

Solução de Revestimento Sacrificial com Espuma Mineral Frágil para Mitigação da Ação de Explosões

Duarte Braz; Pedro Matias
Centro de Competências para Proteção de Infraestruturas,
CINAMIL, Academia Militar
Academia Militar
Lisboa, Portugal
braz.da@exercito.pt; matias.pjsg@exercito.pt

David Lecompte; Aldjabar Aminou; Bachir Belkassem; Mohamed Ben Rhouma
Department of Military and Protective Engineering, RMA
Royal Military Academy
Bruxelas, Bélgica
david.lecompte@mil.be;
aldjabar.aminoumalamkailou@mil.be;
bachir.belkassem@hotmail.com;
medbenrhouma3013@gmail.com

Resumo — O uso de engenhos explosivos no campo de batalha é uma das maneiras mais eficazes de criar um maior número de baixas. Independentemente do alvo, estruturas ou veículos, é do interesse das forças militares em conflitos armados, mitigar os seus efeitos. Consequentemente, surge o objetivo deste trabalho: o estudo da eficácia de um revestimento sacrificial à base de espuma mineral frágil. Teoricamente, este é capaz de absorver alguma energia induzida por uma explosão numa estrutura e assim minimizar danos. A solução estudada neste trabalho, adota um núcleo com espuma mineral frágil. Este material é leve, incombustível, económico e com capacidade de absorção de energia. Primeiro, procedeu-se à caracterização da espuma, em que se tornou possível, através de uma campanha de testes de compressão quase-estática, determinar as suas propriedades físicas. Realizou-se também um teste dinâmico, em que foi possível compreender que a espuma mineral é capaz de atenuar a pressão de uma explosão numa estrutura. O desenvolvimento deste sistema e avaliação do seu comportamento submetido a uma explosão, foi realizado através de testes experimentais e modelos numéricos no software LS-Dyna. A solução de revestimento mostrou-se eficaz. Contudo o seu sucesso depende não só do núcleo, mas da placa frontal adotada.

I. INTRODUÇÃO

Estruturas militares como quartéis, viaturas de combate e edifícios civis de grande importância são os alvos mais comuns em ataques terroristas com recurso a engenhos explosivos. Além deles, as explosões podem ser originadas por eventos acidentais. A 4 de agosto de 2020, ocorreu uma detonação química massiva no porto de Beirute, considerada a maior do género e o desastre antropológico mais grave da década [1].

As soluções leves para proteção têm sido um alvo comum de investigação nos dias atuais [2]–[4].

Um revestimento sacrificial (RS) é composto por um núcleo entre duas camadas chamadas placa frontal e traseira (Figura 1). A filosofia por trás do RS é atenuar as acelerações e os grandes danos resultantes de uma explosão, convertendo altas pressões num curto espaço de tempo para pressões baixas, (abaixo da pressão máxima admissível na estrutura) em períodos de tempo mais longos [5].

Neste estudo, o objetivo é realizar testes experimentais na espuma mineral, de modo a avaliar a sua capacidade de absorção da energia induzida por uma explosão. Com base nos resultados experimentais, um modelo numérico foi desenvolvido e validado.

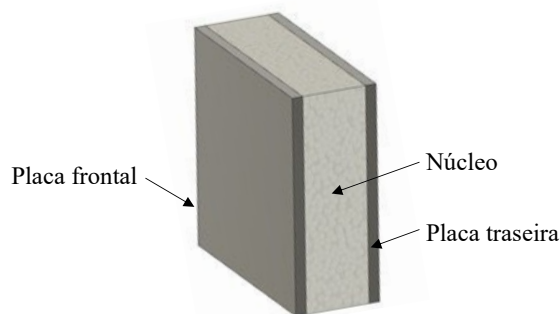


Figura 1. Vista esquemática de uma camada de proteção

II. EXPLOSÃO E AÇÃO DE UMA EXPLOSÃO

A palavra "explosão" é geralmente usada para descrever eventos associados a um ruído alto e, à ruptura súbita dos objetos no local da sua ocorrência e à sua volta [6], bem como uma rápida e súbita libertação de energia e produção de gás em grande escala [4]. Esta energia vem em forma de ondas de choque, calor, som e luz. Estas ondas podem propagar-se numa estrutura num curto espaço de tempo e levar ao seu colapso [7]. À medida que a explosão se move para longe da fonte, a pressão do ar na frente da onda diminui.

A variação da pressão é caracterizada por um aumento instantâneo da pressão atmosférica ambiente (P_0) até um pico de sobrepressão (P_{s0}) (Figura 2). O pico da sobrepressão incidente cai exponencialmente com o tempo, e regressa à pressão ambiente. Este intervalo de tempo corresponde à duração da fase positiva, t_0 . Segue-se uma onda de pressão negativa com duração, t_0^- , aproximadamente 2 a 5 vezes maior que a da fase positiva [8].

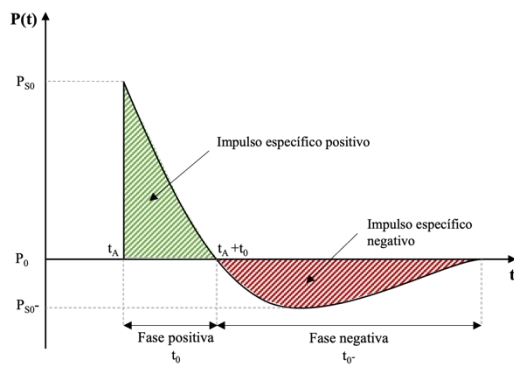


Figura 2. Perfil pressão-tempo típico de uma explosão, adaptado de [8]

O perfil da onda de choque é descrito pela equação de *Friedlander*, que, para a detonação aérea perfeita de uma carga esférica, é dado por [9]:

$$P_S(t) = P_{S0} \left[1 - \frac{t}{t_0} \right] e^{-A \left(\frac{t}{t_0} \right)} \quad (2.1)$$

onde A é o coeficiente de decadência da onda.

III. ESPUMA MINERAL FRÁGIL

Na natureza é possível encontrar muitas matérias-primas compostas por estruturas celulares únicas, como madeira e coral. Esta propriedade intrínseca permite-lhes possuir uma densidade muito baixa e multifuncionalidade [10]. Os materiais celulares fabricados pelo homem, tais como espumas, têm características distintas que incluem uma excelente relação entre resistência/peso e a capacidade de sofrer grandes deformações sob uma carga quase constante [11].

A espuma mineral frágil estudada neste trabalho tem uma estrutura celular fechada e é composta por cal, areia, cimento e água. A mistura destes componentes é estabilizada sob a pressão de 12 bar e à temperatura de cerca de 190°C num aparelho de desinfeção [12]. A composição química em percentagem de massa da espuma mineral estudada é: 70-80% de silicato de cálcio hidratado, menos de 2% de quartzo, 15-20% de calcite e 3-8% de gesso e anidrite. Tem uma densidade de cerca de 110kg/m³ e, uma vez que é fabricado em painéis leves, pode ser usado para aumentar a resistência de uma estrutura existente.

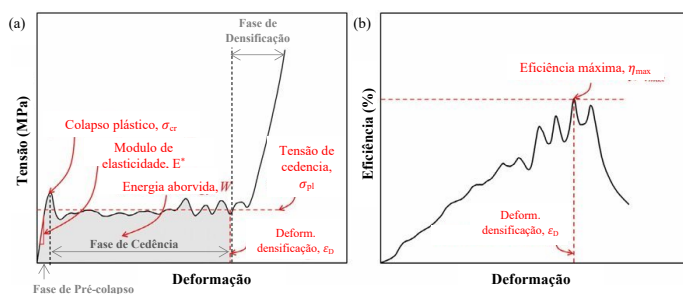


Figura 3. Diagrama esquemático que indica a curva de tensão-deformação de um sólido celular e (b) Eficiência de Absorção de Energia (η - u) [13]

Na Figura 3 (a) é apresentada a curva de tensão-deformação sob uma carga de compressão num material celular, que pode muitas vezes ser simplificado em três regimes ou fases: a fase

elástica linear (fase pré-colapso), a fase do de cedência e a fase de densificação [14].

IV. CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA MINERAL FRÁGIL

A escolha do núcleo de um RS deve ser feita com base na resistência da estrutura principal. Se a tensão de cedência do núcleo esmagador for muito baixa, a espuma deforma-se mesmo sob uma carga inferior à própria resistência da estrutura, perdendo a sua finalidade. Por outro lado, se for superior à resistência máxima, a estrutura principal pode sofrer um deslocamento máximo para além do valor crítico, mesmo com o revestimento sacrificial acoplado [4]. Para caracterizar o comportamento da espuma mineral, é necessário obter certas propriedades básicas.

A. Teste quase-estático

Através de um teste de compressão quase-estática é possível determinar propriedades como o Módulo de *Young*, o limite elástico e a resistência à fratura [10].

O interesse recai na tensão de cedência e na deformação na densificação, considerando diferentes configurações e sua influência nestes valores. Em primeiro lugar, foram efetuados testes de compressão uniaxial para várias amostras com diferentes secções transversais (quadradas e circulares), sem e com os seus limites confinados. Depois, foram efetuados testes de compressão para amostras de secção transversal quadrada de duas camadas. Como exemplo dos resultados obtidos, a Figura 4 mostra as curvas de tensão-deformação para diferentes amostras paralelepípedicas.

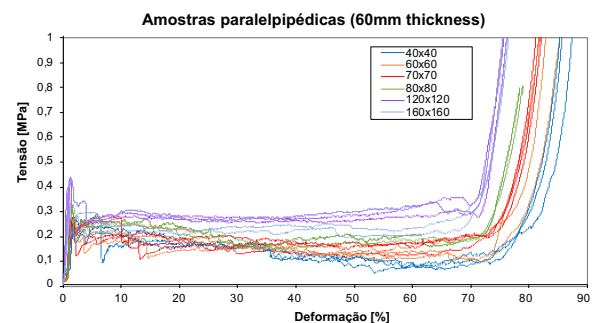


Figura 4. Curvas de tensão-deformação para diferentes amostras paralelepípedicas

As curvas mostram um primeiro pico local que corresponde à fase elástica. No final da fase elástica, segue-se uma fase de cedência com alguma oscilação, característica da espuma frágil, como apresentada na Figura 3, em que existe uma fase plástica. Por último, um rápido aumento de tensão representa a fase de densificação. A equação para determinar a tensão de cedência é definida por:

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\epsilon_{c0}}^{\epsilon_{d0}} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_{d0} - \epsilon_{c0}} \quad (3.1)$$

quando ϵ_{c0} é a deformação no pré-colapso e ϵ_{d0} a deformação inicial na densificação, correspondente ao início e ao fim da fase de cedência, respetivamente.

Devido à irregularidade dos valores e à difícil determinação da deformação de densificação em materiais celulares, foram adotados três métodos diferentes para a confirmação do valor. Os métodos mais comuns para determinar a deformação de densificação do início baseiam-se na eficiência de absorção de energia:

$$\eta(\epsilon) = \frac{1}{\sigma(\epsilon)} \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3.2)$$

onde σ e ϵ são a tensão e a deformação nominal, respetivamente.

O primeiro método baseou-se no máximo global da curva de eficiência (Figura 3 (b)) para a determinação da deformação de densificação [15]:

$$\left. \frac{d\eta(\epsilon)}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_{d0}} = 0 \quad (3.1)$$

mas uma vez que este método apresentou resultados mais duvidosos e não constantes, foi considerado um segundo método que determina a deformação na densificação pelo último máximo local da curva de eficiência. Finalmente, para ter um terceiro método como confirmação, foi utilizada uma abordagem diferente, um método baseado na curva de tensão-deformação. Este estabelece que a deformação de densificação inicial é definida como o último mínimo local antes da subida abrupta da curva de tensão-deformação [15].

A utilização dos três métodos diferentes revelou-se útil e precisa. Esta abordagem era mais necessária em amostras mais pequenas devido à menor estabilidade e resistência do material. A Figura 5, Figura 6 e Figura 7 mostram a comparação dos resultados da tensão de cedência e a deformação de densificação para as diferentes amostras.

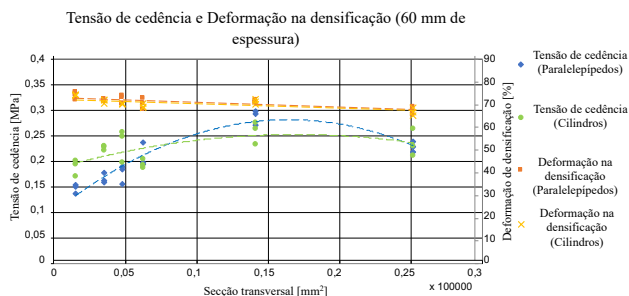


Figura 5. Tensão de cedência e deformação na densificação para 60 mm de espessura, considerando amostras de secção transversal quadrada e circular

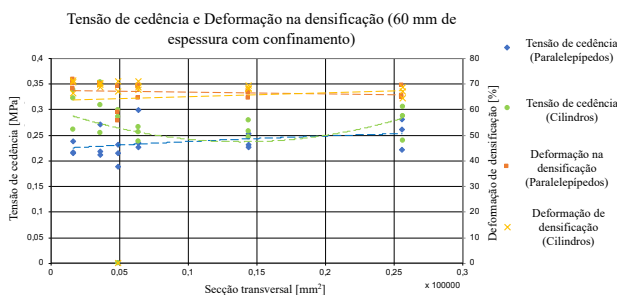


Figura 6. Tensão de cedência e deformação na densificação para 60 mm de espessura com confinamento, considerando amostras de secção transversal quadrada e circular

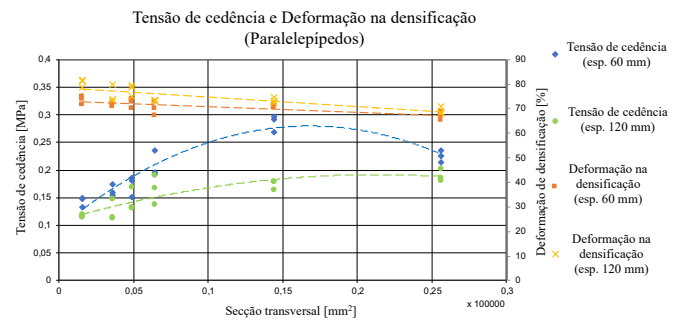


Figura 7. Tensão de cedência e deformação na densificação para 60 e 120 mm de espessura, considerando amostras de secção transversal quadrada

B. Teste Dinâmico

Para a caracterização da capacidade de absorção da onda de choque e comportamento compressivo dinâmico dos materiais, existem muitas abordagens na literatura [16]–[18]. A técnica mais comum é a utilização de uma Barra de Pressão de Hopkinson, em inglês *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB). Consiste em três barras diferentes: barra projétil, barra incidente e barra transmissora. A amostra em estudo é colocada entre a barra incidente e a barra transmissora, que permite a determinação da taxa de deformação, da deformação e da tensão são determinadas. Noutra abordagem, pode utilizar-se um dispositivo ou máquina de teste de queda. Estes consistem numa estrutura de aço, uma grande área de impacto e uma estrutura rígida inferior. Um objeto de queda é libertado no topo, apontando para a amostra na estrutura rígida. Deste teste é possível recolher dados referentes às forças e deslocamentos da amostra.

O objetivo do teste dinâmico nesta tese não é definir o comportamento compressivo ou o deslocamento da espuma, mas compreender se ao utilizar a espuma mineral haverá uma mitigação da carga de uma explosão numa estrutura. A organização deste teste pode ser dividida em duas partes principais: o dispositivo ou setup e a sala de monitorização (Figura 8).

O dispositivo corresponde a um *Explosive Driven Shock Tube* (EDST) na parede. Este equipamento consiste na utilização de um tubo para aumentar a carga proveniente de uma pequena carga explosiva, e gerar uma frente de onda planar [19]. Este tubo está direcionado a uma estrutura de massa elevada (cilindro inferior de aço e cilindro superior de alumínio). As medições foram efetuadas por uma célula de pressão, registando os valores de pressão refletida por uma placa frontal funcionando como um pistão, posicionada a 2 mm da saída do EDST, e uma célula de carga para os valores de carga transmitida à estrutura.

Os dispositivos de medição estão ligados a um sistema de registo de dados na sala de controlo. A carga explosiva (10g de C4), posicionada a 50 mm da entrada do EDST, é acionada por um gatilho manual, na mesma sala.

Nesta campanha de testes foram utilizadas amostras de espuma mineral frágil com 80x80x60mm³, em que algumas estavam confinadas e em camadas duplas.

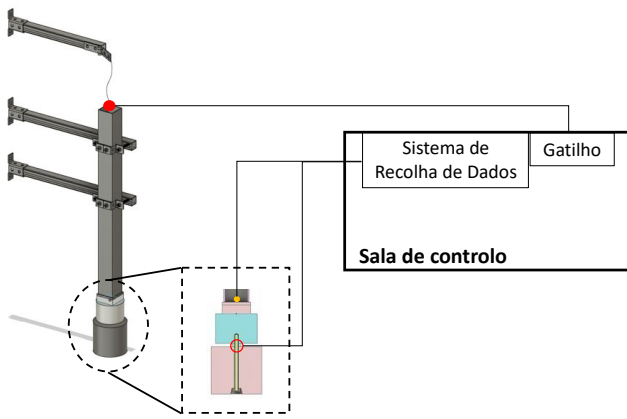


Figura 8. Organização global do *setup* utilizado na campanha de testes

Considerando a filosofia de RS, é possível notar que a espuma mineral frágil traz vantagens quando usada para a atenuação do carregamento por uma onda de choque (Figura 9). No entanto, é importante notar que a pressão refletida medida no final do EDST é sobrestimada, o que conduzirá a uma grande dispersão de valores. Utilizando uma média móvel nos resultados obtidos como forma de evitar as vibrações criadas pelo impacto da onda de choque, é possível observar que a pressão transmitida apresenta um pico no impacto na placa frontal, convergindo para valores próximos da tensão de cedência da amostra.

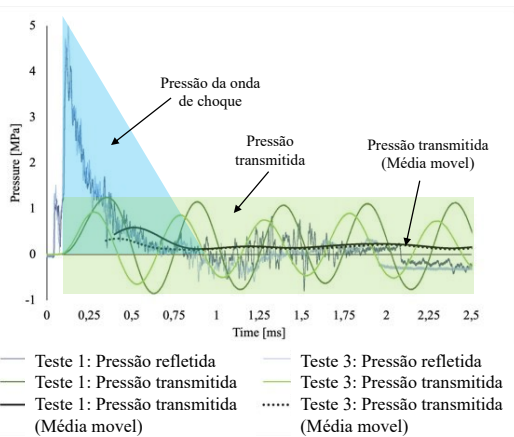


Figura 9. Filosofia de revestimento sacrificial aplicada aos resultados para uma amostra com uma camada de 60 mm

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados da campanha de teste, em que é possível verificar a eficácia da espuma mineral como material de revestimento sacrificial de uma estrutura para um carregamento dinâmico.

TABELA 1. SUMÁRIO DOS RESULTADOS DA CAMPANHA DE TESTES DINÂMICOS

Amostra	Teste	Pico de Pressão [MPa]	Pressão Transmitida [MPa]	Diferença de Pressão [%]
Uma camada	1	4.51	0.59	86.93
	3	5.00	0.35	93.05
Uma camada confinada	1	4.44	0.42	90.53
	3	3.78	0.44	88.29
Duas camadas	2	3.87	0.46	88.21
	3	4.08	0.41	90.04

V. CAPACIDADE DE ATENUAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE

A. Estudo Experimental

1) Setup do teste

O principal objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da espuma mineral na mitigação dos efeitos de uma explosão, em particular na deformação gerada numa estrutura. O *setup* da campanha de testes está esquematizado na Figura 10.

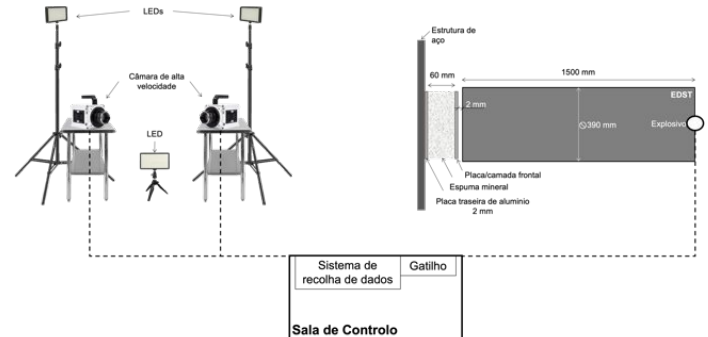


Figura 10. Esquema global do *setup* utilizado nos testes experimentais

O *setup* é constituído por três grupos principais. Em primeiro lugar, dispomos de todos os elementos relativos ao próprio teste, em que existe a placa de controlo de alumínio (EN AW-1050-H24) (com e sem RS) fixa por uma moldura aparafusada (EN AW-7022), a estrutura de aço (EN AW-7022), a carga de explosivo, o detonador e o gatilho. Em segundo lugar, existem as câmaras de alta velocidade e as luzes LED. As câmaras estão sincronizadas para começarem a gravar simultaneamente. Por fim, existe um sistema de gravação onde um computador está equipado com um software de gravação de dados. Uma massa de 19,8g de C4 é preparada na entrada do EDST de secção circular.

Ao premir o gatilho, a carga explosiva detona e, neste momento a gravação das imagens começa com a rutura de um fio elétrico fixo no explosivo. A placa de alumínio é pintada com um padrão de manchas na face virada para as câmaras. Torna-se assim, possível explorar as imagens capturadas pela Correlação de imagem digital (em inglês *Digital Image Correlation*, DIC). Isto permitirá calcular as deformações da placa de alumínio por contraste de cor.

Nesta campanha de testes foram alvo seis configurações de RS distintas.

2) Resultados experimentais

A placa de alumínio deforma-se permanentemente em consequência da onda de choque da explosão, em que o deslocamento máximo ocorre no centro da placa. A evolução do deslocamento em função do tempo e da placa/camada frontal é apresentada na Figura 11.

À medida que a onda de choque da explosão atinge o alvo, a placa de controlo de alumínio começa a deformar-se quase instantaneamente até atingir o valor máximo. Após alguma oscilação, estabiliza depois de alguns milissegundos até atingir o valor final do deslocamento, que corresponde à deformação plástica. Quando a espuma mineral é adicionada como RS, as oscilações diminuem de frequência, uma vez que a massa da

espuma mineral determina a frequência que passará para a placa de alumínio.

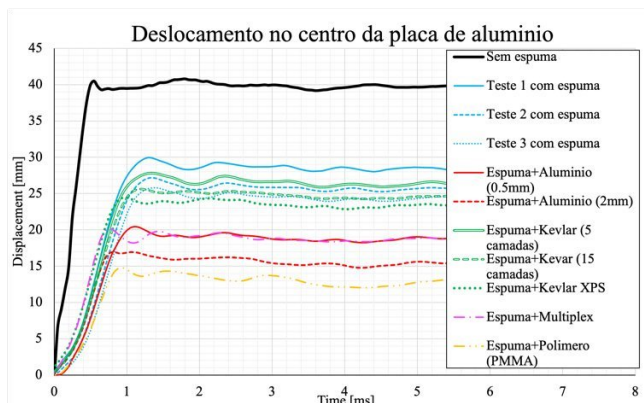


Figura 11. Evolução do deslocamento da placa de controle de alumínio para diferentes soluções de placa/camada frontal

Ao adicionar uma placa/camada frontal, o deslocamento máximo pode ser reduzido ainda mais. Esta visa proteger a espuma mineral e uniformizar a onda de choque, atuando como um pistão que esmaga o material do núcleo.

A Tabela 2 mostra um resumo dos resultados da campanha de testes, onde é possível concluir que o RS com a placa frontal de alumínio de 2 mm é a solução mais eficiente em geral. Apesar de não ser a solução mais leve mostra melhores resultados, em termos de redução do deslocamento máximo e relação espessura/massa.

TABELA 2. TABELA RESUMO DOS RESULTADOS DA CAMPANHA DE TESTE

Espess. Espuma	Elemento Frontal			Desloc. Max. [mm]	Differ. Relat. [%]
	Material	Massa [g]	Espess.		
0	Nenhum	-	-	44.47	-
60	Nenhum	-	-	29.52 + 1.19	33.62
60	Alumínio	121.95	0.5 mm	25.25	43.22
60	Alumínio	487.80	2 mm	20.60	53.69
60	Kevlar	321.87	5 camadas	31.29	29.64
60	Kevlar	965.61	15 camadas	29.59	33.46
60	Kevlar XPS	64.37	1 camada	29.17	34.41
60	Multiplex	864	20 mm	24.89	44.03
60	Polímero (PMMA)	489,10	3.8 mm	17.12	61.51

B. Estudo Numérico

1) Modelo em elementos finitos

O custo geral numa campanha experimental é muito elevado. Além disso, a falta de controlo das condições ambientais, dos limites de horários, etc., pode levar à falha na obtenção de resultados. Por estas razões, é vantajoso recorrer a modelos numéricos. A simulação é um produto de três fases: primeiro a definição da geometria, da malha, dos materiais e das condições iniciais e de fronteira; em segundo lugar os cálculos e, finalmente, o processamento dos resultados.

Dada a geometria simétrica do *setup* e para reduzir o tempo de cálculo, um quarto da geometria foi modelado (Figura 12). O modelo criado nesta tese foi resolvido numa abordagem segundo Lagrange. Geralmente funciona bem para problemas quando as distorções dos elementos são moderadas e é vantajoso devido à sua eficiência e precisão de tempo. Todas as partes, com exceção da espuma são definidas com elementos finitos (EF) sólidos paralelepípedicos com secção quadrada de 2mmx2mm, com 1mm de espessura para a placa de controlo, 7,5 mm para a estrutura de aço e 3 para a moldura de fixação.

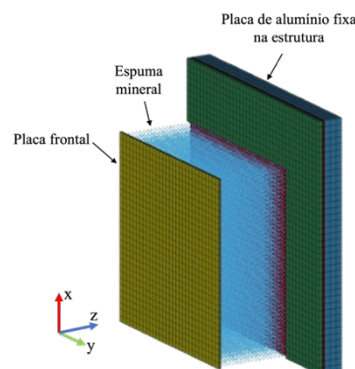


Figura 12. Geometria do modelo

Para replicar com precisão a ligação entre a estrutura de aço, a moldura de fixação e a placa de alumínio foi utilizado o algoritmo CONTACT_AUTO MATIC SURFACE TO SURFACE_TIEBREAK. Aplicando OPTION=4 o deslizamento entre as três partes foi permitido.

A espuma mineral é modelada usando *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). O contacto entre os elementos EF e SPH é definido usando o algoritmo de contacto CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE, onde os elementos SPH foram definidos como escravos e os elementos finitos como mestres.

Tanto a estrutura de aço como a moldura de fixação não excedem o seu limite elástico. Por esta razão, ambos foram simplesmente modelados, utilizando uma lei constitutiva linear elástica através do material MAT_ELASTIC. As placas de controlo e frontais superam a região elástica e sofrem deformação plástica. De modo a considerar, as propriedades da velocidade de deformação do alumínio, o material MAT_MODIFIED JOHNSON COOK foi adotado, tendo este modelo sido validado por [19], [20].

Em LS-Dyna, para os elementos SPH, a lei do material deve ser compatível. O software oferece uma lei baseada nas equações constitutivas para espumas, por Chang (1995), em que é possível inserir curvas de tensão-deformação de compressão quase estática, juntamente com as propriedades mecânicas de modo a simular a espuma mineral frágil [21].

A modelação da carga induzida pela onda de choque foi simulada usando uma formulação de Lagrange e uma curva de carga definida, a partir de dados experimentais.

2) Resultados numéricos

Os resultados dos modelos numéricos são apresentados na Figura 13, bem como os experimentais. Ao comparar os valores

obtidos nos modelos numéricos com os testes experimentais, existe um erro relativo entre 0,11 e 5,50%, o que significa que cada modelo foi validado.

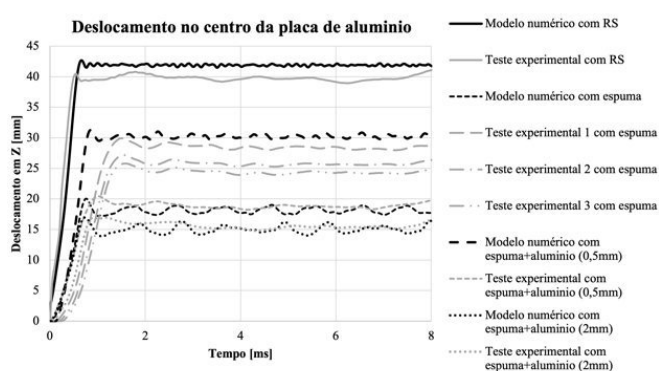


Figura 13. Deslocamentos da placa de controlo de alumínio obtidos nos modelos numéricos e testes experimentais

VI. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base na campanha de testes quase estáticos, em amostras paralelepípedicas, o aumento do tamanho na secção transversal também aumenta o valor da tensão de cedência até um determinado ponto, fazendo com que o comprimento da secção transversal quadrada seja o dobro da espessura da amostra. Por outro lado, as amostras confinadas em geral garantem um valor mais constante de tensão de cedência, que devido à percentagem de área confinada, aumenta os valores para amostras mais pequenas. Por fim, nas amostras de duas camadas a tensão de cedência diminui quase para metade devido aos danos entre as duas camadas durante o carregamento, o que mostra que esta abordagem não traz muita vantagem.

Com os testes dinâmicos foi claro notar que há uma atenuação nitida dos valores de pressão refletida pela placa, quando comparados com os transmitidos para a estrutura de massa alta. Uma vez que as amostras não confinadas apresentam melhores resultados, com base na média móvel para reduzir as oscilações causadas, conclui-se que a dispersão do material é importante na atenuação da onda choque.

A espuma mineral frágil por si só garante uma redução significativa na deformação da placa de controlo, embora e como foi mencionado anteriormente, a fim de garantir uma distribuição uniforme da carga, a placa frontal seja crucial. O que foi possível verificar nas diferentes soluções testadas foi que o alumínio (EN AW-1050-H24), como placa frontal, provou ser a melhor solução numa primeira abordagem a um RS com esta espuma, garantindo uma solução leve e compacta.

Por último, foi desenvolvido um modelo numérico em LS-Dyna para simular a configuração de teste utilizada para avaliar a capacidade RS. Este modelo baseava-se numa lei de espuma celular Fu Chang, de acordo com as curvas de tensão-deformação da espuma mineral. Os resultados dos modelos foram fortemente validados pelos resultados experimentais.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio das pessoas que me são mais próximas. À minha família, amigos e camaradas o meu sincero agradecimento.

Agradeço em especial a toda equipa do *Department of Military and Protective Engineering* da *Royal Military Academy* na Bélgica, por toda a disponibilidade, empenho, preocupação, atenção e ajuda, que sempre demonstraram.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] S. Sivaraman and S. Varadarajan, "Investigative consequence analysis: A case study research of Beirut explosion accident," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 69, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104387.
- [2] A. Aminou, "Atténuation d'ondes d'explosion par mousse minérale: Étude expérimentale et numérique," *École Royal Militaire, Brussels*, 2020.
- [3] M. Liang, X. Li, Y. Lin, K. Zhang, and F. Lu, "Dynamic compressive behaviors of two-layer graded aluminum foams under blast loading," *Materials*, vol. 12, no. 9, 2019, doi: 10.3390/ma12091445.
- [4] H. Ousji and P. Berke, "Blast mitigation using crushable core systems: experimental, analytical and numerical study," 2017.
- [5] G. W. Ma and Z. Q. Ye, "Energy absorption of double-layer foam cladding for blast alleviation," *Int J Impact Eng*, vol. 34, no. 2, pp. 329–347, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.012.
- [6] K. Ramamurthi, *Modeling Explosions and Blast Waves*, 2nd Edition. Springer, ANE Books India, 2021.
- [7] G. V. Jasmine, M. R. Ponnada, and S. P. Mishra, "Blast Loads and Their Effects on Structures," 2022, pp. 167–178. doi: 10.1007/978-981-16-5839-6_15.
- [8] M. D. Goel, "Blast: Characteristics, loading and computation-an overview," in *Advances in Structural Engineering: Mechanics, Volume One*, Springer India, 2015, pp. 417–434. doi: 10.1007/978-81-322-2190-6_36.
- [9] J. Hetherington and P. Smith, *Blast and Ballistic Loading of Structures*. CRC Press, 2014. doi: 10.1201/9781482269277.
- [10] Y. Sun and Q. M. Li, "Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 112. Elsevier Ltd, pp. 74–115, Feb. 01, 2018. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006.
- [11] P. J. Tan, J. J. Harrigan, and S. R. Reid, "Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam," in *Materials Science and Technology*, May 2002, vol. 18, no. 5, pp. 480–488. doi: 10.1179/026708302225002092.
- [12] A. ; Jonet *et al.*, "Blast Mitigation Using Brittle Foam Based Sacrificial Cladding: A Feasibility Study," *Brussel*, 2019.
- [13] Y. Duan, B. Du, X. Shi, B. Hou, and Y. Li, "Quasi-static and dynamic compressive properties and deformation mechanisms of 3D printed polymeric cellular structures with Kelvin cells," *Int J Impact Eng*, vol. 132, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.017.
- [14] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids*. Cambridge University Press, 1997. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [15] Q. M. Li, I. Magkiriadis, and J. J. Harrigan, "Compressive strain at the onset of densification of cellular solids," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 42, no. 5, pp. 371–392, Sep. 2006, doi: 10.1177/0021955X06063519.
- [16] K. Müller, T. Quercetti, and A. Musolf, "Characterisation of shock-absorbing components under impact loading," 2009, pp. 569–574. doi: 10.1051/dymat/2009081.
- [17] M. Sperl, L. Gajdos, Z. Slizkova, and M. Drdlova, "Instrumented dynamic tests of building materials," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jan. 2021, vol. 1039, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/1039/1/012023.
- [18] M. Chen, H. Si, X. Fan, Y. Xuan, and M. Zhang, "Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete," *Constr Build Mater*, vol. 316, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125896.
- [19] M. A. Louar *et al.*, "Explosive driven shock tube loading of aluminium plates: Experimental study," *Int J Impact Eng*, vol. 86, pp. 111–123, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.07.013.
- [20] O. Atoui, A. Maazoun, B. Belkassam, A. Jonet, L. Pyl, and D. Lecompte, "Numerical Investigation Of Aluminium Plates Subjected To Blast Loading Using Arbitrary Lagrangian Eulerian and Lagrangian Approaches," *Silos proceedings (13th Shock and Impact Loads on Structures 2019)*, pp. 155–164, 2019.
- [21] LSTC, "LS-DYNA ® Keyword User's Manual Volume I Livermore Software Technology (LST), An Ansys Company," 2020. [Online]. Available: www.lstc.com