

# Comportamento de Painéis de Vidro Laminado à Ação de Explosões - Geração de Curvas Pressão-Impulso (P-I)

Tiago Oliveira<sup>1,2</sup> Corneliu Cismasiu<sup>3</sup> Pedro Matias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CCPI, Academia Militar – Lisboa, Portugal <sup>2</sup>Instituto Superior Técnico – Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Faculdade de Ciências e Tecnologias, NOVA – Lisboa, Portugal

oliveira.tam@exercito.pt cornel@fct.unl.pt matias.pjsg@exercito.pt

**Resumo**—Os engenhos explosivos e as explosões em geral são dos maiores perigos quer em ataques propositados, como o caso do terrorismo, quer em casos de explosões acidentais, as partes envidraçadas dos edifícios são um dos maiores perigos para os ocupantes do mesmo na ocorrência de um evento explosivo, por criar estilhaços que podem causar uma percentagem significativa dos ferimentos e até fatalidades que possam ocorrer. Sendo este material cada vez mais utilizado na arquitetura moderna, é de extrema importância o estudo e preparação das fachadas para aguentarem com este tipo de solitação.

Nesta dissertação estuda-se o comportamento de painéis de vidro laminado quando sujeitos à ação de uma explosão através da modelação numérica desses painéis, recorrendo ao programa de modelação LS-Dyna, validado através de ensaios experimentais encontrados na bibliografia. Para verificar esses resultados foi realizada também uma campanha experimental em escala real. Contudo, as medições conseguidas nesses ensaios não foram suficientes conclusivas para permitir validar as estimativas numéricas

Através do modelo de elementos finitos foi possível gerar diagramas Pressão-Impulso (P-I) para o critério de rotura definido. No caso das fachadas de vidro laminado, estes diagramas podem ser muito úteis no seu dimensionamento, para a previsão do dano que a ação da explosão vai causar numa estrutura, principalmente se esta se encontrar numa zona de maior risco de ataques com engenhos explosivos ou outro tipo de pressões excecionais.

## I. INTRODUÇÃO

Um dos papéis mais importantes da construção, no passado e atualmente, é a defesa, desde os antigos castelos medievais até às fortificações modernas. Na nossa sociedade atual, com o crescimento da atividade terrorista e explosões acidentais, os grandes edifícios civis onde se reúnem grandes congregações de pessoas, tais como escritórios, aeroportos ou locais de culto, não podem ser concebidos apenas para nos proteger da chuva, frio ou vento, mas para estar na vanguarda do combate a estas ameaças de forma a garantir a nossa segurança e bem-estar.

No caso de atividades terroristas, a ordem de magnitude destes ataques tem aumentado ao longo do tempo. Na década de 1970, os ataques mais violentos causaram baixas nas dezenas, enquanto no início deste século, em 11 de Setembro de 2001, um único ataque causou milhares de baixas e custou milhares de milhões em bens materiais [1]. Não só os ataques

estão a aumentar em sofisticação e dimensão, como também se tornaram mais frequentes, nos anos 70 foram registados 9 840 ataques terroristas em todo o mundo, enquanto no período entre 2002 e 2013 foram registados 72 185 ataques que resultaram em quase 170 000 mortes [2].

A principal ameaça apenas milissegundos após a detonação do próprio explosivo está associada a fragmentos de painéis de vidro ou sistemas de envidraçamento [3].

Um dos principais exemplos disto foi o atentado conhecido como *Oklahoma City Bombing* de 1995, em Oklahoma City EUA. Onde houve estudos realizados a fim de compreender como a percentagem de lesões relacionadas com vidro varia com a distância do *Ground Zero*, num raio de 300 metros, como pode ser observado na Tabela I. [4].

Distancia do <i>Ground Zero</i> (m)	Ferimentos relacionados com o vidro	Percentagem de ferimentos relacionados com o vidro (%)
0-60	3	1.5
60-120	109	54.5
120-180	42	21
180-240	17	8.5
240-300	10	50
>300	17	8.5

Tabela I

FERIMENTOS RELACIONADAS COM VIDRO NUM RAIOS DE 300 METROS (ADAPTADO DE [4])

## II. AÇÃO E EFEITOS DA EXPLOSÃO

Uma explosão pode ser definida por uma súbita libertação de energia. A fonte desta energia pode vir de uma explosão física proveniente de explosivos físicos como pólvora ou TNT, através de uma reação química, ou mesmo de uma transformação nuclear [5].

### A. Caracterização da onda de choque

Quando ocorre uma explosão, há uma rápida libertação de energia, que é transferida pelo ar circundante através da criação de uma onda de choque. Esta onda de choque é gerada no momento da detonação, onde, em explosivos de alta intensidade, são geradas pressões entre 20-30 GPa. À medida

que a onda de choque se afasta do ponto de detonação, a sua capacidade destrutiva diminuí, tal como a sua velocidade. Este comportamento é ilustrado na Figura 1 [6].

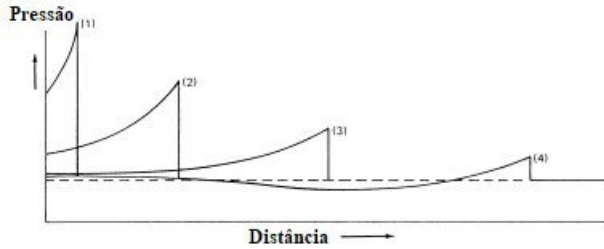


Figura 1. Curvas de pressão-distância para tempos sucessivos após uma explosão (adaptado de [7])

Uma onda de choque pode ser definida pela mudança de pressão muito abrupta, quase instantânea, que resulta de uma explosão. Na Figura 2 é possível ver como esta mudança de pressão se dá ao longo do tempo para uma onda ideal. Enquanto a onda de choque não chega ao local, vemos que a pressão é a pressão atmosférica,  $P_o$ , com a chegada da frente de choque, no momento da chegada,  $t_A$ , há um aumento instantâneo da pressão até se atingir o pico da pressão incidente,  $P_{so}$ , depois há uma rápida decadência na sobrepressão positiva (pressão acima da pressão atmosférica) até atingir novamente os níveis de pressão atmosférica no tempo total,  $t_A + t_0^+$ , esta sobrepressão positiva é seguida por uma sobrepressão negativa (pressão abaixo da pressão atmosférica) que atinge um valor mínimo,  $P_{so}^-$  até eventualmente regressar à pressão atmosférica [6], [8].

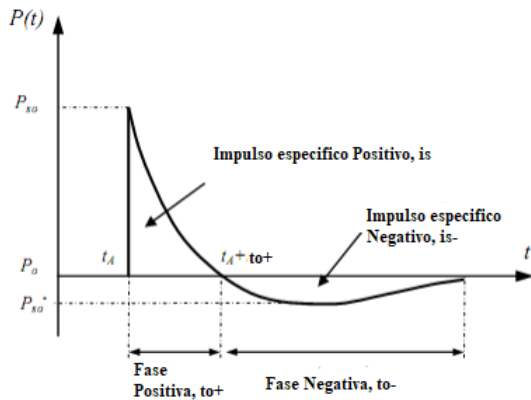


Figura 2. Curva de variação de pressão idealizada (adaptada de [9])

Esta queda de pressão na curva pressão-tempo é geralmente representada pela equação modificada de Friedlander (Equação (1)) [8].

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

onde  $b$  é o coeficiente de decomposição da onda.

A onda de choque é também caracterizada pelo seu impulso positivo,  $i_s^+$  que está diretamente relacionado com a ação aplicada sobre uma dada estrutura devido a uma explosão.

O impulso positivo pode ser obtido através da seguinte expressão (Equação (2)) [8]:

$$i_s^+ = \int_{t_A}^{t_A+t_0^+} P_s(t) dt = P_{so} t_o \left[ \frac{1}{b} - \frac{1 - e^{-b}}{b^2} \right] \quad (2)$$

Como pode ser observado na Equação 1 estamos perante uma decadência de pressão exponencial, o que torna útil uma aproximação linear, a duração desta decadência linear aproximada é chamada  $t_d$ , este parâmetro também pode ser denominado como duração da fase positiva equivalente. O impulso positivo simplificado é então obtido pela seguinte expressão (Equação 3). [10].

$$i_s^+ = \frac{1}{2} t_d P_{so} \quad (3)$$

**B. Interação de ondas de choque com uma estrutura - Curvas de Pressão-Impulso (P-I)**

Para avaliar como a ação de uma explosão interage com uma estrutura é possível produzir três tipos de regimes de resposta que relacionam o período natural da estrutura,  $T_n$  e a duração da fase positiva  $t_0^+$ , cuja relação pode ser vista na Tabela II [6], [11].

Regime de resposta	Rácio entre o período natural e a duração da fase positiva
Impulsiva	$t_0/T_n < 0.4$
Dinâmica	$0.4 < t_0/T_n < 2$
Quase-estática	$t_0/T_n > 2$

Tabela II  
IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE REGIME DE RESPOSTA

Estas considerações podem ser representadas esquematicamente por meio de diagramas de Pressão-Impulso (P-I) (Figura 3) [11].

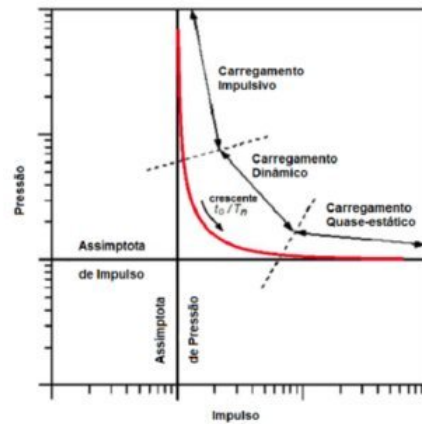


Figura 3. Representação de um diagrama de Pressão-Impulso (P-I) (adaptado de [11])

III. CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS DE VIDRO LAMINADO

O vidro laminado consiste em pelo menos duas placas de vidro coladas entre si por meio de um plástico transparente ou polímero. Este tipo de vidro é bastante bom para aplicações estruturais, pois o processo de laminação do vidro resulta numa melhoria significativa do comportamento do vidro à rotura e fragmentação [12]. Um painel de vidro laminado tem então dois componentes principais, as folhas de vidro e a camada intermédia.

O vidro é considerado um material frágil com baixa resistência ao impacto, mas isto não significa que seja um material fraco porque apresenta uma boa resistência à rotura. É possível calcular a resistência de um material frágil com relativa facilidade pela força necessária para o quebrar. Segundo a norma da União Europeia pr-EN 13474-3 [13] a tensão necessária para a fratura variava entre 30 a 120 MPa.

O material mais comum nas camadas intermédias dos painéis de vidro laminado utilizados na construção e na indústria automóvel é o Polivinil Butiral (PVB) devido à sua capacidade de bloqueio da radiação ultravioleta, clareza ótica e as suas grandes propriedades adesivas [14].

À temperatura ambiente, o PVB é tido como bastante deformável, e pode atingir até 200% antes de se partir. A laminação do vidro causa um aumento significativo da sua capacidade de deformação. Uma função típica de resistência é ilustrada na Figura 4, onde se pode observar que a contribuição do próprio vidro para a resistência do painel total é mínima em comparação com a do PVB [15].

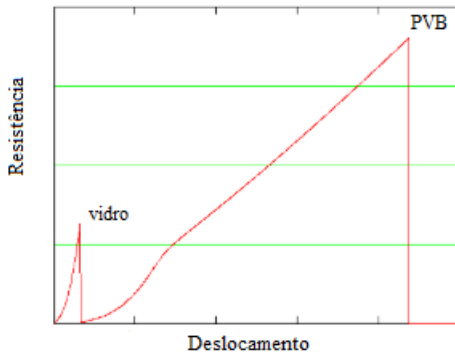


Figura 4. Função de resistência típica para vidro laminado (adaptado de [15])

IV. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Esta campanha experimental procurou calibrar a ação da explosão, a fim de aumentar a informação disponível sobre o comportamento do vidro laminado sob a ação de uma explosão real, caracterizando o pico de pressão incidente,  $P_{so}$ , o pico de pressão refletida,  $P_r$ , e a aceleração,  $a$ , sendo todos estes parâmetros medidos simultaneamente em cada teste. Foram então realizados seis testes experimentais, utilizando cargas separadas de 5 kg, W, TNT a diferentes distâncias, R, em que foi verificado o nível de danos num painel de vidro de 2 metros x 1 metro com uma disposição de 10/1,52/10 milímetros.

Estes testes estão descritos na Tabela III, assim como as suas distâncias reduzidas.

Test N°	W (kg)	R (m)	Z (m/kg <sup>1/3</sup> )
1	5	12	7.02
2	5	10	5.85
3	5	9	5.26
4	5	7	4.09
5	5	6	3.51
6	5	5	2.92

Tabela III  
CONDIÇÕES DE ENSAIO DE CADA TESTE

A. Setup experimental

A primeira tarefa realizada nesta campanha de ensaio foi conceber uma estrutura de apoio onde o painel de vidro pudesse ser apoiado e fixado em segurança. Para tal, foi utilizada a ferramenta de desenho Autodesk AutoCad®. A configuração experimental foi concebida como um perfil metálico SHS 200x8 num aço S355 J2H, que por sua vez é fixado em duas paredes de betão armado. Na figura 5 é possível observar a visão global da configuração.

O painel de vidro é fixado a esta estrutura através de duas chapas metálicas do mesmo aço que a estrutura que se fixam à estrutura através de varões roscados M12 classe 8.8, e fixam o vidro por aperto através de varões roscados M10 classe 8.8.

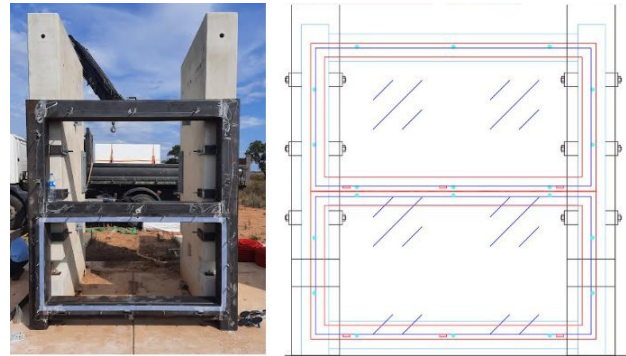


Figura 5. Setup real (esquedra) e desenhado em AutoCad (direita)

B. Resultados experimentais

1) Pressões incidentes e refletidas: Os dados obtidos da pressão incidente e refletida foram calibrados utilizando a equação de Friedlander modificada (Equação 1). Para calibrar os dados foi necessário obter os parâmetros da equação de Friedlander modificada, explicados na Secção II Estes resultados são ilustrados em Tabelas IV e V.

W (kg)	R (m)	$P_{so}$ (kPa)	$t_0^+$ (ms)	b
5	12	55.8	12.56	1.65
5	10	52.10	14.24	1.26
5	9	99.53	12.05	3.20
5	7	155.25	5.24	1.16
5	6	140.37	5.93	2.42
5	5	238.85	4.98	2.22

Tabela IV  
PARÂMETROS DE FRIEDLANDER PARA A PRESSÃO INCIDENTE

W (kg)	R (m)	$P_r$ (kPa)	$t_0^+$ (ms)	b
5	10	150.82	4.71	1.87
5	9	126.62	7.67	0.86
5	7	267.65	4.62	1.23
5	5	748.53	3.66	1.25

Tabela V

PARÂMETROS DE FRIEDLANDER PARA A PRESSÃO REFLETIDA

Nas tabelas anteriores pode-se observar que existem valores de pressão de pico e duração da fase positiva que não são muito coerentes em relação ao que seria de esperar. Como estamos sempre confrontados com a mesma carga explosiva, a pressão de pico seria mais elevada e a duração da fase positiva seria mais curta à medida que a carga se aproxima do painel de vidro, ou seja, à medida que a distância reduzida diminui. A fim de melhor compreender o que se passa, é necessário calcular o impulso para a fase positiva, através da Equação 2 e compará-la com os valores teóricos existentes desenvolvidos por Kingery & Bulmash (K&B).

2) *Aceleração*: A medição da aceleração foi feita utilizando um acelerómetro acoplado à face do painel de vidro laminado oposta à explosão. As acelerações máximas medidas pelos sensores podem ser observadas na Tabela VI.

W (kg)	R (m)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )
5	12	2168.13
5	9	1418.04
5	7	667.95
5	6	1543.05
5	5	1730.58

Tabela VI

VALORES MÁXIMOS DA ACELERAÇÃO

Ao analisar as acelerações máximas é possível observar um problema semelhante ao das pressões e impulsos de pico onde a aceleração não varia de acordo com o que se esperaria porque se esperaria que a aceleração aumentasse à medida que a distância reduzida diminui, o que nem sempre é o caso.

### V. ANÁLISE NUMÉRICA

Esta secção contém o trabalho de modelação realizado. A validação do modelo de elementos finitos é feita utilizando testes experimentais já encontrados na bibliografia, realizados por Zhang et al, em 2015 [14], e por Hooper et al. em 2012 [16], devido às dificuldades encontradas e à incapacidade de obter deslocamentos máximos no centro dos painéis na campanha experimental. Será também demonstrada a traçado dos diagramas de Pressão-Impulso (P-I).

#### A. Caracterização do modelo

A parte mais importante do modelo é o painel de vidro laminado, este foi modelado utilizando três elementos de casca correspondentes às duas folhas de vidro, com o material (MAT\_001\_ELASTIC) e a camada intermédia de PVB, com o material (MAT\_098\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK). Foi também aproveitada a simetria do painel de vidro laminado para modelar apenas um quarto do painel total, o que permite

poupar no tempo de cálculo. O modelo do painel de vidro está ilustrado na Figura 6.

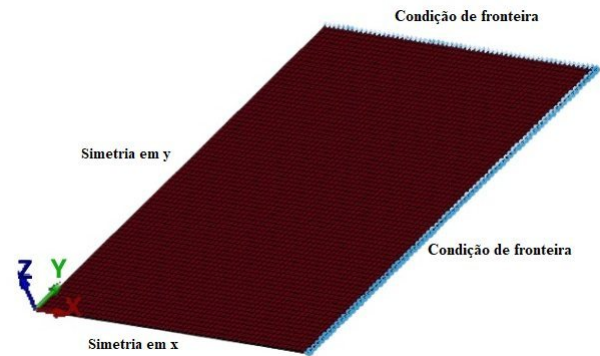


Figura 6. Modelo simplificado para um quarto de um painel de vidro laminado

Também faz parte do modelo a estrutura de suporte utilizada na campanha experimental, o sistema de fixação e os varões roscados que fixam as chapas de fixação à estrutura de suporte.

#### B. Validação do modelo

Como mencionado anteriormente, a fim de validar este modelo numérico, foram utilizados testes presentes na bibliografia.

Zhang et al. [14], em 2015, e Hooper et al. [16], em 2012, levaram a cabo campanhas experimentais que são utilizadas para validar os modelos realizados nesta dissertação.

Para a carga dos painéis foram comparados dois tipos de simulação, a *keyword* (LOAD\_BLAST\_ENHANCED), do LS-Dyna, onde apenas a carga e a sua distância são colocadas e a *keyword* (DEFINE\_CURVE), onde é utilizada uma simplificação triangular para simular o decaimento da curva de pressão-duração.

Os painéis foram então carregados com os valores teóricos da formulação Kingery & Bulmash a fim de verificar se estes são uma boa forma de prever o comportamento do painel. Com as pressões e impulsos refletidos conhecidos é possível saber a duração da fase positiva equivalente através da Equação 3.

As diferenças encontradas entre os deslocamentos máximos obtidos nos testes e os do modelo numérico mostram que a definição da carga utilizando a *keyword* (DEFINE\_CURVE) é mais vantajoso, uma vez que se observam erros menores com um erro médio de cerca de 15,6% para os testes realizados por Hooper et al. e 19,4% para os testes realizados por Zhang et al. enquanto que quando a carga é definida usando a *keyword* (LOAD\_BLAST\_ENHANCED) é obtido um erro médio de cerca de 21% para os testes realizados por Hooper et al. e cerca de 40% para os testes realizados por Zhang et al.

### VI. ANÁLISE PRESSÃO IMPULSO (P-I)

Com o modelo validado, uma parte importante da análise e dimensionamento de uma estrutura sujeita à ação de uma explosão é a geração de diagramas de pressão-impulso que podem ajudar a prever o comportamento de uma estrutura, no

caso desta dissertação painéis de vidro laminado, face a esta ação.

Estes diagramas foram gerados escolhendo impulsos como referência e depois executando o modelo numérico várias vezes até ser possível saber para que valor é verificado o critério de falha definido.

Para cada linha reta gerada existem várias pressões refletidas associadas a um único valor de impulso, o que muda é o tempo de ação destas pressões. Por vezes existem valores de impulso cujas pressões são difíceis de associar, por serem demasiado altas ou demasiado baixas, o que mostra que este ponto está numa das assintotas do diagrama.

O critério de rotura foi então definido como a fissura do vidro, que, no modelo de elementos finitos, pode ser claramente observado pelo desaparecimento do elemento casca que corresponde ao vidro, como ilustrado na Figura 7.

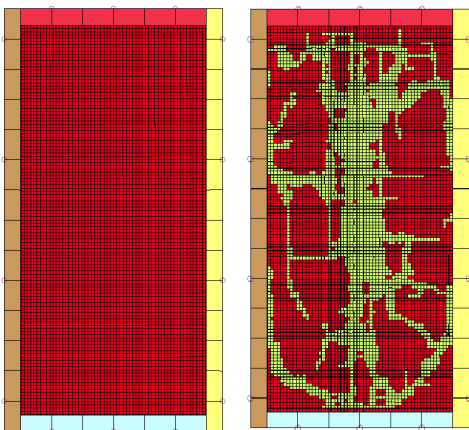


Figura 7. Modelo numérico com a casca de vidro intacta (esquerda) e partida (direita)

Com as linhas verticais desenhadas e os modelos executados é possível obter uma curva, como a representada na Figura 8, para o painel de vidro laminado testado na campanha experimental, com as quatro arestas encastradas. Nesta curva é possível observar o que foi anteriormente mencionado onde não foi possível gerar um ponto para a primeira linha reta porque era necessária uma pressão muito elevada de muito curta duração, o que indica que a assimetria impulsiva foi encontrada.

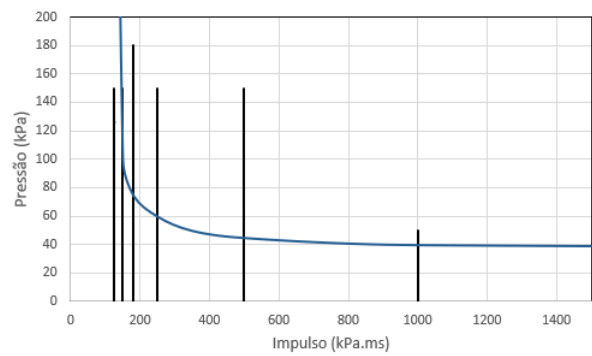


Figura 8. Diagrama (P-I) para um painel de vidro laminado temperado com 2x1 metros

Para validar o método, o diagrama obtido foi comparada com a existente na norma UFC 3-340-02, [17] para um painel de vidro temperado de espessura equivalente (Figura 9). Como a extensão do PVB não está a ser considerada, é possível fazer esta comparação direta.

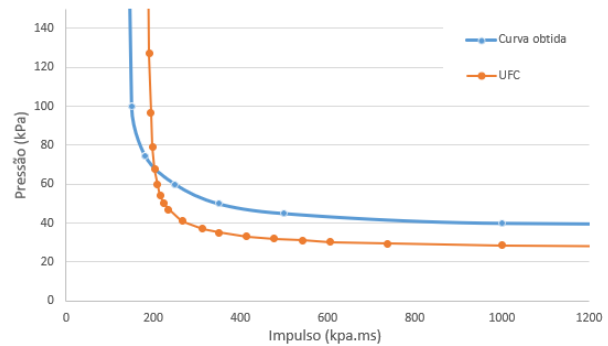


Figura 9. Diagrama (P-I) obtido em comparação com o UFC 3-340-02

A fim de estudar a influência do aumento da espessura das lâminas de vidro, a curva (P-I) foi comparada para dois painéis de 1,5 metros por 1,2 metros com a mesma espessura de PVB, 1,52 milímetros, mas um com uma espessura de 3 milímetros por lâmina e outro com 6 milímetros por lâmina (Figura 10).

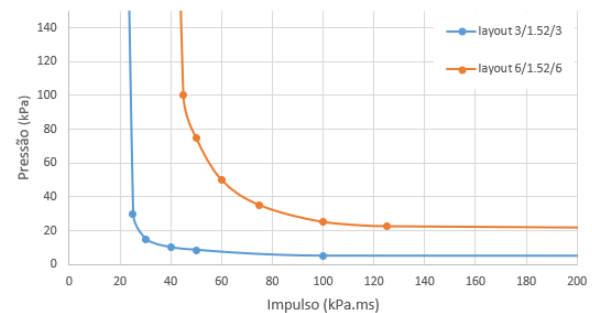


Figura 10. Comparação das curvas (P-I) para dois layouts com diferentes espessuras de vidro

Este resultado era esperado, uma vez que o aumento da espessura do vidro deve causar um aumento da resistência

do vidro para o critério de falha previamente definido, e as mesmas condições de fronteira.

## VII. CONCLUSÕES

O vidro é um material cada vez mais utilizado na construção atual, não só nos seus usos tradicionais, como janelas, mas também com funções estruturais. Com isto devido à sua fragilidade este pode causar muito mais estilhaços do que outros materiais mais comuns. Isto torna o seu estudo, compreensão e dimensionamento correto cada vez mais importante, a fim de minimizar o risco de ferimentos ou morte daqueles que se encontram dentro de um determinado edifício em caso de qualquer ataque terrorista ou explosão acidental.

A modelação de um painel de vidro laminado no LS-Dyna pode ser feita de inúmeras maneiras e ter graus de complexidade completamente diferentes. Isto torna muito importante estudar se o aumento do grau de complexidade do modelo trará realmente resultados substancialmente melhores. Nestes modelos é possível, e quase garantido, que haja mudanças no modelo que causam grandes aumentos no tempo de computação necessário sem trazer grandes vantagens para o resultado pretendido, isto pode causar desperdício de tempo desnecessário que, ao lidar com este tipo de programas, pode significar meses de trabalho perdido. Ao longo deste projeto, o modelo de elementos finitos foi executado mais de 150 vezes, para a validação do modelo e para os diagramas (P-I), pelo que os aumentos no tempo de computação multiplicar-se-iam significativamente.

Os modelos teóricos de cálculo de pressão-impulso realizados por Kingery & Bulmash podem ser utilizados para prever o comportamento de um painel de vidro, embora por vezes subestimem os picos de pressão sentidos pela estrutura.

Os diagramas de Pressão-Impulso foram gerados com sucesso e podem constituir o início de uma bibliografia para o CCPI e para o próprio Exército Português, uma vez que este tipo de diagramas são uma parte fundamental do dimensionamento de qualquer estrutura que possa estar em risco de sofrer o efeito de uma explosão, principalmente para infraestruturas críticas propensas a ataques.

A campanha experimental tem de ser mais extensa de forma a ter resultados mais conclusivos, uma vez que foi impossível utilizar as câmaras de alta velocidade para medir o deslocamento causado nos painéis, devido ao flash causado pela explosão, e por isso recorreu-se a testes presentes na bibliografia para validar o modelo de elementos finitos. No entanto, esta campanha serviu para provar as diferenças substanciais que existem entre os valores obtidos na realidade e os obtidos através de modelos teóricos.

## REFERÊNCIAS

- [1] B. M. Jenkins, "The New Age of Terrorism," *The McGraw-Hill Homeland Security Handbook*, pp. 117–130, 2006.
- [2] —, "The 1970s and the Birth of Contemporary Terrorism — RAND," 2015. [Online]. Available: <https://www.rand.org/blog/2015/07/the-1970s-and-the-birth-of-contemporary-terrorism.html>
- [3] M. Eslami, K. M. Mosalam, V. Kodur, S. Marjanishvili, B. Katz, and H. N. Mahmoud, "Multi-performance blast pressure-duration curves of laminated glass panes," *International Journal of Protective Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 226–244, 2021.
- [4] H. S. Norville, N. Harvill, E. J. Conrath, S. Shariat, and S. Mallonee, "Glass-Related Injuries in Oklahoma City Bombing," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 13, no. 2, pp. 50–56, 1999.
- [5] I. G. Cullis, "Blast waves and how they interact with structures." *Journal of the Royal Army Medical Corps*, vol. 147, no. 1, pp. 16–26, 2001.
- [6] E. Yandzio and M. Gough, *Protection of Buildings Against Explosions*. Teh Steel Construction Institute, 1999.
- [7] 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=JBJVZRPPOKiucygyTRPPBHpZopcnlFff&df=mail126\\_letter%0Apapers3://publication/uuid/AAB230B2-1181-426C-AE51-1F62F1F0F6C1](https://mail.126.com/js6/main.jsp?sid=JBJVZRPPOKiucygyTRPPBHpZopcnlFff&df=mail126_letter%0Apapers3://publication/uuid/AAB230B2-1181-426C-AE51-1F62F1F0F6C1)
- [8] W. Baker, P. Cox, P. Westine, J. Kulesz, and R. Strehlow, "Explosion Hazards and Evaluation;" vol. 5, 1983.
- [9] W. C. Wedding, "Experimental Study of Blast Resistant Glazing System Response to Explosive Loading," Ph.D. dissertation, University of Kentucky, 2010.
- [10] D. Cormie, G. Mays, and P. Smith, *Blast Effects on Buildings*, 3rd ed. Westminster, London: Institution of Civil Engineers, 2019.
- [11] V. Karlos and G. Solomos, "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components," European Commission, Tech. Rep., 2013.
- [12] M. Patterson, *Structural Glass Facade and Enclosures*, John Wiley Sons, Ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [13] prEN 13474, "Glass in building - Determination of the strength of glass panes," *CEN European Committee for Standardization*, 2009.
- [14] X. Zhang, H. Hao, Y. Shi, and J. Cui, "The Mechanical Properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at High Strain Rates," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 404–415, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.057>
- [15] C. Morison, "The Resistance of Laminated Glass to Blast Pressure Loading and the Coefficients for Single Degree of freedom Analysis of Laminated Glass," Ph.D. dissertation, Cranfields University, 2007.
- [16] P. A. Hooper, R. A. Sukhram, B. R. Blackman, and J. P. Dear, "On the Blast Resistance of Laminated Glass," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 6, pp. 899–918, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.12.008>
- [17] U.S Department of Defense, "Unified Facilities Criteria ( UFC ) Structures To Resist the Effects of Accidental," 2008.