO

A. Descrição do caso de estudo

O caso de estudo consiste num painel de vidro laminado temperado, com 35 cm de largura e 25 cm de altura. Este painel é apoiado nos dois bordos verticais, com suportes lineares contínuos.

Cada sistema de fixação lateral é composto por uma chapa de suporte e uma cantoneira L 50x5 ligados por dois varões roscados e ligações soldadas. Para além deste sistema, foi ainda necessário inserir quatro sensores de força e 4 placas de aço, para que fosse possível instalar a instrumentação, necessária para registo de dados durante os ensaios. Na Fig. 5 apresenta-se o esquema do *setup* utilizado para o caso estudo.

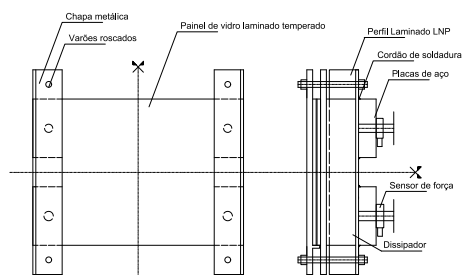


Figura 5 - Esquema do setup utilizado para o caso de estudo.

B. Análise pelo Programa LS-Dyna

O modelo utilizado para a análise no programa LS-Dyna consiste, por simplificação, num painel de vidro laminado desenhado à linha média, com os dois bordos verticais apoiados linearmente.

Através da calibração dos modelos de análise, foram estabelecidas as cargas e as distâncias à entrada do EDST a utilizar. Neste sentido, para o vidro com 2x6 mm e uma película de PVB de 0,76 mm, estabeleceu-se a utilização de uma carga de 10 g, a 10 cm da entrada do EDST, para o vidro com 2x8 mm e uma película de PVB de 1,14 mm, adotou-se uma carga de 20 g, a 10 cm e para o vidro com 2x10 mm e uma película de PVB de 1,14 mm, optou-se por uma carga de 20 g, a 0 cm.

1) *Painel de Vidro Laminado com duas lâminas de 6 mm:* Verifica-se que com o uso do dissipador, independentemente da sua geometria, é expectável uma redução da força transmitida à estrutura de suporte. No modelo sem dissipador, regista-se um valor máximo total da força transmitida à estrutura de suporte de 54,6 kN e nos modelos com o dissipador *honeycomb* e com o dissipador auxético, regista-se um valor máximo de 30,0 kN e 18,9 kN, respetivamente (Fig. 6). Outro aspeto que se verifica através da utilização dos dissipadores, consiste na redução

significativa da frequência de vibração do sistema, o que significa que estes se mostram eficazes no amortecimento da resposta da estrutura. É ainda possível observar que o dissipador auxético apresenta um melhor desempenho, possibilitando uma força máxima registada, menor e mais tardia.

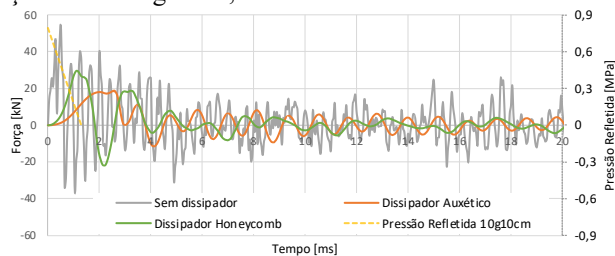


Figura 6 - Força transmitida pelo painel do vidro com 2x6 mm, sujeito a uma carga de 10 g a 10 cm.

Relativamente ao deslocamento no centro do painel (Fig. 7), observa-se que o uso do dissipador *honeycomb* se traduz num primeiro ponto de inflexão mais tardio, face ao caso em que não existe dissipador e ainda numa redução bastante pequena no valor máximo registado, sendo que sem dissipador observa-se um valor máximo de 36,7 mm e com o dissipador *honeycomb* regista-se um valor de 36,6 mm. Em ambos os casos se observa a quebra do painel de vidro. Por outro lado, a utilização do dissipador auxético, traduz-se em maiores ganhos para a estrutura, uma vez que, regista-se uma redução maior, atingindo um valor máximo de 28,0 mm, a que corresponde menores danos do painel de vidro.

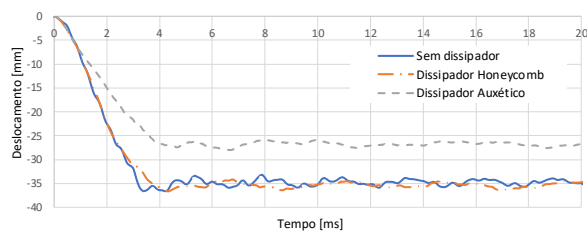


Figura 7 - Deslocamento no centro painel do vidro com 2x6 mm, sujeito a uma carga de 10 g a 10 cm.

Na Fig. 8, encontram-se os valores referentes às extensões registadas. Verifica-se que o maior benefício ocorre quando se utiliza o dissipador auxético, em que se regista um valor máximo de 0,45, enquanto que o dissipador *honeycomb* regista um valor máximo de 0,88. Quando não se utiliza nenhuma das soluções, obtém-se um valor máximo de 1,57, pelo que, ambas as soluções permitem registar uma redução significativa. Em qualquer caso, verifica-se que nenhum dos modelos estudados ultrapassa o valor máximo de extensão suportado pelo PVB de 200%.

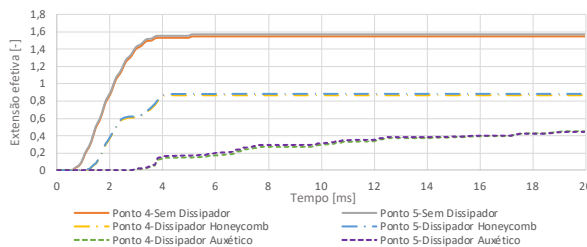


Figura 8 - Extensão efetiva máxima do vidro com 2x6 mm, sujeito a uma carga de 10 g a 10 cm.

Relativamente aos danos sofridos pelos dissipadores (Fig. 9), é possível concluir que o dissipador auxético sofre deformações maiores, uma vez que, atingindo uma extensão máxima de cerca de 31%, enquanto o dissipador *honeycomb*, atinge uma extensão máxima de 12%. Tendo em conta que o dissipador auxético permite reduzir a força aproximadamente 35,7 kN, enquanto o dissipador *honeycomb* apenas reduz cerca de 24,6 kN (Fig. 6), estes dados confirmam que quanto maior forem os danos sofridos pelo dissipador, maior será a sua capacidade de dissipação de energia.

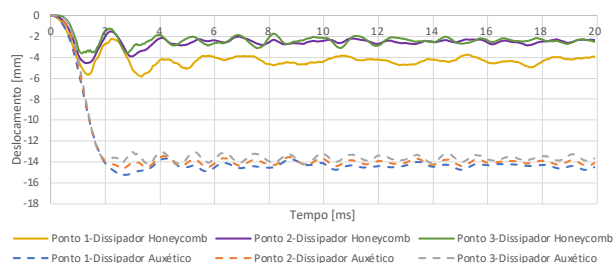


Figura 9 - Deslocamento registado nos dissipadores, para o vidro com 2 painéis de 6 mm.

2) *Painel de Vidro Laminado com duas lâminas de 8 mm:* Para este estudo de caso, foi registado um valor máximo de 84,4 kN para o modelo sem dissipador, e valores máximos de 34,6 kN e 29,4 kN para os modelos com o dissipador *honeycomb* e o dissipador auxético, respetivamente. Verifica-se que, mais uma vez, os modelos com dissipadores registam uma força máxima e uma frequência de vibração menor, sendo que, o dissipador auxético é aquele aparentemente fornece melhores resultados.

A partir da análise dos deslocamentos obtidos no centro do painel, observa-se que com o uso dos dissipadores o painel de vidro não quebra totalmente. O dissipador *honeycomb* permite obter um valor máximo de 12,2 mm e o dissipador auxético um valor de 21,9 mm, em vez do valor de 38,6 mm, que se verifica quando não se usa dissipador, e que corresponde à quebra completa das duas lâminas.

Relativamente às extensões no centro do painel de vidro, verifica-se que, no modelo sem dissipador, as lâminas de vidro atingem a extensão de rotura, sendo que se regista um valor máximo da extensão de 0,88, inferior ao limite da extensão admissível de 2. Para os casos em que se utilizam os dissipadores, o vidro não atinge a sua extensão de rotura, pelo que as extensões observadas correspondem aos pontos que se encontram junto das superfícies exteriores das lâminas de vidro. Através destes resultados é possível concluir que a utilização de dissipadores permite aparentemente evitar a quebra completa do painel de vidro, uma vez que, se regista uma extensão máxima, para o modelo com o dissipador *honeycomb*, de 0,00050 e, para o modelo com o dissipador auxético, de 0,00058.

Relativamente aos danos sofridos pelos dissipadores, verifica-se que o dissipador auxético sofre deslocamentos maiores, uma vez que regista um valor máximo de 20,9 mm e o dissipador *honeycomb* apenas regista um valor de 10,7 mm. Convertendo em extensões nos dissipadores, observa-se uma extensão com um valor máximo de 41,8% no dissipador auxético, e de 21,3% no dissipador *honeycomb*. Comparando a

ordem de grandeza dos deslocamentos, esta é similar no centro e nos bordos do painel, onde se encontram os dissipadores. Isto deve-se aos dissipadores permitirem que o vidro não frature e os deslocamentos nos vários pontos do painel serem semelhantes.

Por outro lado, os resultados relativos à força máxima obtida e aos danos registados nos dissipadores, confirmam os resultados do caso estudo de painéis com 6 mm, isto é, as maiores deformações sofridas pelo dissipador, traduzem-se numa maior capacidade de absorção de energia e, conseqüentemente, em forças máximas menores transmitidas à estrutura de suporte.

3) *Painel de Vidro Laminado com duas lâminas de 10 mm:* Analisando, em primeiro lugar, as forças máximas totais transmitidas à estrutura de suporte, obtém-se uma força máxima instantânea de 327,7 kN para a situação de não utilizar dissipador. Esta força reduz-se para 62,4 kN no caso de se utilizar o dissipador auxético e para 43,7 kN no caso de se utilizar o dissipador *honeycomb*. Relativamente à frequência própria do sistema, verifica-se novamente que a utilização de dissipadores faz baixar significativamente a mesma.

Relativamente aos deslocamentos no centro do painel, observa-se, para o primeiro ponto de inflexão, um deslocamento de 97,6 mm, para o caso em que não se tem dissipador, 124,5 mm, para o dissipador *honeycomb*, e 130,5 mm, para o dissipador auxético. Este aumento das deformações no centro do painel, aquando da utilização dos dissipadores, pode ser justificado pelo contributo da deformação do apoio do painel constituído por apoios mais flexíveis, o que se traduz em deformações superiores no centro do painel, sendo que, da mesma forma, as deformações superiores registadas com o dissipador auxético, advêm deste ser mais flexível do que o dissipador *honeycomb*.

No que se refere às extensões efetivas no painel, verifica-se que quando se empregam os dissipadores, as extensões no PVB se reduzem, sendo que, no modelo sem dissipador, regista-se um valor máximo de 2,44 e para os modelos com o dissipador *honeycomb* e o dissipador auxético, se atingem valores máximos de 2,02 e de 1,81, respetivamente. Assim, prevê-se que nos modelos sem dissipador e com o dissipador *honeycomb* a película de PVB possa apresentar valores de extensão superiores ao valor máximo de 2,0 (ou 200%), enquanto no modelo com o dissipador auxético seja expectável registar valores inferiores. O facto de o PVB poder atingir o valor máximo, significa que atingimos o critério de risco mínimo.

Por último, analisando as deformações registadas nos dissipadores, é possível constatar que apesar de o dissipador *honeycomb* apresentar dois pontos com deslocamentos menores, o ponto 1, que se trata do ponto mais interno do dissipador, possui um deslocamento cerca de 3 vezes superior ao verificado nos outros pontos (26,27 mm, para o ponto 1, 8,73 mm e 7,75 mm, para os pontos 2 e 3, respetivamente). Esta diferença entre deslocamentos, traduz-se previsivelmente em maiores danos internos no dissipador, que tende a acompanhar a rotação do painel de vidro. Ao contrário, no dissipador auxético todos os pontos apresentam deformações semelhantes, possivelmente devido à sua menor rigidez (a máxima registada no ponto 1, de 27,58 mm e a mínima no ponto 3, de 23,21 mm), o que se traduz em deformações relativamente uniformes neste dissipador.

Por outro lado, o facto de neste caso estudo ser o dissipador *honeycomb* aquele que sofre maiores danos, justifica o facto de ser este o dissipador que permite um maior amortecimento da força máxima transmitida à estrutura de suporte, o que volta a confirmar os resultados obtidos nos casos de estudo anteriores.

VI. CONCLUSÕES

Para se avaliar o desempenho de um sistema de proteção para a ação de uma explosão, interessa ter sempre presente três aspetos: a ação, o dissipador e o elemento estrutural. Assim, através do estudo efetuado procurou-se, primeiramente, calibrar a ação da explosão, através de ensaios realizados em laboratório, com recurso a EDST e, na sequência, compreender a eficiência do dissipador. Para tal, realizaram-se ensaios estáticos e dinâmicos dos dissipadores impressos em 3D. Por fim, pretendeu-se avaliar o comportamento de um painel de vidro laminado sujeito à ação de uma explosão, com e sem dissipadores, através do programa de modelação numérica LS-Dyna.

Nos ensaios de calibração da ação da explosão, procurou-se validar as expressões desenvolvidas para a caracterização da ação da explosão. Foram realizados diversos ensaios, onde se procurou variar a distância da carga explosiva à entrada do EDST, bem como a massa de explosivo utilizada. Verificou-se que para distâncias superiores a 10 cm, a ordem de grandeza dos valores obtidos através dos ensaios experimentais é coerente com as expressões aproximadas propostas na referência [11], mas o mesmo não ocorre para distâncias inferiores a este valor.

Através dos ensaios estáticos dos dissipadores foi possível obter as propriedades e a lei constitutiva de cada uma das geometrias em estudo. Nos ensaios dinâmicos, manteve-se a carga explosiva utilizada constante, tendo-se optado por variar apenas a distância da carga à entrada do EDST. Posteriormente, para cada uma das geometrias, avaliaram-se os resultados quantitativos e qualitativos obtidos. Verificou que consoante o tipo de ação, o dissipador apresenta um comportamento diferente, relativamente aos danos sofridos, o que pode resultar num aumento ou numa diminuição do valor da força transmitida à estrutura de suporte. Contudo, o principal objetivo consiste em encontrar um dissipador que diminua as ações transmitidas nas situações em de explosões de maior intensidade. Assim, mesmo que para explosões de menor intensidade ou maior distância ocorra alguma amplificação do efeito quando se utilizam dissipadores, o importante será não ultrapassar a força de dimensionamento da estrutura de suporte e, por outro lado, garantir que para explosões de grande intensidade, em que os dissipadores sofrem maiores danos, exista de facto uma redução das forças transmitidas à estrutura em conjunto com menores danos nos painéis de vidro.

Por fim, relativamente à análise numérica efetuada para o elemento estrutural, através do programa LS-Dyna, verificou-se que a utilização dos dissipadores, independentemente da geometria, possibilita um efeito dissipativo importante. A sua utilização permite diminuir significativamente as forças transmitidas à estrutura de suporte, bem como os danos nos painéis de vidro. No caso particular do modelo com vidro laminado com duas lâminas de 8 mm, o estudo numérico indica que o uso de dissipadores permite que o vidro não frature, o que se traduz numa redução significativa dos danos registados.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais com os dissipadores, afigura-se que a geometria mais eficiente do dissipador será a geometria alveolar auxética. Utilizando esta geometria registam-se em geral melhores resultados em termos de redução de danos nos painéis de vidro laminado e menores forças transmitidos à estrutura de suporte.

Em resumo, os objetivos propostos para o presente estudo foram alcançados, sendo os resultados obtido do trabalho realizado uma boa base para o arranque da campanha de ensaios experimentais de painéis de vidro laminado com e sem dissipadores sujeitos à ação de uma explosão.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio de pessoas que sempre se mostraram disponíveis em fornecer o seu contributo e conhecimento para o desenvolvimento da dissertação que serve de base para o presente artigo. A todas elas o meu sincero agradecimento.

Agradeço em especial ao meu orientador científico, Professor Doutor José Oliveira Pedro, e ao meu coorientador militar, Tenente-Coronel de Engenharia Pedro Matias, por toda a disponibilidade, empenho, preocupação e atenção que sempre demonstraram.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. ., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier Science B.V.
- [2] C O'Regan. (2014). *Structural use of glass in buildings* (Issue 2nd Edition). The Institution of Structural Engineers.
- [3] Cormie, D., Mays, G., & Smith, P. (2019). *Blast Effects on Buildings*. <https://doi.org/10.1680/beob.61477>
- [4] Courtney, E., Courtney, A., & Courtney, M. (2014). Shock tube design for high intensity blast waves for laboratory testing of armor and combat materiel. *Defence Technology*.
- [5] Draganić, H., & Sigmund, V. (2012). Blast Loading on Structures. *Technical Gazette* 19, 19, 643–652.
- [6] E. Yandzio, M. G. (1999). Protection of Buildings Against Explosions.
- [7] Elsayed, N. M., & Atkins, J. (2008). Explosion and Blast-related Injuries: effect of explosion and blasts from military operations and acts of terrorism.
- [8] Förch, M. (2019). Analysis of Glass Panels Subjected to Blast Load.
- [9] Haldimann, M., Luible, A., & Overend, M. (2008). Structural use of Glass. In *Structural use of Glass*. International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [10] Henrych, J. (1979). *The dynamics of explosion and its use*. Elsevier Scientific Pub.
- [11] Malewski, A., Kozłowski, M., Vrdoljak, A., & Akmadžić, V. (2019). *Glass in Structural Applications*. 47–55.
- [12] Ousji, H., Belkassam, B., Louar, M. A., Kakogiannis, D., Reymen, B., Pyl, L., & Vantomme, J. (2015). Parametric Study of an Explosive-Driven Shock Tube as Blast Loading Tool. *Society for Experimental Mechanics*.
- [13] P. D. Smith, & J. G. Hetherington. (2011). Blast and Ballistic Loading of Structures. In *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- [14] Patterson, M. (2011). *Structural Glass Facades and Enclosures*. John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., & Sobek, W. (1999). *Glass Construction Manual*. Birkhäuser - Publishers for Architecture.
- [16] U.S. Department of Defense. (2008). Unified Facilities Criteria (UFC) Structures To Resist the Effects of Accidental.
- [17] Wurm, J. (2007). *Glass structures*. Birkhäuser Verlag AG.