

# Conceção, análise e ensaio de uma solução de absorção de energia para fachadas envidraçadas com fixações lineares

José Machado, Pedro Matias  
CCPI, CINAMIL, Academia Militar  
Academia Militar  
Lisboa, Portugal

machado.jac@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 presente trabalho está incluído no projeto ProFESEx (Sistema de Proteção de Fachadas Envidraçadas Sujeitas a Explosões) com o principal objetivo de desenvolver uma solução de proteção de fachadas envidraçadas utilizando metamateriais impressos em 3D com geometria auxética, e vidro laminado composto por duas lâminas de vidro temperado capazes de resistir a cargas explosivas. Pretende-se que a adoção de um sistema de dissipação de energia permita uma redução dos danos do vidro e melhore o seu comportamento e resistência no caso de explosões. Quando um vidro laminado é sujeito à ação de uma carga de explosiva, os danos causados nos seres humanos podem ser drasticamente reduzidos quando comparados com os danos causados por um vidro monolítico, responsável pela maioria das vítimas, devido à projeção dos fragmentos. A modelação do comportamento do vidro utilizando o método dos elementos finitos (MEF) é complexa devido às suas propriedades. Procurou-se calibrar os resultados dos modelos numéricos de EF com os obtidos nos ensaios realizados, e desta forma compreender o comportamento de um painel de vidro laminado com e sem o sistema de dissipação de energia proposto. Concluiu-se que o sistema de dissipação funciona, embora os resultados obtidos nos ensaios de campo realizados não sejam totalmente esclarecedores do comportamento do painel de vidro com o sistema de dissipação para diferentes cargas explosivas. Contudo, concluiu-se que o sistema de dissipação funciona, quando se compara os resultados obtidos com o painel de apoio rígido. Este sistema necessita, contudo, de melhorias para que o painel de vidro possa beneficiar mais da capacidade de dissipação de energia dos dissipadores.

**Palavras-Chave** — Ação da explosão; Vidro Laminado; Metamateriais; Dissipador de Energia; Auxético; LS-Dyna.

## I. INTRODUÇÃO

Tendo em consideração o historial de explosões, como sejam a recente grande explosão registada em Beirute, Líbano, a proteção das infraestruturas é crucial para assegurar a proteção das pessoas contra os impactos das explosões.

O fenómeno do terrorismo tem evoluído ao longo do tempo, sendo classificado pela Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) um novo conceito de conflito. A resposta da OTAN a esta guerra híbrida é muito difícil [1], embora se verifique que nos últimos anos o número de ações terroristas está a estabilizar, e a letalidade dos ataques é decrescente nos países desenvolvidos. Em 2021, quatro em cada dez ataques mais mortíferos foram provocados por bombardeamentos [2].

Compete aos profissionais da engenharia de estruturas conceber e dimensionar sistemas capazes de proteger as pessoas de explosões [3]. Uma das principais preocupações atuais, está relacionada com a utilização de fachadas envidraçadas em edifícios. Na Academia Militar, o projeto "Fachadas de Vidro de Proteção Contra Cargas de Explosão" (ProFESEx) tem como principais objetivos conceber e dimensionar uma solução para a proteção da fachada envidraçada utilizando metamateriais com recurso a impressão 3D, com o objetivo de desenvolver um dispositivo de dissipação de energia.

Este trabalho está integrado no projeto ProFESEx e tem como objetivo principal estudar uma solução de fixação linear de amortecedores em painéis de vidro de tamanho real que proporcionem a dissipação eficaz de energia aquando da ocorrência de uma explosão.

## II. EXPLOSÕES

Uma explosão ocorre quando uma reação química, física ou nuclear se desenvolve de forma muito rápida, libertando uma grande quantidade de energia num curto intervalo de tempo. Quanto mais rápida for a reação, mais violenta é a explosão [4]. As explosões podem ser confinadas ou ao ar livre e, dependendo da sua localização ou origem, verificam-se comportamentos diferentes [5].

A explosão considerada para este trabalho foi uma explosão não confinada de superfície, onde se considera que a explosão se dá perto do solo, ou em contacto com o mesmo, sendo que a onda de choque que chega à superfície ou edifício em estudo é considerada plana [5].

A variação de pressões de uma explosão ao longo do tempo pode ser traduzida pela Figura 1 onde se observa que o pico da pressão se regista no instante da chegada da onda de choque, tendo ao longo do tempo um decaimento, passando por uma fase negativa antes de voltar a estabilizar à pressão atmosférica. A fase positiva tem uma duração menor que a fase negativa, embora o impulso produzido seja muito superior [6].

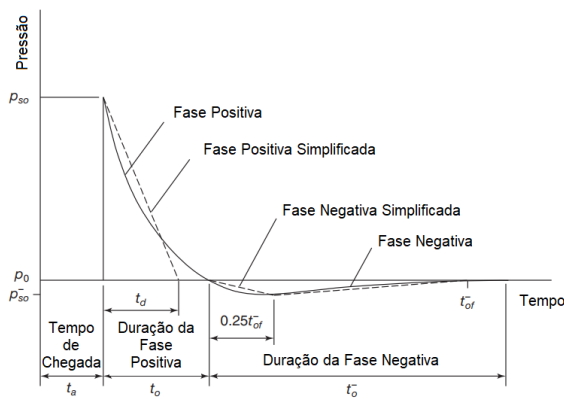


Figura 1 - Curva de pressão ao longo do tempo (Adaptado de [4])

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):

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

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

### III. CARACTERIZAÇÃO DO VIDRO

Na construção moderna de edifícios, as soluções de fachada envidraçada têm uma grande preponderância. As fachadas envidraçadas tornam possível a criação de espaços interiores amplos e bem iluminados com luz natural, melhorando as condições de habitabilidade e trabalho [3].

Os tipos de vidro mais utilizados atualmente nas janelas e fachadas de edifícios são o vidro recozido, o vidro term endurecido e o vidro temperado [7].

O vidro laminado consiste em pelo menos duas placas de vidro coladas por uma película intermédia [7]. Quando o vidro laminado é submetido a uma carga, a reação pode depender da duração da carga. Para durações longas, as lâminas de vidro laminado comportam-se quase totalmente desligados um do outro devido a efeitos de retração da película intermédia. Para cargas de curta duração, o vidro laminado comportar-se como um vidro monolítico da mesma espessura, uma vez que devido à natureza da ação a película intermédia consegue transferir a carga entre as folhas de vidro, aumentando assim a sua resistência em comparação com as cargas de longa duração [8].

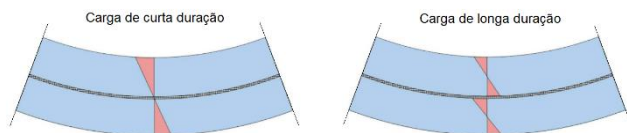


Figura 2 - Comportamento do vidro laminado sujeito a cargas rápidas e lentas

A película intermédia mais utilizada na indústria é o Polivinil

Butiral, (PVB). Trata-se de um polímero com excelentes propriedades mecânicas e elevada transparência, que combina muito bem com o vidro. O comportamento do PVB altera-se com a temperatura, em que a flexibilidade e a capacidade de transferência de carga entre as folhas de vidro diminuem drasticamente com o aumento da temperatura. Além disso, o PVB tem uma taxa de tensão-deformação que depende da duração do tempo de uma carga, tendo um comportamento de viscoelástico material. O módulo de distorção do PVB diminui com durações de carga mais elevadas e aumenta quando a duração da carga é inferior [8], [9].

Para melhorar a resposta do painel envidraçado, foi desenvolvido um dispositivo que se pretende dissipe parte da energia total transmitida durante a explosão do vidro para a estrutura. A geometria consiste em células auxéticas unidas por duas partes sólidas. A geometria auxética tem a vantagem de ter o coeficiente de Poisson negativo. Os dissipadores são produzidos numa impressora 3D utilizando Polietileno Tereftalato combinado com Glicol (PETG), o que conduz a um dispositivo com elevada capacidade de dissipação de energia [10], [11].

### IV. DIMENSIONAMENTO DO SETUP DE ENSAIO

#### A. Set Up de Ensaio

Para o dimensionamento da estrutura são consideradas os efeitos dinâmicos resultantes da onda explosiva. Assim, a capacidade resistente do aço foi incrementada de acordo com o proposto por Biggs [12]. A estrutura é dimensionada com perfis tubulares SHS 200x200x8 em aço S355 J0H, e chapas de fixação do vidro e de fixação da fachada à parede de reação em S355 JR. A verificação da segurança desta estrutura é realizada de acordo com a EN 1993-1. O Setup de ensaio é apresentado na Figura 3. Neste dimensionamento é também efetuada a verificação dos painéis de vidro para a ação do vento e de uma explosão accidental.

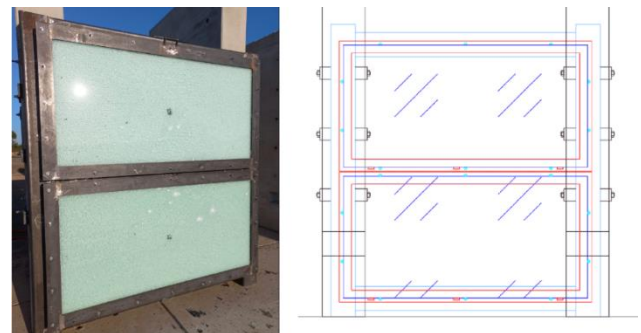


Figura 3 - Setup de ensaio experimental

#### B. Dimensionamento do Painel de Vidro para a Ação do Vento

No dimensionamento da solução envidraçada, considera-se que o painel de vidro deve resistir à ação do vento num edifício de 50 m de altura com uma fachada envidraçada completa utilizando sistema de fixação por aperto. O painel considerado é dimensionado tendo em conta a ação do vento previsto no Anexo Nacional da EN 1991-1-4 [13] para o cenário condicionante de uma janela do canto da fachada no último piso do edifício, e tendo em conta o coeficiente de pressão local.

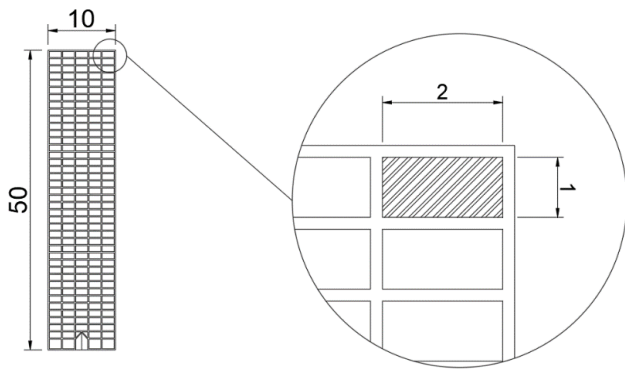


Figura 4 - Painel de vidro considerado

Para o cálculo da resistência do vidro, é utilizada a prEN 13474 [14]. Verifica-se que o valor de resistência do painel de vidro laminado suposto simplesmente apoiado é muito superior aos esforços resultantes da ação do vento regulamentar.

C. Dimensionamento do Painel de Vidro a Explosões

Para o cálculo da resistência à explosão é utilizado o manual americano “Unified Facilities Criteria” (UFC) [15] uma vez que a Pré-Norma Europeia [14] não inclui a resistência a ações acidentais do tipo explosões. Esta ação é considerada uma carga impulsiva dado que a sua duração é muito inferior ao período normal da estrutura.

O manual UFC [15] inclui gráficos e tabelas que permitem obter a resistência à explosão de um vidro temperado de 19 mm sujeito a uma carga explosiva. Aplicam-se estes resultados ao caso de um vidro laminado temperado que se comporta como um vidro maciço de 20 mm, conforme se explicou em III.

Para compreender as cargas que podem ser resistidas pelo painel de vidro laminado, as equações de Kingery e Bulmash [16] foram utilizadas para calcular as pressões, tempos e impulsos de diferentes cargas e fazer a comparação com os resultados das tabelas do manual UFC [15].

V. MODELO NUMÉRICO

A. Dissipador de Energia

Para caracterização das propriedades do dissipador de energia são realizados três modelos distintos utilizando o software LS-Dyna. O primeiro modelo consistiu no modelo de Elementos Finitos (EF) do dissipador. Para tal, foi feita uma replica do modelo apresentado por Coutinho [10] (Figura 5).

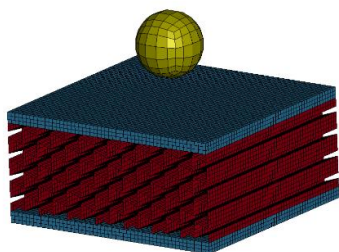


Figura 5 - Modelo numérico replicado de Coutinho [10]

Os resultados foram muito próximos e também foi possível comparar duas séries de testes realizados com os dados

experimentais apresentados também por Coutinho [10].

Na sequência, foi realizado um segundo modelo do dissipador que permite simular o ensaio estático realizado por Martins [17], o que permite comparar os resultados com um ensaio experimental à escala real (Figura 6).

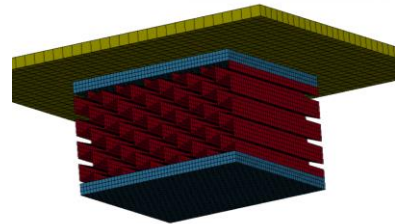


Figura 6 - Modelo numérico do ensaio experimental realizado por Martins [17]

Verifica-se dos resultados comparados que o modelo numérico prevê de forma adequada o comportamento do dissipador. O modelo final consistiu permite caracterizar a resposta dinâmica do dissipador utilizado. Ao carregar 24 cargas impulsivas distintas no dissipador foi possível definir uma resposta que foi modelada em LS-Dyna (Figura 7)

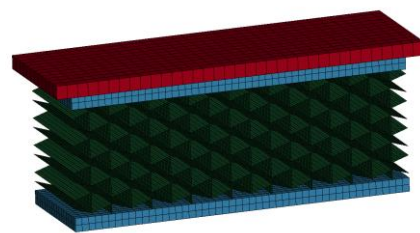


Figura 7 - Modelo numérico do dissipador linear utilizado

B. Vidro Laminado

Para modelar o vidro laminado, foram testados diversos tipos de materiais e formas de modelar. Foram testados elementos de *shell* e *solid*, tendo-se obtido resultados muito próximos, tal como refere Hooper et al. [18]. Assim, tendo em conta que a modelação com elementos de *solid* conduz a um volume computacional muito superior, foram utilizados elementos de *shell* para modelar o vidro (Figura 8). Para validar o modelo, foram utilizados os resultados dos testes experimentais apresentados por Hooper et al. [18] e Zhang et al. [19].

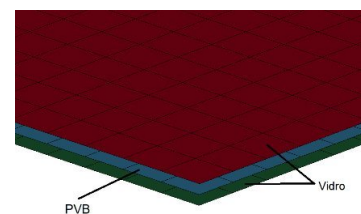


Figura 8 - Modelo numérico do vidro adotado

Para o vidro, os materiais testados diversos materiais predefinidos no LS-Dyna:

- MAT\_001\_ELASTIC combinado com
- ADD\_MAT\_EROSION,
- MAT\_032\_LAMINATED\_GLASS, e
- MAT\_280\_GLASS.

Os melhores resultados obtidos foram obtidos combinando os dois primeiros materiais. Para o PVB também foram testados diversos materiais, como sejam:

- MAT\_027\_MOONEY\_RIVLIN\_RUBBER,
- MAT\_76\_GENERAL\_VISCOELASTIC, e
- MAT\_098\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK.

Os melhores resultados foram obtidos com a formulação MAT\_98\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK, visto que para uma carga muito rápida como uma explosão, o critério de tensão-extensão do PVB para a duração da carga não teria efeito nos resultados.

O erro entre os resultados dos modelos de elementos finitos e os obtidos nos testes experimentais foi no máximo de cerca de 17%.

### C. Modelo do Setup Final

Com o modelo numérico do setup final, foi possível prever o comportamento do painel de vidro laminado com e sem os dissipadores. Os resultados foram comparados também com os obtidos pelos gráficos do manual UFC [15], utilizando um vidro monolítico de 19 mm.

Com o modelo numérico do setup foi possível também efetuar diversos estudos da configuração dos dissipadores que minimizam os danos no painel de vidro. A melhor configuração encontrada consistiu em utilizar 18 dissipadores no apoio do painel, o que permitiu concluir no modelo numérico que até cargas de 5kg de TNT a 9 m de distância (i.e. 5kg@9m) o painel de vidro não atinge-se a rotura quando se utilizam os dissipadores. Em comparação, o painel de vidro com o suporte rígido atingia a rotura de acordo com o modelo numérico para cargas de 5kg a distâncias de 10 m ou inferiores (Figura 9).

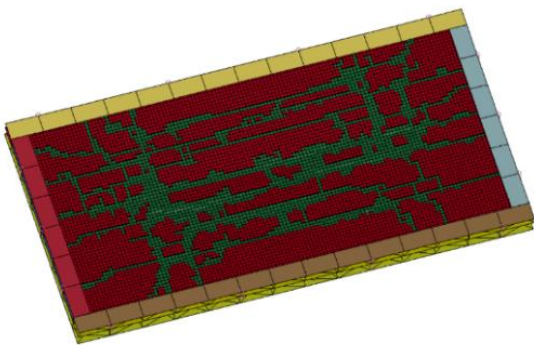


Figura 9 – Resultados obtidos pelo modelo numérico do set-up final de ensaio para uma carga explosiva de 5kg@7m

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Quatro explosões diferentes foram testadas para avaliar a resposta e importância da utilização do dissipador. As cargas testadas foram: 5kg@5m, 5kg@6m, 5kg@7m e 5kg@9m. Dois painéis de vidro foram testados em cada caso, um com a instalação de dissipadores e outro com fixação rígida a estrutura

de suporte. Nos ensaios foram utilizados sensores de pressão incidente, sensores de pressão refletida e acelerómetros. Os ensaios de campo tiveram dificuldades na medida que o impacto de projéteis levantados do solo pela explosão fraturaram o vidro, o que tornou incerta a razão para a rotura da lâmina de vidro exposta diretamente à explosão (Figura 10).



Figura 10 - Padrão de rotura do vidro com impacto de projéteis

Para as cargas de 5kg@9m e 5kg@5m o dissipador não teve danos visíveis, o que permite concluir que existe uma limitação no uso deste tipo de dispositivos em função da ação incidente. Para a carga de 5kg@5m, o vidro teve uma rotura completa embora o dissipador tenha ficado intacto (Figura 11).



Figura 11 - Resposta do vidro laminado a 5kg@5m

As cargas de 5kg@6m e 5kg@7m do dissipador teve danos enormes, o que significa que funcionou com grandes deformações plásticas e, portanto, dissipou energia (Figura 12). As medições feitas pelos sensores de pressão foram superiores ao teórico, mas os resultados dos acelerómetros permitiram concluir a melhoria na resposta quando se utilizam os dissipadores de energia.



Figura 12 - Resposta dos dissipadores para a carga de 5kg@6m

Os resultados mostram também que no caso dos dissipadores com funcionamento elástico (5kg@5m e 5kg@9m) a redução

da aceleração máxima registada no painel é de cerca de 40% em relação ao painel com apoio rígido (Figura 13), o que se traduz em menores deslocamentos e tensões do painel de vidro. Quando o dissipador se encontra na fase plástica (5kg@6m e 5kg@7m) a redução de aceleração é menos evidente; valores de cerca de 5% foram captados pelos acelerómetros. Em qualquer caso a utilização dos dissipadores permitiu uma redução da aceleração máxima registada, em comparação com o painel com apoios rígidos.

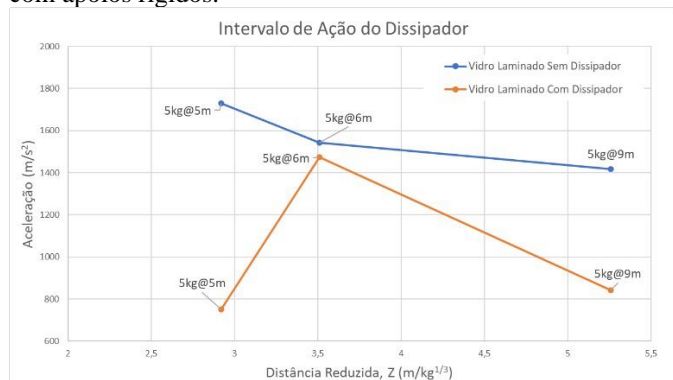


Figura 13 – Avaliação da aceleração máxima do painel de vidro com e sem dissipador

## VII. CONCLUSÕES

Embora os ensaios experimentais realizados e os modelos numéricos de EF evidenciem diferenças nos resultados, foi possível concluir que a adoção de dissipadores de energia contínuos no apoio do painel de vidro laminado na estrutura de suporte da fachada permite reduzir os danos nos painéis e as forças transmitidas à estrutura de suporte no caso da ocorrência de uma ação explosiva. É, contudo, necessário prosseguir os estudos para ser possível definir melhor as características dos dissipadores em função das propriedades dinâmicas dos painéis de vidro e da estrutura de suporte e também da ação da explosão que se prevê possa ocorrer.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda a equipa presente na realização do trabalho, em especial aos orientadores, Professor Oliveira Pedro e TCor Pedro Matias pela constante presença e aconselhamento durante toda a realização do mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] “NATO - Topic: NATO’s response to hybrid threats.” [https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics\\_156338.htm?selectedLocale=en](https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_156338.htm?selectedLocale=en) (accessed Oct. 25, 2022).
- [2] “Global Terrorism Index 2022,” *Institute for Economics & Peace*, pp. 1–99, 2021. doi: 10.4324/9780203731321.
- [3] M. Kozłowski, A. Malewski, V. Akmadžić, and A. Vrdoljak, “Glass in structural applications,” *e-Zbornik : ELECTRONIC COLLECTION OF PAPERS OF THE FACULTY OF CIVIL ENGINEERING*, vol. 9, no. 18, pp. 47–55, 2019, [Online]. Available: <https://e-zbornik.gf.sum.ba/en/235-glass-in-structural-applications>

- [4] Gilbert F. Kinney and Kenneth J. Graham, *Explosive Shock in Air*, 2nd ed. New York: The Macmillan Company, 1985. [Online]. Available: [https://mail.126.com/js6/main.jsp?sid=JBVZRPPOKiuccygTRPPBHpZopcnIFff&df=mail126\\_letter%0Aapers3://publication/uuid/AAB230B2-1181-426C-AE51-1F62F1F0F6C1](https://mail.126.com/js6/main.jsp?sid=JBVZRPPOKiuccygTRPPBHpZopcnIFff&df=mail126_letter%0Aapers3://publication/uuid/AAB230B2-1181-426C-AE51-1F62F1F0F6C1)
- [5] E. Yandzio and M. Gough, *Protection of Buildings Against Explosions*. Teh Steel Construction Institute, 1999.
- [6] W. E. Baker, P. A. Cox, P. Westine, J. Kulesz, and R. A. Strehlow, “Explosion Hazards and Evaluation,” vol. 5, 1983, doi: 10.1016/0379-7112(84)90044-4.
- [7] C. Schittich, G. Staib, D. Balkow, M. Schuler, and W. Sobek, *Glass Construction Manual*. Birkhäuser - Publishers for Architecture, 1999.
- [8] C O’Regan, “Structural use of glass in buildings ( Second edition ),” no. 2nd Edition. 2014.
- [9] A. Zemanová, P. Hála, P. Konrád, T. Janda, and R. Hlůžek, “The influence of interlayer properties on the response of laminated glass to low-velocity hard-object impact,” *Int J Impact Eng*, vol. 159, no. October 2021, 2022, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104036.
- [10] M. Coutinho, “Mitigação de impactos com estruturas auxéticas impressas em 3-D .,” p. 103, 2019.
- [11] H. M. B. Rebelo, “Development and study of a high performance protective solution against blast loads,” 2020.
- [12] J. M. Biggs, *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, 1964. doi: 10.1017/CBO9780511618086.
- [13] CEN European Committee for Standardization, *EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. 2010.
- [14] CEN European Committee for Standardization, *prEN 13474 Glass in building - Determination of the strength of glass panes*. Brussels, Belgium, 2009.
- [15] U.S Department of Defense, “Unified Facilities Criteria ( UFC ) Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions,” 2008.
- [16] C. N. Kingery, “Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst,” 1984.
- [17] F. da C. C. Martins, “Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas contra Explosões com Recurso a Tecnologias de Impressão 3D,” 2021.
- [18] P. A. Hooper, R. A. M. Sukhram, B. R. K. Blackman, and J. P. Dear, “On the blast resistance of laminated glass,” *Int J Solids Struct*, vol. 49, no. 6, pp. 899–918, 2012, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2011.12.008.
- [19] X. Zhang, H. Hao, and Z. Wang, “Experimental study of laminated glass window responses under impulsive and blast loading,” *Int J Impact Eng*, vol. 78, pp. 1–19, 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.020.