

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

Tiago Alves Mendes de Oliveira

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor Corneliu Cismasiu
Tenente-Coronel de Engenharia Pedro
José da Silva Gonçalves Matias

Jurí

Presidente: Professora Doutora Paula Manuela dos Santos Lopes do Rego Figueiredo
Orientador: Professor Doutor Corneliu Cismasiu
Vogais: Professor Doutor Hugo Miguel Bento Rebelo
Tenente-Coronel de Engenharia João Carlos Martins Rei

Novembro de 2022

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Todo este projeto, e muito longo percurso acadêmico, nunca seriam possíveis sem a ajuda, orientação e apoio de inúmeras pessoas, familiares, amigas e camaradas que aqui vou tentar fazer justiça demonstrando a minha imensa gratidão para com estes.

Primeiramente quero deixar um profundo agradecimento aos meus orientadores desta dissertação. Ao Professor Doutor Corneliu Cismasiu que nunca me recusou uma reunião, ou deixou de tirar uma dúvida, ou de responder a um email. Ajudou-me também a perceber muitos dos conceitos abordados nesta dissertação. Transmito também um agradecimento igualmente importante ao Tenente-Coronel de Engenharia Pedro Matias que é a razão pela qual tive a oportunidade de trabalhar neste projeto e de fazer a campanha experimental em escala real, sendo a primeira vez que um aluno da academia integrado neste projeto teve a oportunidade de o fazer.

Um grande agradecimento ao Capitão de Engenharia Matos, à Primeiro-Sargento Andreia Silva e à Primeiro-Cabo Dinis que me acompanharam e ajudaram durante a campanha de ensaios experimentais e sem os quais esta nunca teria sido possível.

Aos militares do Campo Militar de Santa Margarida (CMSM) que estiveram empenhados na campanha experimental e que operaram e forneceram os equipamentos que permitiram realizar a mesma.

À empresa CORIFA, Lda que montou e fabricou o *setup* experimental que permitiu a realização dos ensaios, assim como auxiliou na montagem do sistema e operação do equipamento, que permitiu a realização dos ensaios em segurança.

Aos meus camaradas e amigos que sempre me apoiaram em tudo, não só neste momento desafiante, mas também durante todos estes seis longos anos de Academia Militar.

Aos meus pais Fernando e Maria Gabriela Oliveira, ao meu irmão e melhor amigo, desde que me lembro, André Oliveira, e restantes familiares, agradeço o apoio e confiança depositada em mim.

Por fim, mas não menos importante, um muito especial agradecimento à minha querida Nelya, pela paciência e dedicação que sempre mostrou para comigo, pela compreensão da minha ausência ao longo destes seis anos, sem nunca deixar de me apoiar e de estar presente quando eu mais precisava. Muito obrigado por tudo.

Resumo

Os engenhos explosivos, e as explosões em geral, são dos maiores perigos quer em ataques propostos, como o caso do terrorismo, quer em casos de explosões acidentais. Os elementos envidraçados dos edifícios são uma das maiores ameaças para os ocupantes dos mesmos na ocorrência de um evento explosivo. Podem originar estilhaços, que aumentam a percentagem de vítimas por ferimentos ou até mesmo, a morte. Sendo este material cada vez mais utilizado na arquitetura moderna, é de extrema importância o estudo e preparação das fachadas para suportarem este tipo de fenómeno.

Nesta dissertação, foi estudado o comportamento de painéis de vidro laminado, quando sujeitos à ação de uma explosão. Esta análise foi efetuada através da simulação numérica no software LS-Dyna, com consequente validação através de ensaios experimentais baseados em trabalhos já realizados. Para verificar esses resultados, foi realizada também uma campanha experimental à escala real. Contudo, as medições conseguidas nesses ensaios não foram suficientemente conclusivas para permitir validar as estimativas numéricas.

Através do modelo de elementos finitos, foi possível gerar diagramas de Pressão-Impulso (P-I) para o critério de rotura definido, que serão úteis no dimensionamento e previsão de danos que uma ação explosiva pode causar nas fachadas de vidro laminado de uma estrutura.

Os diagramas Pressão-Impulso foram gerados com sucesso. No entanto, é importante estender a campanha de ensaios experimentais para que seja possível comparar estes resultados numéricos com os resultados reais.

Palavras-chave: Explosão; Vidro laminado; Elementos finitos; Diagramas Pressão-Impulso

Abstract

Explosive devices and explosions in general are among the greatest dangers either in deliberate attacks, such as terrorism, or in cases of accidental explosions. Glazed building elements are a major threat to building occupants in the event of an explosive event. They can cause shrapnel, which increases the percentage of victims through injury or even death. As this material is increasingly used in modern architecture, it is extremely important to study and prepare buildings to withstand this type of phenomenon.

In this dissertation, the behaviour of laminated glass panels, when subjected to the action of an explosion, was studied. This analysis was performed through numerical simulation in the LS-Dyna software with subsequent validation through experimental tests based on previous studies. To verify these results a full-scale experimental campaign was also carried out. However, the measurements obtained from these tests were not conclusive enough to validate the numerical estimates.

Through the finite element model it was possible to generate Pressure-Impulse diagrams for the defined failure criterion, which can be useful in the design and damage prediction, which an explosive action can cause in the laminated glass façades of a structure.

Pressure-Impulse diagrams were successfully generated. However, it is important to extend the experimental testing campaign, in order to be able to compare these numerical results with the real results.

keywords: Explosion; Laminated glass; Finite Elements; Pressure-Impulse Diagrams

Conteúdo

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
Siglas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos e Metodologia	4
1.3 Organização da Dissertação	4
2 Ação e Efeitos da Explosão	5
2.1 Definição de Explosão	5
2.2 Classificação de Explosões	5
2.2.1 Explosões não confinadas	6
2.2.2 Explosões confinadas	7
2.3 Caracterização da Onda de Choque	7
2.3.1 Reflexão da onda de choque	11
2.3.2 Interação da onda de choque com uma estrutura	14
2.4 Resposta Estrutural	16
2.5 Equivalência em TNT	18
3 Caracterização dos Painéis de Vidro	21
3.1 Tipo de Vidro e Processo de Fabrico	21
3.1.1 Processo Float e Vidro Recozido	22
3.1.2 Vidro Temperado	23
3.1.3 Vidro Termo-Endurecido	25
3.1.4 Vidro Laminado	25
3.2 Propriedades e Componentes do Vidro Laminado	28
3.2.1 Lâminas de Vidro	28
Propriedades Físicas e Mecânicas	28
Propriedades Térmicas	30
3.2.2 Camada Intermédia (PVB)	30
4 Análise Estrutural do Comportamento do Vidro Laminado Sujeito a uma Explosão	33
4.1 Técnicas de Análise Estrutural de Painéis de Vidro Sujeitos a Explosões	33
4.1.1 Sistemas de Um Grau de Liberdade	33
4.1.2 Método de Elementos Finitos	34
4.2 Software Utilizado na Modelação	34
4.2.1 LS-PrePost	34

4.2.2	LS-Dyna	35
4.3	Análise Numérica de Painéis de Vidro Laminado	35
4.3.1	Modelos com elementos sólidos	35
4.3.2	Modelos com elementos casca	37
5	Programa Experimental	39
5.1	Ensaios	39
5.2	<i>Setup</i> Experimental e Equipamentos Utilizados	40
5.2.1	Estrutura de Suporte	40
5.2.2	Sistema de Fixação	40
5.2.3	Sensor de Pressão Incidente	41
5.2.4	Sensor de Pressão Refletida	42
5.2.5	Acelerómetro	43
5.2.6	Material Explosivo	43
5.3	Resultados Obtidos	44
5.3.1	Pressão Incidente e Refletida	44
5.3.2	Aceleração	47
5.3.3	Análise Visual dos Danos	48
6	Caso de estudo - Análise Numérica	51
6.1	Descrição do Caso de Estudo	51
6.2	Caracterização do Modelo	51
6.2.1	Modelo do Painel de Vidro Laminado	51
6.2.2	Chapas de Fixação	54
6.2.3	Perfil SHS 200 x 8	56
6.2.4	Varões Roscados	56
6.3	Validação do Modelo do Vidro	57
6.4	Análise Pressão-Impulso	62
6.4.1	Desenvolvimento dos Diagramas Pressão-Impulso	63
6.4.2	Influência do Aumento da Espessura das Lâminas de Vidro	66
7	Considerações Finais	69
7.1	Síntese e Principais Conclusões	69
7.2	Desenvolvimentos Futuros	70
	Bibliografia	70

Lista de Figuras

1.1	<i>Oklahoma City Bombing</i> , 1995 (adaptado de [7])	3
1.2	Zona portuária de Londres, 1996 (adaptado de [7])	3
1.3	Cidade de Londres, 1992 (adaptado de [6])	3
2.1	Explosão aérea perfeita (adaptado de [6])	6
2.2	Explosão aérea próxima do solo (adaptado de [6])	6
2.3	Explosão à superfície (adaptado de [6])	7
2.4	Explosões totalmente ventiladas, parcialmente ventiladas/confinadas e totalmente confinadas, respetivamente (adaptado de [6])	7
2.5	Curvas típicas de pressão-distância para sucessivos tempos depois de uma explosão (adaptado de [17])	8
2.6	Perfil idealizado para a variação de pressão (adaptado de [19])	9
2.7	Idealização da variação da pressão em relação ao tempo no seguimento de uma explosão (adaptado de [13])	10
2.8	Reflexão normal de uma onda de choque (adaptado de [6])	11
2.9	Curva pressão-tempo para uma onda de choque que sobre uma reflexão normal (adaptado de [6, 14])	12
2.10	Reflexão oblíqua regular de uma onda de choque (adaptado de [6])	13
2.11	Coeficiente de reflexão em relação ao ângulo de incidência para diferentes pressões (adaptado de [23])	13
2.12	Desenvolvimento da onda de <i>Mach</i> e reflexão de <i>Mach</i> (adaptado de [6])	14
2.13	Comportamento de uma onda de choque durante a sua passagem por uma estrutura (adaptado de [24])	15
2.14	Perfis da pressão atuantes na superfície frontal de uma estrutura (adaptado de [6])	15
2.15	Representação de um diagrama Pressão-Impulso (P-I) (adaptado de [25])	17
3.1	Diagrama representativo do processo de fabrico <i>float</i> (adaptado de [35])	22
3.2	Padrão de rotura do vidro recozido (adaptado de [31])	23
3.3	Diagrama representativo do processo de endurecimento para obtenção de vidro temperado (adaptado de [33])	23
3.4	Diferenças nas tensões do vidro temperado e do vidro recozido (adaptado de [39])	24
3.5	Padrão de rotura do vidro temperado (adaptado de [31])	24
3.6	Padrão de rotura do vidro termo-endurecido (adaptado de [33])	25
3.7	Processo de fabrico do vidro laminado com película PVB (adaptado de [33]).	26
3.8	Quatro fases do desempenho de um vidro laminado de dois painéis após ocorrer uma fratura (adaptado de [39])	27
3.9	Típica função de resistência do vidro laminado (adaptado de [40])	28
3.10	Curvas tensão-deformação do aço, vidro e madeira (adaptado de [45])	29

4.1	Sistema de um grau de liberdade sem amortecimento (adaptado de [50])	34
4.2	Sistema de um grau de liberdade numa explosão (adaptado de [51])	34
4.3	Corte de um modelo típico de vidro laminado com elementos sólidos (adaptado de [61])	36
4.4	Corte de um modelo típico de vidro laminado a 2D (adaptado de [61])	37
4.5	Variações das tensões no vidro (adaptado de [47])	38
5.1	<i>Setup</i> experimental real (esquerda) e em <i>AutoCad</i> (direita)	40
5.2	Sistema de fixação utilizado (esquerda) e pormenor em <i>Autocad</i> (direita)	41
5.3	Posicionamento do sensor de pressão incidente	42
5.4	Sensor de pressão ICP® modelo 113B22	42
5.5	Localização dos sensores de pressão no <i>setup</i>	42
5.6	Acelerómetro acoplado ao painel	43
5.7	Método de fixação do acelerómetro (adaptado de [68])	43
5.8	Carga explosiva	44
5.9	Cordão detonador	44
5.10	Explosor <i>wireless</i>	44
5.11	Resultado experimental da aceleração em função do tempo com uma carga de 5kg a 9m	47
5.12	Verificação da carga necessária para a rotura do vidro através do gráfico pressão-duração do UFC	48
5.13	Ponto de convergência das fissuras obtidas no ensaio a 12 metros	50
5.14	Perfil do painel com um dos vidros partidos	50
5.15	<i>Setup</i> do ensaio completo com o geotêxtil	50
6.1	Modelo simplificado de um quarto do painel de vidro laminado	52
6.2	Ilustração do elemento casca e respetivos graus de liberdade (adaptado de [72])	53
6.3	Disposição dos elementos casca do modelo	54
6.4	Chapas de fixação real (esquerda) e no modelo (direita)	55
6.5	Sistema de fixação no modelo (esquerda) e real (direita)	57
6.6	Modelo completo	57
6.7	Resultado do deslocamento máximo obtido no ensaio 1 de Zhang et al.	60
6.8	Comparação da pressão refletida obtida pelo modelo com a obtida por Hooper et al. no ensaio 3	61
6.9	Comparação dos deslocamentos obtidos no teste 2 de Hooper et al. com o obtido pelo MEF	61
6.10	Retas utilizadas para gerar o diagrama P-I	63
6.11	Modelo numérico com a casca do vidro intacta (esquerda) e partida (direita)	64
6.12	Ilustração da resistência à rotura da segunda lâmina (adaptado de [48])	65
6.13	Diagrama pressão-impulso para um painel de vidro laminado temperado 2x1 metros	65
6.14	Diagramas P-I obtido comparado com o UFC 3-340-02	66
6.15	Comparação dos diagramas P-I para dois <i>layouts</i> com espessuras de vidro diferentes	67

Lista de Tabelas

1.1 Ferimentos relacionados com estilhaços de vidro em edifícios próximos ao <i>Ground Zero</i> (adaptado de [8])	2
1.2 Ferimentos causados por vidro num raio de 300 metros (adaptado de [8])	3
2.1 Coeficiente de arrasto a ser usado para edifícios (adaptado de [6])	16
2.2 Identificação dos tipos de regime de resposta (adaptado de [6])	17
2.3 Fatores de equivalência em TNT baseado na energia específica, (adaptado de [13]) . . .	18
2.4 Fatores de equivalência em TNT baseados na pressão e impulso (adaptado de [29]) . . .	19
3.1 Composição química do vidro sódico-cálcico (adaptado de [33])	22
3.2 Propriedades mecânicas do vidro comparadas com o aço, madeira e betão (adaptado de [44])	29
3.3 Propriedades do PVB (adaptado de [19, 48])	31
4.1 Propriedades mecânicas estabelecidas no modelo de Esmali et al. [7]	36
5.1 Condições de cada ensaio realizado	39
5.2 Características do sensor de pressão ICP® modelo 137B24B [66]	41
5.3 Características do sensor de pressão ICP® modelo 113B24 [67]	43
5.4 Características do acelerómetro ICP® modelo 350D02 [68]	43
5.5 Parâmetros da equação de Friedlander para a pressão incidente	45
5.6 Parâmetros da equação de Friedlander para a pressão refletida	45
5.7 Pressões e impulsos incidentes registados e estimativas de K&B	45
5.8 Pressões e impulsos refletidos registados e estimativas do K&B	46
5.9 Métodos de verificação da coerência dos resultados	46
5.10 Valores da aceleração máxima	47
5.11 Resumo dos danos observados nos ensaios	49
6.1 Propriedades mecânicas utilizadas na modelação do vidro.	52
6.2 Propriedades mecânicas utilizadas na modelação do PVB [47]	53
6.3 Constantes do modelo de Johnson-Cook utilizadas [47, 74]	54
6.4 Propriedades inseridas no material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC)	55
6.5 Parâmetros de de Cowper Symonds Inseridos no material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC) [74]	55
6.6 Propriedades inseridas no material (MAT_020_RIGID)	56
6.7 Propriedades inseridas no material (MAT_100_SPOTWELD)	56
6.8 Resumo das condições dos ensaios de Hooper et al. [47]	58
6.9 Resumo da condições de ensaio de Zhang et al. [46]	58
6.10 Valores para realizar a simplificação triangular nos ensaios de Hooper et al. [47]	58

6.11 Valores para realizar a simplificação triangular nos ensaios de Zhang et al. [46]	58
6.12 Forças a carregar em cada nó para cada ensaio	59
6.13 Comparação dos deslocamentos para validação do modelo	59

Siglas

3D 3 Dimensões.

AC Antes de Cristo.

ANFO *Ammonium Nitrate-Fuel Oil* (Nitrato de Amónio-Óleo Combustível).

CCPI Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas.

CMSM Campo Militar de Santa Margarida.

EUA Estados Unidos da América.

HBX *High Blast Explosive* (Explosivo de alta explosão).

HMX ciclotetrametileno-tetranitramina.

I&D Investigação e Desenvolvimento.

ISIL *Islamic State of Iraq and the Levant* (Estado Islâmico do Iraque e do Levante).

K&B Kingery & Bulmash.

LLNL *Lawrence Livermore National Laboratory*.

MEF Método de Elementos Finitos.

OSDH *Oklahoma State Department of Health* (Departamento de Saúde do Estado de Oklahoma).

P-I Pressão-Impulso.

PETN Tetranitrato de Pentaeritrol.

PVB Polivinil Butiral.

RDX Ciclotrimetilenotrinitramina.

SDOF *Single Degree of Freedom* (Um Grau de liberdade).

TNT Trinitrotolueno.

UFC *Unified Facilities Criteria*.

UV Ultravioleta.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

Desde os antigos castelos medievais às fortificações modernas, um dos principais papéis da construção, em qualquer momento de história, foi e continua a ser a defesa. Na sociedade atual, existe um maior crescimento de atividades terroristas e explosões acidentais, pelo que os edifícios civis de grandes dimensões, que podem aglomerar um grande número de pessoas, como: escritórios, aeroportos ou locais de culto, têm de ser projetados para nos proteger de diversos acontecimentos.

No caso da atividade terrorista, a ordem de magnitude destes ataques tem vindo a aumentar com o passar do tempo. Nos anos 70 os ataques mais violentos causavam baixas na casa das dezenas, enquanto que no início deste século, a 11 de Setembro de 2001, um só ataque causou baixas na casa dos milhares, e custou milhares de milhões em bens materiais [1].

Os ataques estão a aumentar em nível de sofisticação, dimensão e frequência e a prova disso está no aumento de ataques registados. Na década de 70, foram registados 9 840 atentados terroristas em todo o mundo, enquanto que entre 2002 e 2013 foram registados 72 185 ataques, que resultaram em quase 170 000 vítimas mortais.[1, 2].

Na Europa, o número de mortes causadas desde 2019 tem vindo a diminuir, tendo sido registadas 200 fatalidades nesse mesmo ano e apenas 62 no ano seguinte, segundo o *Global Terrorism Index 2019* [3]. No entanto, estes indicadores não são garantia de uma tendência decrescente. Este decréscimo está associado, em parte, à queda do Estado Islâmico do Iraque e do Levante (do inglês *Islamic State of Iraq and the Levant (ISIL)*) na Síria e no Iraque, não tendo sido atribuídas a este grupo nenhuma fatalidade na Europa em 2018. [3].

Entre 1990 a 1995, apenas nos Estados Unidos da América (EUA), houveram cerca de 15 700 incidentes de ataques bombistas criminosos que resultaram em mais de 650 milhões de dólares em danos, 355 vítimas mortais e 3 176 feridos [4].

O terrorismo costuma causar, para além das vidas humanas, danos económicos significativos. É estimado que apenas no ano de 2018 o terrorismo custou 33 mil milhões de dólares à economia mundial. No decorrer dos 18 anos compreendidos entre 2000 a 2018 este valor transforma-se em 855 mil milhões de dólares. O ano de 2014 é considerado como sendo o pico do terrorismo mundial, com 33 555 vítimas mortais e 111 mil milhões de dólares em danos e impacto económico. Um exemplo de como estes ataques podem afetar economicamente um país é o caso de Espanha, onde se estima que entre 1970 e 1988 cada atentado terrorista tenha custado ao país uma média de 140 000 turistas a menos no país [5].

Nestes ataques a perda de vidas e danos materiais é inevitável, no entanto, todos os esforços têm de ser feitos para que esta seja minimizada o máximo possível. Para isso, é preciso consciencializar que as principais ameaças para as pessoas e bens, quando se dá uma explosão, provêm de:

- Projéteis - como vidros, portas e alguns pormenores arquitetónicos;
- Onda de choque - pode causar ferimentos a órgãos ou membros;
- Colapso localizado da estrutura - quando se verifica uma falha localizada nos elementos estruturais do edifício;
- Colapso total da estrutura - quando um incidente localizado causa um mecanismo de colapso estrutural progressivo, o que leva à completa destruição do edifício [6].

A principal ameaça, após a chegada da onda de choque, são os fragmentos provenientes dos painéis de vidro ou dos sistemas de envidraçamento [7]. Em 1995, um carro bomba detonou num edifício federal na cidade de Oklahoma nos EUA, num ataque que ficou conhecido como *Oklahoma City Bombing*. Neste ataque, o explosivo detonou a cerca de 5 metros da fachada norte do edifício e causou 168 fatalidades tornando-se, assim, no maior atentado terrorista em solo americano na altura [6]. Após a explosão, foram reportados vidros partidos até um raio de 10 quarteirões, em que 362 das 426 pessoas hospitalizadas tinham ferimentos causados por estilhaços de vidro [7]. O Departamento de Saúde do Estado de Oklahoma (do inglês *Oklahoma State Department of Health (OSDH)*), entrevistou 445 sobreviventes que se encontravam nas proximidades do edifício atingido diretamente pelo carro bomba. Foram identificados 673 sobreviventes, aos quais foi realizado um levantamento da quantidade de feridos causados pelos estilhaços de vidro em comparação com o total de ferimentos causados pela explosão. A Tabela 1.1, apresenta essa relação para os ocupantes de vários edifícios que se encontravam em proximidade do *Ground Zero*.

Analisando a mesa tabela pode observa-se que, na maioria dos edifícios, mais de 50% dos ferimentos nos seus ocupantes foram causados por estilhaços de vidro projetados pela onda de choque da explosão.

Tabela 1.1: Ferimentos relacionados com estilhaços de vidro em edifícios próximos ao *Ground Zero* (adaptado de [8])

Edifício	Número total de feridos	Feridos causados por estilhaços de vidro	Percentagem de feridos causados por estilhaços de vidro (%)
<i>Durham Post Office</i>	7	3	43
<i>Water Resoureces Board</i>	39	23	59
<i>Athenian Restaurant</i>	4	2	50
<i>YMCA</i>	81	33	41
<i>Federal Courthouse</i>	12	6	50
<i>Journal Record Buildings</i>	128	62	48
<i>Offices and apartments</i>	10	5	50
<i>C.R Anthony's</i>	8	6	75
<i>Regency Tower Apartments</i>	27	8	30
<i>AT&T Building and Metro Library</i>	4	2	50
<i>Southwestern Bell Building</i>	11	5	45

A Tabela 1.2, indica as percentagens de ferimentos causados pelo vidro variam relativamente à distância a que as pessoas se encontravam so *Ground Zero*. Pode concluir-se que, o pico de percentagem de ferimentos provocados pelos estilhaços encontravam-se dentro de um raio compreendido entre os 60 e os 120 metros. Estes valores excluem os feridos oriundos do edifício *Alfred P. Murrah*, o *Ground Zero do ataque* [8].

Tabela 1.2: Ferimentos causados por vidro num raio de 300 metros (adaptado de [8])

Distância ao <i>Ground Zero</i> (m)	Número de ferimentos causados pelo vidro	Porcentagem de ferimentos causados pelo vidro (%)
0-60	3	1.5
60-120	109	54.5
120-180	42	21.0
180-240	17	8.5
240-300	10	5.0
>300	17	8.5

Em 1996 uma bomba foi detonada na região portuária de Londres, no Reino Unido. O engenho consistia num explosivo improvisado colocado numa carrinha, o dano causado aos edifícios circundantes foi mínimo no entanto, todos os envidraçados numa raio de 50 metros ficaram danificados [6].

Na Cidade de Londres em 1992, outro carro bomba detonou numa zona bastante movimentada do setor financeiro da cidade. Com esta explosão o *European Bank for Reconstruction and Development*, que se encontrava a cerca de 150 metros do local da explosão, sofreu danos bastante significativos nas suas fachadas de vidro. O dano sofrido por este edifício mostra a influência que o tipo, tamanho e resistência do vidro que se utiliza tem na segurança. Várias fachadas de vidro recozido foram completamente destruídas, e os seus estilhaços projetados até para dentro de edifícios adjacentes. Os únicos envidraçados que se mantiveram intactos foram as janelas de vidro laminado no piso térreo, que tinham uma espessura de 33 milímetros, e as janelas de vidro duplo, com uma espessura de 10 milímetros. Tendo estas últimas demonstrado apenas ligeiras fissuras [6]. Nas Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 pode observar-se os danos causados ao vidro nos casos acima mencionados.



Figura 1.1: *Oklahoma City Bombing*, 1995 (adaptado de [7])



Figura 1.2: Zona portuária de Londres, 1996 (adaptado de [7])



Figura 1.3: Cidade de Londres, 1992 (adaptado de [6])

Relatórios deste tipo de incidentes indicam que cerca de 85% das lesões em casos de explosão são causadas pelos estilhaços dos vidros, que são projetados devidos à explosão. Isto põe os envidraçados, janelas ou fachadas na linha da frente do combate a este tipo de ocorrência, evidenciando o papel importante que estas estruturas têm na segurança dos edifícios e dos seus ocupantes no caso de uma explosão [7].

1.2 Objetivos e Metodologia

Esta dissertação de mestrado focou-se na análise de painéis de vidro laminado sujeitos à ação de explosões, com o objetivo principal de avaliar o estado atual do conhecimento. Com recurso ao desenvolvimento de modelos de análise numérica e com apoio de uma campanha experimental, gerar curvas de Pressão-Impulso que possam ser utilizadas no dimensionamento de fachadas envidraçadas.

A Metodologia desta dissertação tem em conta as seguintes fases:

1. Inicialmente, realizou-se o estudo do estado da arte no que diz respeito às ações explosivas, os seus efeitos sobre as estruturas de vidro, a caracterização dos painéis de vidro e os métodos de análise.
2. De seguida, procedeu-se à análise dos resultados numéricos obtidos através de modelos de elementos finitos validados com apoio a ensaios presentes na bibliografia.
3. Numa fase seguinte, avaliou-se o comportamento dos painéis de vidro sujeitos à ação de explosões através de uma campanha de ensaios experimentais.
4. Por fim, utilizou-se os modelos de elementos finitos realizados para gerar diagramas Pressão-Impulso, que podem ser utilizados no dimensionamento de fachadas envidraçadas.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação é constituída por sete capítulos.

No primeiro capítulo, apresenta-se a motivação que leva ao desenvolvimento desta dissertação, assim como a metodologia e organização do mesmo.

No segundo capítulo, caracteriza-se a explosão através da sua definição e classificação e, caracteriza-se o comportamento da onda de choque e a sua reflexão numa estrutura.

No terceiro capítulo, são caracterizados os painéis de vidro, onde são apresentados os diferentes tipos de vidro que podem ser utilizados em construção, dando ênfase ao vidro laminado que é o objeto de estudo desta dissertação.

No quarto capítulo, descrevem-se sumariamente as técnicas de análise de painéis de vidro sujeitos a explosões, assim como o *software* utilizado na modelação numérica. São ainda apresentados estudos publicados na literatura, relacionados com a modelação numérica de elementos de vidro laminado sujeitos à ação de explosões.

No quinto capítulo, é pormenorizada a campanha experimental realizada no âmbito desta dissertação, apresentando os *setups* utilizados, o material e os resultados obtidos, assim como a interpretação feita desses mesmos resultados.

No sexto capítulo, é explicada a modelação numérica do painel de vidro e do sistema de fixação, seguida da validação do modelo através da comparação dos resultados da modelação numérica e de ensaios presentes na bibliografia. Por fim, descreve-se o método utilizado para desenvolver as curvas Pressão-Impulso e, apresentam-se as obtidas deste caso de estudo.

Por último, no sétimo capítulo, são apontadas as conclusões finais desta dissertação, assim como algumas propostas para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Ação e Efeitos da Explosão

Uma explosão causada por explosivos de elevada capacidade dentro, ou muito perto de um edifício, pode ter efeitos catastróficos. Podem destruir, ou seriamente danificar, partes da composição estrutural interna ou externa do edifício levando ao colapso de partes, propulsão de fragmentos provenientes das janelas e a inutilização dos sistemas de segurança críticos, tais como: detecção e supressão de incêndios e outros sistemas (ventilação, água, luz esgotos e eletricidade) [6].

Todos estes possíveis danos são causados pela onda de choque criada pela explosão, tornando essencial a compreensão e estudo da mesma [9].

2.1 Definição de Explosão

Uma explosão, é definida como um processo em que uma onda de pressão de amplitude finita é gerada no ar devido a uma rápida libertação de energia [10]. O mesmo fenómeno, pode também ser definido como uma súbita libertação de energia [11, 12]. A fonte dessa energia pode vir de uma explosão provocada por explosivos físicos, como a pólvora ou o Trinitrotolueno (TNT), através de uma reação química, ou até de uma transformação nuclear [12].

Numa explosão nuclear, a energia libertada vem da formação de diferentes núcleos atômicos pela redistribuição de prótons e neutrões dentro desses núcleos, que interagem entre si [13]. Uma explosão física ocorre devido a uma súbita libertação de energia mecânica, como a libertação de um gás comprimido [14]. Uma explosão química, envolve a rápida oxigenação dos elementos combustíveis (carbono e átomos de hidrogénio) constituintes do explosivo. O oxigénio necessário para a explosão tem que fazer parte do componente explosivo, de forma a que este não necessite de ar para se dar a reação e, assim, poder-se considerar o explosivo controlável. Este fenómeno de oxidação é conhecido por combustão [13].

2.2 Classificação de Explosões

As explosões podem ser divididas em dois grandes grupos, baseados no nível de confinamento das cargas explosivas: explosões confinadas e explosões não confinadas [15].

As explosões confinadas, subdividem-se pelo grau de ventilação do local onde ocorre a explosão. A principal diferença em relação às explosões não confinadas, é a permanência de produtos gasosos originados pela reação química envolvida na explosão. Estes produtos, permanecendo presos dentro de um espaço fechado, vão exercer pressões adicionais e aumentar o período de tempo em que a estrutura está sujeita ao efeito da explosão. Dependendo do grau de confinamento, pode levar mais ou menos tempo até que essa energia libertada pela explosão seja dissipada [6, 16].

2.2.1 Explosões não confinadas

As explosões não confinadas podem ser subdivididas em:

- Explosão aérea perfeita: explosão que ocorre no exterior do edifício acima do nível da superfície terrestre. Esta produz uma onda de choque esférica, que atinge a estrutura sem qualquer amplificação intermédia da onda de choque (Figura 2.1)[6, 15].

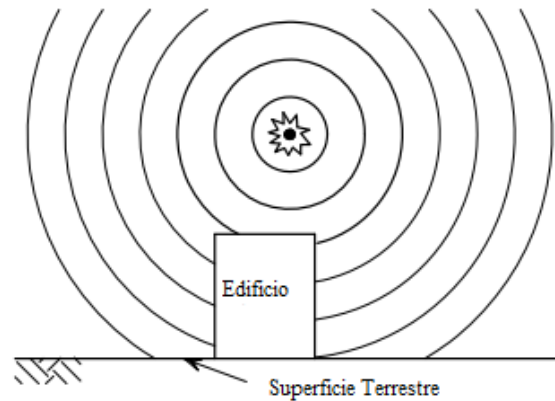


Figura 2.1: Explosão aérea perfeita (adaptado de [6])

- Explosão aérea próxima do solo: explosão localizada também acima do nível da superfície terrestre, mas neste caso vai ocorrer amplificação intermédia da onda de choque causada por reflexões feitas pela superfície terrestre (Figura 2.2) [6, 15].

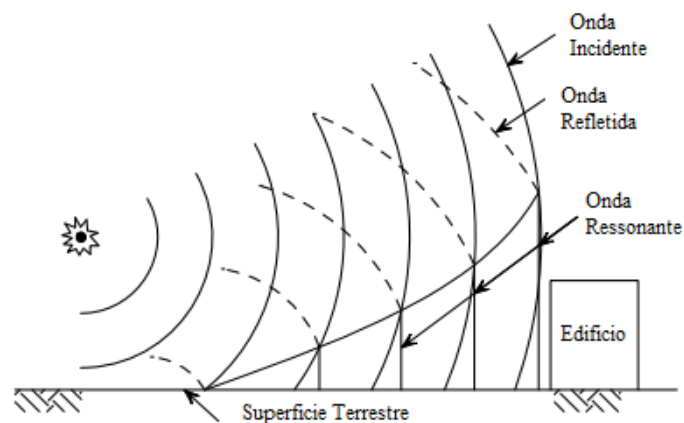


Figura 2.2: Explosão aérea próxima do solo (adaptado de [6])

- Explosão à superfície: ocorre quando a detonação do explosivo é localizada perto do terreno. A onda de choque, inicial é amplificada logo no ponto de detonação devido às reflexões causadas pelo terreno (Figura 2.3)[6, 15]. O entendimento deste tipo de explosão é de elevada importância, pois a maioria dos atentados terroristas acontecem em zonas urbanas, com os engenhos explosivos colocados perto do solo [6].

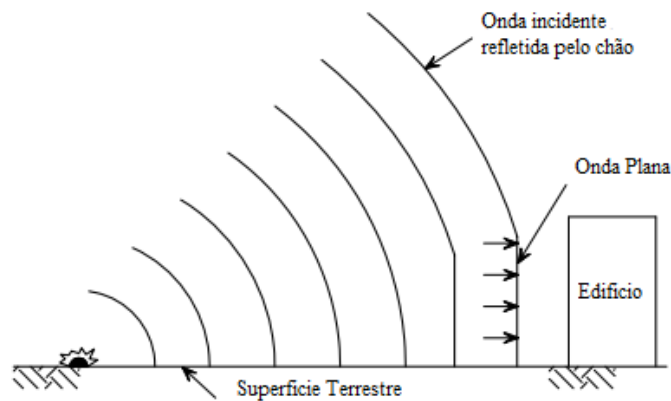


Figura 2.3: Explosão à superfície (adaptado de [6])

2.2.2 Explosões confinadas

As explosões confinadas podem ser subdivididas em três categorias diferentes, representados na Figura 2.4:

- Explosão totalmente ventilada: uma explosão deste tipo dá-se dentro de uma edifício ou cubículo, com uma ou mais aberturas para o exterior. A onda inicial será totalmente ventilada através dessas aberturas, o que vai formar uma onda de choque que se propaga para fora da estrutura de onde se originou a explosão [6, 15].
- Explosão parcialmente confinada/ventilada: uma explosão que se dá numa estrutura com aberturas para o exterior de tamanho limitado. A ventilação da onda inicial e dos produtos da detonação não será instantânea, como no caso da explosão totalmente ventilada. Isto faz com que exista, durante um período finito de tempo, a acumulação de temperaturas elevadas e produtos gasosos dentro da estrutura [6, 15].
- Explosão totalmente confinada: o total confinamento de uma explosão significa que a estrutura em que se dá a explosão não permite a ventilação dos produtos da detonação, o que vai fazer com que o aumento de pressão causado pela explosão seja muito longo [6, 15].



Figura 2.4: Explosões totalmente ventiladas, parcialmente ventiladas/confinadas e totalmente confinadas, respetivamente (adaptado de [6])

2.3 Caracterização da Onda de Choque

Quando ocorrer uma explosão dá-se uma rápida libertação de energia, que é transferida pelo ar circundante através da criação de uma onda de choque, com pressões compreendidas entre 20-30 GPa e

temperaturas que podem chegar aos 7000 C° [11, 12]. À medida que esta onda se afasta do ponto de detonação a sua capacidade destrutiva diminui, assim como a sua velocidade de propagação [6].

A Figura 2.5 ilustra a propagação de uma onda de choque na atmosfera. Assume-se um pequeno volume de gases a uma pressão alta, uniforme nas fases iniciais da explosão. Com a expansão destes gases, a pressão no centro vai diminuindo mais abruptamente do que no perímetro. Nas fases seguintes da explosão vai-se dar uma sobreexpansão da onda de choque, o que vai causar uma rarefação no centro da explosão (ver curva 4) resultando numa fase de pressão negativa e uma fase de pressão positiva [17].

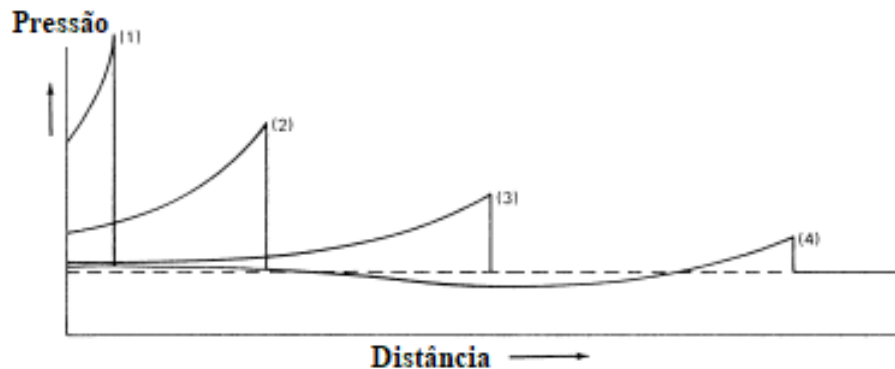


Figura 2.5: Curvas típicas de pressão-distância para sucessivos tempos depois de uma explosão (adaptado de [17])

À medida que a onda de choque se expande no espaço, o volume de ar deixado para trás torna-se tão grande que o volume inicial dos produtos, que criaram a explosão, tornam-se insignificantes. A fase de sobrepressão positiva e a fase de sobrepressão negativa possuem, aproximadamente, a mesma área [17].

Uma onda de choque pode, então, definir-se pela abrupta e quase instantânea mudança de pressão, que resulta de uma explosão [14]. Na Figura 2.6 é ilustrado o perfil da pressão ao longo do tempo para uma onda ideal. Enquanto a onda de choque não chega ao local, a pressão apresenta valores iguais à pressão atmosférica, P_o . Com a chegada da frente de choque, no tempo de chegada, t_A , verifica-se um aumento instantâneo da pressão até à sobrepressão incidente de pico, P_{so} . De seguida, dá-se um rápido decaimento na sobrepressão positiva (pressão superior à pressão atmosférica), até que esta volta a atingir os níveis da pressão atmosférica no tempo total, $t_A + t_d$. Esta sobrepressão positiva é seguida por uma sobrepressão negativa (pressão inferior à pressão atmosférica), que atinge um valor mínimo, P_{so}^- , até que eventualmente retorne à pressão atmosférica [6, 18].

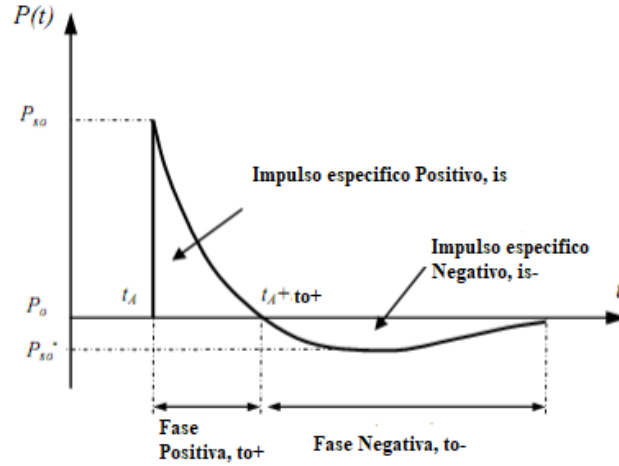


Figura 2.6: Perfil idealizado para a variação de pressão (adaptado de [19])

O decaimento de pressão na curva pressão-tempo é usualmente representado pela equação modificada de Friedlander (Equação (2.1)) [11, 18].

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

Na Equação 2.1, P_{so} é a pressão incidente de pico, t_o^+ é a duração da fase positiva, b representa o coeficiente de decaimento da curva e t representa o tempo decorrido entre a análise e o instante de chegada da onda de choque t_A . Toda esta expressão pode ser somada à pressão atmosférica, no entanto, esta é normalmente considerada como a referência e pode ser ocultada da equação.

A onda de choque é também caracterizada pelo seu impulso positivo, i_s^+ , que pode ser determinado através da integração da Equação 2.1 [11]. O impulso positivo pode ser obtido pela seguinte expressão (Equação (2.2)) [11, 18]:

$$i_s^+ = \int_{t_A}^{t_A+t_o^+} P_s(t) dt = P_{so} t_o \left[\frac{1}{b} - \frac{1 - e^{-b}}{b^2} \right] \quad (2.2)$$

Uma expressão semelhante é utilizada para o cálculo do impulso negativo, i_s^- , (Equação 2.3), no entanto, na maioria dos estudos sobre ondas de choque, a fase negativa é ignorada e apenas parâmetros associados à fase positiva são tidos em conta [18].

$$i_s^- = \int_{t_A+t_o^+}^{t_A+t_o^++t_o^-} P_s(t) dt \quad (2.3)$$

Como se pode observar na Equação 2.1, o decaimento de pressão é exponencial, o que faz com que seja útil a existência de uma aproximação linear, de forma simplificar a interpretação e análise dos dados. A duração desse decaimento linear aproximado é denominado de t_d , podendo este parâmetro ser também denominado por duração da fase positiva equivalente. O impulso positivo é, então, obtido pela seguinte expressão (Equação 2.4), que representa uma aproximação triangular para o cálculo do impulso positivo [13].

$$i_s^+ = \frac{1}{2} t_d P_{so} \quad (2.4)$$

Com isto obtém-se o instante t_d através da expressão (Equação 2.5) [13]:

$$t_d = \frac{2i_s^+}{P_{so}} \quad (2.5)$$

As aproximações lineares permitem chegar também a uma expressão simplificada para a variação de pressão em relação ao tempo (Equação 2.1), para a seguinte expressão (Equação 2.6) [6]:

$$P(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \quad (2.6)$$

Na Figura 2.7 está ilustrada essa simplificação da curva pressão-tempo.

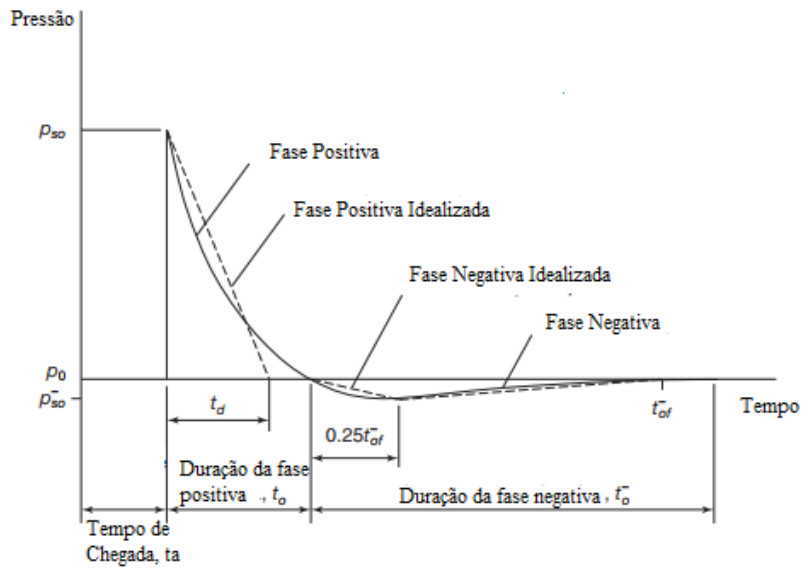


Figura 2.7: Idealização da variação da pressão em relação ao tempo no seguimento de uma explosão (adaptado de [13])

Para definir a pressão incidente de pico, Kinney e Graham [17], com base na análise de uma grande base de dados experimentais, apresentaram a seguinte Equação 2.7:

$$\frac{P_{so}}{P_o} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (2.7)$$

Através da Equação 2.7 facilmente é obtido o valor da pressão incidente de pico, através do rácio entre esta e a pressão atmosférica P_{so}/P_o , em que $Z[m/kg^{1/3}]$ corresponde à distância reduzida, que é calculada pela Equação 2.8:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2.8)$$

Nesta equação, R é a distância em metros medida a partir do centro da carga explosiva e W corresponde à massa da carga explosiva exprimida em quilogramas de TNT [20, 21]. O TNT é, normalmente, utilizado como o explosivo de referência. Para analisar ondas de choque provenientes de outras fontes que não o TNT, é necessário que se preceda à conversão da massa do explosivo em questão

para uma massa equivalente de TNT [13]. Este processo será discutido mais aprofundadamente nas secções seguintes.

Para a duração da fase positiva, $t_o^+[ms]$, Kinney e Graham [17] chegaram à seguinte expressão (Equação 2.9):

$$t_o^+ = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right] W^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2}} \quad (2.9)$$

Para o cálculo do impulso específico por unidade de área, e tal como se passou no caso da duração da onda de choque, apenas se vai considerar a fase positiva, $i_s^+[MPa.ms]$, em que Kinney e Graham [17], apresentam a Equação 2.10:

$$i_s^+ = \frac{0.067 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.23} \right)^4}}{Z^2 \sqrt[3]{\left(\frac{Z}{1.55} \right)^3}} \quad (2.10)$$

2.3.1 Reflexão da onda de choque

Uma onda de choque que atinja uma superfície sólida, como um edifício ou outra estrutura de considerável densidade, será refletida. Estas reflexões, principalmente em zonas bastante urbanizadas, criam condições de interação bastante complexas e, em determinadas situações, criam uma ampliação da onda de choque [6].

As reflexões sofridas pelas ondas de choque podem ser normais (Figura 2.8), quando essa reflexão normal está associada a um impacto direto com a estrutura, com ângulo de incidência igual a 0° . A oblíqua ou ressonante (Figura 2.10), está associada à existência de um ângulo de incidência, compreendido entre os 0° e os 40° , quando a onda entra em contacto com a estrutura. Existe ainda a formação da onda *Mach* (Figura 2.12), que está associada ao ângulo de incidência, a partir de um determinado ângulo este fenómeno ocorre sempre [6, 12].

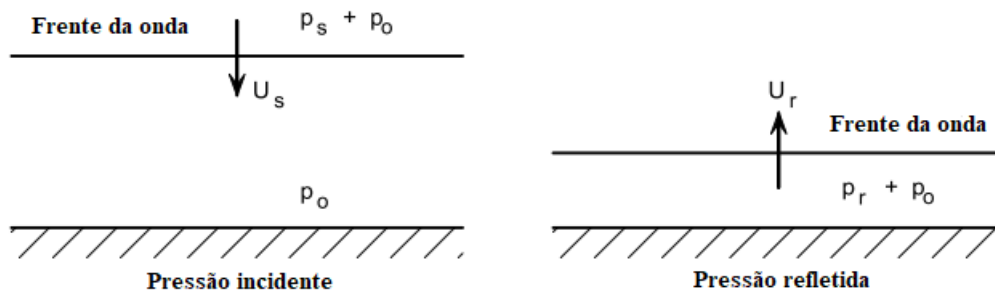


Figura 2.8: Reflexão normal de uma onda de choque (adaptado de [6])

No processo de reflexão, as moléculas de ar que constituem a frente da onda de choque são travadas abruptamente pela presença de uma estrutura. Isto faz com que essas moléculas se comprimam, levando a que a pressão refletida seja consideravelmente superior à pressão incidente, podendo chegar a ser entre duas a oito vezes superior, dependendo da magnitude da pressão incidente de pico [6, 12, 14]. A Figura 2.9, demonstra esta relação entre as pressões ao longo do tempo onde, P_r corresponde à pressão refletida máxima e P_s à pressão incidente máxima.

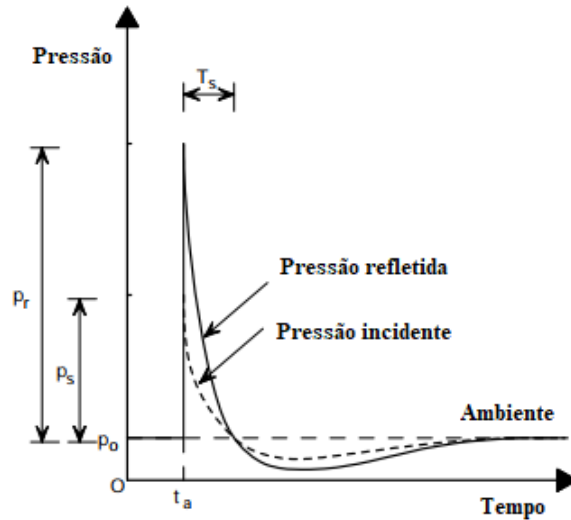


Figura 2.9: Curva pressão-tempo para uma onda de choque que sofre uma reflexão normal (adaptado de [6, 14])

A pressão refletida pode ser calculada através da equação obtida por Rankine e Hugoniot (Equação 2.11), que assume que o ar se comporta como um gás ideal [13, 22].

$$p_r = 2p_s \left[\frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right] \quad (2.11)$$

A pressão refletida obtida em reflexões normais ao longo do tempo é, normalmente, designado por p_r , e a pressão refletida de pico é designada por P_r . O integral apresentado na Equação 2.12 representa o impulso refletido i_r e a respetiva duração da fase positiva, designada por T_r [18].

$$i_r = \int_{t_a}^{t_a+T_r} [p_r(t) - p_0] dt \quad (2.12)$$

De forma a simplificar o dimensionamento, pode ser calculada a pressão refletida de pico através de uma impulso triangular equivalente, semelhante ao que se faz com a pressão de pico na Equação 2.4 [22].

O impulso refletido pode ser calculado também, sabendo o valor do impulso específico e, assumindo uma similaridade nos rácios entre estes dois e o rácio da pressão refletida com a pressão incidente (Equação 2.13) [18].

$$\frac{i_r}{i_s} \approx \frac{P_r}{P_s} \quad (2.13)$$

Na maioria dos casos em que as ondas de choque se refletem em estruturas grandes e planas, esta reflexão incide de forma oblíqua. À medida que a onda de choque viaja deste do ponto de origem, vai ser refletida pelo solo, o que vai alterar o ângulo de incidência, α_i , que está compreendido entre 0° (ocorre reflexão normal) e 40° , até onde ocorre a reflexão oblíqua regular. A pressão refletida de pico causada pela reflexão oblíqua depende também da magnitude da pressão incidente, sendo que, para ângulos incidentes até aos 40° , esta pode ser duas a treze vezes superior à pressão incidente de pico [6, 12, 18].

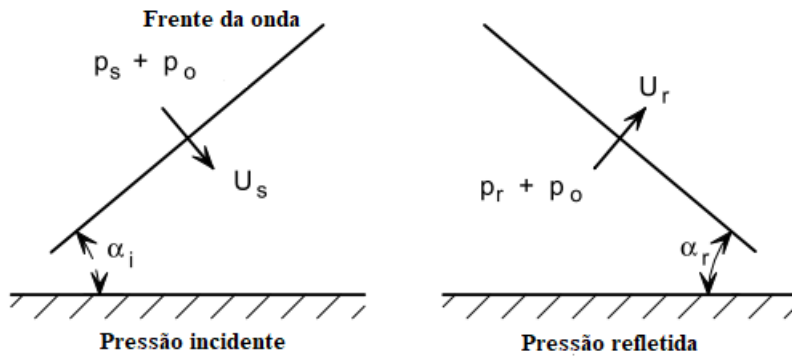


Figura 2.10: Reflexão obliqua regular de uma onda de choque (adaptado de [6])

A pressão refletida de pico, neste caso, pode ser calculada recorrendo a uma coeficiente de reflexão C_r (Equação 2.14) [6].

$$C_r = \frac{P_r}{P_s} \quad (2.14)$$

Através do gráfico apresentado na Figura 2.11, retirado da norma Norte Americana *Unified Facilities Criteria* (UFC) 3-340-02 [15], é possível observar a relação entre o coeficiente de reflexão e o ângulo de incidência, em função de vários valores de pressão incidente de pico.

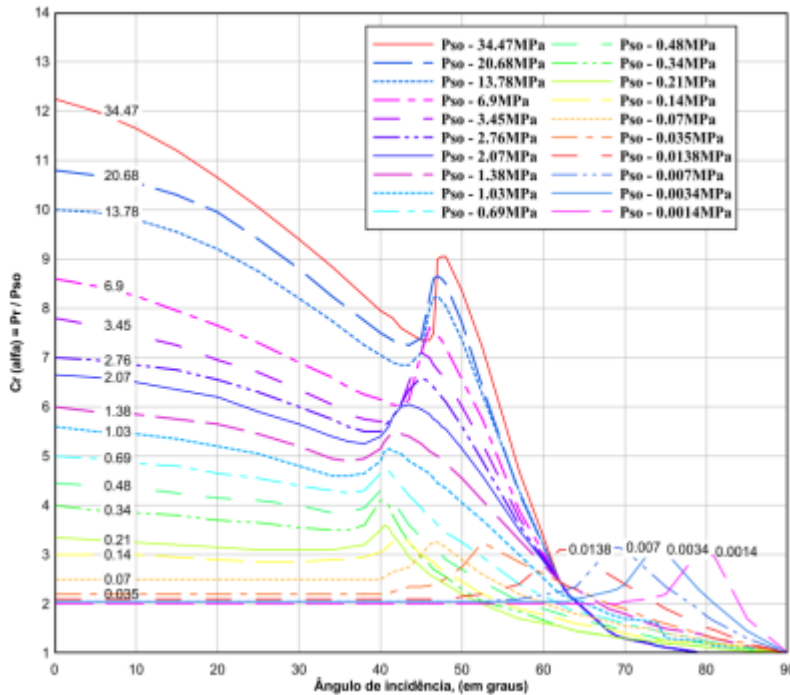


Figura 2.11: Coeficiente de reflexão em relação ao ângulo de incidência para diferentes pressões (adaptado de [23])

Quando o ângulo de incidência excede o valor crítico, normalmente de 40° , a reflexão obliqua regular é substituída pela reflexão de *Mach*. Este tipo de reflexão ocorre quando a onda de choque refletida conecta com a onda de choque incidente a certo ponto, criando uma terceira onda chamada onda de *Mach* (Figura 2.12). O ponto de união das três ondas é designado por ponto triplo [12, 13].

A reflexão de *Mach* pode causar um aumento significativo na pressão refletida e pode levar a pressões muito superiores às pressões obtidas por reflexão oblíqua regular. O nível desse aumento depende da magnitude da pressão incidente inicial [6].

A formação desta onda de *Mach* é importante quando um explosivo detona a uma certa altura acima do solo, e quando o engenho explosivo detona dentro de uma estrutura ou numa zona muito urbanizada, onde existe uma grande variedade de ângulos de incidência possíveis [6, 13].

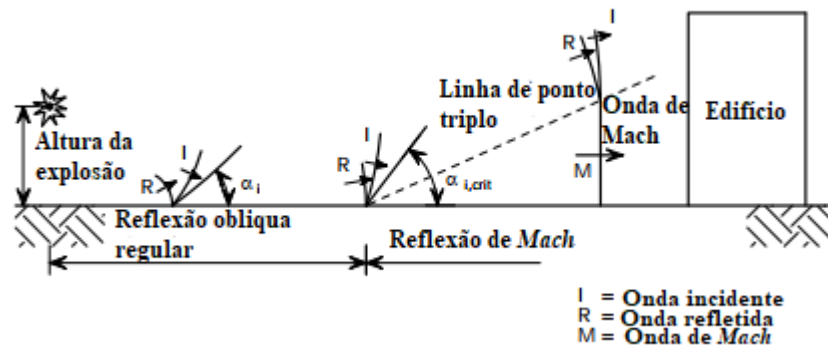


Figura 2.12: Desenvolvimento da onda de *Mach* e reflexão de *Mach* (adaptado de [6])

2.3.2 Interação da onda de choque com uma estrutura

A onda de choque causada por uma explosão interage com uma estrutura conectando a sua energia com a mesma, de forma a que fique sujeita à pressão causada. Isto faz com que a estrutura se deforme de uma maneira que vai depender da intensidade da explosão, das características dos explosivos utilizados, da localização do local de detonação relativamente à estrutura, da possível intensificação da pressão causada pela interação com o terreno e das propriedades da estrutura [12, 24].

Se a estrutura exposta à ação da explosão for retangular, como é caso da maioria dos edifícios, esta vai ser sujeita a pressões em todas as superfícies. A explosão vai criar uma força normal em todas as superfícies expostas, como pode ser observado na Figura 2.13 [24].

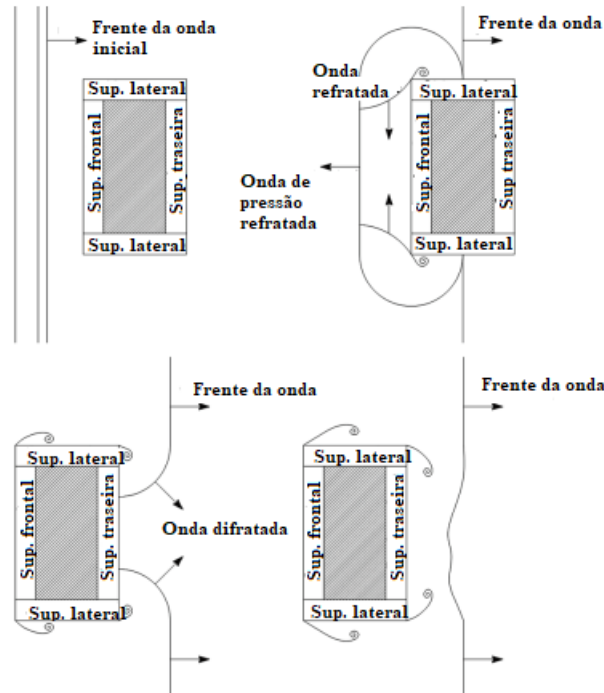


Figura 2.13: Comportamento de uma onda de choque durante a sua passagem por uma estrutura (adaptado de [24])

A superfície frontal da estrutura sofre uma pressão de pico superior devido à reflexão da onda de choque. Quando a onda de choque inicial passa pela superfície do edifício, a pressão de pico começa a decair para zero a um ritmo que depende da duração da onda de choque. Como as superfícies laterais e a zona do telhado recebem pressões de pico inferiores, criam um efeito de difração na superfície frontal que, por sua vez, faz com que o ritmo de decaimento da pressão aumente. Quando este efeito de alívio deixa de existir, o ritmo de decaimento volta a um valor semelhante ao inicial, como pode ser observado na Figura 2.14 à esquerda [6, 24]. Este perfil pode ser simplificado para um perfil triangular, como o que se pode observar na Figura 2.7, tendo em atenção que o impulso obtido pela forma simplificada tem de ser o mesmo ao obtido na Figura 2.14. Para isto o tempo, t_d , tem de ser igual para ambos os perfis à direita [6].

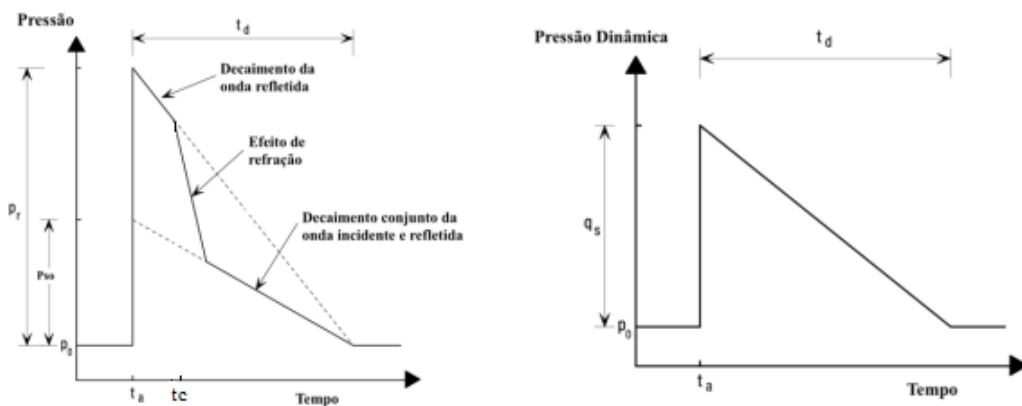


Figura 2.14: Perfis da pressão atuantes na superfície frontal de uma estrutura (adaptado de [6])

O tempo que o efeito de alívio, causado pela pressão das superfícies laterais, demora a atuar pode

ser calculado através da Equação 2.15 [15, 24, 25]

$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r} \quad (2.15)$$

Onde: S [m] corresponde ao menor valor entre a altura da estrutura e metade da largura da estrutura. R corresponde a um rácio S/G , onde G corresponde ao menor valor entre a altura e metade da largura da estrutura e C_r [m/s] que é a velocidade do som na área refratada.

A pressão atuante na superfície frontal, passado o tempo t_c , corresponde à soma da pressão inicial, p_s , e a pressão dependente do arrasto, $C_D \cdot q$, está representada na Equação 2.16 [15, 24, 25].

$$p = p_s + C_D q \quad (2.16)$$

O coeficiente de arrasto, C_D , relaciona a pressão dinâmica com a pressão transacional total na direção da pressão dinâmica causada pelo vento, que varia com o número de *Mach* e com a geometria da estrutura. Para paredes frontais o valor de C_D deve ser considerado 1. Para telhados, paredes traseiras e paredes laterais o valor recomendado depende da pressão, como está representado na Tabela 2.1 [6, 15, 24].

Tabela 2.1: Coeficiente de arrasto a ser usado para edifícios (adaptado de [6])

Pressão dinâmica de pico (KN/m ²)	Coeficiente de arrasto (C_D)
0-172	-0.4
172-345	-0.3
345-896	-0.2

Assim, para calcular a carga total que atua numa determinada área ou elemento de uma estrutura, somam-se os dois componentes da carga explosiva, representados pela Equação 2.17.

$$F(t) = F_{Impulsiva}(t) + F_{Dinâmica}(t) \quad (2.17)$$

$F_{Impulsiva}$ é o componente da carga causada pela onda de choque, enquanto que $F_{Dinâmica}$ é o componente relacionado com a pressão dinâmica, que resulta do fluxo de ar causado pela passagem da onda de choque.

Ambos estes componentes são calculados multiplicando a pressão da onda de choque, p_r , e a pressão dinâmica, $C_D q$, pela área da estrutura normal à direção de onde vem a onda de choque, A_{proj} , obtendo assim a Equação 2.18 e a Equação 2.19 [6].

$$F_{Impulsiva} = p_r A_{proj} \quad (2.18)$$

$$F_{Dinâmica} = C_D q A_{proj} \quad (2.19)$$

2.4 Resposta Estrutural

Na resposta de uma estrutura à ação de uma explosão podem ser identificados três regimes de resposta, relacionando o período natural da estrutura, T_n , e a duração da fase positiva, t_0 , da explosão que atua na estrutura. Na Tabela 2.2 é possível observar estes regimes de resposta. [6, 25]

Tabela 2.2: Identificação dos tipos de regime de resposta (adaptado de [6])

Regime de resposta	Relação entre período natural e a duração da fase positiva
Impulsivo	$t_0/T_n < 0.4$
Dinâmico	$0.4 < t_0/T_n < 2$
Quase-estático	$t_0/T_n > 2$

Estas considerações podem ser também representadas esquematicamente através dos diagramas P-I (Figura 2.15). Este tipo de diagramas são desenvolvidos de modo a serem um espectro de resposta para uma estrutura sujeita a uma carga explosiva, quando lhe é definido um determinado critério de rotura. Neles é possível observar a zona onde se dá o carregamento impulsivo, e a zona onde se dá o carregamento quase-estático. [25].

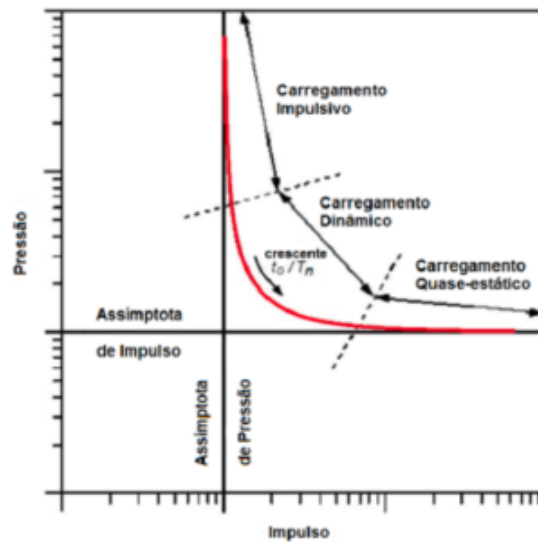


Figura 2.15: Representação de um diagrama Pressão-Impulso (P-I) (adaptado de [25])

Estes diagramas são também a melhor forma de diferenciar os regimes impulsivos e quase estáticos, através da assintota vertical e horizontal. Estas assintotas são, em termos práticos, os limites do diagrama. No regime de resposta impulsivo, assintota vertical, o tempo de duração da aplicação da carga é muito inferior ao período natural da estrutura. A duração da carga é de tal forma reduzida que, quando a estrutura responde, como responderia caso a carga fosse estática, a carga já passou a estrutura. O impulso torna-se, assim, um aspeto excecionalmente importante na previsão de danos para este tipo de carregamentos [6, 26].

No regime quase-estático, a duração de aplicação da carga é muito superior ao período natural da estrutura. A resposta da estrutura tende a ser semelhante à força estática equivalente para esse carregamento [6].

Entre os regimes impulsivos e quase-estáticos, encontra-se o regime dinâmico. Neste regime a duração da aplicação da carga é semelhante ao tempo que a estrutura demora a responder [6].

2.5 Equivalência em TNT

Os efeitos das explosões causadas por diferentes tipos de explosivos são, normalmente, caracterizados comparando-os com os efeitos do TNT [27, 28]. As razões pelas quais a equivalência em TNT é utilizada, em vez da quantidade de energia libertada, vem do facto da explosão criada por uma certa fonte, ter propriedades físicas muito específicas. Essas propriedades dependem da proporção de energia libertada, que está contida na onda de choque, e do ritmo a que a energia é libertada. Por exemplo, no caso de uma explosão nuclear, aproximadamente 50% da energia libertada vai para a onda de choque, o resto aparece sob a forma de radiação nuclear [28, 18]. Por isto, em vez de se descrever a quantidade de energia libertada por uma explosão, é mais correto comparar as propriedades da onda de choque gerada por um qualquer explosivo sólido com aquela que originaria de uma carga equivalente de TNT.

Deste modo, é possível expressar os efeitos da energia libertada pela explosão de um material explosivo, de uma determinada forma, relativamente ao TNT, de forma semelhante, em função do calor de detonação dos diferentes materiais através da seguinte equação (Equação (2.20)) [15]:

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (2.20)$$

Onde:

W_E = Massa equivalente de TNT [kg];

W_{EXP} = Massa do explosivo em questão [kg];

H_{EXP}^d = Calor da detonação do explosivo em questão [MJ/kg];

H_{TNT}^d = calor de detonação do TNT [MJ/kg].

Na Tabela 2.3, adaptada de Baker et al. [18], são demonstrados os fatores de conversão para alguns explosivos comuns.

Tabela 2.3: Fatores de equivalência em TNT baseado na energia específica, (adaptado de [13])

Explosivo	Energia por unidade de massa ($Q_x : Kj/kg$)	Fator de conversão de equivalência em TNT ($Q_x = Q_{TNT}$)
Nitroglicerina (liquida)	6700	1.481
HMX	5680	1.256
Semtex	5660	1.250
RDX	5360	1.185
Composto B (60% RDX 40% TNT)	5190	1.148
C4 (91% RDX)	4870	1.078
TNT	4520	1.000
Dinamite gelatinosa	4520	1.000
ANFO (94% nitrato de amónio, 6% óleo combustível)	3932	0.870
60% dinamite de nitroglicerina	2710	0.600

Outro método possível é basear a equivalência em TNT na pressão ou no impulso. A Tabela 2.4 apresenta valores de fatores de conversão para alguns explosivos comuns.

Tabela 2.4: Fatores de equivalência em TNT baseados na pressão e impulso (adaptado de [29])

Explosivo	Fator Equivalente de Pressão	Fator Equivalente de Impulso
Comp. B	1.11	0.98
Comp. A-3	1.09	1.08
ANFO	0.9	0.9
Comp. C4	1.37	1.19
Ciclotol (70/30)	1.14	1.09
HBX-1	1.17	1.16
HBX-3	1.14	0.97
H-6	1.38	1.15
Minol-2	1.20	1.11
PETN	1.14	1.15
TRITONAL	1.07	0.96
Pentolite	1.42	1.00
Tetril	1.07	1.07
TNT	1.00	1.00

Capítulo 3

Caracterização dos Painéis de Vidro

Os arqueólogos acreditam que os primeiros utensílios de vidro feitos pelo Homem originaram da Mesopotâmia (atual Iraque e norte da Síria) durante a Idade do Bronze, por volta do ano 2300 AC, altura em que o vidro apenas servia para o fabrico de pequenos ornamentos. O vidro pode também ser encontrado na natureza na forma de obsidiano, que é criado através de erupções vulcânicas [30].

O vidro, que é um material amorfo e normalmente transparente, está a crescer em popularidade enquanto material de construção, com funções estruturais, para os edifícios mais modernos. Está ainda presente por todo o tipo de edifícios como material não estrutural [31].

Nas últimas duas décadas, as estruturas com fachada de vidro têm-se tornado cada vez mais populares, o que causou um significativo aumento na utilização das propriedades estruturais do vidro e, a integração de componentes de vidro no sistema estrutural dos edifícios. Isto proporcionou o aparecimento de uma nova tecnologia de construção de fachadas, que prioriza: sistemas estruturais pormenorizados e expostos ao exterior, estruturas geometricamente complexas, a transparência da fachada, bom comportamento térmico e, se preparadas para tal, bom comportamento contra a ação de explosões [32]. Por outro lado, o vidro apresenta também algumas desvantagens que têm de ser combatidas, exemplo disso é a sua baixa resistência à tração e fragilidade, o que tornam as zonas envidraçadas dos edifícios em zonas altamente frágeis e vulneráveis. Este fenómeno verifica-se principalmente em condições de carregamento extremo, quer no início da construção, ou ao longo da vida útil do edifício. O que faz com que sejam necessários métodos de análise avançados que tenham em conta as propriedades intrínsecas do vidro, de forma a minimizar qualquer tipo de baixas ou ferimentos, caso haja alguma falha [31].

3.1 Tipo de Vidro e Processo de Fabrico

O vidro é um material inorgânico e amorfo constituído, normalmente, por uma massa líquida à base de sílica, que é arrefecida até atingir um estado rígido sem cristalização. O vidro sódico-cálcico é o tipo de vidro mais utilizado no mundo. A Tabela 3.1 mostra a composição química deste material. A composição química do vidro influencia a sua viscosidade, expansão térmica e temperatura de fusão. A viscosidade aumenta durante o processo de arrefecimento da massa líquida, até ocorrer a solidificação a uma temperatura de aproximadamente 530 C° para vidro sódico-cálcico [33].

Tabela 3.1: Composição química do vidro sódico-cálcico (adaptado de [33])

Vidro sódico-cálcico		
Sílica (areia)	SiO_2	69-74%
Óxido de cálcio	CaO	5-14%
Óxido de sódio	Na_2O	10-16%
Magnésio	MgO	0-6%
Alumínio	Al_2O_3	0-3%
Outros		0-5%

O vidro comum pode ser categorizado pelo seu processo de fabrico, podendo este ser: vidro recozido pelo processo *float*, vidro termo-endurecido ou vidro temperado [31].

No processo de fabrico moderno para produtos de vidro, o fluxo de material é praticamente contínuo desde o ponto em que a matéria prima é misturada até à conclusão do produto final [34].

3.1.1 Processo Float e Vidro Recozido

O processo *float* é o mais simples e comum dos processos de produção de vidro, e um dos métodos mais económicos [31, 35]. Este processo consiste em misturar e aquecer a matéria prima, até uma temperatura de, aproximadamente, 1600 C° em que se dá a fundição do vidro e é criado o *float*. É criada uma corrente contínua de *float*, dispersa sob uma superfície de estanho fundido, até se atingir a espessura desejada. Nessa altura, o *float* é arrefecido até, aproximadamente, 600 C° . O material passa da superfície de estanho para a câmara de Lehr, onde se dá o processo de recozimento. O processo de recozimento é um processo de arrefecimento controlado, que visa minimizar tensões residuais, que podem surgir num processo de arrefecimento rápido ou não uniforme. O vidro recozido segue para uma zona de inspeção e, por fim, para a zona de corte e armazenamento [35]. Este processo encontra-se ilustrado na Figura 3.1.

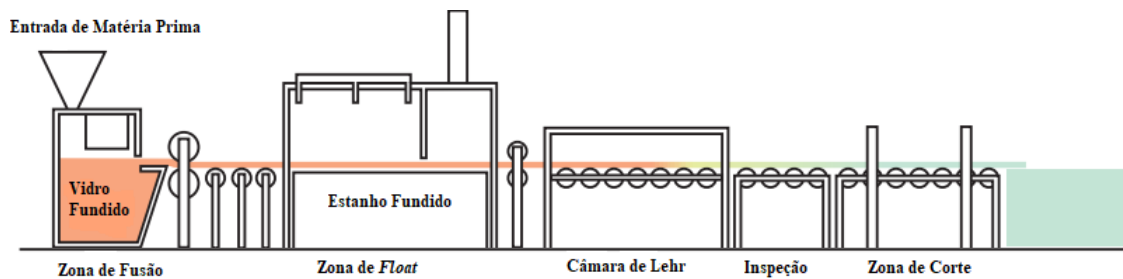


Figura 3.1: Diagrama representativo do processo de fabrico *float* (adaptado de [35])

Através deste método, obtém-se o vidro recozido, que apresenta todas as propriedades típicas do vidro, como a transparência, resistência à corrosão e a altas temperaturas. Devido ao seu preço relativamente reduzido, é normalmente utilizado para envidraçamentos estruturais e arquitetónicos ou como matéria-prima na obtenção de outros tipos de vidro [35, 36]. No entanto, o vidro recozido tende a ser frágil e a estilhaçar por grandes fragmentos irregulares, conforme ilustrado na Figura 3.2, o que o torna bastante perigoso quando estilhaçado. Por essa razão, este tipo de vidro não é utilizado em elementos de proteção contra explosões [36].



Figura 3.2: Padrão de rotura do vidro recozido (adaptado de [31])

3.1.2 Vidro Temperado

Temperar ou endurecer um vidro são termos usados na indústria, que se referem ao tratamento térmico que altera significativamente o padrão de rotura de um painel de vidro [35]. O primeiro exemplo de algo semelhante ao vidro temperado moderno pode ter sido a gota do Príncipe Rupert (*Prince Rupert's drop*), registada pela primeira vez no século XVII. Esta veio de uma curiosidade científica, e é obtida deixando pingar vidro fundido quente em água. Deste processo resulta num pequeno objeto de vidro semelhante a um girino, com uma cabeça em forma de gota, e uma cauda longa muito fina. A elevada tensão residual no interior da gota leva a que a cabeça seja muito resistente ao golpe, mas quando a cauda é danificada a gota desintegra-se de forma explosiva [37].

O processo de obtenção do vidro temperado começa após a última fase do processo de fabrico do vidro recozido estar terminada. O vidro recozido passa novamente por um forno, onde é aquecido a uma temperatura compreendida entre $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $675\text{ }^{\circ}\text{C}$, e é, de seguida, rapidamente arrefecido por jatos de ar frio, conforme ilustrado na Figura 3.3 [33, 35].

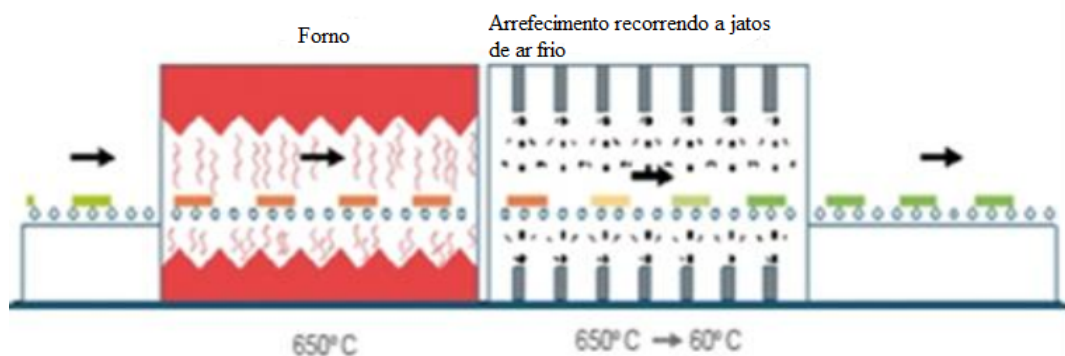


Figura 3.3: Diagrama representativo do processo de endurecimento para obtenção de vidro temperado (adaptado de [33])

Este arrefecimento rápido, faz com que o exterior do painel de vidro solidifique antes da parte interior. À medida que a parte interior solidifica, terá tendência a contrair. No entanto, a parte exterior, já solidificada, vai oferecer resistência e, conseqüentemente, fazer com que as superfícies exteriores entrem em compressão e a zona do núcleo interior entre em tração, conforme é demonstrado na Figura 3.4. Este fenómeno cria uma distribuição de tensão parabólica, que induz um pré-esforço no vidro temperado, o que faz com que a propagação de fendas não chegue à superfície exterior [33, 35, 38]. Este tratamento térmico faz com que o vidro temperado seja quatro a cinco vezes mais resistente do que o vidro recozido [35, 38].

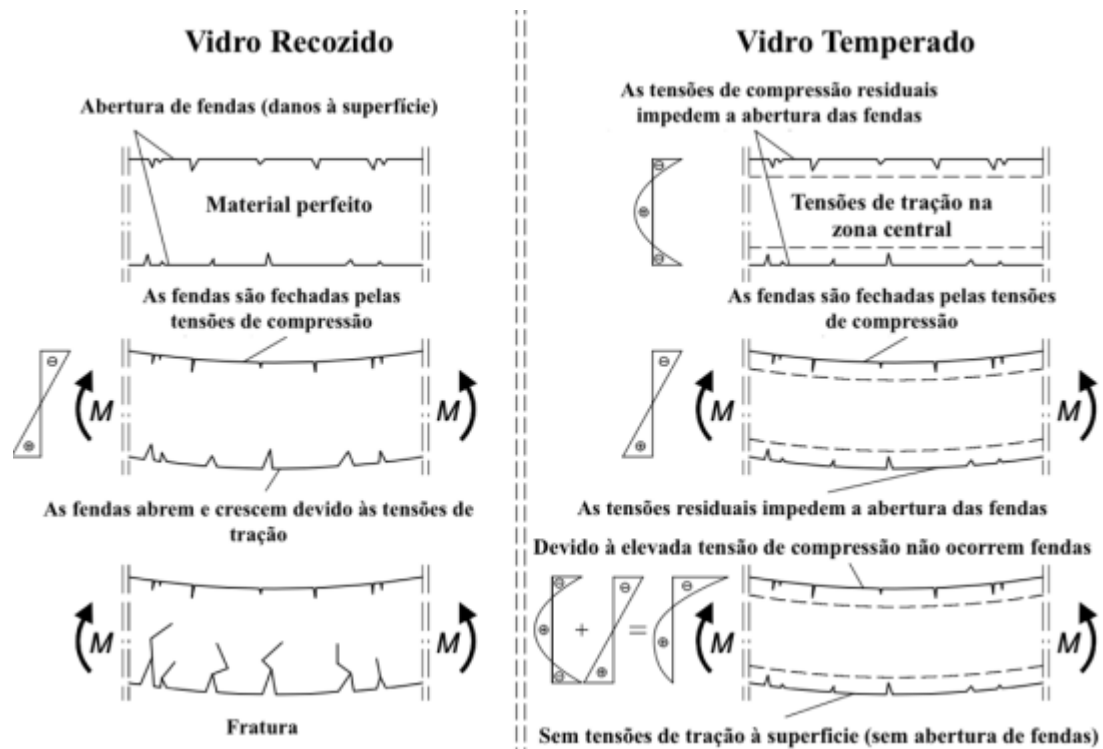


Figura 3.4: Diferenças nas tensões do vidro temperado e do vidro recozido (adaptado de [39])

O vidro temperado é considerado um vidro de segurança uma vez que quando estilhaça, fá-lo em pequenos fragmentos ovais, e não em fragmentos de grande dimensão afiados. As fendas criadas no vidro temperado não têm necessariamente de chegar à zona exterior, podem manter-se pela zona de tensão de tração no interior. Isto possibilita que o interior estilhaça em pequenos fragmentos, e o painel se mantenha intacto [38].

No entanto, quando sujeitos a certas cargas dinâmicas com altas taxas de deformação, como pressões oriundas de explosões, os painéis de vidro temperado monolítico podem, ao estilhaçar, originar grandes fragmentos com vértices afiados, como se pode observar na Figura 3.5, representando sérias ameaças de ferimentos a pessoas que estejam nas proximidades. Nestes grandes fragmentos, apenas o interior tracionado do painel estilhaça, o exterior comprimido mantém estes fragmentos coesos. Isto faz com que nem sempre o vidro temperado garanta a mitigação dos danos originados pelos estilhaços [31, 38].



Figura 3.5: Padrão de rotura do vidro temperado (adaptado de [31])

Um método alternativo ao endurecimento térmico é o endurecimento químico. Através deste pro-

cesso o vidro temperado (quimicamente) pode ser cortado ou perfurado, mas as zonas cortadas ou perfuradas vão ter a mesma resistência que o vidro recozido. A utilização deste processo químico de endurecimento é muito pouco comum, só é utilizado quando a geometria do vidro a endurecer faz com que o endurecimento térmico não seja tão eficaz. Este processo é baseado numa troca iónica, iões de sódio no vidro trocam com iões de potássio. Para a troca iónica ocorrer, o vidro é submergido em sal fundido, que cria as tensões de compressão na superfície exterior. A desvantagem deste método é que existe uma maior probabilidade de as fendas na superfícies serem mais profundas do que a espessura da zona de compressão, o que pode levar a um crescimento mais acentuado das fendas, mesmo sem uma carga exterior aplicada, que pode causar uma falha espontânea no painel [33].

3.1.3 Vidro Termo-Endurecido

Vidro termo-endurecido é obtido utilizando um processo semelhante ao do vidro temperado, mas com um ritmo de arrefecimento menor. Desta forma, as tensões residuais na superfície são menores, o que faz com que a sua resistência ao impacto seja algures entre a do vidro recozido e a do vidro temperado, aproximadamente duas vezes superior à resistência do vidro recozido [31, 36].

O vidro termo-endurecido não pode ser classificado como um vidro de segurança quando utilizado como um painel único, mas pode ser utilizado como vidro laminado de segurança. Um painel deste vidro deve ser enquadrado nas suas quatro arestas de forma a melhorar a sua zona de rotura (Figura 3.6), tornando-a maior. Obtém-se assim, um melhor desempenho do vidro quando sujeito a cargas externas. Este tipo de vidro não pode ser trabalhado para além deste processo [33].

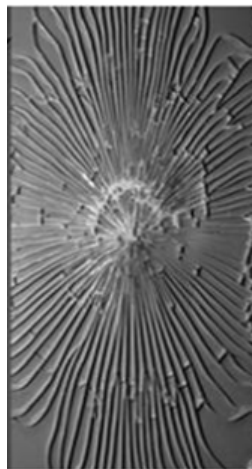


Figura 3.6: Padrão de rotura do vidro termo-endurecido (adaptado de [33])

3.1.4 Vidro Laminado

O vidro laminado consiste em pelo menos dois painéis de vidro ligados através de um plástico ou polímero transparente. Este tipo de vidro é bastante interessante para aplicações estruturais, uma vez que o processo de laminação do vidro resulta numa melhoria significativa no seu comportamento em relação à rotura e fragmentação. Após a rotura do vidro, os fragmentos aderem à película que separa os painéis, o que leva a que alguma capacidade estrutural se mantenha. Esta capacidade estrutural aumenta quanto maiores forem os fragmentos. Por esta razão, o vidro laminado é considerado um vidro de segurança [33, 40].

O processo de laminação do vidro surgiu originalmente como forma de produzir vidros para-brisa mais seguros para os automóveis. Hoje em dia tem cada vez mais aplicações, desde a aviação a vários

tipos de soluções arquitetônicas e estruturais [40]. À medida que este material se tornou mais popular na indústria da construção começaram-se a fabricar painéis com mais de duas camadas de vidro, de forma a garantir maior capacidade estrutural à fachada [35].

O Polivinil Butiral (PVB) é a resina mais utilizada como camada intermédia nos vidros laminados devido à sua capacidade de bloquear radiação Ultravioleta (UV) [33, 41]. Os materiais utilizados nesta camada intermédia são fornecidos em rolos de vários comprimentos, larguras e espessuras específicas. As limitações dimensionais das camadas intermédias são um fator limitante ao tamanho máximo que o painel de vidro pode assumir. A espessura da camada intermédia, vem normalmente em função da espessura dos painéis de vidro que se pretendem laminar, sendo que as espessuras mais comuns são de 0,76 a 1,52 milímetros [35].

O vidro laminado tem sido cada vez mais utilizado para melhorar a segurança dos edifícios, ou utilizando uma laminação múltipla caso existam mais do que dois painéis de vidro, ou mudando o material utilizado na camada intermédia. Um possível material de substituição é o SentryGlas de DuPont que é cada vez mais utilizado em fachadas de vidro estruturais. Este material tem uma resistência superior à degradação dos vértices e arestas do vidro quando expostos aos elementos, ou devido a incompatibilidade com o selante. Segundo DuPont, esse material é cinco vezes mais duro e cem vezes mais rígido do que o tradicional PVB, o que possibilita que o painel de vidro seja menos espesso do que seria se se utilizasse uma resina convencional [33, 35].

O processo de fabrico do vidro laminado com PVB, envolve aquecer e comprimir todo o conjunto vidro-PVB-vidro numa autoclave. Este processo, ilustrado na Figura 3.7, é feito a 140 C° e a 14 bar de pressão de forma a garantir que os painéis de vidro ficam unidos sem vazio ou bolsa de ar entre eles [33, 35].

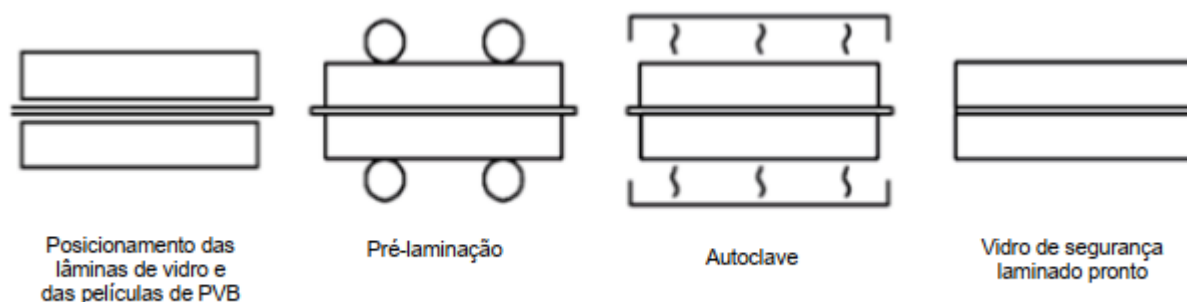


Figura 3.7: Processo de fabrico do vidro laminado com película PVB (adaptado de [33]).

Com o processo ilustrado na Figura 3.7, o PVB adere aos painéis de vidro e mantém os dois, ou mais, painéis juntos. Se os painéis de vidro do painel entrarem em rotura estes manter-se-ão preso à camada de PVB. [35]. Para que se possa estudar com sucesso o vidro laminado, é importante conhecer bem como se comporta este vidro depois de começar a fraturar. Para tal, Overend [39], apresenta um modelo para o comportamento de rotura de um vidro laminado, ilustrado na Figura 3.8.

- Fase 1: ambos os painéis de vidro estão intactos, o conjunto age como uma viga única. A resistência do conjunto é função da tensão de tração resistente do plano inferior, da duração da carga e do módulo de resistência ao corte da película.
- Fase 2: O painel inferior encontra-se fraturado, passando agora a resistência do painel a depender da resistência à flexão do painel de superior e do tempo de duração da carga. Nesta fase, o momento fletor (M_2) é inferior ao momento fletor da fase 1 (M_1). Isto resulta numa transição brusca

entre a fase 1 e a fase 2 no que toca à relação momento-curvatura, uma vez que o momento fletor que causa fratura na fase 1 não é sustentável na fase 2.

- Fase 3: Ambos os painéis encontra-se fraturados. No entanto, a camada intermédia mantém um comportamento elástico. A resistência ao momento fletor é devida apenas à camada intermédia. Os fragmentos de vidro do painel superior estão comprimidos. O momento fletor nesta fase (M_3), é o momento necessário para superar a resistência à flexão que vai depender do tempo de duração da carga, da resistência da camada intermédia, do módulo de elasticidade da camada intermédia e do rácio entre o tamanho dos fragmentos de vidro do painel superior e a sua espessura.
- Fase 4: Nesta última fase, já existe uma deformação grande o suficiente para que a resistência à flexão apenas depende da resistência da camada intermédia e do tempo de duração da carga [39, 41].

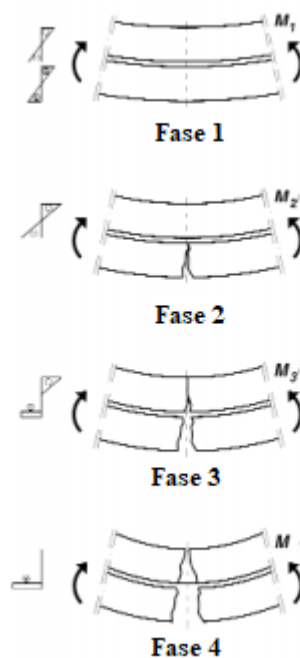


Figura 3.8: Quatro fases do desempenho de um vidro laminado de dois painéis após ocorrer uma fratura (adaptado de [39])

É de mencionar que as fachadas de vidro laminado têm propriedades acústicas superiores ao de outros tipos de vidro, uma vez que a camada intermédia comporta-se como difusora de som. Os materiais que se utilizam na laminação e a espessuras do vidro influenciam de forma significativa as propriedades acústicas da fachada [35].

Como mencionado anteriormente, o vidro laminado tem maior resistência ao impacto do que o vidro temperado. O vidro recozido, quando laminado, tem a vantagem mitigar as distorções óticas causadas pelo tratamento térmico. No entanto, o vidro temperado é mais resistente do que o vidro recozido. O melhor compromisso para as fachadas de vidro, é a utilização de vidro temperado como camada interior, que aumenta a resistência da fachada, e um painel de vidro recozido como camada exterior de forma a diminuir as distorções óticas [35].

A laminação do vidro causa um aumento significativo na capacidade de deflexão do mesmo. Na Figura 3.9 está ilustrado uma típica função de resistência para um painel de vidro laminado, onde se

pode observar que a contribuição do vidro em si para a resistência do painel total é mínima quando comparada com a do PVB [40].

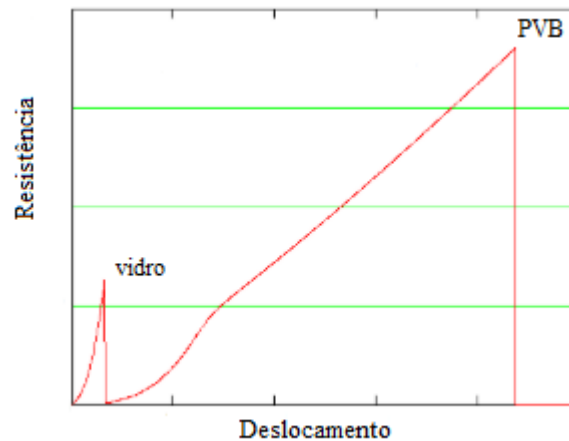


Figura 3.9: Típica função de resistência do vidro laminado (adaptado de [40])

3.2 Propriedades e Componentes do Vidro Laminado

3.2.1 Lâminas de Vidro

As propriedades do vidro dependem das suas características estruturais, enquanto que a estrutura do vidro é determinada pela sua composição química e pela velocidade de arrefecimento durante o processo de fabrico [42].

A variação das propriedades do vidro é feita alterando a sua composição química, alterando as quantidades dos seus componentes. A velocidade de arrefecimento representa o tempo que o vidro tem para dissipar calor no momento de fabrico, o que vai influenciar as características finais do vidro [42].

Propriedades Físicas e Mecânicas

O vidro é considerado um material frágil, com baixa resistência ao impacto, no entanto apresenta uma grande resistência à rotura. A determinação da resistência de um material frágil é feita através da força necessária para este entrar em rotura. O vidro comercial comum, em teoria, apresenta uma resistência na ordem dos 21 MPa, no entanto na prática muito raramente passa de 15 MPa sem ocorrer rotura. Em vidros de utilização comum como, por exemplo, o de uma janela, observam-se resistências na ordem dos 10 a 100 MPa [31, 42]. De acordo com a norma da União Europeia pr-EN 13474-3 [43], a tensão necessária para a fratura de um vidro variava entre os 30 e os 120 MPa.

Estas discrepâncias nos valores da resistência teóricos e práticos são justificadas com falhas internas ou superficiais que amplificam o efeito das tensões impostas. Para combater este fenómeno, é muito importante garantir a homogeneidade química e a inexistência de fissuras no painel de vidro [42].

Devido a este comportamento frágil, a resistência à compressão é aproximadamente dez vezes superior à resistência à tração por flexão. O valor de resistência à tração para um vidro é aproximadamente 500 MPa na prática, sendo que o seu valor teórico é de 900 MPa. Para cargas permanentes o valor da resistência à compressão é de 170 MPa [44].

O vidro é um material frágil, de baixa ductilidade, não demonstrando quaisquer sinais antes de entrar em rotura, é por isto considerado um material perigoso. O módulo de Young, E , dá uma aproximação

numérica da resposta do vidro quando sujeito a uma carga, sendo este o rácio entre a tensão aplicada, σ , no vidro e a respetiva extensão causada, ε (Equação 3.1) [45].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Na Figura 3.10, é ilustrada a curva tensão-deformação do vidro ao lado da do aço e da madeira. É possível observar que o vidro não tem capacidade de deformação plástica, ao contrário do aço, uma vez que a sua resposta à deformação é linear. [45].

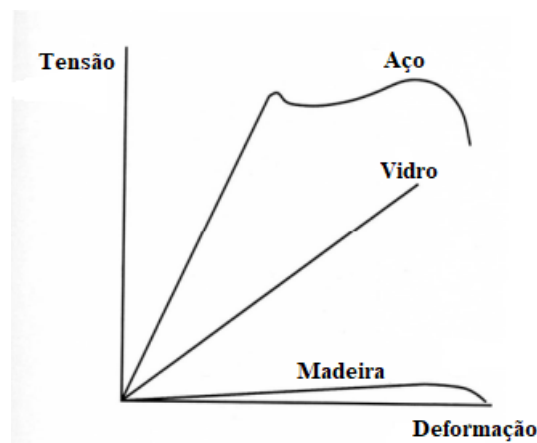


Figura 3.10: Curvas tensão-deformação do aço, vidro e madeira (adaptado de [45])

Para a maior parte do vidro comercial, o módulo de elasticidade apresenta um valor de, aproximadamente, 70 GPa; um terço do valor do aço e cinco vezes superior ao da madeira. Este valor diminui ligeiramente quando o vidro é submetido a tratamentos térmicos [44, 45].

O módulo de distorção, G , que caracteriza a resistência ao corte de uma material, é a correlação entre a deformação por corte, γ , e a tensão de corte, τ . A Equação 3.2 demonstra essa correlação [45].

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.2)$$

O valor comum para o módulo de distorção no vidro é, aproximadamente, 30 GPa.

Na Tabela 3.2 encontram-se valores para as propriedades mecânicas do vidro comparadas com outros materiais tipicamente utilizados na indústria da construção [45].

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas do vidro comparadas com o aço, madeira e betão (adaptado de [44])

	Aço	Madeira	Betão	Vidro
Densidade (kg/m^3)	7850	600	2200	2500
Módulo de elasticidade, E (GPa)	210	11	29	70
Resistência à tração (MPa)	240	14	2,2	45
Extensão de rotura (%)	25	0,7	-	0,006-0,17
Resistência à compressão (MPa)	235	4-26	20	500

É de ter em atenção que estes valores de resistência à tração do vidro são para o vidro recozido. Se o painel for de vidro termo-endurecido esta resistência vai duplicar, e se for um painel temperado esta vai aumentar até cinco vezes, sendo que todas as outras propriedades mantêm-se iguais.

Propriedades Térmicas

O vidro é considerado um mau condutor térmico. Por isso, a espessura do vidro tem um papel fulcral na capacidade de resistência de um painel ou peça de vidro ao choque térmico. A capacidade do vidro de resistir à variação de temperatura sem fissurar depende também da espessura, quanto mais fina for a peça de vidro menor será a diferença entre os pontos mais frios e os pontos mais quentes, pois o calor passa mais rápido pela espessura reduzida. Este fenómeno faz com que uma peça mais fina seja mais resistente ao choque térmico, pois não vai haver uma face da peça a dilatar e outra a resistir a essa dilatação [42].

O coeficiente térmico de expansão, α , determina a variação da dimensão de uma determinada peça de vidro com a temperatura. Para a maioria do vidro comercial, esse valor é $9 * 10^{-6} 1/k$. Podemos prever a variação do comprimento da peça através da Equação 3.3 [44, 45].

$$\Delta L = \alpha \Delta T L \quad (3.3)$$

Onde L é o comprimento original, ΔL a variação desse comprimento e ΔT a variação da temperatura.

É necessário ter-se uma especial atenção ao trabalhar com vidro laminado, pois quando sujeito a temperaturas entre os 38 C° e os 49 C° não se comporta como um vidro monolítico único, mas sim como se tivesse camadas semi-independentes, o que diminui bastante a sua resistência. Para temperaturas superiores a 77 C°, a camada intermédia perde as capacidades adesivas, tornando-se completamente obsoleta, e os painéis de vidro tornam-se independentes um do outro [45].

O diferencial máximo de temperatura que um determinado material consegue tolerar sem fraturar é conhecido por resistência ao choque térmico. Para o vidro recozido, que não tenha levado qualquer tratamento térmico, é de 40 Kelvin. Para o vidro termo-endurecimento, o valor de resistência ao choque térmico é superior a este [44].

3.2.2 Camada Intermédia (PVB)

O material mais comum nas camadas intermédias dos painéis de vidro laminado utilizados na indústria da construção e na indústria automóvel é o PVB, devido à sua capacidade de bloquear as radiações UV, clareza ótica e ótimas propriedades adesivas [41, 46].

O PVB é um polímero dúctil e viscoelástico, isto quer dizer que as suas propriedades físicas variam com a temperatura e com a duração da aplicação da carga. À temperatura ambiente, o PVB deforma com facilidade, podendo atingir uma extensão até 200% antes de romper. A temperaturas inferiores a 0 C° e com tempos de aplicação das cargas baixos, o PVB transfere a tensão de corte toda de um painel para o outro. No entanto, quando se aumenta a temperatura e a duração da aplicação da carga, esta transferência diminui [33, 41].

Quando os painéis de vidro fraturam, a resposta da camada de PVB é influenciada pela presença e quantidade de fragmentos dos painéis que ficam presos à camada. Esses fragmentos impedem que o PVB se expanda, por isso, a extensão não é uniforme em toda a película de PVB, variando entre os fragmentos e causando deformações localizadas [41]. A falha completa do vidro laminado ocorre quando a película de PVB é rasgada. [47]. Na Tabela 3.3 observam-se algumas propriedades importantes do PVB.

Tabela 3.3: Propriedades do PVB (adaptado de [19, 48])

Parâmetro	Valor	Unidades
Densidade	1,100	Kg/m ³
Módulo de Young	220	MPa
Coeficiente de Poisson	0,495	-
Tensão à tração	28	MPa
Módulo tangente	1,0	Pa
Extensão de rotura	2,0	-

Capítulo 4

Análise Estrutural do Comportamento do Vidro Laminado Sujeito a uma Explosão

4.1 Técnicas de Análise Estrutural de Painéis de Vidro Sujeitos a Explosões

O comportamento do vidro laminado, após um determinado impacto, pode ser simulado utilizando métodos analíticos ou métodos numéricos [49].

Os resultados aproximados obtidos através do Método de Elementos Finitos (MEF) sofrem de alguma imprecisão devido à grande diferença entre a rigidez do vidro e a do material da camada intermédia. Por isso, a validação dos resultados obtidos através do MEF é feita através de campanhas experimentais que validem o modelo numérico [49].

4.1.1 Sistemas de Um Grau de Liberdade

Num sistema de um grau de liberdade (do inglês *Single Degree of Freedom* (SDOF)), a posição do sistema em qualquer instante pode ser definida com apenas uma coordenada [15, 50].

Todas as estruturas possuem muitos graus de liberdade, no entanto, no caso de cargas de curta duração, como as causadas por explosões, existe um modo que é predominante. Esse modo pode então ser considerado para definir o comportamento de toda a estrutura, podendo o problema ser simplificado considerando apenas um grau de liberdade. Um exemplo simples de sistema de um grau de liberdade pode ser observado na Figura 4.1, onde a massa move-se apenas na direção vertical e toda a massa do sistema move-se uniformemente. Para uma explosão (Figura 4.2), normalmente, o amortecimento é desprezado por ter muito pouca influência no primeiro pico, que é o mais importante numa explosão. Neste caso o sistema de um grau de liberdade é representado apenas pela sua massa e rigidez [50].

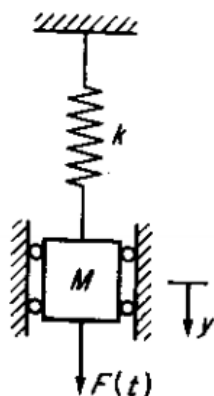


Figura 4.1: Sistema de um grau de liberdade sem amortecimento (adaptado de [50])

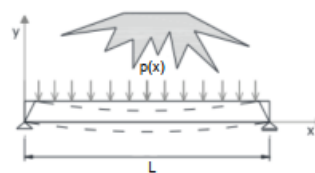


Figura 4.2: Sistema de um grau de liberdade numa explosão (adaptado de [51])

Um painel de vidro irá ter um comportamento muito semelhante ao observado na teoria das lajes de Kirchhoff, a teoria indica que uma laje é um elemento estrutural com uma espessura de dimensão muito inferior às restantes dimensões, sujeito a ações fora do plano, o que causa uma curvatura [52].

4.1.2 Método de Elementos Finitos

O MEF é atualmente bastante utilizado em vários ramos industriais, como a aeronáutica, aeroespacial, a indústria automóvel e Engenharia Civil. Para satisfazer todas estas áreas existe uma grande diversidade de *software* como o IDEAS®, o SAMCEF®, o NASTRAN®, o ABAQUS®, o FIDAP®, o MARC®, o ANSYS®, o ADINA®, o LS-DYNA®, o ASTER® e o CASTEM® [53].

O MEF é utilizado por investigadores de forma a prever o dano no vidro laminado, ou qualquer outro material. Este método mostra-se bastante útil quando, para chegar à solução numérica de um dado problema, é necessário a resolução de equações que são muito complexas ou impossíveis de resolver de forma exata [49].

Todas as informação que podemos obter com o MEF como a compressão, curvatura ou força residual podem ser determinadas experimentalmente, mas realizar constantes campanhas experimentais, tendo em conta todas as opções de laminação existentes, seria demasiado dispendioso economicamente e demoroso. Assim, o MEF tem sido imprescindível para simular o comportamento ao dano do vidro laminado e, desta forma, facilitar a utilização do mesmo em várias indústrias [49].

A disponibilidade de computadores cada vez mais complexos e potentes, tem acelerado a adoção destas análises numéricas por engenheiros estruturais. Soluções de problemas complexos que anteriormente seriam impossíveis de obter, são hoje obtidas com relativa facilidade [50].

4.2 Software Utilizado na Modelação

4.2.1 LS-PrePost

O LS-PrePost é um pré e pós processador avançado, disponível sem necessidade de licença paga com o LS-Dyna. O programa é capaz de importar, editar e exportar ficheiros LS-Dyna, podendo ser operado de forma eficiente e intuitiva nos sistemas operativos Windows, Linux e Macs [54].

4.2.2 LS-Dyna

A origem do LS-Dyna remota ao *software* DYNA3D, desenvolvido nos meados dos anos setenta, pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL). As primeiras aplicações deste *software* foram em análises de tensões de estruturas sujeitas a vários tipos de carga [55, 56]. Este tipo de aplicações requeriam grandes recursos computacionais, para a época, o que levava a que o *software* fosse muito demoroso, e por isso apareceu a necessidade de uma versão mais eficiente [56].

O LS-Dyna foi então projetado para lidar com problemas altamente não lineares, a elevadas velocidades, que possam incluir interações entre sólidos e fluidos [57, 58]. O LS-Dyna é bastante utilizado em várias indústrias, como a automóvel, onde se recorre a este programa para verificar a conceção dos automóveis e prever o seu comportamento em colisões, assim como os possíveis efeitos da mesma nos passageiros. Na aeronáutica, este é utilizado para prever falhas estruturais e dos motores, assim como no estudo referente a colisões das aeronaves com aves [57, 59].

Desde os ataques de 11 de setembro de 2001 em Nova Iorque, que a necessidade de simular explosões no ar aumentou significativamente. O que por si, levou a uma grande evolução na capacidade de simular explosões no LS-Dyna. Tradicionalmente, no método mais utilizado para simular explosões, a pressão causada pelo choque é calculada através de equações empíricas e diretamente aplicada nos elementos da estrutura. Os únicos dados que estas equações empíricas necessitam para definir a explosão, é o peso da carga explosiva e a distância a que esta se encontra da estrutura, não sendo necessário simular o ar entre a explosão e a estrutura, poupando assim muito tempo de computação [60].

Com isto é possível realizar modelos de elementos finitos de estruturas sujeitas a explosões e obter resultados coerentes que correspondam à realidade. [60]. Este método de modelação de explosões não pode ser usado para simular explosões em laboratório que usem tubos de choque. Para ultrapassar essa limitação, é possível simular a explosão através do carregamento da curva diretamente no LS-Dyna.

4.3 Análise Numérica de Painéis de Vidro Laminado

Nesta secção serão apresentados exemplos expostos na bibliografia de vários tipos de modelos numéricos do vidro. Com isto é pretendido justificar o fundamento das escolhas feitas nesta dissertação para as simulações, tendo em conta vários fatores como o grau de complexidade, tempo de computação e precisão dos resultados.

4.3.1 Modelos com elementos sólidos

Tradicionalmente, um modelo de vidro laminado pode ser modelado utilizando modelos com elementos sólidos, que são constituídos por três camadas sólidas unidas que correspondem à constituição do painel de vidro laminado (vidro/PVB/vidro) (Figura 4.3). Estes modelos, são os mais complexos e necessitam de um tempo computacional bastante elevado [61].

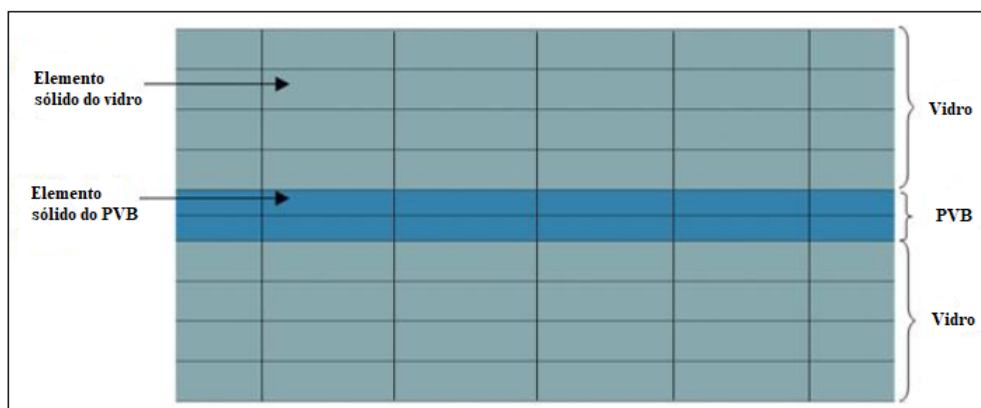


Figura 4.3: Corte de um modelo típico de vidro laminado com elementos sólidos (adaptado de [61])

Esmali et al. [7], em 2021, realizaram um modelo de elemento finitos recorrendo a elementos sólidos de painéis de vidro laminado com vidro recozido. Neste caso, os autores modelaram o vidro recozido como um material frágil (BRITTLE) e a camada intermédia de PVB através do modelo de Johnson-Cook com as propriedades mecânicas descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas estabelecidas no modelo de Esmali et al. [7]

Material	Material do modelo	Propriedades mecânicas	Valor
Vidro	(BRITTLE)	Densidade (kg/m^3)	2600
		Módulo de elasticidade (GPa)	70
		Coefficiente de Poisson	0.22
		Tensão de rotura (MPa)	60
PVB	Johnson-Cook	Densidade (kg/m^3)	1100
		Módulo de elasticidade (GPa)	0.53
		Coefficiente de Poisson	0.485
		A (MPa)	6.72
		B (MPa)	10.6
		C	0.248
		n	0.303
Extensão de rotura (%)	200		

Este modelo é dos modelos mais complexos que se pode realizar quando se trata de painéis de vidro laminado. Foram obtidos bons resultados quando comparados com ensaio experimentais realizados por outros autores, com erros a chegar, no máximo, a 17% [7]. No entanto, é de mencionar que, apesar de todas as vantagens que um modelo como este tem, a elevada capacidade computacional que requer impossibilita que este possa ser usado em trabalhos como o presente.

Hooper et al. [47], em 2012, realizaram um modelo semelhante ao anteriormente descrito, com propriedades mecânicas também semelhantes, mas recorrendo a elementos casca. Os autores notaram que o tempo computacional requerido com os elementos sólidos variava entre as 10 e as 20 horas, o que é um aumento significativo em relação aos modelos com elementos casca que demoravam, utilizando o mesmo computador, entre 20 a 60 segundos.

4.3.2 Modelos com elementos casca

Outra forma, significativamente mais simples, de simular um painel de vidro laminado é através de elementos casca. Nestes modelos, é possível utilizar apenas uma única casca constituída pelo material (MAT_032_LAMINATED_GLASS) que, apesar da sua simplicidade, já foi utilizado para analisar painéis de vidro laminado sujeitos a cargas explosivas [61, 62]. A utilização deste tipo de modelo implica a idealização de vários pontos de integração definidos pela espessura de cada componente de painel. Desta forma, cada ponto de integração representa o vidro ou a camada intermédia de PVB [61], o que possibilita caracterizar o comportamento do painel ao longo da sua espessura. Um exemplo da distribuição destes pontos de integração pode ser observado na Figura 4.4.

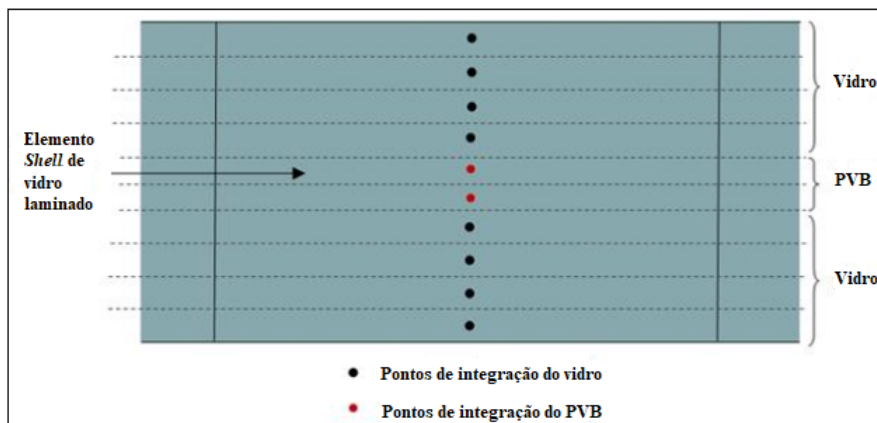


Figura 4.4: Corte de um modelo típico de vidro laminado a 2D (adaptado de [61])

O material (MAT_032_LAMINATED_GLASS) é menos utilizado na bibliografia existente, no entanto, existem outras formas de modelar vidro laminado recorrendo a elementos casca. Uma delas é o modelo realizado por Hooper et al. [47], em 2012, em que os autores modelaram o vidro laminado recorrendo a três elementos casca, dois para as duas camadas de vidro e um para a camada intermédia de PVB. O vidro e o PVB foram simulados com as mesmas propriedades mecânicas utilizadas por Esmali et al. [7], apresentadas na Tabela 4.1, tendo estes autores recorrido também ao modelo de Johnson-Cook para simular a película de PVB.

Hooper et al. [47] realizaram dois modelos com as mesmas propriedades, mas recorrendo num a elementos sólidos e noutra a elementos casca. Assim é possível analisar as limitações que podem existir quando se usa um modelo com elementos casca. Quando se utiliza um modelo com elementos casca é importante ter em conta que estes elementos assumem que existe uma variação linear da extensão em todo o plano da secção. Esta suposição é semelhante à que se faz para as vigas clássicas monolíticas casca [47].

No vidro laminado, esta suposição pode não ser válida devido à diferença entre os módulos de elasticidade entre o vidro e o PVB. Na Figura 4.5, à esquerda, está ilustrada a distribuição da tensão de flexão no vidro laminado, se a variação da extensão no plano for linear. A tensão no PVB não é visível porque é várias ordens de grandeza inferior à tensão sentida no vidro, devido às diferenças no módulo de elasticidade. Se este comportamento linear não se verificar temos, num caso extremo, o PVB a servir apenas para separar as camadas de vidro, apresentando uma distribuição das tensões não linear, como a ilustrada na Figura 4.5, à direita. Neste caso, o painel de vidro não se comporta como um só, cada camada de vidro teria um comportamento independente [47].

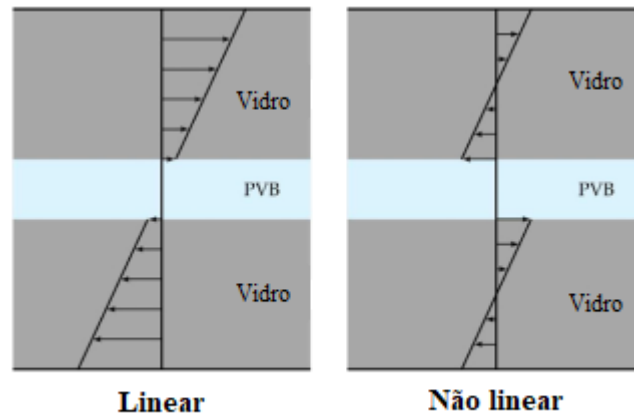


Figura 4.5: Variações das tensões no vidro (adaptado de [47])

Norville et al. [63], em 1998, desenvolveram um modelo de análise numérica onde a variação da extensão ao longo da espessura podia desviar-se da suposição linear. Este teste comprovou que o módulo da secção de uma viga de vidro laminado aproxima-se do de um viga monolítica, com a mesma espessura, quando carregadas com uma carga de curta duração, como é o caso de uma explosão.

Isto indica que a suposição de uma variação da extensão no plano linear ao longo da espessura do elemento casca é válida e, conseqüentemente, prova que o vidro laminado pode ser modelado recorrendo a estes elementos.

Capítulo 5

Programa Experimental

A campanha de ensaios experimentais foi realizada no Campo Militar de Santa Margarida. Os materiais explosivos foram sempre manuseados, transportados e armazenados por militares qualificados, de acordo com as normas de segurança do Exército Português.

O presente estudo enquadra-se no projeto “Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas sujeitas a Explosões” (ProFESEx), que se insere nos Projetos de Investigação e Desenvolvimento (I&D) do Exército Português, ao encargo da Academia Militar, na área tecnológica de Ciências Militares – Técnicas e Tecnologias Militares – Engenharias de aplicação militar.

Estes ensaios têm como objetivo dar início a uma maior campanha experimental para que se possa ter um maior conjunto de dados reais.

Neste capítulo, descrevem-se os diferentes ensaios efetuados, apresentando toda a sua metodologia e procedimentos assim como a motivação dos mesmos e, posteriormente, os resultados obtidos tal como a análise e interpretação dos mesmos.

5.1 Ensaios

Esta campanha experimental procurou analisar a ação da explosão, através da caracterização da pressão incidente de pico, P_{so} , da pressão refletida de pico, P_r , e da aceleração, a , sendo que todos estes parâmetros foram medidos simultaneamente em cada ensaio. Foram realizados seis ensaios experimentais distintos. Numa primeira instância, foi verificado o nível dos danos dos os painéis de vidro com dimensões 2 metros x 1 metros e com um *layout* de 10/1,52/10 milímetros.

Para tal, utilizaram-se cargas de 5 kg de TNT, a 80 centímetros do solo em todos os ensaios, fazendo variar a distância a que se colocavam as mesmas em relação à estrutura de suporte. Assim, é possível avaliar a evolução dos danos com a alteração do valor das distâncias. As condições dos seis ensaios são resumidas na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Condições de cada ensaio realizado

Ensaio	W (kg)	R (m)	Z (m/kg ^{1/3})
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

5.2 *Setup* Experimental e Equipamentos Utilizados

5.2.1 Estrutura de Suporte

A primeira tarefa realizada nesta campanha experimental, foi a idealização de uma estrutura de suporte onde fixar o painel de vidro a utilizar, de forma segura. Para isso, recorreu-se à ferramenta de modelação Autodesk AutoCad®. A estrutura de suporte foi projetada como um perfil metálico SHS 200x8 num aço S355 J2H que, por sua vez, é fixado em duas paredes de betão armado. Na Figura 5.1 é possível observar a vista global do *setup*.

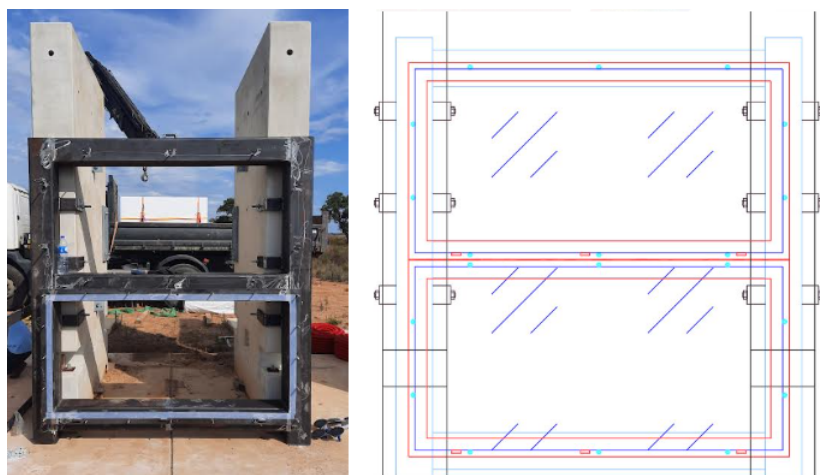


Figura 5.1: *Setup* experimental real (esquerda) e em *AutoCad* (direita)

5.2.2 Sistema de Fixação

O objetivo do sistema de fixação utilizado nesta campanha experimental é a mitigação do contacto direto entre o painel de vidro laminado e o sistema de suporte, assim como garantir que más fixações do painel não afetam os resultados obtidos.

Os sistemas de fixação podem ser classificados como mecânicos ou aderentes sendo que, os primeiros, podem ser divididos entre mecânicos aparafusados e mecânicos de aperto, sendo o último o tipo de sistema utilizado nesta campanha de ensaios [64].

Fixações mecânicas por aperto são normalmente utilizadas em elementos de vidro sem funções estruturais importantes [65].

Nesta campanha experimental, foram utilizadas duas chapas de 15 milímetros que fixam o painel de vidro ao longo das suas quatro extremidades. Este sistema é, então, um sistema de fixação contínuo. As chapas são fixas à estrutura de suporte através de varões roscados de M12 classe 8.8. e, o aperto entre elas, é feito através de varões roscados M10 classe 8.8 que estão soldados à chapa traseira. Para evitar que o vidro esteja em contacto direto com as chapas metálicas, e assim não haver possibilidade de rotura devido a algum impacto com o sistema de fixação, as chapas foram revestidas com uma borracha em toda a superfície que estivesse em contacto com o painel de vidro, este revestimento pode ser observado na Figura 5.1. Na Figura 5.2 é possível observar o sistema de fixação utilizado.

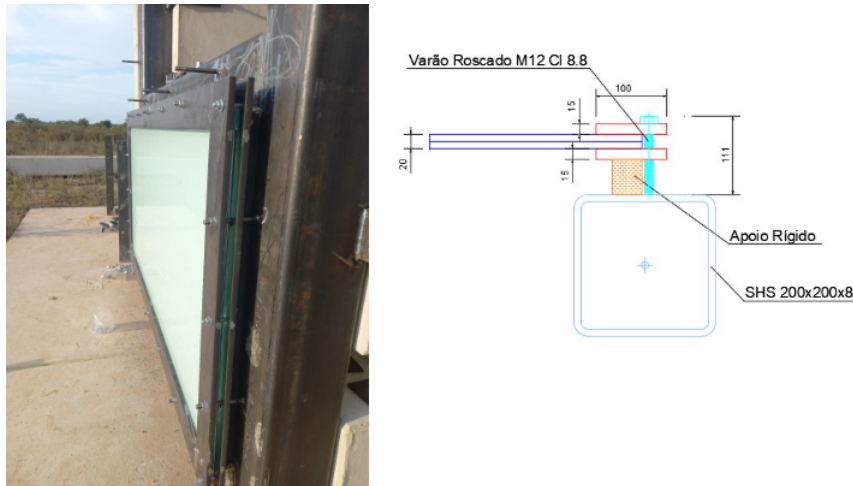


Figura 5.2: Sistema de fixação utilizado (esquerda) e pormenor em *Autocad* (direita)

5.2.3 Sensor de Pressão Incidente

Para medir a pressão incidente, foi utilizado um sensor de ponta aérea ICP® modelo 137B24B. Este tipo de sensor tem a forma de uma lápis com uma das faces achatadas, que tem de estar virada para cima. É nesta face achatada que se encontra o elemento de deteção da pressão incidente, este sensor incorpora também sensores de quartzo, com compensação de aclaração e microelétrica ICP® integral, que auxilia a condução do sinal captado da explosão através de longos cabos. O formato do sensor permite que a onda de choque avance suavemente pelo sensor, minimizando assim a distorção dos resultados. Com este sensor é possível medir a pressão incidente causada pela explosão e, assim, permite-nos determinar a pressão incidente de pico, o impulso total, a onda de choque e o tempo de chegada. Estes sensores apresentam um tempo de resposta de microssegundos, com uma frequência de ressonância acima dos 400 kHz [66]. Na Tabela 5.2 estão expostas as características do sensor ICP® modelo 137B24B.

Tabela 5.2: Características do sensor de pressão ICP® modelo 137B24B [66]

Sensibilidade ($\pm 15\%$) [mV/kPa]	Intervalo de medição ($\pm 5V$) [kPa]	Pressão máxima [kPa]	Tempo de chegada (incidente) [μs]
2.90	1 724	34 474	≤ 6.5

O sensor e a carga explosiva têm que estar à mesma distância do painel de viro, e perpendicularmente entre a carga explosiva e o painel (Figura 5.3). Para fixar os sensores, recorreu-se a um bloco de betão armado deitado no solo onde se fixou um perfil metálico e nesse perfil acoplou-se o sensor.



Figura 5.3: Posicionamento do sensor de pressão incidente

5.2.4 Sensor de Pressão Refletida

Para a medição da pressão refletida na estrutura, utilizaram-se três sensores de pressão ICP® modelo 113B24 (*general purpose ICP*) (Figura 5.4). Estes sensores encontram-se atravessados pela estrutura de suporte metálica, através de furações na parte superior e na parte inferior da estrutura, para possibilitar a medição da pressão na parte superior e inferior no painel. Isto permite estimar a pressão sentida no centro do painel e, exatamente no centro da estrutura de suporte. Estes sensores são aparafusados, através de uma rosca própria do sensor, na superfície metálica que fixa o painel de vidro à estrutura, de forma a que a cabeça do sensor coincida com a superfície exterior dessa mesma superfície metálica (Figura 5.5).



Figura 5.4: Sensor de pressão ICP® modelo 113B22

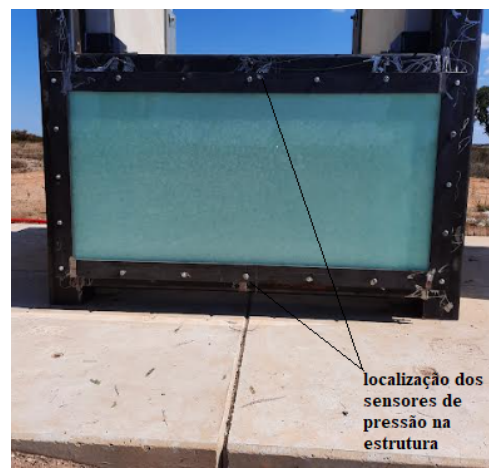


Figura 5.5: Localização dos sensores de pressão no *setup*

O sensor utiliza um elemento piezométrico de quartzo, com compensação de aceleração acoplado a um seguidor de fonte eletrônica. A frequência natural elevada deste equipamento, faz com que a faixa

de frequência utilizável nestes sensores seja extremamente ampla, mais de 100 kHz, com um tempo de resposta bastante rápido, de aproximadamente 1 milissegundo [67]. Na Tabela 5.3, estão expostas as características do sensor de pressão ICP® modelo 113B22.

Tabela 5.3: Características do sensor de pressão ICP® modelo 113B24 [67]

Sensibilidade ($\pm 10\%$) [mV/kPa]	Overrange útil ($\pm 10V$) [kPa]	Pressão máxima [kPa]	Tempo de chegada [μs]
0.725	13 790	68 950	≤ 1

5.2.5 Acelerómetro

Para a medição da aceleração causada no painel de vidro pela onda de choque da explosão, foi utilizado um acelerómetro ICP® modelo 350D02 enroscado numa porca colada com silicone na traseira do painel (Figura 5.6). Para uma correta fixação do acelerómetro, foi necessário assegurar que a superfície à qual este foi acoplado era plana e suave, sem qualquer tipo de detritos. Foi colada a porca, à qual o acelerómetro foi enroscado, recorrendo a silicone, deixando o mesmo secar durante várias horas protegido de elevados níveis de humidade, garantindo que o acelerómetro não se descola durante o embate da onda de choque. Este método de colocação do acelerómetro é um dos métodos recomendados pelo manual técnico do acelerómetro como pode ser observado na Figura 5.7 [68].



Figura 5.6: Acelerómetro acoplado ao painel

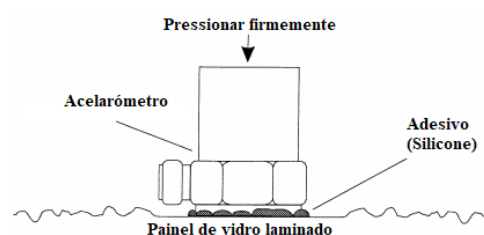


Figura 5.7: Método de fixação do acelerómetro (adaptado de [68])

Na Tabela 5.4 é possível observar algumas das características deste sensor.

Tabela 5.4: Características do acelerómetro ICP® modelo 350D02 [68]

Sensibilidade ($\pm 30\%$) [mV/m/s ²]	Intervalo de medição [m/s ²]	Intervalo de frequência ($\pm 1dB$) [Hz]	Intervalo de temperatura (°C)
0.01	$\pm 490\ 000$	4 a 10 000	-23 a 66

5.2.6 Material Explosivo

O explosivo utilizado nesta campanha de ensaios foi o TNT, um explosivo sólido de cor amarela, sem odor, que não se encontra naturalmente na natureza. É fabricado combinando tolueno com uma mistura de ácido nítrico e sulfúrico, possui um ponto de ebulição de 240 C° (nesta temperatura este explode),

e um ponto de fusão de 80,1 C°. O TNT é dos explosivos mais utilizados do mundo para fins militares, muito devido à sua insensibilidade ao choque e à fricção [69].

A carga explosiva utilizada era composta por cinco blocos, de um quilograma cada, com uma forma paralelepipedal que foram ligados entre si da forma que se encontra ilustrada na Figura 5.8. Depois de preparada a carga, esta foi colocada à distância pretendida da estrutura, que continha o painel de vidro, sempre por militares devidamente treinados para o manuseamento de explosivos. De seguida, colocou-se o detonador no explosivo (Figura 5.9) e, por fim, o mesmo foi detonado através de um explosor, (Figura 5.10) depois de todos os envolvidos nos ensaios se encontrarem a uma distancia segura da explosão.



Figura 5.8: Carga explosiva Figura 5.9: Cordão detonador Figura 5.10: Explosor *wireless*

5.3 Resultados Obtidos

Como anteriormente referido, esta campanha de ensaios incidiu sobre a medição da pressão incidente, pressão refletida e aceleração. Neste capítulo, são apresentados os resultados qualitativos desta campanha, assim como a avaliação da sua dispersão através da incerteza relativa.

5.3.1 Pressão Incidente e Refletida

Os dados obtidos da pressão incidente e pressão refletida foram analisados e filtrados recorrendo à equação modificada de Friedlander (Equação 2.1). Para analisar os dados, foi necessário obter os parâmetros da equação modificada de Friedlander: a pressão incidente de pico, P_{so} , para os dados da pressão incidente, a pressão refletida de pico, P_r , para os dados de pressão refletida, o coeficiente de decaimento, b , e a duração da fase positiva, t_0^+ . Para cada uma das distâncias reduzidas ensaiadas foram utilizados dois sensores de pressão incidente, e dois sensores de pressão refletida. Assim, é possível combater possíveis erros de medição num dos sensores. Quando os valores medidos em ambos os sensores são semelhantes, considera-se que ambos mediram coerentemente as pressões, e determina-se a média dos dois valores medidos pelos dois sensores. Quando o valor medido por um sensor é muito diferente do valor medido pelo outro sensor, exclui-se o valor que claramente está incorreto, e assume-se apenas os dados obtidos por um dos sensores .

Estes parâmetros podem ser observados nas Tabelas 5.5 e 5.6. Na Tabela 5.6, não constam os resultados dos ensaios a 12 metros e a 6 metros, porque os sensores não mediram com sucesso para essas distâncias.

Tabela 5.5: Parâmetros da equação de Friedlander para a pressão incidente

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 5.6: Parâmetros da equação de Friedlander para a pressão refletida

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

Nas tabelas anteriores, é possível observar que existem valores de pressão de pico e duração da fase positiva que não são coerentes. Como estamos sempre perante a mesma carga explosiva, é de esperar que a pressão de pico seja cada vez maior, e a duração da fase positiva seja cada vez menor, à medida que a carga se aproxima do painel de vidro, ou seja à medida que a distância reduzida diminui. No entanto, é possível observar que isso nem sempre acontece: a pressão refletida de pico a 9 metros é inferior à pressão incidente de pico a 10 metros, e a duração da fase positiva é maior a 9 metros do que a 10 metros. De forma a compreender melhor a ação que o painel de vidro está sofrer, determinam-se os impulsos associados às pressões e durações da fase positiva obtidas.

Nas Tabelas 5.7 e 5.8, é possível observar a pressão de pico e os impulsos obtidos pela equação de Friedlander, para as pressões incidentes e pressões refletidas, respetivamente, dos ensaios realizados juntamente com os dados previstos por Kingery & Bulmash (K&B). Os impulsos foram calculados através da Equação 2.2, descrita na Secção 2.3, apenas foram contabilizados os impulsos positivos nesta análise, uma vez que o seu efeito é bastante mais significativos numa estrutura, sendo que a fase negativa tende a ser ignorada neste tipo de estudos [18].

Tabela 5.7: Pressões e impulsos incidentes registados e estimativas de K&B

W (kg)	R (m)	P_{so} (kPa)	P_{so} (K&B) (kPa)	Variação (%)	I_{so} (kPa.ms)	I_{so} (K&B) (kPa.ms)	Variação (%)
5	12	55.85	24.80	125.20	217.00	74.30	192.06
5	10	52.10	33.10	57.40	253.82	88.00	188.43
5	9	99.53	39.50	151.40	261.35	96.80	169.99
5	7	155.25	62.10	150.00	285.93	120.90	136.50
5	6	140.37	83.80	67.51	214.12	138.30	54.82
5	5	238.85	122.10	95.62	320.50	162.20	97.60

Tabela 5.8: Pressões e impulsos refletidos registados e estimativas do K&B

W (kg)	R (m)	P_r (kPa)	P_r (K&B) (kPa)	Variação (%)	I_r (kPa.ms)	I_r (K&B) (kPa.ms)	Variação (%)
5	10	150.82	74.70	101.90	320.99	180.70	77.64
5	9	126.62	91.00	39.14	370.10	202.90	82.41
5	7	267.65	153.90	73.91	427.86	268.60	59.29
5	5	748.53	354.20	111.33	938.24	395.20	137.41

Nos impulsos calculados pode-se agora observar que, sem ser para o caso dos 6 metros, existe um seguimento lógico entre a evolução dos valores do impulso incidente e refletido e a redução da distância reduzida. No entanto, é possível observar que os valores obtidos pelo método experimental, quer para as pressões quer para os impulsos, são consideravelmente superiores aos valores estimados por Kingery & Bulmash.

Uma forma de verificar se a pressão refletida obtida é coerente com a respetiva pressão incidente, é recorrendo à Equação 2.11, descrita na Secção 2.3.1, onde através da pressão incidente de pico obtida no ensaio experimental e a pressão atmosférica, que para este efeito considera-se 101 [kPa], é possível calcular a pressão refletida de pico, que lhe deveria corresponder, e comparar com a pressão refletida de pico obtida. É também sabido que, é possível igualar o rácio da pressão refletida de pico com a pressão incidente de pico com o rácio do impulso refletido de pico e o impulso incidente de pico, como está demonstrado na Equação 2.13 na Secção 2.3.1. Ao realizarmos estes rácios com os valores obtidos nos ensaios experimentais podemos também verificar se os resultados são coerentes entre si. A Tabela 5.9 demonstra os resultados destes dois métodos.

Tabela 5.9: Métodos de verificação da coerência dos resultados

W (kg)	R (m)	P_{so} (kPa)	P_r previsto pela equação (kPa)	P_r medido (kPa)	Variação (%)	P_r/P_{so}	I_r/I_{so}
5	10	52.10	125.65	150.82	16.69	2.89	1.26
5	9	99.53	272.76	126.62	115.41	1.27	1.42
5	7	155.25	478.22	267.65	78.41	1.72	1.50
5	5	238.85	839.59	748.53	12.17	3.13	2.93

Os valores apresentados na Tabela 5.9, têm erros significativos nas medições dos sensores utilizados visto que se observa uma variação bastante elevada entre a pressão refletida, obtida pela Equação 2.11, e a pressão obtida no sensor nos ensaios a 9 e a 7 metros, passando, no caso do ensaio a 9 metros, os 100% de variação. Nos ensaios a 10 e 5 metros esta variação é bastante mais aceitável no entanto, para o ensaio a 10 metros obtém-se uma diferença significativa entre os rácios das pressões de pico, e dos impulsos quando estes deveriam ser, de acordo com a Equação 2.13, semelhantes. A variação destes valores prova que, apesar da variação entre a pressão refletida de pico prevista pela equação, e a pressão refletida de pico medida ser relativamente reduzida, o problema não está nas pressões de pico existe, mas sim no tempo de duração da fase positiva que influencia os impulsos e faz com que o rácio seja tão diferente.

Nos restantes ensaios, a diferença entre os rácios não é tão acentuada. O que indica que, qualquer problema na medição das pressões de pico pode ter sido compensado com mudanças na duração da fase positiva, em relação ao previsto, que por consequência faz com que o impulso compense os erros

na medição das pressões de pico.

5.3.2 Aceleração

A medição da aceleração foi realizada recorrendo a um acelerómetro acoplado na face do painel de vidro laminado contrária à explosão. As acelerações máximas medidas pelos sensores podem ser observadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Valores da aceleração máxima

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

É importante referir que não se acoplou o acelerómetro no painel ensaiado a 10 metros, uma vez que este foi o primeiro ensaio que se realizou. Neste ensaio tentou utilizar-se a câmaras de alta velocidade colocadas na retaguarda da estrutura de suporte do vidro, de forma captar toda a movimentação do painel de vidro, e assim retirar diretamente o valor do deslocamento máximo. Isto mostrou-se impossível, uma vez que clarão causado pela explosão ofuscou completamente a câmara.

Ao analisar as acelerações máximas é possível observar um problema semelhante ao das pressões de pico e impulsos, em que a aceleração não varia de acordo com o que seria de esperar. Seria expectável que a aceleração aumentasse à medida que a distância reduzida diminui. Este fenómeno é visível no ensaio a 12 metros, onde a aceleração máxima deveria ser inferior à aceleração máxima medida no ensaio a 9 metros, e no ensaio a 7 metros onde a aceleração máxima deveria estar compreendida entre as acelerações máximas obtidas no ensaio a 9 metros e no ensaio a 6 metros.

O sinal retirado dos acelerómetros tem uma configuração como a que está ilustrada na Figura 5.11, onde pode ser observado um pico muito elevado na vibração do painel de vidro seguida de uma estabilização.

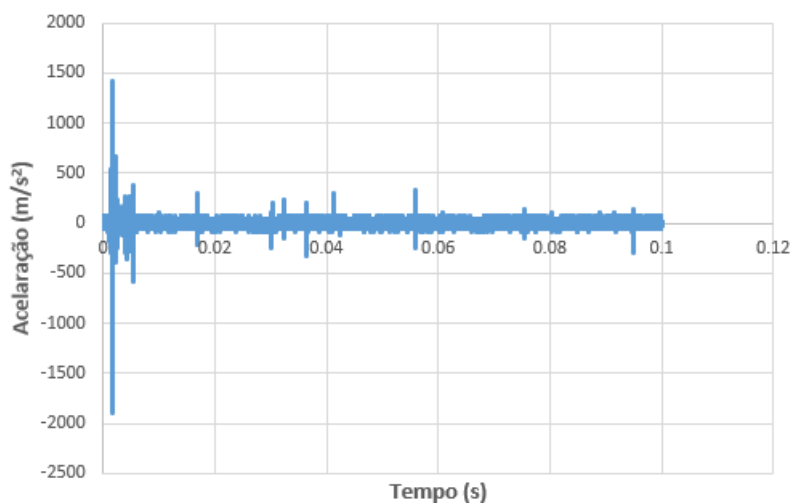


Figura 5.11: Resultado experimental da aceleração em função do tempo com uma carga de 5kg a 9m

De modo a obter melhores resultados, é necessário realizar uma campanha experimental mais extensa. Assim, será possível confirmar, ou melhorar, os dados obtidos de forma a ter-se a certeza que os mesmos estão completamente corretos. Para tal era necessário mais tempo do que o disponível para a realização desta dissertação.

5.3.3 Análise Visual dos Danos

Uma parte também importante desta campanha experimental é a análise visual dos danos causados pela explosão ao painel de vidro e se esta correspondia ao expectável.

Recorrendo aos dados do UFC 3-340-02 é possível, através dos gráficos que relacionam a pressão refletida de pico com a duração de ação dessa mesma pressão para o vidro temperado, ter uma estimativa de qual a distância reduzida necessária para haver fraturas pelo menos na primeira lâmina de vidro do painel. Como se considera a rotura do vidro sem extensão do PVB, é possível recorrer aos gráficos de um painel de vidro temperado de espessura equivalente ao painel de vidro laminado, que neste caso seria a maior dimensão que existe no UFC 3-340-02 de aproximadamente 19 milímetros. Utilizando a formulação de Kingery & Bulmash, é possível ver a que a carga, distância, pressões de pico e durações dadas pelo UFC 3-340-02 correspondem, obtendo assim um gráfico como o ilustrado na Figura 5.12. Onde, para uma carga de 5 kg, é possível ver a que distância a que o painel de vidro é suposto começar a fraturar.

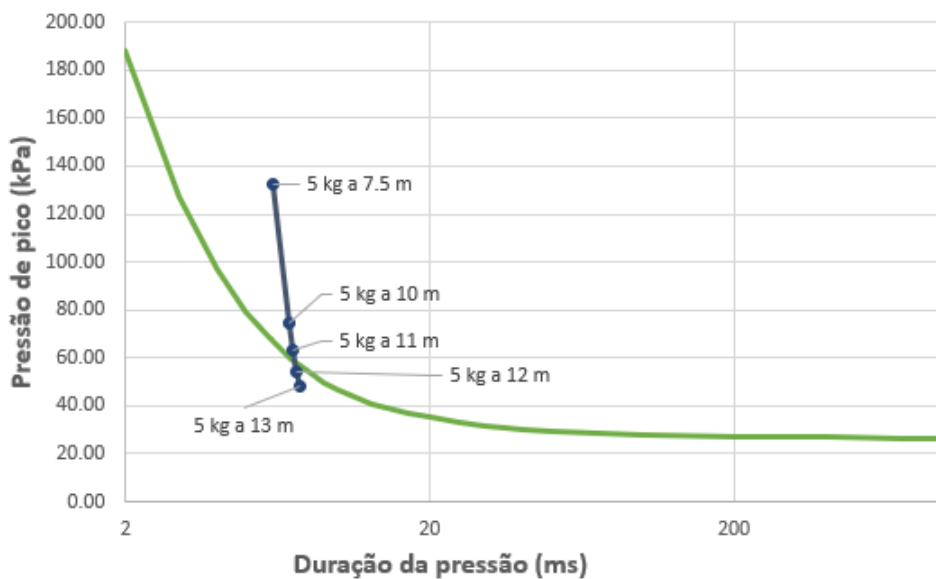


Figura 5.12: Verificação da carga necessária para a rotura do vidro através do gráfico pressão-duração do UFC

No gráfico da Figura 5.12, é possível ver onde a linha obtida com as pressões causadas pela carga de 5 kg a diferentes distâncias, cruza com as curva pressão-duração para um painel de vidro temperado de 19 milímetros retirada do UFC. Estas curvas pressão-duração, tal como as mais conhecidas curvas pressão-impulso, podem ser utilizadas para estimar a carga necessária para ocorrer um certo dano, que depende do critério escolhido. Para ver quando o vidro fratura, basta ver se o ponto observado no gráfico está a cima da curva. Então, observando a interceção da linha com a curva é possível concluir que a colocação da carga de 5kg a 10 metros vai causar a rotura do painel de vidro e, se a mesma carga for colocada a 12 metros, já não é suposto observar-se quaisquer danos no vidro. Nesta campanha não se considerou colocar a carga a 11 metros uma vez que o ponto encontra-se praticamente em cima da curva e, por isso, optou-se pelos 10 metros para garantir que o vidro entrava em rotura. Utilizou-se

também o modelo de elementos finitos, exposto no Capítulo 6, para verificar se as expectativas do UFC eram corretas. As diferenças entre o que se obteve no modelo de elementos finitos, as expectativas do UFC, e dos resultados da campanha experimental estão explicados no Capítulo 6.

O seguinte objetivo foi encontrar uma distância que fraturasse as duas lâminas de vidro do painel. Para isso, reduziu-se gradualmente a distância até à distância de 5 metros, onde este critério de ruptura se verifica. Na Tabela 5.3.3, é possível observar o nível de danos observados nos seis ensaios realizados.

Tabela 5.11: Resumo dos danos observados nos ensaios

W (kg)	R (m)	Dano observado	UFC	MEF
5	12	Parte uma lâmina	Não parte	Não parte
5	10	Parte uma lâmina	Parte	Parte as duas lâminas
5	9	Parte uma lâmina	Parte	Parte as duas lâminas
5	7	Parte uma lâmina	Parte	Parte as duas lâminas
5	6	Parte uma lâmina	Parte	Parte as duas lâminas
5	5	Parte as duas lâminas	Parte	Parte as duas lâminas

Analisando a Tabela 5.3.3, observa-se que a carga a 12 metros fez danos à primeira camada de vidro, quando anteriormente foi mencionado que isso não devia acontecer. Quando se analisou o vidro após a explosão, e depois de todas as medidas de segurança terem sido tomadas, observou-se que o padrão de fraturas do vidro não era o esperado para uma carga plana originada por uma explosão, mas sim que tinha mais semelhanças com o padrão causado pelo embate de um projétil a alta velocidade no painel; isto é provavelmente causado por pedras expelidas do solo pela explosão em direção ao painel de vidro. Na Figura 5.13, pode-se observar esse padrão onde se claramente se observa que as fissuras têm um ponto de convergência, o que é típico de um embate de projétil e não de uma carga distribuída por todo o painel. Na Figura 5.14, pode-se também observar que apenas um dos vidros do painel entrou em ruptura.



Figura 5.13: Ponto de convergência das fissuras obtidas no ensaio a 12 metros



Figura 5.14: Perfil do painel com um dos vidros partidos

A medida tomada para mitigar a projeção dos projéteis contra o painel foi colocar um geotêxtil no solo, entre o painel de vidro e a carga explosiva, como pode ser observado na Figura 5.15.



Figura 5.15: Setup do ensaio completo com o geotêxtil

Os resultados visuais dos ensaios foram semelhantes para todas as outras distâncias até aos 5 metros, onde se observou que ambas as lâminas de vidro entraram em rotura, deixando a integridade do painel dependente da camada intermédia de PVB. Isto indica que, tendo em conta as pressões medidas pelos sensores, o painel de vidro ensaiado fratura por completo quando em si atua uma pressão refletida de pico de 748,53 kPa e um impulso de 938,24 kPa.ms, que, como mencionado anteriormente, são valores significativamente superiores do que os que seriam esperados quando se consultam as normas teóricas.

Capítulo 6

Caso de estudo - Análise Numérica

Neste capítulo pretende-se avaliar, através de um modelo numérico, o comportamento do painel de vidro ensaiado na campanha experimental.

6.1 Descrição do Caso de Estudo

O presente caso de estudo tem como objetivo a realização de uma campanha de ensaios experimental de painéis de vidro laminado sujeitos a uma explosão.

O painel de vidro laminado é constituído por duas camadas de 10 milímetros unidas por uma camada intermédia de PVB de 1.52 milímetros com 2 metros de largura e 1 metro de altura. Este painel de vidro é fixado à estrutura de suporte, através de um sistema de fixação mecânico, que fixa o vidro através de duas chapas metálicas aparafusadas por varões roscados como se encontra descrito na Secção 5.3.2.

Os resultados destes ensaios são apoiados por métodos numéricos, que são utilizados para traçar curvas de pressão-impulso para diferentes disposições de painéis de vidro laminado.

6.2 Caracterização do Modelo

Os modelos de elementos finitos realizados nesta dissertação foram obtidos recorrendo ao programa de modelação numérica LS-Dyna.

6.2.1 Modelo do Painel de Vidro Laminado

O modelo realizado para esta dissertação foi obtido utilizando três superfícies do tipo casca que correspondem às duas lâminas de vidro e à camada intermédia de PVB. Tirou-se proveito da simetria do painel de vidro laminado para modelar apenas um quarto do painel total, assumindo uma pressão uniforme em todo o painel, o que possibilita a utilização das suas condições de simetria no eixo x e no eixo y. O sistema de coordenadas do modelo foi colocado no centro do painel com o eixo x e y a corresponder às direções do painel, e o eixo z a corresponder à direção da aplicação da carga, como pode ser observado na Figura 6.1.

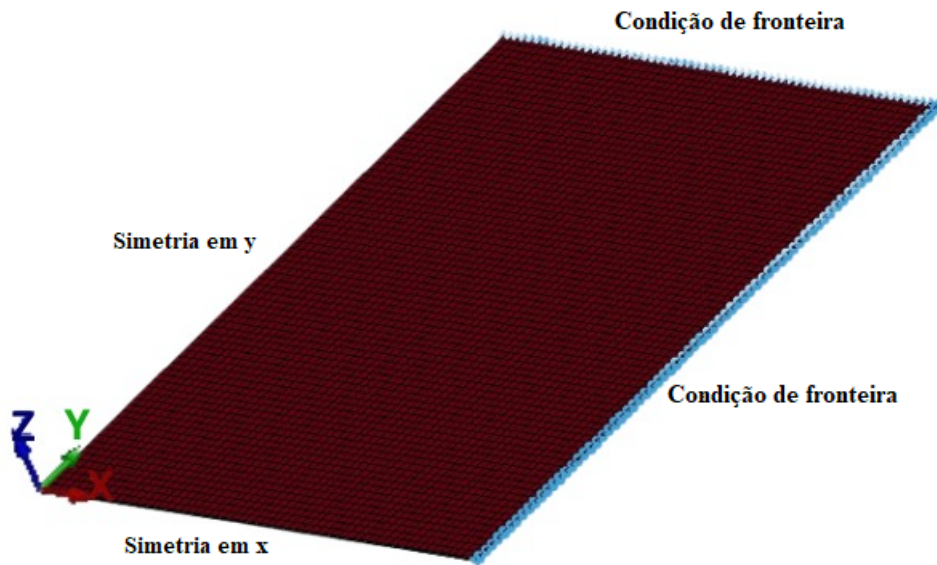


Figura 6.1: Modelo simplificado de um quarto do painel de vidro laminado

As condições de fronteira do painel consistem no painel encastrado nos seus 4 bordos através do sistema de fixação anteriormente exposto, que no modelo realizado foram simplificados através da ferramenta (BOUNDARY_SPC) do LS-Dyna, que nos permite bloquear ou libertar as rotações e deslocamentos dos nós. Como na realização do modelo, tirou-se proveito da simetria do painel o que vamos obter na realidade são dois bordos exteriores encastrados totalmente e dois bordos interiores com encastramentos deslizantes.

Estas condições de fronteira foram utilizadas numa fase inicial do desenvolvimento do modelo do vidro, antes de lhe ser adicionado o modelo do sistema de fixação, que será explicado posteriormente, removendo a necessidade de definição destas condições de fronteira.

A carga da explosão é modelada utilizando a *keyword* (DEFINE_CURVE), recorrendo à simplificação triangular ilustrada na Figura 2.14 na Secção 2.3.2, em vez da opção dada pelo LS-Dyna para explosões, a *keyword* (LOAD_BLAST_ENHANCED). Esta abordagem foi adotada uma vez que se obtêm melhores resultados para o deslocamento máximo ao centro quando se utiliza a *keyword* (DEFINE_CURVE) do que quando se utiliza a *keyword* (LOAD_BLAST_ENHANCED) nos resultados obtidos por outros autores, como poderá ser observado mais à frente.

O comportamento do vidro é linear e elástico com um limite de rotura por tração, conhecido como comportamento frágil [70]. Por esta razão, utilizou-se o material (MAT_001_ELASTIC) do LS-Dyna para simular as duas lâminas de vidro na modelação, juntamente com as características apresentadas para o vidro, e para o PVB, que podem ser observadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Propriedades mecânicas utilizadas na modelação do vidro.

Propriedade	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	2600	72	0.22

Como pode ser observado na Tabela 6.1, o material (MAT_001_ELASTIC) não inclui tensão de cedência. Segundo o manual de LS-Dyna [71], quando se utiliza uma material que não tem este tipo de parâmetro de rotura deve-se acrescentar (MAT_ADD_EROSION), onde se pode incluir este tipo critério de rotura. De acordo com a pré-norma europeia prEN 16612 [43], o valor da tensão de cedência do

vidro temperado é de 120 MPa, e a sua extensão máxima na rotura, calculada através da Equação 3.1, tem um valor de 0.0016667.

Na modelação da casca do vidro, utilizou-se a formulação (*fully integrated shell*) (ELFORM=16) que alivia o bloqueio dos elementos automaticamente, melhorando o comportamento à flexão no plano, retirando a necessidade de utilizar a *keyword* (HOURGLASS) no LS-Dyna. Esta formulação, para um elemento casca constituído por 4 nós, é baseada na suposição cinemática de Reissner-Mindlin e tem, para o sistema de coordenadas local de coordenadas, 5 graus de liberdade que correspondem aos deslocamentos em x, y e z e às rotações em x e y representados na Figura 6.2 [55, 72].

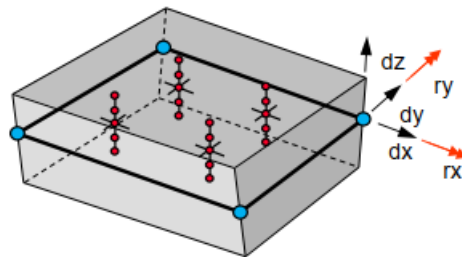


Figura 6.2: Ilustração do elemento casca e respetivos graus de liberdade (adaptado de [72])

A película intermédia de PVB foi simulada com o material (MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK), com as propriedades mecânicas observadas na Tabela 6.2 que é usualmente utilizado em casos em que o material está sujeito a uma carga dinâmica como um impacto a alta velocidade ou uma explosão [47, 73].

Tabela 6.2: Propriedades mecânicas utilizadas na modelação do PVB [47]

Propriedade	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
PVB	1100	0.53	0.485

Este material é baseado no modelo desenvolvido por Johnson e Cook [73], em 1985, de forma a descrever os efeitos de elevados índices de extensão e da temperatura na deformação plástica de metais. No entanto este modelo serve para a modelação do PVB após a rotura inicial do vidro devido ao facto deste modelo ter sido realizado para plasticidade, e se se considerar que o tempo de recuperação do material é ordens de grandeza superior ao tempo de duração da explosão podemos considerar que vidro laminado partido é essencialmente plástico dentro da escala de tempo que interessa, apesar de não o ser se analisarmos durante mais tempo [47].

O modelo de Johnson-Cook é então baseado na Equação 6.1 que demonstra a tensão necessária para atingir este fluxo plástico [73].

$$\sigma = (A + B\varepsilon)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*n}) \quad (6.1)$$

Onde ε corresponde à extensão plástica, ε^* é o índice da extensão plástica que corresponde à razão entre o índice de extensão e um índice de extensão de referência (é, por isso, adimensional), e T^* corresponde à temperatura. Os efeitos da temperatura podem ser ignorados, eliminando o terceiro parênteses da Equação 6.1 [73]. A Equação 6.1 mostra também as incógnitas A, B, n, C que são constantes características de cada material, que para o caso deste painel de vidro laminado têm os valores apresentados na Tabela 6.3 [47, 73].

Tabela 6.3: Constantes do modelo de Johnson-Cook utilizadas [47, 74]

A (MPa)	B (MPa)	C	n
6.72	10.6	0.248	0.303

Na modelação da casca que simula a película de PVB, recorreu-se à formulação (*Fully integrated Belytschko-Tsay membrane*) (ELFORM=9). Esta formulação é mais dispendiosa no que toca a tempo de computação quando comparada à formulação de Belytschko-Tsay (ELFORM=2), mas no entanto é a mais recomendada quando estamos perante um material em que a rigidez à flexão é insignificante, como é o caso de PVB, onde se pretende que este seja completamente flexível [75]. Tanto os vidros como o PVB foram modelados com uma malha constituída por elementos quadrangulares de 10 milímetros. Na Figura 6.3, é possível observar as dimensões destes elementos assim como a disposição das cascas e ao que elas correspondem.

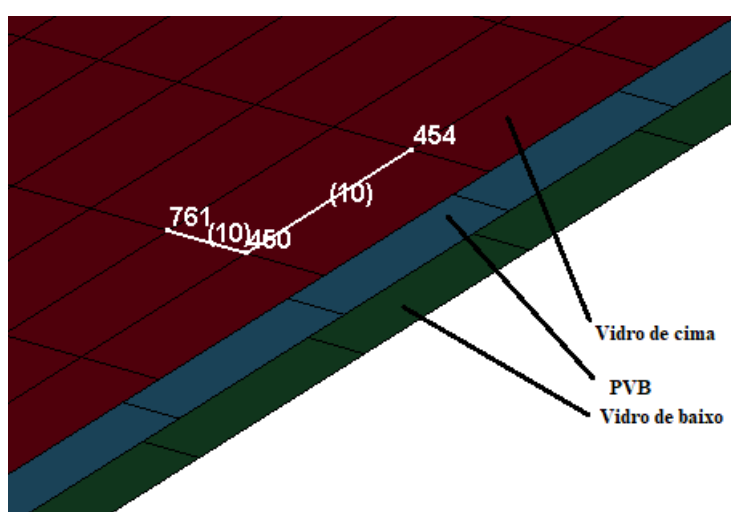


Figura 6.3: Disposição dos elementos casca do modelo

Como na elaboração deste modelo foram utilizados três elementos casca no LS-Dyna, é necessário também modelar o contacto entre ambas as camadas de vidro e a camada intermédia de PVB. Para isso, foi utilizado o contacto (TIED_SURFACE_TO_SURFACE_OFFSET).

6.2.2 Chapas de Fixação

As chapas de aço de fixação do painel de vidro à estrutura de suporte, também elas constituídas por um aço S355 J2H foram modeladas recorrendo ao material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC). Esta é uma opção bastante rentável no que toca ao tempo de computação do programa, sendo bastante boa para modelar materiais isotrópicos, como é o caso do aço. Esta opção é viável para a modelação de elementos casca, sólido ou vigas [71]. Na Tabela 6.4 é possível observar as propriedades inseridas no material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC).

Tabela 6.4: Propriedades inseridas no material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC)

Propriedades	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência (MPa)
Valor	7860	210	0.28	355

Este material permite a inclusão dos efeitos de taxas de deformação através do modelo de Cowper Symonds (Equação 6.2), que dimensiona a tensão de cedência através de um fator dependente da taxa de deformação.

$$\left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \cdot \sigma \quad (6.2)$$

Nesta equação, σ corresponde à tensão de cedência inicial. Todos os parâmetros dentro dos parênteses retos são o fator dependente da taxa de deformação em que: $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação e C e P são parâmetros próprios do modelo de Cowper Symonds [71]. Estes parâmetros apresentam-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Parâmetros de de Cowper Symonds Inseridos no material (MAT_003_PLASTIC_KINEMATIC) [74]

Parâmetros	SRC (s ⁻¹) (C)	SRP (P)	FS (Extensão de rotura)
Valor	40.00000	5	0.20

Os elementos das chapas de fixação foram modelados recorrendo à formulação de Belytschko-Tsay (ELFORM=2). Esta formulação é a mais económica, no que toca a tempo de computação, de todas as formulações semelhantes, e é a que se deve utilizar quando não existem características do material que necessitem, obrigatoriamente, de outro tipo de formulação [75]. Os elementos desta formulação têm os mesmos graus de liberdade que os apresentados na Figura 6.2 [72]. Na Figura 6.4 é possível observar a modelação destas chapas de fixação juntamente com a real.

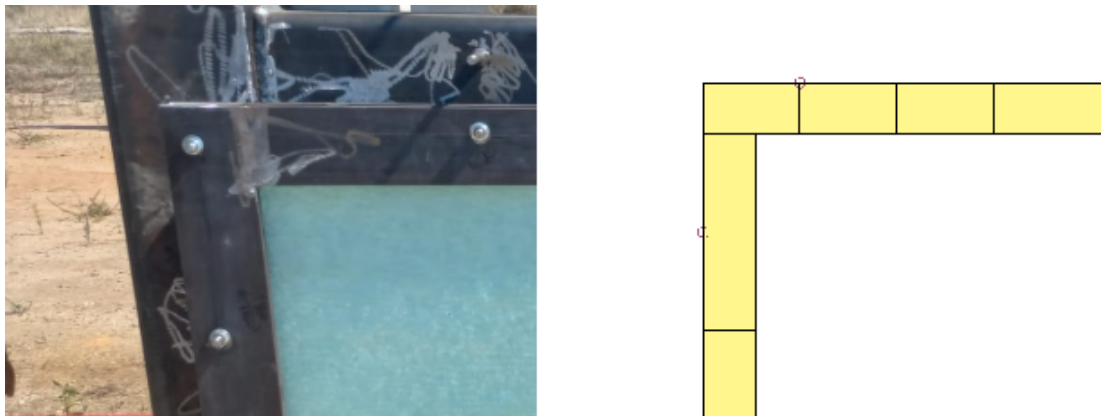


Figura 6.4: Chapas de fixação real (esquerda) e no modelo (direita)

Para a modelação do contacto entre as chapas de fixação com o painel de vidro laminado, foi utilizado o contacto (AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE). Esta *keyword*, faz um tratamento bidirecional

do contacto levando a que o programa verifique se há penetração de uma casca para a outra. Realiza-se, assim um tratamento simétrico do contacto entre as cascas, fazendo com que a definição de qual das superfícies é o *slave* e qual é o *master* seja arbitrária, visto que os resultados serão os mesmos [76].

6.2.3 Perfil SHS 200 x 8

Para modelar o perfil utilizado no *setup* experimental, constituído por um aço S355 J2H, recorreu-se ao material (MAT_020_RIGID) do LS-Dyna, no qual é introduzida a densidade, Módulo de Young e coeficiente de Poisson de forma a definir o material.

Com as características do material definidas, o material (MAT_020_RIGID) proporciona a possibilidade de transformar o elemento casca utilizado para modelar o perfil num corpo rígido e, assim, contornar este elemento de forma a que não lhe seja atribuída qualquer memória no programa para guardar o seu comportamento ao longo do tempo [71]. As propriedades definidas para o perfil SHS 200 x 8 podem ser observadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Propriedades inseridas no material (MAT_020_RIGID)

Propriedades	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson
Valor	7850	210	0.28

6.2.4 Varões Roscados

Na modelação dos varões roscados, de classe 8.8, que têm como finalidade fixar as chapas de aço encostadas ao painel de vidro à estrutura de suporte, e conseqüentemente fixar o painel à estrutura, recorreu-se a um elemento viga. Para realizar esta a ligação entre elementos casca, as duas chapas que prendem o painel de vidro, utilizando um elemento viga, recorre-se ao material (MAT_100_SPOTWELD), como é aconselhado no manual do LS-Dyna [71]. Definiram-se as propriedades para os varões roscados no material (MAT_100_SPOTWELD), que podem ser observadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Propriedades inseridas no material (MAT_100_SPOTWELD)

Propriedades	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson	Tensão de cedência (MPa)
Valor	7850	210	0.28	355

Para o material (MAT_100_SPOTWELD) utiliza-se a formulação (*spotweld beam*) (ELFORM=9) porque efetual a ligação entre dois elementos casca, este material só é aplicável para (ELFORM=9) [71].

Quando se utiliza o material (MAT_100_SPOTWELD), não é necessário modelar qualquer tipo de contacto visto que o elemento *beam* já está ligado a um nó dos elementos casca que este pretende conectar [71]. Isto só é possível porque, como já foi mencionado, a ligação está a ser feita através dos nós das cascas, se fosse através do centro do elemento seria necessário utilizar a *keyword* (CONTACT_SPOTWELD). Na Figura 6.5, é possível então observar a estrutura de fixação juntamente com os varões roscados.

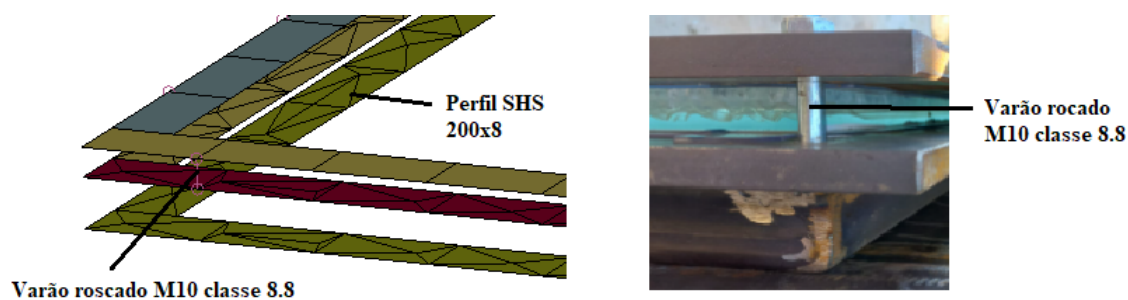


Figura 6.5: Sistema de fixação no modelo (esquerda) e real (direita)

Na Figura 6.6, pode ser observado o sistema de fixação juntamente com o modelo do painel de vidro, que representa o modelo final, com todos os seus componentes identificados.

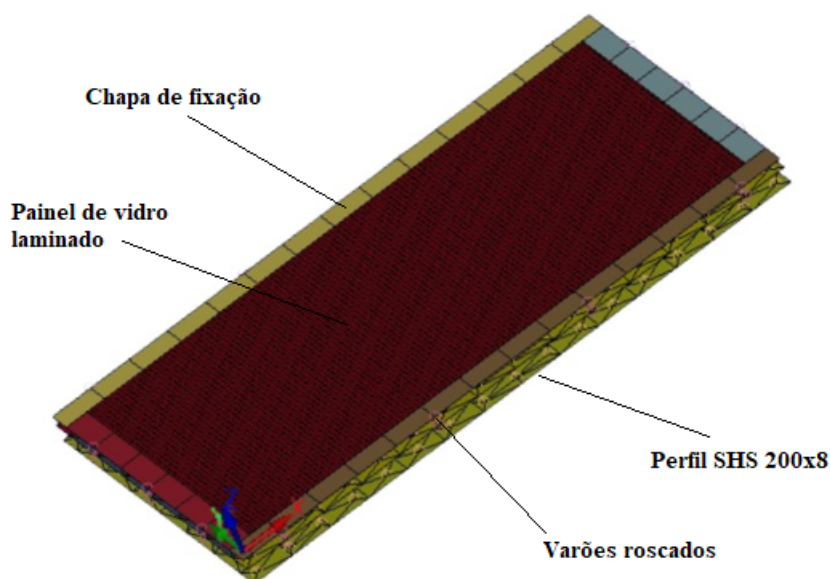


Figura 6.6: Modelo completo

6.3 Validação do Modelo do Vidro

Devido aos problemas encontrados nos dados retirados da campanha experimental, a validação do modelo foi realizada recorrendo a ensaios já expostos na bibliografia. Foram tentadas várias opções de elementos para modelação, nomeadamente as que foram descritas na Secção 4.3. A opção de modelar utilizando elementos sólidos foi excluída desde o início devido ao elevado tempo computacional necessário, que seria incompatível com o tempo disponível para a realização da presente dissertação.

Zhang et al. [46], em 2015, e Hooper et al. [47], em 2012, realizaram ensaios experimentais que podem ser utilizados para validar os modelos realizados nesta dissertação.

Nos ensaios de ambos os autores, todos os painéis eram constituídos por vidro laminado com dimensões de 1.5 m x 1.2 m mas com espessuras diferentes, assim como várias cargas e distâncias de colocação das mesmas. Um resumo das condições dos ensaios de ambos os autores podem é apresentado na Tabela 6.8 e na Tabela 6.9.

Tabela 6.8: Resumo das condições dos ensaios de Hooper et al. [47]

Teste Nº	Layout dos painéis vidro/PVB/vidro (mm)	Dimensões (m x m)	Condições de fronteira	W (TNT) (kg)	R (m)
1	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	15	10
2	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	15	13
3	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	30	16
4	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	30	14

Tabela 6.9: Resumo da condições de ensaio de Zhang et al. [46]

Teste Nº	Layout dos painéis vidro/PVB/vidro (mm)	Dimensões (m x m)	Condições de fronteira	W (TNT) (kg)	R (m)
1	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	10	10
2	3/2.28/3	1.5 x 1.2	Encastrado	10	10
3	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	10	9
4	6/1.52/6	1.5 x 1.2	Encastrado	10	9
5	3/1.52/3	1.5 x 1.2	Encastrado	10	12.3

Para simular as cargas explosivas no LS-Dyna, como foi mencionado anteriormente, é possível recorrer à *keyword* (LOAD.BLAST.ENHANCED) ou a uma simplificação triangular que combina a pressão refletida de pico com duração da fase positiva, através da *keyword* (DEFINE.CURVE), que possa simular o conjunto de carga e distância de cada ensaio. Para verificar qual a melhor opção para o presente trabalho, modelaram-se ambas as opções e compararam-se os resultados obtidos. Na Tabela 6.10 e na Tabela 6.11, é possível observar os valores teóricos, pela formulação de Kingery Bulmash, de pressão refletida e impulso refletido necessários para fazer a simplificação triangular no LS-Dyna. Os valores da duração da fase positiva equivalente são obtidos recorrendo à Equação 2.5.

Tabela 6.10: Valores para realizar a simplificação triangular nos ensaios de Hooper et al. [47]

Teste Nº	Pressão refletida (kPa)	Duração da fase positiva equivalente (ms)	Impulso refletido (kPa.ms)
1	157.3	4.98	391.5
2	90.8	6.43	292.1
3	95	7.95	377.7
4	124.8	7.02	438.1

Tabela 6.11: Valores para realizar a simplificação triangular nos ensaios de Zhang et al. [46]

Teste Nº	Pressão refletida (kPa)	Duração da fase positiva equivalente (ms)	Impulso refletido (kPa.ms)
1	117.2	5.02	293.9
2	117.2	5.02	293.9
3	147.1	4.50	330.7
4	147.1	4.50	330.7
5	78.1	5.98	233.7

Com os valores das tabelas anteriores, é possível calcular uma força que seja concentrada em cada nó do quarto de painel modelado. Para isso, é apenas necessário determinar a razão da pressão refletida de cada ensaio e do número de nós no modelo (4636 para o quarto de painel modelado), e multiplicar pela área do quarto de painel. Com esta informação, é possível obter a força a atuar em cada nó do modelo para cada caso, como está representado na Tabela 6.12. A carga final vai então ser uma curva triangular, cujos pontos correspondem às forças expostas na Tabela 6.12, e as durações da fase positiva equivalentes expostas nas Tabelas 6.10 e 6.11.

Tabela 6.12: Forças a carregar em cada nó para cada ensaio

Teste Nº	Força em cada nó (kN) (Hooper et al.)	Força em cada nó (kN) (Zhang et al.)
1	0.01527	0.01138
2	0.00881	0.01138
3	0.00922	0.01428
4	0.01211	0.01428
5	-	0.00758

Comparando os deslocamentos máximos dos painéis obtidos nos ensaios realizados por Hooper et al. e Zhang et al. e os resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos carregado com os valores teóricos, é possível validar que o modelo realizado consegue prever com alguma certeza o comportamento de um dado painel de vidro laminado. Esta comparação encontra-se exposta na Tabela 6.13.

Tabela 6.13: Comparação dos deslocamentos para validação do modelo

Exemplo	Ensaio	Deslocamento máximo real (mm)	Deslocamento máximo obtido com (LOAD_BLAST_ENHANCED) (mm)	Deslocamento máximo obtido com (DEFINE_CURVE) (mm)	Variação com (LOAD_BLAST_ENHANCED) (%)	Variação com (DEFINE_CURVE) (%)
Hooper et al.	1	349	310	329	11.17	5.73
	2	172	224	236	30.23	37.21
	3	202	165	193	18.32	4.46
	4	265	200	225	24.53	15.09
Zhang et al.	1	275	146	246	46.91	10.5
	2	280	198	204	29.29	27.14
	3	326	175	273	46.32	16.26
	4	230	192	201	16.52	12.61
	5	264	102	184	61.36	30.30

Na Figura 6.7, é possível observar o comportamento do modelo de elementos finitos do ensaio 1 de Zhang et al., 10 kg a 10 metros, para um melhor entendimento do funcionamento destes modelos.

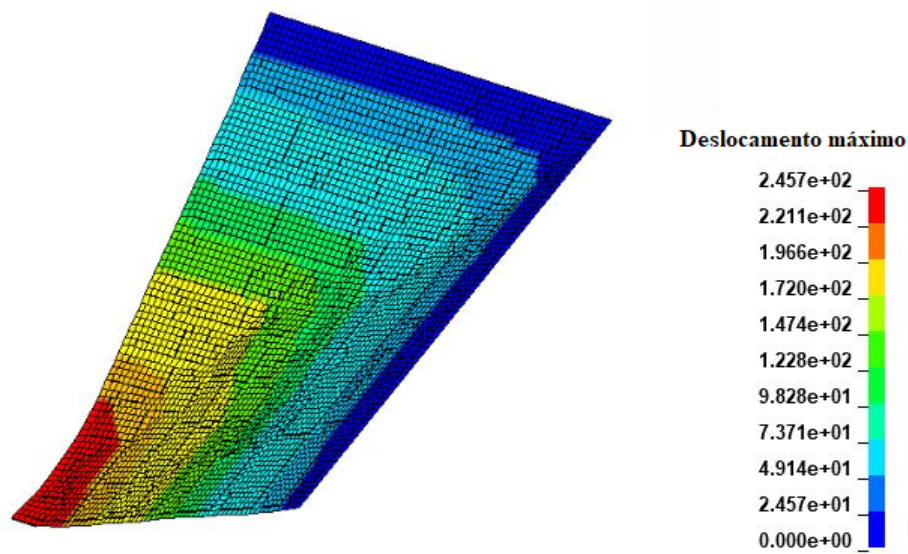


Figura 6.7: Resultado do deslocamento máximo obtido no ensaio 1 de Zhang et al.

Observando as diferenças encontradas entres os deslocamentos máximos obtidos nos ensaios e nos do modelo numérico, é possível concluir que definir a carga usando a *keyword* (DEFINE_CURVE) é mais vantajoso, uma vez que são observados erros menores com uma média de erros a rondar os 15,6% para os ensaios realizados por Hooper et al. e de 19.4% para os ensaios realizados por Zhang et al. Verificou-se que quando se define a carga utilizando a *keyword* (LOAD_BLAST_ENHANCED) ,é obtida uma média de erros de cerca de 21% para os ensaio de Hooper et al. e cerca de 40% para os ensaios de Zhang et al.

Da análise da Tabela 6.13, é possível observar que existem três valores de variação que se encontram bastante desfasados dos restantes, um para os ensaios de Hooper et al. e dois para os ensaios de Zhang et al.

A modelação da explosão demonstrou-se então pouco precisa quando modelada com a *keyword* (LOAD_BLAST_ENHANCED). Isto pode ser devido à dificuldade na previsão de todas as condicionantes externas que podem afetar a evolução a pressão refletida numa estrutura. Ao analisar a curva gerada pelo LS-Dyna, através da *keyword* (BLSTFOR), juntamente com a curva gerada no ensaio 3 (carga de 30 kg a 16 metros) de Hooper et al., é possível observar uma ligeira subestimação da pressão refletida de pico, característica da *keyword* (LOAD_BLAST_ENHANCED), também encontrada nos ensaios de Tabatabaei et al. [77], mas principalmente uma duração da fase positiva e um decaimento da curva completamente diferente do obtido no ensaio. Estas características vão afetar significativamente o impulso final sentido pela estrutura, e simular danos completamente diferentes na mesma. Na figura 6.8, é possível observar-se o decaimento a curva de pressão obtida no ensaio 3 de Hooper et al. e da curva dada pelo LS-Dyna.

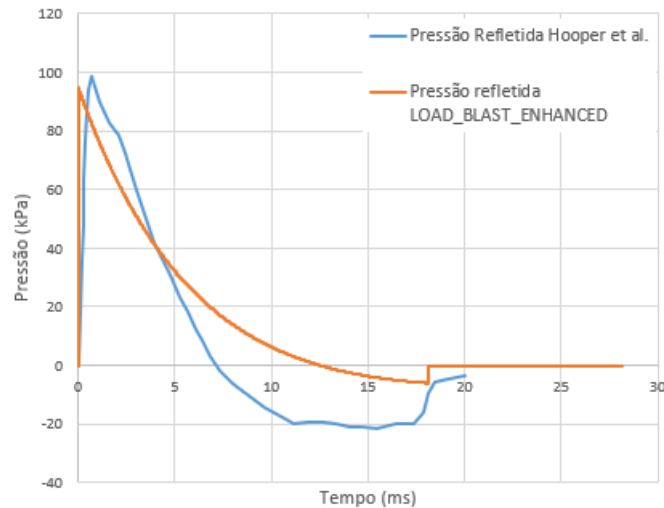


Figura 6.8: Comparação da pressão refletida obtida pelo modelo com a obtida por Hooper et al. no ensaio 3

No teste 2 de Hooper et al., é quando se observa este grande desfasamento da ordem de grandeza da variação dos deslocamentos medidos. Isto advém do facto de o deslocamento nesse ensaio ter sido o único a apresentar um comportamento 100% elástico, ou seja, o vidro recuperou totalmente a posição inicial. O modelo de elementos finitos não foi capaz de prever este comportamento, e então o deslocamento obtido é significativamente maior do que o real. A comparação direta de ambos pode ser observada na Figura 6.9. O deslocamento de 172 milímetros, obtido pelo autor, é um resultado pouco usual, especialmente para um vidro com estas dimensões. É fora do comum o vidro apresentar um comportamento completamente elástico para um valor tão elevado de deslocamento. É de notar que, apesar do modelo de elementos finitos assumir um deslocamento muito superior ao observado para este carregamento, o declive de crescimento de ambas as curvas é bastante semelhante o que prova que o modelo apenas falhou na previsão do pico máximo por não ter previsto a recuperação total do painel de vidro.

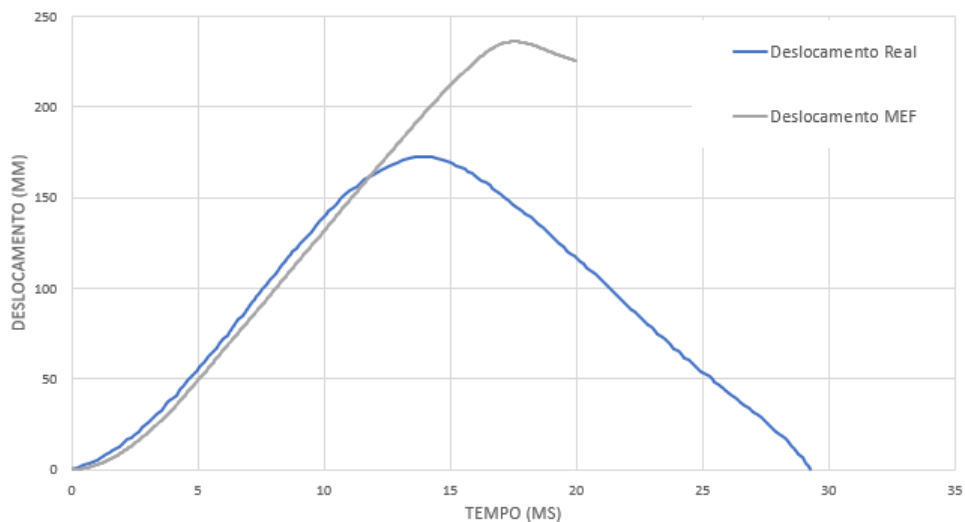


Figura 6.9: Comparação dos deslocamentos obtidos no teste 2 de Hooper et al. com o obtido pelo MEF

Larcher et al. [48], em 2012, realizaram um modelo de elementos finitos em 3D onde usaram

dois ensaios de Hooper et al., o teste 1 e o teste 2, e observaram a variação dos deslocamentos de forma a determinar se o modelo seria capaz prever o historial de deslocamentos do painel. Nestas comparações, os autores obtiveram uma variação de cerca de 10% no deslocamento máximo medido no teste 1, e de cerca de 40% para o teste 2. Os autores consideraram que, para os painéis em questão, estas variações eram aceitáveis, tendo até sido superiores às medidas nesta dissertação.

Para os ensaios de Zhang et al. foram os testes 2 e 5 que deram erros mais elevados. O teste 2 era em tudo igual ao teste 1, à exceção de que o teste 1 tinha uma camada de PVB de 1.52 milímetros e no teste 2 tinha uma espessura de 2.28 milímetros, o que corresponde a um aumento de 50 % na espessura da camada de PVB. Ambos os ensaios demonstram que o aumento da espessura da camada PVB não foi muito significativa com um deslocamento de 275 milímetros para o teste 1 e 280 milímetros para o teste 2. Com isto, observa-se que não só os deslocamentos máximos são demasiado parecidos para um aumento de espessura do PVB de 50%, como o teste com o PVB mais espesso apresentou um deslocamento maior o que em teoria. Este resultado não era esperado, uma vez que uma camada de PVB mais espessa deveria significar um painel de vidro mais resistente. No modelo de elementos finitos esses deslocamentos são 252 milímetros para o teste 1, e 204 milímetros para o teste 2, sendo o deslocamento do teste 1, com a camada de PVB menos espessa, significativamente superior ao do teste 2, ou seja o LS-Dyna deu uma importância superior ao aumento da camada de PVB do que se demonstrou acontecer na realidade.

O teste 5 foi realizado, ao contrário dos outros, com vidro laminado temperado, o que significa que foi alterado, no modelo, o valor da tensão de cedência de 80 MPa para 120 MPa (valores dados pelo autor dos ensaios) e, conseqüentemente, o valor da sua extensão máxima na rotura. Este teste 5 tem um *layout* do painel de vidro semelhante ao do teste 1, sendo que a diferença está na distância reduzida, uma vez que a carga se encontra significativamente mais afastada da estrutura, e na tensão de cedência do vidro. Seria de esperar que estas mudanças causassem uma diferença nos deslocamentos obtidos significativa, mas, segundo os dados reais, o deslocamento no teste 1 foi de 275 milímetros e no teste 5 foi 264 milímetros, ou seja uma diferença inferior a 10 milímetros. No modelo, o deslocamento máximo passa de 252 milímetros, no teste 1, para 184 milímetros, no teste 5, o que é uma diferença muito superior à verificada no real. Isto demonstra que, tanto o aumento na tensão de cedência como o aumento da distância reduzida não tiveram muita influência na realidade, o que não é coerente com o esperado.

Estes fenómenos, nos ensaios reais, de valores que, teoricamente, eram esperados ser diferentes, reforça ainda mais o que foi observado na campanha experimental desta dissertação - que é muito desafiante obter resultados 100% coerentes neste tipo de campanhas experimentais.

Com estes resultados, considera-se o modelo validado e a garantia que os valores teóricos, apesar de subestimados quando comparados com a realidade, quando carregados no modelo de elementos finitos, podem produzir resultados de comportamento aceitáveis e assim serem utilizados para prever o comportamento de um painel de vidro laminado.

6.4 Análise Pressão-Impulso

Uma parte importante da análise de uma estrutura sujeita à ação de uma explosão, é a geração de diagramas pressão-impulso. Estes diagramas ajudam na previsão do comportamento de uma estrutura, como é o caso desta dissertação, painéis de vidro laminado, face a essa ação.

6.4.1 Desenvolvimento dos Diagramas Pressão-Impulso

Para gerar os diagramas pressão-impulso para um painel de vidro laminado, foram obtidas várias linhas retas verticais associadas a um valor de impulso aleatório. Como está descrito na Equação ??, cada valor de impulso refletido está associado a um valor de pressão refletida e a uma duração da fase positiva equivalente. Para uma simplificação triangular, isto indica que se se aumentar o valor da pressão refletida e diminuir o valor da duração da fase positiva, ou vice versa, é possível obter inúmeros conjuntos de valores, que possibilitam obter o mesmo impulso refletido. Com isto, geraram-se as retas verticais mencionadas, ilustradas na Figura 6.10.

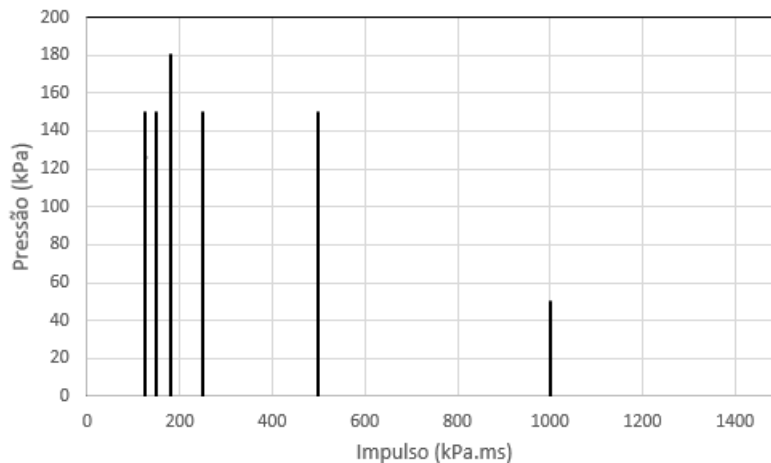


Figura 6.10: Retas utilizadas para gerar o diagrama P-I

Cada uma das retas observadas corresponde a várias pressões refletidas, associadas a um só valor de impulso. Por vezes, existem valores de impulso cujas pressões são difíceis de associar, por serem muito elevadas ou muito reduzidas, isto demonstra que esse ponto se encontra na assintota impulsiva ou na assintota quase-estática do diagrama. Recorrendo ao modelo de elementos finitos, com objetivo de encontrar, para cada reta, um par de valores em que: num deles, o vidro cumpra o critério de rotura, (que neste case é a fratura) e o outro não, de forma a fechar cada vez mais o espaço entre esses dois pontos, até se chegar a um intervalo de dúvida aceitável para a precisão pretendida. Quanto menor o intervalo de pressões, mais preciso será o diagrama. Para o critério de rotura considerado neste estudo, a quebra do vidro, o objetivo no modelo numérico será a observação de quando os elementos casca, que constituem o vidro, começam a entrar em rotura expondo os elementos do PVB. Esta comparação visual pode ser observada na Figura 6.11.

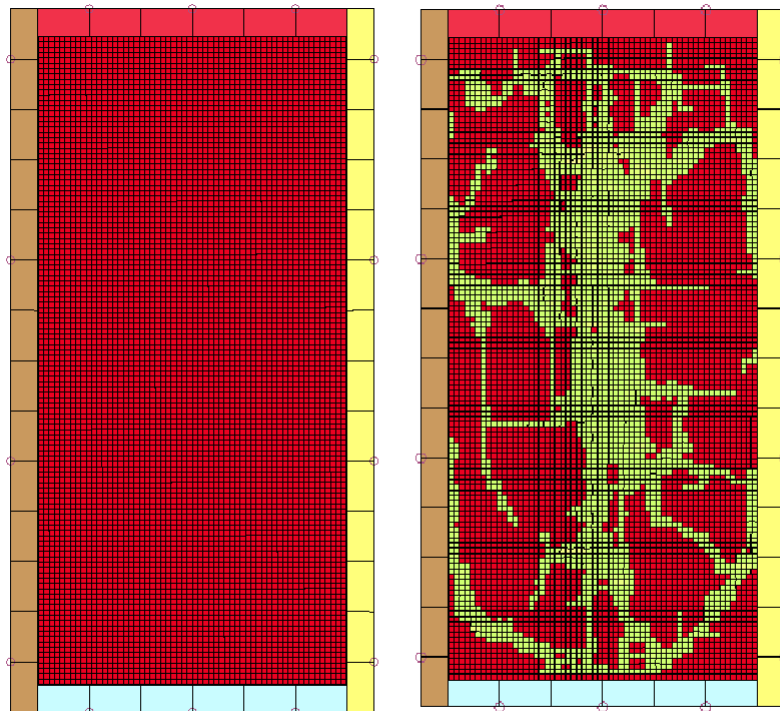


Figura 6.11: Modelo numérico com a casca do vidro intacta (esquerda) e partida (direita)

É importante prestar atenção às pressões que se utilizam para cada ponto de impulso, sendo que não faz sentido, para este estudo, correr no modelo uma pressão maior do que a obtida para o ponto anterior de impulso menor. O processo é assim mais rápido, permitindo eliminar logo vários pontos da linha seguinte apenas prestando atenção ao ponto descoberto anteriormente. Para a formulação do diagrama pressão-impulso do painel de vidro ensaiado na campanha experimental, parte-se do ponto em que se verifica que o vidro quebra pela primeira vez, com uma carga de 5 kg a 10 metros, com uma pressão refletida de pico de cerca de 74 kPa e um impulso refletido de 180 kPa.ms. Isto torna o processo mais fácil, uma vez que se sabe que todos os valores de pressões refletidas de pico que correspondam a impulsos refletidos maiores que 180 kPa.ms têm de ser menores que 74 kPa e todas as que estejam associadas a impulsos refletidos menores têm de ser maiores que este valor. É ainda importante ter em atenção que, no primeiro ponto em que se alcança o critério de rotura, é possível determinar o tempo em que o vidro fratura e conseqüentemente o deslocamento. Sabendo o valor do deslocamento, consegue-se aferir se uma carga que não causou o critério de rotura está próxima ou não de o fazer e, desta forma, tem-se uma noção de que carga se deve aplicar no painel na próxima iteração.

Analisando o modelo numérico, este demonstrou uma diferença muito reduzida entre a quebra de uma das lâminas de vidro ou das duas, No entanto, esta diferença dura muito pouco tempo, sendo que a segunda lâmina de vidro partia praticamente logo de seguida. Na Figura 6.12, é possível observar que a resistência oferecida pela segunda lâmina de vidro não é muito significativa e, inclusive, é ignorada em muitas das formulações resistência-deformação como a observada na Figura 3.9.

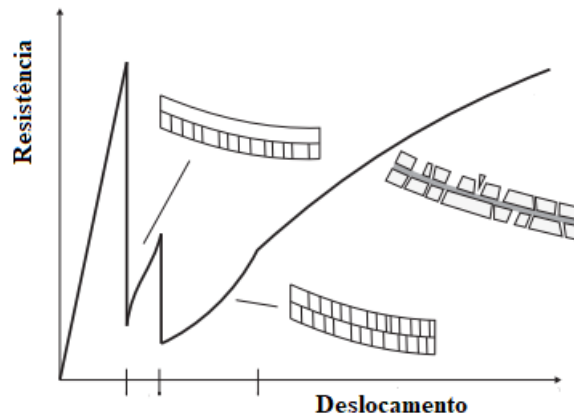


Figura 6.12: Ilustração da resistência à rotura da segunda lâmina (adaptado de [48])

É possível concluir que o diagrama pressão-impulso para a rotura da primeira lâmina de vidro seria praticamente coincidente ao diagrama obtido para a rotura de ambas as lâminas. É possível que, com uma análise mais detalhada e uma convergência de pontos, nas retas dos impulsos mais pequena, se consigam observar algumas diferenças entre ambas as curvas.

Na Figura 6.13, é possível observar o diagrama pressão-impulso para o painel de vidro laminado temperado ensaiado na campanha experimental exposta no Capítulo 5, assim como onde os pontos do diagrama intercetam as retas, ilustradas na Figura 6.10.

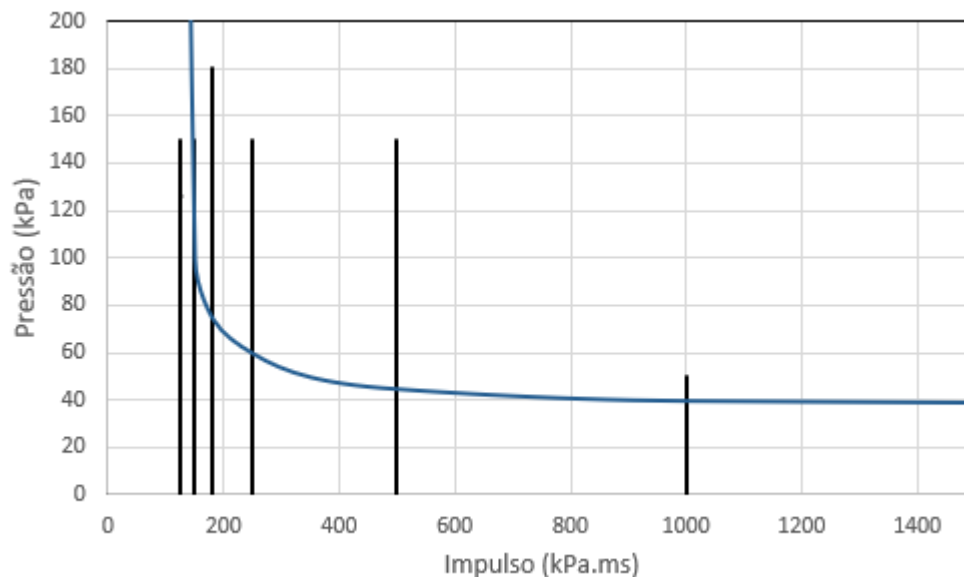


Figura 6.13: Diagrama pressão-impulso para um painel de vidro laminado temperado 2x1 metros

Na Figura anterior, pode claramente observar-se o que foi anteriormente mencionado: para a primeira reta não se conseguiu encontrar uma pressão associada, o que indica que este ponto se encontra na assintota impulsiva. Para o desenvolvimento deste diagrama, foi considerado a rotura do vidro como critério de rotura, então, recorrendo ao UFC 3-340-02, é possível comparar o diagrama obtido com o diagrama desta norma para um painel temperado de espessura semelhante; uma vez que, para o

critério de rotura escolhido, a resistência do PVB não é relevante. Na Figura 6.14, encontra-se então a comparação entre o diagrama obtido e o diagrama do UFC 3-340-02.

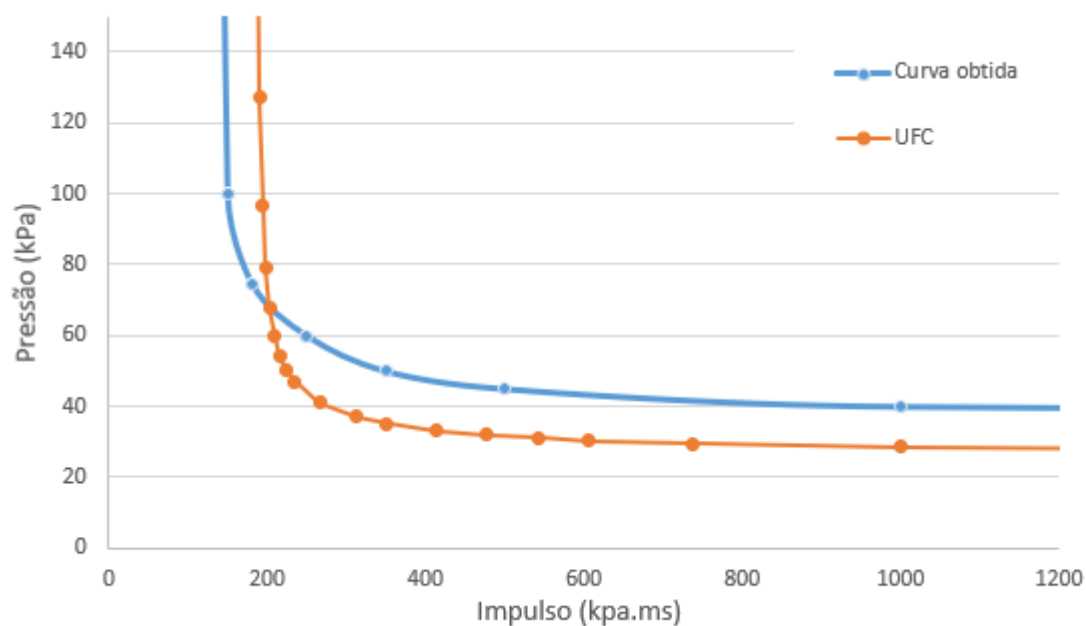


Figura 6.14: Diagramas P-I obtido comparado com o UFC 3-340-02

Ao analisar a figura anterior, é possível observar que o diagrama do UFC 3-340-02 é conservativo na maioria da curva, o que seria de esperar uma vez que esse diagrama é para um vidro monolítico temperado de 19 milímetros, que é ligeiramente menos espesso do que o painel de vidro ensaiado, que tem uma espessura de 21.52 milímetros, contabilizando a camada PVB. Os modelos teóricos tendem a ser conservativos quando comparados com a realidade. [46, 78]. Este fenómeno também se observou nas medições das pressões na campanha experimental, descrita no Capítulo 5. A única zona da curva onde o diagrama do UFC 3-340-02 se encontra à frente do diagrama gerado pelo modelo de elementos finitos, é na assintota impulsiva. Isto deve-se ao facto de essa assintota ter sido a mais desafiante de obter, uma vez que é muito difícil obter resultados coerentes no LS-Dyna porque trabalhamos com cargas muito elevadas aplicadas numa muito reduzida quantidade de tempo.

6.4.2 Influência do Aumento da Espessura das Lâminas de Vidro

De forma a melhor verificar este método de desenvolvimento de diagramas pressão-impulso realizaram-se mais dois diagramas para dois painéis de vidro, ambos com dimensões de 1.5 metros por 1.2 metros e uma espessura da camada intermédia de PVB de 1.52 milímetros; no entanto, num dos painéis a espessura das lâminas de vidro temperado é 3 milímetros e no outro esta duplica para 6 milímetros. No dimensionamento destes diagramas, tem-se em consideração o mesmo critério de rotura que anteriormente, a rotura do vidro, assim como as mesmas condições de fronteira, todos os bordos encastrados. As curvas foram geradas utilizando o mesmo método que a anterior e podem ser observadas na Figura 6.15.

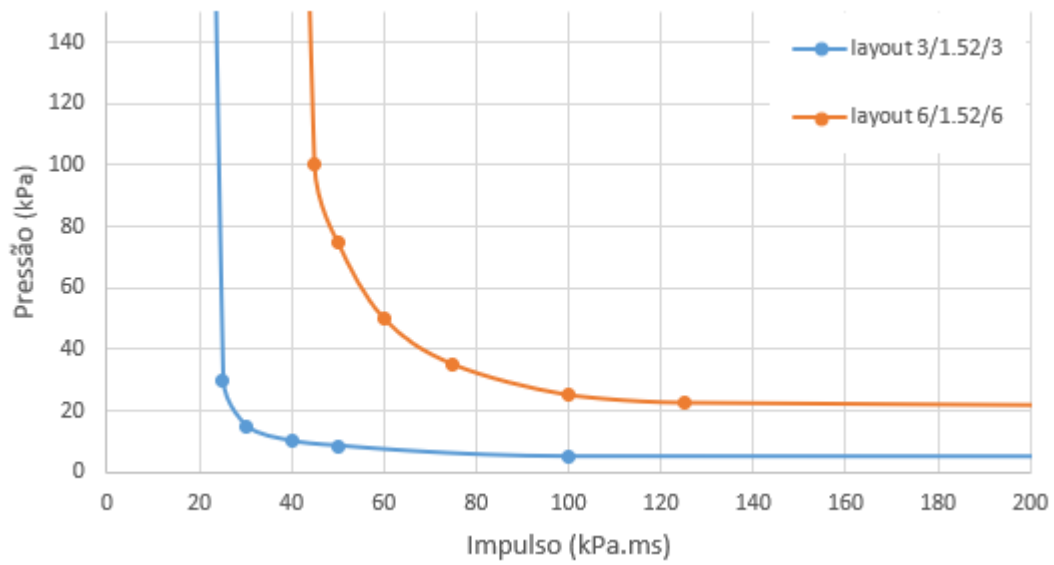


Figura 6.15: Comparação dos diagramas P-I para dois *layouts* com espessuras de vidro diferentes

Nesta figura, observa-se bem o aumento da resistência apresentada pelo painel de vidro com o aumento da espessura das lâminas de vidro. Isto prova que os diagramas permitem obter resultados coerentes, que podem agora ser replicados para qualquer outro critério de rotura.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Síntese e Principais Conclusões

Atualmente, o vidro é um material cada vez mais utilizado na construção, não só nas suas utilizações tradicionais, como janelas, mas também com funções estruturais, que devido à fragilidade deste material causa muitos mais estilhaços, do que outros materiais mais correntes. Isto faz com que seja muito importante o seu estudo, compreensão e correto dimensionamento, de forma a minimizar o risco de ferimento ou morte, de quem está nas proximidades do edifício, em caso de algum ataque terrorista ou explosão acidental.

A simulação de um painel de vidro laminado em LS-Dyna pode ser feita de inúmeras formas e ter graus de complexidade completamente diferentes, podendo haver uma enorme diferença no tempo de computação necessária entre elas, principalmente entre modelos constituídos por elementos casca e elementos sólidos. Como tal, é importante o estudo que permita avaliar se o aumento do grau de complexidade do modelo leva a resultados substancialmente melhores. Isto porque é possível, e quase garantido, que existiam mudanças no modelo que causem grandes aumentos no tempo de computação necessário, sem trazer grandes vantagens para o resultado pretendido. O que pode levar perdas de tempo desnecessárias que, quando se lida com este tipo de programas, pode significar meses de trabalho perdido.

Ao longo desta dissertação, os diferentes modelos de elementos de finitos foram corridos mais de 150 vezes para a sua validação e para os diagramas pressão-impulso, por isso, aumentar a complexidade do modelo levaria à multiplicação significativa do tempo de computação.

Os modelos teóricos de cálculo de pressões e impulsos de Kingery & Bulmash, demonstram-se bastante conservativos, quando comparados com os resultados obtidos na campanha experimental. Nos ensaios realizados para validar o modelo de elementos finitos os valores de pressão e impulso coincidiam melhor com os modelos teóricos.

Os diagramas de pressão-impulso foram gerados com sucesso, podendo estes constituir o início de uma bibliografia própria do Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas (CCPI) e do Exército Português. Estes 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 propícias a ataques.

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

Realizar simulações no programa LS-Dyna sem qualquer formação, e em tão pouco tempo, demonstrou-se um grande desafio. Promoveu a pesquisa e a capacidade de resolver problemas complexos, através da leitura de manuais e até mesmo de recorrer a fóruns na Internet, o que resultou numa nova forma de obter informação e tirar dúvidas.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

Apesar da campanha de ensaios experimentais não ter tido a extensão pretendida, o objetivo final desta dissertação - a geração de curvas de pressão-impulso recorrendo ao método de elementos finitos - foi cumprido. Foi possível gerar as curvas com um modelo validado, mas não se interligou a geração das mesmas a casos experimentais. Apesar disto, existe sempre a possibilidade de projetos futuros, que podem incluir:

- Aumentar a campanha experimental, recorrendo a uma estrutura de proteção das câmaras de alta velocidade que consiga proteger as câmaras do clarão causado pela explosão. É importante referir que, se esta opção for tomada, é necessário uma boa iluminação artificial no interior dessa estrutura.
- Gerar diagramas pressão-impulso, recorrendo ao método explicado e ao modelo de elementos finitos exposto nesta dissertação, para mais dimensões, *layouts* e critérios de rotura do vidro laminado. Principalmente diferentes critérios de extensão do PVB, para avaliar a influência na espessura da camada intermédia de PVB na resistência do painel de vidro laminado, e determinar a espessura que influencia mais essa resistência, se a do PVB se a das lâminas de vidro.
- Aumentar a complexidade do modelo de elementos finitos realizado, e comparar os diagramas pressão-impulso obtidos. Determinar o quão mais se pode melhorar a precisão das curvas pressão-impulso. Fazer uma correlação entre a complexidade dos modelos numéricos e os resultados obtidos, de forma a ver até que ponto de complexidade do modelo é que vale a pena chegar, e a partir de que ponto é que o aumento da complexidade do modelo já não traz benefícios suficientes que a justifiquem o aumento do tempo de computação.
- Gerar curvas de pressão-impulso para outros materiais que não o vidro laminado.

Bibliografia

- [1] B. M. Jenkins, "The New Age of Terrorism," *The McGraw-Hill Homeland Security Handbook*, pp. 117–130, 2006.
- [2] B. M. Jenkins, "The 1970s and the Birth of Contemporary Terrorism — RAND," 2015.
- [3] Institute for Economics & Peace, "Global Terrorism Index 2019: Measuring the Impact of Terrorism," 2019.
- [4] M. Mines, A. Thach, S. Mallonee, L. Hildebrand, and S. Shariat, "Ocular Injuries Sustained by Survivors of," pp. 837–843, 2000.
- [5] H. Bardwell and M. Iqbal, "The Economic Impact of Terrorism from 2000 to 2018," *Peace Economics, Peace Science and Public Policy*, vol. 27, no. 2, pp. 227–261, 2021.
- [6] E. Yandzio and M. Gough, *Protection of Buildings Against Explosions*. Teh Steel Construction Institute, 1999.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] I. Sochet, "Blast Effects of External Explosions," in *Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, (Yokohama, Japan), hal-00629253, Set 2010.
- [10] U. A. M. C. Headquarters, *Engineering Design Handbook. Explosions in Air. Part 1*. Alexandria, Virginia: AMC Pamphlet AMCP 706-181, ad/a-00381 ed., 1974.
- [11] V. Karlos, G. Solomos, and M. Larcher, "Analysis of the blast wave decay coefficient using the Kingery–Bulmash data," *International Journal of Protective Structures*, sep 2016.
- [12] 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.
- [13] D. Cormie, G. Mays, and P. Smith, *Blast Effects on Buildings*. Westminster, London: Institution of Civil Engineers, 3rd ed., 2019.
- [14] D. A. Crowl, *Understanding Explosions*. New York City, New York: American institute of Chemical Engineers, 2003.
- [15] U.S Department of Defense, "Unified Facilities Criteria (UFC) Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions," 2008.

- [16] F. C. Salvado, A. J. Tavares, F. Teixeira-Dias, and J. B. Cardoso, "Confined Explosions: The Effect of Compartment Geometry," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 48, pp. 126–144, 2017.
- [17] Gilbert F. Kinney and Kenneth J. Graham, *Explosive Shock in Air*. New York: The Macmillan Company, 2 ed., 1985.
- [18] W. Baker, P. Cox, P. Westine, J. Kulesz, and R. Strehlow, "Explosion Hazards and Evaluation," vol. 5, 1983.
- [19] W. C. Wedding, *Experimental Study of Blast Resistant Glazing System Response to Explosive Loading*. PhD thesis, University of Kentucky, 2010.
- [20] M. D. Goel, V. A. Matsagar, A. K. Gupta, and S. Marburg, "An Abridged Review of Blast Wave Parameters," *Defence Science Journal*, vol. 62, no. 5, pp. 300–306, 2012.
- [21] H. Hao and C. Wu, "Scaled-distance Relationships For Chamber Blast Accidents in Underground Storage of Explosives," *Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol. 5, no. 1-2, pp. 57–90, 2001.
- [22] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay, "Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview," *Electron. J. Struct. Eng.*, pp. 76–91, 2007.
- [23] F. C. C. Martins, *Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas contra Explosões com Recurso a Tecnologias de Impressão 3D*. Master thesis, Academia Militar, 2021.
- [24] H. Draganic and V. Sigmund, "Blast Loading on Structures," *Journal of the Structural Division*, vol. 19, no. 3, pp. 643–652, 2012.
- [25] V. Karlos and G. Solomos, "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components," tech. rep., European Commission, 2013.
- [26] T. Krauthammer, S. Astarlioglu, J. Blasko, T. B. Soh, and P. H. Ng, "Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 771–783, 2008.
- [27] J. Pachman, R. Matyáš, and M. Künzel, "Study of TATP: Blast characteristics and TNT equivalency of small charges," *Shock Waves*, vol. 24, no. 4, pp. 439–445, 2014.
- [28] John M. Dewey, "TNT EQUIVALENCY OF EXPLOSIVE SOURCES," in *Military Aspects of Blast and Shock 18*, (Bad Reichenhall, Alemanha), 2004.
- [29] H. Hao, Y. Hao, J. Li, and W. Chen, "Review of the Current Practices in Blast-Resistant Analysis and Design of Concrete Structures," *Advances in Structural Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 1193–1223, 2016.
- [30] David Whitehouse, *Glass: A Short History*. Washington DC: Smithsonian Books, 2012.
- [31] C. Bedon, X. Zhang, F. Santos, D. Honfi, M. Kozłowski, M. Arrigoni, L. Figuli, and D. Lange, "Performance of Structural Glass Facades Under Extreme Loads – Design Methods, Existing Research, Current Issues and Trends," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 921–937, 2018.
- [32] M. R. Patterson, *Structural Glass Facades: A Unique Building Technology*. Master degree, University of Southern California, 2008.

- [33] A. Berenjian and G. Whittleston, "History and Manufacturing of Glass," *American Journal of Materials Science*, vol. 7, no. 1, pp. 18–24, 2017.
- [34] H. Rawson, "Physics of glass manufacturing processes," *Physics in Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 91–114, 1974.
- [35] M. Patterson, *Structural Glass Facade and Enclosures*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [36] X. Zhang, Y. Zou, H. Hao, X. Li, G. Ma, and K. Liu, "Laboratory Test on Dynamic Material Properties of Annealed Float Glass," *International Journal of Protective Structures*, vol. 3, no. 4, pp. 407–430, 2012.
- [37] R. Gardon, "Thermal Tempering of Glass," in *GLASS: SCIENCE AND TECHNOLOGY: VOLUME 5: Elasticity and Strength in Glasses*, vol. 5, ch. 5, pp. 145–216, ACADEMIC PRESS, INC., 1980.
- [38] X. Zhang, H. Hao, and Z. Wang, "Experimental Investigation of Monolithic Tempered Glass Fragment Characteristics Subjected to Blast Loads," *Engineering Structures*, vol. 75, pp. 259–275, 2014.
- [39] M. Overend, "Recent Developments in Design Methods for Glass Structures," *Structural Engineer*, vol. 88, no. 14, pp. 18–26, 2010.
- [40] C. Morison, *The Resistance of Laminated Glass to Blast Pressure Loading and the Coefficients for Single Degree of freedom Analysis of Laminated Glass*. PhD thesis, Cranfiels University, 2007.
- [41] S. C. Angelides, J. P. Talbot, and M. Overend, "The effects of high strain-rate and in-plane restraint on quasi-statically loaded laminated glass: a theoretical study with applications to blast enhancement," *Glass Structures and Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 403–420, 2019.
- [42] M. Akerman, "Natureza , Estrutura e Propriedades do Vidro," *CETEV - Centro Técnico de Elaboração do Vidro*, pp. 1–37, 2000.
- [43] prEN 13474, "Glass in building - Determination of the strength of glass panes," *CEN European Committee for Standardization*, 2009.
- [44] J. Wurm, *Glass Structures: Design and Construction of Self-Supporting Skins*. Birkhauser, 2007.
- [45] R. L. White, *Glass as a Structural Material*. Master of science, Kansas State University, 2007.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] M. Larcher, G. Solomos, F. Casadei, and N. Gebbeken, "Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 42–50, 2012.
- [49] M. Teotia and R. K. Soni, "Applications of Finite Element Modelling in Failure Analysis of Laminated Glass Composites: A Review," *Engineering Failure Analysis*, vol. 94, pp. 412–437, 2018.
- [50] J. M. Biggs, *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, 1964.
- [51] R. J. L. Rita, "Comportamento de Fachadas Envidraçadas sob a Ação de Explosões," 2020.

- [52] M. Parrat, *Behaviour of Multi-Layered Laminated Glass Under Blast Loading*. PhD thesis, University of Toronto, 2016.
- [53] G. Dhatt, G. Touzot, and E. Lefrançois, *Finite Element Methods*. ISTE Ltd, 2012.
- [54] Livermore Software Technology Corporation, “LS-PrePost Online Documentation.” <https://www.lstc.com/products/ls-prepost>. Acedido: 19-ago-2022.
- [55] J. Hallquist, “LS-DYNA Theory Manual,” *Livermore Software Technology Corporation (LSTC)*, 2007.
- [56] J. Hallquist, “LS-DYNA Keyword User ’s Manual I,” *Livermore Software Technology Corporation (LSTC)*, vol. I, 2007.
- [57] R. Hedayati and M. Sadighi, “Tutorials for Bird-Strike Simulation Using ANSYS/LS-DYNA,” *Bird Strike*, vol. 8, pp. 207–233, 2016.
- [58] W. Rust and K. Schweizerhof, “Finite Element Limit Load Analysis of Thin-Walled Structures by ANSYS (implicit), LS-DYNA (explicit) and in Combination,” *Thin-Walled Structures*, vol. 41, pp. 227–244, 2003.
- [59] Livermore Software Technology Corporation, “LS-DYNA Applications.” <https://www.lstc.com/applications>. Acedido: 12-set-2022.
- [60] T. P. Slavik, “A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA®,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 10, no. 1, 2010.
- [61] H. D. Hidallana-Gamage, D. P. Thambiratnam, and N. J. Perera, “Computational Analysis of Laminated Glass Panels Under Blast Loads: A Comparison of Two Dimensional and Three Dimensional Modelling Approaches,” *The International Journal Of Engineering And Science*, vol. 2, no. 8, pp. 69–79, 2013.
- [62] J. H. Chung, G. R. Consolazio, R. J. Dinan, and S. A. Rinehart, “Finite-Element Analysis of Fluid-Structure Interaction in a Blast-Resistant Window System,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 3, pp. 297–306, 2010.
- [63] H. S. Norville, K. W. King, and J. L. Swofford, “Behavior and Strength of Laminated Glass,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, no. 8, pp. 46–53, 1998.
- [64] X. Centelles, J. R. Castro, and L. F. Cabeza, “Experimental results of mechanical, adhesive, and laminated connections for laminated glass elements – A review,” *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 192–204, 2019.
- [65] C. Bedon and M. Santarsiero, “Transparency in Structural Glass Systems Via Mechanical, Adhesive, and Laminated Connections - Existing Research and Developments,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 20, no. 5, pp. 1–18, 2018.
- [66] PCB Piezotronics, “Model 137B24B ICP Pressure Sensor Installation and Operating Manual.”
- [67] PCB Piezotronics, “Model 113B24 ICP Pressure Sensor Installation and Operating Manual.”
- [68] PCB Piezotronics, “Model 350D02 SHEAR ICP Shock Accelerometer Installation and Operating Manual,”
- [69] United States Enviromental Protection Agency, “Technical Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT),” *United States Environmental Protection Agency*, pp. 1–8, 2014.

- [70] M. Larcher, M. Teich, N. Gebbeken, G. Solomos, F. Casadei, G. A. Falcon, and S. L. Sarmiento, "Simulation of laminated glass loaded by air blast waves," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 82, pp. 69–74, 2011.
- [71] J. Hallquist, "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II Material Models," *Livermore Software Technology Corporation (LSTC)*, vol. II, 2007.
- [72] A. Haufe, K. Schweizerhof, and P. Dubois, "Properties Limits: Review of Shell Element Formulations," in *Developer Forum*, (Haufe2013), pp. 1–35, Dyna More, 2013.
- [73] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, 1985.
- [74] A. Škrlec and J. Klemenc, "Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models Using Taguchi Arrays," *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 62, no. 4, pp. 220–230, 2016.
- [75] Livermore Software Technology Corporation, "Ls-dyna user's guide: Elements." <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/elements>. Acedido: 19-out-2022.
- [76] Livermore Software Technology Corporation, "Contact modeling in ls-dyna: Contact types." <https://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types>. Acedido: 04-out-2022.
- [77] Z. S. Tabatabaei and J. S. Volz, "A Comparison between Three Different Blast Methods in LS-DYNA®: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE," *12th International LS-DYNA Users Conference*, no. 3, pp. 1–10, 2012.
- [78] W. W. El-Dakhkhni, W. F. Mekky, and S. H. C. Rezaei, "Validity of SDOF Models for Analyzing Two-Way Reinforced Concrete Panels under Blast Loading," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 24, no. 4, pp. 311–325, 2010.