

Comportamento de Fachadas Envidraçadas sob a Ação de Explosões

Desenvolvimento de uma solução de proteção

Rui Jorge Lourenço Rita

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro
Tenente-Coronel de Engenharia Pedro José da Silva Gonçalves Matias

Júri

Presidente: Professor Doutor Mário Manuel Paisana dos Santos Lopes
Orientador: Professor Doutor José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro
Vogal: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro
Vogal: Tenente-Coronel de Engenharia Artur Jorge Espada Caracho

Dezembro de 2020

“Os grandes homens não nasceram na grandeza, engrandeceram.”

Mario Gianluigi Puzo

Declaração

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

Agradecimentos

A concretização desta dissertação jamais podia ter acontecido sem o apoio e contributo de um conjunto de pessoas, às quais, quero deixar aqui, palavras sinceras de apreço e gratidão. Não foi uma jornada fácil e tendeu a piorar neste ano de 2020, porém o que concluo é que acabou bem graças a todos os que daqui para a frente irei enunciar.

Em primeiro lugar quero demonstrar o meu grande agradecimento ao Professor Doutor José Oliveira Pedro, meu orientador científico, pelo empenho, motivação, disponibilidade, pelas suas capacidades técnicas, pedagógicas e sobretudo humanas, durante o desenvolvimento desta dissertação e quando fui seu aluno. Igualmente agradeço ao Tenente-Coronel de Engenharia Pedro Matias, meu coorientador militar pelas suas capacidades, pela abdicção do seu tempo pessoal, empenho e preocupação em prol de me apoiar na minha investigação. Ao Professor Filipe Santos, meu coorientador científico, que não conhecia antes de desenvolver a dissertação, agradeço, também, o tempo dispensado e a atenção dada às dúvidas e problemas que lhe coloquei. Agradeço por fim aos três pela paciência que demonstraram para comigo, integrando-me no seio da discussão de quem tem anos largos de experiência.

Ao Doutor Hugo Rebelo, agradeço pelo precioso tempo dispensado para se reunir comigo para me tirar dúvidas fulcrais sobre o programa de análise automática LS-Dyna. Uma palavra de apreço, também, ao Tenente de Engenharia José Pinto, pela camaradagem, motivação e empenho transmitidos, bem como disponibilidade e abertura para que o pudesse contactar e tirar dúvidas.

Ao Sargento-Chefe Coelho da Secção de Informática da Academia Militar, obrigado por resolver, com brevidade, todos os meus problemas relativos a ligações, acessos e licenças virtuais, que, infelizmente, complicaram, em escala significativa, o desenvolvimento da minha dissertação.

Aos meus amigos e amigas, tanto da Academia Militar como da “escanCHA¹”, quero deixar uma palavra sincera de agradecimento. Sem vocês e sem a vossa amizade, não teria passado 6 anos tão felizes.

Finalmente aos meus verdadeiros pilares, a minha família, que sempre esteve presente em todas as alturas que precisei, e que sem ela, não tinha conseguido o que consegui até hoje. À minha irmã Ana Raquel, quero dizer obrigado por sempre olhar para o irmão com admiração e carinho, e por todos os momentos que partilhámos ao longo de 21 anos. Quero deixar um agradecimento do coração aos meus pais, João Paulo e Maria Clara, pela educação que me deram, valores transmitidos, paciência enorme e amor. Obrigado por tudo, tenho orgulho em ser vosso filho.

¹ Gíria militar. Significa o local de se reside.

Resumo

Esta é uma dissertação de mestrado inserida no projeto “Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas sujeitas a explosões” (ProFESEx) do Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas (CCPI) que tem como linha de investigação dominante as Tecnologias de Apoio à Segurança e à Defesa – explosivos, tecnologias energéticas e dos materiais.

O terrorismo nas sociedades atuais, pode ser realizado de várias formas. No entanto a forma que interessa à presente dissertação, é a utilização de engenhos explosivos. Estes engenhos, improvisados ou não, constituem uma ameaça global para os seres humanos, seres com direito a segurança e a proteção.

A Engenharia Militar e a Engenharia Civil têm realizado esforços e feito investigação no sentido de promover o dimensionamento de infraestruturas críticas às ações dinâmicas de explosão. Têm também investido no estudo, desenvolvimento e implementação de sistemas de proteção capazes de mitigar os impactos das explosões, tanto na estrutura em si como nos seus ocupantes.

O vidro constitui-se como um material transparente e sustentável, amplamente utilizado em sistemas de fachadas envidraçadas modernas, nomeadamente em edifícios públicos e militares, de carácter estratégico, como edifícios governamentais, quartéis, aeroportos, terminais rodoviários, hospitais e universidades.

Quando uma explosão atinge um edifício, as fachadas são um dos elementos mais vulneráveis.

O sistema de proteção estudado consiste num dissipador de energia inserido num sistema de fixação pontual. O dissipador é fabricado em metamateriais de geometria alveolar hexagonal capaz de se deformar plasticamente e de conter a nível local os efeitos destrutivos que passariam para a estrutura portante do edifício, através da fachada envidraçada. A fachada tem também o papel de proteger do exterior quem se encontra inserido dentro do espaço protegido e nesse sentido, é de extrema importância que as fachadas envidraçadas sejam compostas por vidro laminado.

Palavras-chave: Engenhos explosivos; Sistemas de proteção; Fachadas envidraçadas; Sistema de fixação; Metamateriais; Vidro Laminado.

Abstract

This is a master's dissertation inserted in the project "Glazing Facade Protection Systems subjected to explosions" of the Competence Center for Infrastructure Protection (CCPI), which has as its dominant research line in the Technologies to Support Security and Defense – explosives, energy and materials technologies.

Terrorism in today's societies can be done in various forms. However, the form that interests this dissertation is the use of explosive devices. These devices, improvised or not, constitute a global threat to human beings, beings entitled to security and protection.

Military and Civil Engineering have made efforts and done research in order to promote the design of critical infrastructures subjected to the dynamic actions of explosions. They have also invested in the study, development and implementation of protection systems capable of mitigating the impacts of explosions, both on the structure itself and on its occupants.

Glass is a transparent and sustainable material, widely used in modern glass facade systems, for example in public and military buildings, with strategic nature, such as government buildings, barracks, airports, bus terminals, hospitals and universities.

When an explosion hits a building, the facades are one of the most vulnerable elements.

The protection system studied consists of an energy dissipator inserted in a pinned connection system. The dissipator is made of a metamaterial with hexagonal alveolar geometry, capable of plastic deformation and containing, at a local level, the destructive effects that would pass to the building's main structure, through the glass facade. The facade also has the role of protecting from the outside those who are inside the protected space and in order to do it, it's extremely important that the glass facades are composed of laminated glass.

Keywords: Explosive devices; Protection systems; Glazing facades; Connection system; Metamaterials; Laminated glass.

Índice de conteúdos

Declaração	v
Agradecimentos.....	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Índice de conteúdos	xiii
Índice de figuras	xv
Índice de tabelas	xix
Lista de acrónimos e siglas	xxi
Lista de símbolos.....	xxiii
Capítulo I. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	5
1.3. Organização da dissertação	6
Capítulo II. Ação de explosão	7
2.1. Definição e Classificação.....	8
2.1.1. Definição.....	8
2.1.2. Classificação	8
2.2. Caracterização das ondas de choque	11
2.2.1. Equivalência em TNT	14
2.2.2. Distância reduzida.....	14
2.2.3. Pressão incidente de pico	15
2.2.4. Impulso específico incidente	15
2.2.5. Pressão dinâmica de pico	15
2.2.6. Duração da fase positiva.....	16
2.3. Reflexão da onda de choque	16
2.4. Resposta à ação de explosão.....	19
2.4.1. Regimes de resposta	20
Capítulo III. Tecnologia das fachadas envidraçadas	23
3.1. Conceção geral de fachadas envidraçadas.....	23
3.2. Tipos de vidro e sua conceção	23
3.2.1. Vidro Float e Recozido	24
3.2.2. Vidro Temperado.....	25
3.2.3. Vidro Termo-endurecido.....	27
3.2.4. Vidro Monolítico, Laminado e Isolante	27
3.3. Materiais constituintes.....	30
3.3.1. Vidro	30
3.3.2. Camada intermédia	34
3.4. Sistemas de fixação	35

3.4.1. Fixações mecânicas.....	36
3.4.1.1. Fixações contínuas	36
3.4.1.2. Fixações pontuais	36
3.4.2. Fixações aderentes	40
3.4.2.1. Fixações aderentes flexíveis.....	40
3.4.2.2. Fixações aderentes rígidas	41
3.5. Propriedades da estrutura de suporte	41
3.5.1. Principal.....	42
3.5.2. Secundária	43
3.6. Dispositivos poliméricos de absorção de energia.....	45
Capítulo IV. Análise estrutural de fachadas sujeitas as explosões.....	48
4.1. Análise estrutural do comportamento de elementos envidraçados sujeitos a uma explosão	48
4.1.1. Sistemas de um grau de liberdade	49
4.1.2. Comportamento da placa de vidro	50
4.1.3. Método de Elementos Finitos.....	50
4.2. Programa de análise automática LS-Dyna	51
Capítulo V. Caso de estudo – Análise do comportamento estrutural	52
5.1. Descrição do caso de estudo.....	52
5.2. Descrição do modelo de análise.....	55
5.2.1. Propriedades dos materiais.....	57
5.2.2. Propriedades das secções	59
5.2.3. Contactos	61
5.2.4. Ação de explosão.....	62
5.2.5. Condições de apoio e fronteira	62
5.3. Calibração do modelo de análise.....	63
5.4. Resultados para a ação de explosão.....	64
5.5. Interpretação dos resultados	66
5.6. Estudo de dissipador com metamaterial de estrutura hexagonal.....	67
5.7. Programa dos ensaios experimentais.....	73
Capítulo VI. Considerações finais	74
6.1. Síntese das principais conclusões	74
6.2. Desenvolvimentos futuros	75
Referências Bibliográficas	76
Anexos.....	A
ANEXO A.....	B
ANEXO B.....	C
ANEXO C.....	D

Índice de figuras

Figura 1 – Um dos ataques de setembro de 2001 [5].	1
Figura 2 – Exemplos de ataques a edifícios com engenhos explosivos [7].	2
Figura 3 – Vista exterior do colapso das fachadas exteriores das Torres Khobar [10].	3
Figura 4 – FP25, extinta entre 1987 e 1991 [13].	4
Figura 5 – Explosão aérea perfeita [18].	9
Figura 6 – Explosão próxima do solo [18].	9
Figura 7 – Explosão em contacto com o solo [18].	10
Figura 8 – Tipos de explosões confinadas (adaptado de [27]).	11
Figura 9 – Perfil idealizado de pressões (adaptado de [25]).	13
Figura 10 – Exemplo de representação dos efeitos da onda de choque (adaptado de [22]).	13
Figura 11 – Pressão dinâmica de pico [12].	16
Figura 12 – Representação da reflexão normal [32].	17
Figura 13 – Perfis idealizados das curvas de pressão incidente e refletida [18].	17
Figura 14 – Reflexão oblíqua [32].	18
Figura 15 – Coeficiente de reflexão para pressões diferentes [32].	18
Figura 16 – Formação da onda de Mach [32].	19
Figura 17 – Comportamento da onda ao passar por um edifício de base retangular [12].	19
Figura 18 – Perfis de pressões na superfície frontal de uma estrutura [12].	20
Figura 19 – Curva de iso-resposta (P-I) (adaptado de [8]).	21
Figura 20 – Composição do vidro [36].	24
Figura 21 – Processo de fabricação do vidro float (adaptado de [38]).	24
Figura 22 – Distâncias entre arestas e furos num painel (adaptado de [39]).	25
Figura 23 – Diferenças nas tensões no vidro recozido e temperado (adaptado de [40]).	26
Figura 24 – Processo de produção de vidro laminado (adaptado de [36]).	28
Figura 25 – Vidros laminados de diferentes dimensões na espessura total (adaptado de [36]).	28
Figura 26 – Comportamento pós-rotura de cada tipo de vidro (adaptado de [37]).	29
Figura 27 – Vidro monolítico a), laminado b) e isolante c) (adaptado de [37]).	30
Figura 28 – Comparação das leis constitutivas do aço e do vidro (adaptado de [41]).	32
Figura 29 – Agravamento de fissuras no vidro.	33
Figura 30 – a) G infinito; b) G aproximadamente nulo (adaptado de [16]).	34
Figura 31 – Esquema-resumo dos tipos de fixação de painéis de vidro.	35
Figura 32 – Sistema de fixação contínuo (fachada em cortina) (adaptado de [43]).	36
Figura 33 – Exemplo de fixação pontual por aperto (adaptado de [43]).	37
Figura 34 – Grampo [46].	37
Figura 35 – Glass fins [47].	37
Figura 36 – Fixação aparafusada: com relevo e articulada (a); sem relevo e rígida (b) (adaptado de [43]).	38
Figura 37 – Fachada do Aeroporto de Madrid.	38
Figura 38 – Fixação mecânica pontual – aranha (adaptado de [48]).	39

Figura 39 – Fachada da Universidade Nova de Lisboa.	39
Figura 40 – Secção de um perfil IPE [49].	42
Figura 41 – Vista lateral da estrutura de suporte.	42
Figura 42 – Vista superior da estrutura de suporte.	42
Figura 43 – Vista lateral da pormenorização da fixação.	43
Figura 44 – Vista superior da pormenorização da fixação.	44
Figura 45 – Sistema de fixação da fachada envidraçada do caso de estudo.	44
Figura 46 – Exemplo de metamaterial mecânico [53].	45
Figura 47 – Metamaterial mecânico de geometria hexagonal [52].	46
Figura 48 – Metamaterial de geometria auxética [52].	46
Figura 49 – Comportamento pós-rotura do vidro laminado (adaptado de [54]).	49
Figura 50 – Esquema de um SDOF (adaptado de [12]).	50
Figura 51 – Sistema de fixação do Aeroporto de Madrid, vista 1.	52
Figura 52 – Sistema de fixação do Aeroporto de Madrid, vista 2.	52
Figura 53 – Modelo de referência.	56
Figura 54 – Comportamento do MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC (adaptado de [60]).	57
Figura 55 – Pontos de integração no elemento Shell do painel LG.	60
Figura 56 – Graficação da regra de integração da keyword INTEGRATION_SHELL (adaptado de [60]).	60
Figura 57 – Prato do apoio do topo (a) e Prato do apoio da base (b).	62
Figura 58 – Nós restringidos para simplificação de simetria.	63
Figura 59 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de topo.	64
Figura 60 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de meia altura.	64
Figura 61 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de base.	64
Figura 62 – Plastificação do S275 no topo da fachada.	65
Figura 63 – Plastificação do S275 a meia altura da fachada.	65
Figura 64 – Plastificação do S275 na base da fachada.	65
Figura 65 – Locais onde o vidro atinge a rotura.	65
Figura 66 – Deslocamento em x do perfil a meio vão.	66
Figura 67 – Dissipador de geometria honeycomb, em PETg (facultado pelo coorientador científico).	67
Figura 68 – Lei constitutiva do dissipador estudado (fornecida pelo coorientador científico).	67
Figura 69 – Resultados do Parafuso 1 de topo no modelo com dissipador.	68
Figura 70 – Resultados do Parafuso 1 de meia altura no modelo com dissipador.	68
Figura 71 – Resultados do Parafuso 1 de base no modelo com dissipador.	68
Figura 72 – Plastificação do S275 no topo da fachada, com dissipador.	69
Figura 73 – Plastificação do S275 a meia fachada, com dissipador.	69
Figura 74 – Plastificação do S275 na base da fachada, com dissipador.	69
Figura 75 – Zonas onde o vidro chega à rotura no modelo com dissipador.	70
Figura 76 – Deslocamentos em x a meio vão do perfil, no modelo com dissipador.	70
Figura 77 – MODELO A, fixação de topo.	71

Figura 78 – MODELO B, fixação de topo.....	71
Figura 79 – MODELO A, fixação de meia altura.....	71
Figura 80 – MODELO B, fixação de meia altura.....	71
Figura 81 – MODELO A, fixação de base.....	71
Figura 82 – MODELO B, fixação de base.....	71
Figura 83 – MODELO A, vista lateral.....	72
Figura 84 – MODELO B, vista lateral.....	72

Índice de tabelas

Tabela 1 – Tipos de explosão consoante o confinamento da carga (adaptado de [23] e [24]).	8
Tabela 2 – Equivalência face a TNT de alguns explosivos (adaptado de [32]).	14
Tabela 3 – Pr MPa para várias combinações $W-R$ (adaptado de [15]).	17
Tabela 4 – Identificação dos regimes de resposta (adaptado de [25]).	20
Tabela 5 – Propriedades térmicas do vidro (adaptado de [36] e [43]).	31
Tabela 6 – Propriedades mecânicas para cada tipo de vidro (adaptado de [36]).	33
Tabela 7 – Propriedades do PVB (adaptado de [16], [43], [45]).	35
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do silicone estrutural (adaptado de [43]).	41
Tabela 9 – Dimensões do perfil IPE200 (adaptado de [49]).	42
Tabela 10 – Algumas propriedades do IPE200 em S275 (adaptado de [50]).	43
Tabela 11 – Coeficiente de comportamento da superfície do vidro (adaptado de [58]).	53
Tabela 12 – Valores recomendados para o coeficiente parcial de segurança do material [58].	54
Tabela 13 – Coeficiente de endurecimento [58].	54
Tabela 14 – Valores da tensão característica para o vidro temperado [58].	54
Tabela 15 – Espessura do filme de PVB consoante espessura do painel e dimensão do menor vão (adaptado de [59]).	55
Tabela 16 – Propriedades inseridas no MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC.	58
Tabela 17 – Propriedades inseridas no MAT_032-LAMINATED_GLASS.	58
Tabela 18 – Propriedades inseridas no MAT_100-SPOTWELD.	59
Tabela 19 – Espessuras dos elementos Shell.	59
Tabela 20 – Diâmetros dos elementos Beam.	59
Tabela 21 – Valores de S e WF.	61

Lista de acrónimos e siglas

2D	2 Dimensões
3D	3 Dimensões
AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Fabrico Aditivo)
BQR	Biológicos, Químicos e Radiológicos
CCPI	Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i> (Análise Mecânica Dinâmica)
e.g.	<i>exempli gratia</i> (“por exemplo”)
EC	Eurocódigo
EFAIL	<i>Efective Plastic Strain at Failure</i> (Deformação plástica na rutura)
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
etc.	<i>et cetera</i> (“e outros”)
EUA	Estados Unidos da América
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FEM	<i>Finite Elements Method</i> (Método de Elementos Finitos)
FP25	Forças Populares 25 de abril
GTD	<i>Global Terrorism Database</i>
HST	<i>Heat Soak Test</i>
IED	<i>Improvised Explosive Device</i> (Engenho Explosivo Improvisado)
LG	<i>Laminated Glass</i> (Vidro Laminado)
LSTC	<i>Livermore Software Technology Corporation</i>
NATO	<i>North Atlantic Treaty Organizations</i> (Organizações do Tratado do Atlântico Norte)
NBQRE	Nuclear, Biológico, Químico, Radiológico e armas Explosivas de alta potência
NP	Norma Portuguesa
PE4-A	<i>Plastic Explosive number 4</i>
PETg	Politereflato de etileno modificado com glicol
PETN	Tetranitrato de pentaeritritol
PL	<i>Pentamode Lattices</i> (Redes pentamódicas)
PLA	Ácido Polilático
PVB	Polivinil Butiral
RDX	<i>Research Department X</i>
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i> (Um grau de liberdade)
SGP	<i>SentryGlasPlus</i>
SM	<i>Subtractive Manufacturing</i> (Fabrico Subtrativo)
TNT	Trinitrotolueno
TPU	Poliuretano termoplástico
UBC	<i>Uniform Building Code</i>
UFC	<i>Unified Facilities Criteria</i>

UV	Ultravioleta
VEA	Vidro Exterior Agrafado
VEC	Vidro Exterior Colado
WLF	<i>Williams-Landell-Ferry</i>

Lista de símbolos

Símbolos latinos

A	Área
A_{proj}	Área da estrutura em projeto
A_v	Área reduzida de corte
b	Coefficiente de decaimento da curva
C_D	Coefficiente de arrastamento
c_p	Calor Específico
C_r	Coefficiente de reflexão
E	Módulo de elasticidade
E_{PVB}	Módulo de Elasticidade do PVB
F	Força de carga total
$f_{b;k}$	Valor característico da tensão de flexão do vidro temperado
$F_{dinâmica}$	Força de carga dinâmica
$f_{g;k}$	Valor característico da tensão de flexão
$F_{impulsiva}$	Força de carga impulsiva
f_t	Tensão de tração
f_u	Tensão última
f_y	Tensão de cedência
G	Módulo de distorção
G_{PVB}	Módulo de distorção do PVB
H^*	Altura acima do solo
H_{EXP}^d	Calor de explosão referente ao explosivo em questão
H_{TNT}^d	Calor de explosão do TNT
i_r	Impulso relativo
i_s	Impulso específico positivo
i_s^-	Impulso específico negativo
i_y	Raio de giração segundo y
i_z	Raio de giração segundo z
I_y	Momento de inércia segundo y
I_z	Momento de inércia segundo z
k_{mod}	Coefficiente de duração da carga
k_{SDOF}	Rigidez equivalente da mola num sistema SDOF
k_{sp}	Coefficiente de comportamento da superfície do vidro
L	Comprimento
m_{SDOF}	Massa equivalente num sistema SDOF
P_0	Pressão atmosférica ambiente
P_r	Pressão refletida

P_{so}	Pressão incidente de pico
P_{so}^-	Pressão mínima
q_s	Pressão dinâmica de pico
R	Distância entre a superfície-alvo e o epicentro da carga explosiva
R_G	Distância entre a detonação e a estrutura
t	Período entre t_a e o instante em estudo
t_0	Duração da fase positiva
t_0^-	Duração da fase negativa
t_a	Tempo de chegada da onda de choque
W	Massa de explosivo
W_{ely}	Módulo de flexão elástica segundo y
W_{elz}	Módulo de flexão elástica segundo z
W_{EXP}	Massa do explosivo em questão
W_{ply}	Módulo de flexão plástica segundo y
W_{plz}	Módulo de flexão plástica segundo z
W_{TNTe}	Massa equivalente de TNT
Z	Distância reduzida

Símbolos gregos

α	Coeficiente de expansão térmica
$\gamma_{M,A}$	Coeficiente parcial de segurança para o vidro recozido
$\gamma_{M,v}$	Coeficiente parcial de segurança do vidro temperado
ΔT	Resistência ao choque térmico
ε_{adm}	Extensão admissível máxima
ε_t	Alongamento de rotura
λ	Condutividade térmica
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Densidade
σ_{adm}	Tensão admissível normal
τ_{adm}	Tensão admissível de corte

Capítulo I. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

A segurança de um indivíduo é um direito humano básico e a proteção de indivíduos é uma obrigação fundamental do Governo. Portanto, os Estados têm a obrigação de garantir os direitos humanos, adotando medidas positivas para a proteção contra a ameaça de atos terroristas, e levar os autores desses atos à justiça [1].

Os extremismos políticos de grande violência continuam a ser enfatizados na Europa, explorando-se a insatisfação de setores sociais que têm em comum serem considerados excluídos da globalização e negarem os sistemas e os atores políticos tradicionais, apesar de enveredarem por referências ideológicas diferentes e, até, antagónicas [2].

Segundo a *Global Terrorism Database* (GTD), um ataque terrorista define-se como a ameaça ou mesmo uso de força e violência ilegais por um não-estado de modo a atingir um objetivo político, religioso, social ou económico, através do medo, coação ou intimidação. Na prática significa que, para se considerar um incidente que tenha cabimento na GTD, devem ser característicos os seguintes atributos:

- O incidente tem de ser intencional;
- O incidente tem de ter um determinado nível de violência ou ameaça da mesma;
- Quem provoca o incidente tem de fazê-lo à parte da nação, ou seja, a GTD não inclui atos de estado terroristas [3].

Os ataques ao World Trade Centre (**Figura 1**) e ao Pentágono no 11 de setembro de 2001 confirmaram que o terrorismo adquiriu uma nova abordagem. Os terroristas atuam, atualmente, com suicídios e assassinatos em grande escala. Anteriormente acreditava-se que existiam limites que nem terroristas se atreveriam a ultrapassar. No entanto não é isso que verificamos. Depois de milhares de mortes no 11 de setembro, tornou-se evidente que pelo menos um dos grupos terroristas existentes atuava sem limites [4].



Figura 1 – Um dos ataques de setembro de 2001 [5].

Tradicionalmente, os terroristas têm escolhido edifícios como alvo preferido para ataques maliciosos. Esta preferência pode ser facilmente entendida, na medida em que existe uma grande quantidade de edifícios vulneráveis dentro de uma nação. Os edifícios são construídos de acordo com

códigos desatualizados, faltando, na maior parte dos casos, considerar no dimensionamento a prevenção e minimização do impacto de ataques nucleares, biológicos, químicos e radiológicos (NBQR) e de ataques com engenhos explosivos [6].

É importante salientar que após o 11 de setembro, vários especialistas passaram a incluir os dois tipos de ameaças num grupo apenas – NBQRE (em inglês CBRNE – *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and high-yield Explosive weapons*) [7].

O colapso ou falha dos edifícios pode ter grande efeito no total dos setores da economia e recursos, e pode resultar em significativa perda de vidas [6]. Como nos diz a bibliografia em [6] e [8], e por exemplo para os Estados Unidos da América (EUA), a consideração dos ataques terroristas como um problema significativo começou com os ataques a instalações militares, embaixadas e consulados. Como exemplos desses ataques temos: Embaixada dos EUA, Beirute, Líbano, abril de 1983; Camaratas dos Marines, Beirute, Líbano, outubro 1983; World Trade Center, Nova Iorque, fevereiro de 1993; Murrah Federal Building, Oklahoma, abril de 1995; Embaixada dos EUA, Quênia, agosto de 1998; Embaixada dos EUA, Tanzânia, agosto de 1998; e, mais uma vez, o World Trade Center em Nova Iorque e o Pentágono em Washington D.C., setembro de 2001.

No decorrer das últimas décadas tem aumentado consideravelmente a atenção ao comportamento das estruturas de engenharia quando sujeitas a explosões ou cargas de impacto. O uso de explosivos por parte de grupos terroristas em todo o mundo que ameaçam edifícios civis e outras estruturas, está a tornar-se um problema cada vez maior nas sociedades modernas [8].

Olhando para o nosso panorama, no nosso país, a ameaça terrorista é classificada de moderada. Continuam a existir referências específicas a Portugal na propaganda divulgada por organizações e grupos terroristas e, da mesma forma, não se têm agravado, até à data, os prenúncios que culminam em atentados. Todavia, Portugal não possui qualquer tipo de imunidade no que concerne ao terrorismo moderno [2].

O uso de carros-bomba e outros Engenhos Explosivos Improvisados (do inglês *Improvised Explosive Device* (IED)) para atacar centros de cidades tem sido a imagem de marca das campanhas de organizações terroristas em todo o mundo. O facto de uma bomba explodir dentro ou muito perto de um edifício (**Figura 2**) pode causar danos catastróficos no seu sistema estrutural externo e interno, fazendo com que colapsem paredes, janelas e sistemas de segurança críticos [9].

Chave:

- | | |
|-------------------|---------------------------------------------|
| 1 – Veículo-bomba | 3 – Homem-bomba |
| 2 – Carta-bomba | 4 – Engenho escondido num contentor do lixo |



Figura 2 – Exemplos de ataques a edifícios com engenhos explosivos [7].

Os efeitos indiretos de uma explosão podem impedir a evacuação oportuna dos ocupantes de um edifício, contribuindo, portanto, para o aumento do número de baixas. Para além disso, grandes explosões sujeitam o edifício a uma massiva carga dinâmica, sendo esta muito superior à carga de dimensionamento da maior parte das estruturas. Devido ao perigo que estas massivas cargas representam, foram feitos esforços nas últimas três décadas no que toca a desenvolver métodos de análise estrutural e dimensionamento eficazes que considerem da melhor forma a resistência a cargas explosivas [9].

Aos 25 dias do mês de junho do ano de 1996 ocorreu, em Al Khobar na Arábia Saudita, o ataque terrorista a um complexo de casas localizado próximo do quartel-general da companhia estatal de produção de petróleo saudita, em Dhahran. A maior parte dos 19 trabalhadores norte-americanos que perderam as suas vidas foram atingidos por projéteis a alta velocidade criados pelo colapso do revestimento das fachadas exteriores do lado onde detonou o engenho. A estrutura do edifício seria toda em betão armado pré-fabricado com ligações bastante robustas entre as lajes e paredes. As numerosas linhas de apoios verticais em conjunto com a grande estabilidade lateral conferida pelo muro exterior, preveniram, então, o colapso total [10] (**Figura 3**). Está-se, portanto, perante um exemplo em que o número de baixas e destruição não foi superior devido ao facto de a estrutura ser muito robusta, composta por elementos pré-fabricados aparafusados, e ter sido dimensionada segundo as normas britânicas para estruturas resistentes a ações de explosão. Estas características conseguiram que se evitassem danos maiores, o que reforça a ideia de que é necessário dimensionar e proteger as estruturas contra estas ações dinâmicas, e não contar com a robustez estrutural unicamente.



Figura 3 – Vista exterior do colapso das fachadas exteriores das Torres Khobar [10].

A análise e dimensionamento de estruturas sujeitas a cargas explosivas requer um conhecimento detalhado e alargado da ação de explosão e da resposta dinâmica dos vários elementos estruturais [9].

Os engenhos explosivos têm vindo a ser concebidos cada vez com menores dimensões, porém mais poderosos desde há alguns anos, levando a que seja facilitada a mobilidade do material explosivo e, também, a maiores raios de ação. Geralmente as baixas devidas a uma detonação não só estão relacionadas com a libertação direta de energia, como também com falhas estruturais e não estruturais,

e com projeção de fragmentos e estilhaços que podem ocorrer e resultar em extensas perdas de vidas [8].

Reduzir a ameaça de ataques terroristas contra edifícios com alta lotação é uma tarefa bastante desafiante. Torna-se difícil prever porquê, como e quando é que podem ocorrer ataques. Devem ser consideradas várias variáveis quando se fala na criação de uma envolvente segura para um edifício [11].

A consideração da ação de uma explosão no dimensionamento de estruturas toma grande importância, principalmente no caso das infraestruturas de grande exposição mediática (e.g. aeroportos, hospitais, embaixadas, etc.) e com grande ocupação humana, cujo colapso total ou parcial acarreta significativos impactos sociais e económicos [12].

Em Portugal o custo associado ao estudo do efeito de ações explosivas é elevado, estando maioritariamente limitado às Forças Armadas. Existe para esta competência o CCPI, que como membros constituintes, para além de militares, integra membros do Instituto Superior Técnico e da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. O CCPI tem, portanto, como missão o estudo e desenvolvimento de soluções que permitam aumentar a resiliência das infraestruturas militares e civis [12].

Não existe um fenómeno terrorista em Portugal desde o desmantelamento da rede terrorista das Forças Populares 25 de abril (FP25) na década de 80 do século passado [2] (**Figura 4**). Todavia, como já foi referido, a ameaça terrorista é média, logo torna-se imperativo estudar e investigar medidas que potenciem a proteção de infraestruturas militares e civis face a ações dinâmicas de grande impacto, sendo estas explosões provocadas ou mesmo acidentais.



Figura 4 – FP25, extinta entre 1987 e 1991 [13].

Explosões e seus efeitos em estruturas militares tem sido tema de pesquisa militar durante várias décadas. Os critérios de dimensionamento destas estruturas, quando disponíveis ao público, tinham aplicabilidade limitada no dimensionamento de janelas e fachadas civis, do ponto de vista arquitetónico. No decorrer na Guerra Fria, estariam disponíveis publicamente pesquisas sobre a resistência de estruturas a explosões atómicas. Pesquisas estas de, por exemplo: Newmark (1953), Norris (1959) e

Iverson (1968). Mainstone (1971), West (1972) e Bauer (1991), que por sua vez, investigaram a quebra de janelas de vidro quando sujeitas a explosões de gás. Neste caso, a quebra das janelas dá-se a pressões relativamente baixas, funcionando apenas como novos locais de ventilação, reduzindo a pressão interna e, desta forma, minimizando os danos na estrutura principal. O Departamento de Defesa dos EUA começou, por volta da metade da década de 80, a desenvolver uma metodologia de dimensionamento para envidraçados resistentes a ações de explosão [14].

Utilizar o vidro como material de construção leva-nos muito atrás no tempo, todavia é nas últimas décadas que se conhecem novas funções e desafios para a sua utilização. Tem-se registado um aumento da sua procura para objetivos arquitetónicos e função estrutural. Tem vindo a ser cada vez mais popular devido ao crescente número de aplicações relativas às suas variadas vantagens. Entre estas vantagens estão a rigidez, a resistência, a transparência e a aplicação estrutural, como é o caso das fachadas autoportantes (vigas e painéis – *glass fins*), guarda-corpos ou pavimentos. Não obstante, o vidro apresenta um leque de características mecânicas que olhando do ponto de vista estrutural representam limitações que devem ser tratadas com cuidado, sendo que a fulcral será a sua fragilidade [15] e [16].

Quando a pressão de uma explosão fratura um envidraçado, os estilhaços que caem e são projetados, representam um grande risco para quem estiver próximo. O uso de envidraçados resistentes a explosões ou protegidos contra as mesmas, em edifícios passíveis de estarem sujeitos a essa carga, poderá reduzir bastante, se não eliminar, os riscos associados. Tomar em consideração estes aspetos, no caso dos envidraçados, constitui uma diminuição significativa de danos no interior de edifícios e da “limpeza” que uma explosão implica [17].

1.2. Objetivos e metodologia

Esta dissertação de mestrado focou-se no estudo do comportamento de fachadas envidraçadas sob a ação de explosões e em particular numa solução de proteção que conseguisse incrementar a capacidade resistente das mesmas. A solução de proteção estudada baseia-se em metamateriais com alta eficiência dissipativa e em uso crescente nos dias de hoje.

Foram estudados vários sistemas de fixação ou conexão de envidraçados a estruturas portantes, sendo que a estrutura portante utilizada foi a mesma usada na dissertação de mestrado de um antigo aluno da Academia Militar [12].

O objetivo principal foi o estudo de dissipadores com diferentes (mas semelhantes) características mecânicas, inseridos na mesma estrutura de fixação da fachada envidraçada e sujeitos à mesma ação de explosão.

A metodologia utilizada na modelação foi conceber primeiramente um ficheiro com a geometria da estrutura desenhada à linha média, ou seja, cada elemento com duas dimensões apenas; importar esse ficheiro para o programa de modelação e criar um modelo de referência que não contivesse a solução protetiva desenvolvida, funcionando como ensaio zero. Seguidamente desenvolveu-se um modelo já com o dissipador integrado, daí terem sido corridos modelos em que os dissipadores possuíam diferentes características.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação foi estruturada em sete capítulos.

No presente e primeiro capítulo, apresenta-se o enquadramento e motivação do tema da dissertação, bem como os seus objetivos e metodologia utilizada.

No segundo capítulo procurou-se caracterizar a ação de explosão, classificando-a, definindo-a e discretizando os seus parâmetros dinâmicos.

No terceiro capítulo realiza-se uma explicação breve da tecnologia das fachadas envidraçadas existente. Apresentam-se os diferentes tipos de vidro e sua conceção, os materiais constituintes dos elementos envidraçados das fachadas, os vários sistemas de fixação, as propriedades da estrutura portante do caso de estudo e as características dos dispositivos poliméricos de absorção de energia.

No capítulo quarto investigam-se as formas como é feita a avaliação do comportamento de elementos envidraçados sujeitos a explosões e uma breve secção de introdução ao programa de análise automática utilizado.

No quinto capítulo apresenta-se a análise do comportamento estrutural específico do caso de estudo, caracterizando o comportamento do modelo de referência e, posteriormente, dos modelos com solução protetiva. No final deste capítulo encontra-se o programa de ensaios experimentais futuros.

No sexto e último capítulo, são tecidas as considerações finais da dissertação, assim como as principais conclusões e matéria para trabalhos de investigação futuros no seguimento deste.

Capítulo II. Ação de explosão

Durante o seu período de vida útil, uma estrutura experimenta tipos de carregamento que se podem dividir em: estático e dinâmico. Carregamento estático define-se como sendo o que resulta de cargas estacionárias que não alteram o seu valor, direção e ponto de aplicação com o passar do tempo. Exemplo deste tipo de carregamento é o peso próprio da estrutura. Já as cargas dinâmicas abrangem situações que as anteriores não contemplam. Podem ter diversas origens, como a atividade humana, o vento, os sismos, impactos e, claro, explosões.

O grosso das condições de carregamento de uma estrutura está previsto nas normas e códigos nacionais e internacionais de projeto – Eurocódigos (EC) e Normas Portuguesas (NP) (que advêm dos EC). Todavia, quando o carregamento é originado por ações dinâmicas de explosão, abre-se uma exceção pois o tema não é abordado nesses documentos ou apenas apresenta linhas de orientação com limitações [18]. Para edifícios ordinários como apartamentos, escritórios, ou lojas, os códigos de construção não obrigam a resistência a explosões. Todavia, para edifícios onde são realizadas atividades de maior nível de risco ou mais perigosas para a construção, os códigos de construção exigem requisitos especiais de segurança. Por exemplo, o Código Uniforme de Construção² estabelece que lajes, paredes e coberturas que sirvam de separação com um ambiente em que haja exposição a explosões, devem ser dimensionados para resistir a uma pressão interna mínima de 4,8 kN/m², além das cargas convencionais. Portanto, são exigidos requisitos, porém, as normas e códigos são limitados quanto a tal [19].

As explosões devidas a ataques terroristas, como resultado do aumento do terrorismo mundial, têm-se nas últimas décadas, como já foi referido, transformado num problema sério, especialmente porque tais ataques podem resultar num elevado número de baixas. A ação de explosões tem vindo mesmo a tornar-se uma área da Engenharia de Estruturas. A severidade deste tipo de carregamento resulta em falhas colossais de elementos da estrutura seja por efeitos diretos ou indiretos da ação. Assim sendo, é crucial prever e estimar os efeitos das explosões nas estruturas [18] e [20].

As referências mais usadas e confiáveis acerca da temática residem em publicações militares norte-americanas, como por exemplo, em *Unified Facilities Criteria* (2008) (UFC) e num relatório técnico de Kingery e Bulmash (1984). Com a ajuda destes documentos podem ser calculadas as cargas e avaliada a resposta dos elementos estruturais de um determinado cenário de explosão. Vários estudiosos como Brode (1955, 1956), Sadovsky (2004), Henrych (1979) e Kinney e Graham (1985), introduziram outras propostas para os parâmetros da explosão. [20].

² Do inglês *Uniform Building Code* (UBC) é um código de construção usado maioritariamente na região Oeste dos EUA, publicado pela primeira vez em 1927 [61].

2.1. Definição e Classificação

2.1.1. Definição

Explosão define-se como uma rápida libertação de energia a grande escala [9]. Uma explosão tem a duração de apenas alguns milissegundos e pode, também, caracterizar-se por uma libertação de gases quentes que se expandem pelo ar, ocupando o espaço que se encontra disponível, levando, pois, à formação da onda de explosão. Cada onda pode ser caracterizada por um conjunto de parâmetros que se calculam com base em manuais e normas desenvolvidos maioritariamente pela sociedade militar [20].

As explosões podem ser categorizadas pela sua natureza como físicas, nucleares ou químicas. Nas explosões físicas liberta-se energia através do enorme colapso de um reservatório cheio de gás comprimido, de erupções vulcânicas ou até, misturando duas substâncias no estado líquido a temperaturas diferentes. Numa explosão nuclear, a energia é libertada devido à formação de diferentes núcleos atómicos por redistribuição de prótons e neutrões dentro dos próprios núcleos que estão a interagir, enquanto que, no caso das explosões químicas, é a rápida oxidação de elementos combustíveis (hidrogénio e carbono) que corresponde à principal fonte de energia [9]. A presente dissertação debruçar-se-á somente em explosões químicas.

Em explosivos, poderão existir 3 grupos de reações químicas: a combustão, a deflagração e a detonação. No que toca à combustão, dá-se a reação de oxidação em que há libertação de calor (reação exotérmica), ou seja, queima-se o explosivo, sem que ocorra explosão [21]. Já a deflagração é também uma reação exotérmica, em que a propagação da oxidação pelo material ocorre a uma velocidade mais baixa que a velocidade do som no ar; dependendo da pressão do ambiente envolvente e de outras condições do exterior. A detonação é a própria onda de choque, isto é, a reação dá-se a uma velocidade muito superior à velocidade de propagação do som no ar [19], [22].

2.1.2. Classificação

As explosões podem ser divididas em dois grupos principais de acordo com o confinamento da carga explosiva: confinadas e não-confinadas. A **Tabela 1** apresenta uma possível categorização segundo a sua localização e confinamento:

Tabela 1 – Tipos de explosão consoante o confinamento da carga (adaptado de [23] e [24]).

Confinamento da carga	Categorias
Não confinada	a) Explosão aérea perfeita
	b) Explosão próxima do solo
	c) Explosão em contacto com o solo
Confinada	d) Explosão totalmente ventilada
	e) Explosão parcialmente confinada/ventilada
	f) Explosão totalmente confinada

Seguidamente serão explicadas todas as categorias de explosão, segundo a tabela anterior.

As explosões não confinadas, sem contacto ou exteriores, como foi referido, podem dividir-se em 3 tipos básicos, que dependem da posição relativa da fonte da explosão e da estrutura a proteger,

isto é, da altura H acima do solo, quando corre a detonação da carga W , e da distância entre a carga e a própria estrutura, R [8]. Esses três tipos de explosão correspondem a:

- a) Explosão aérea perfeita – quando a explosão ocorre no espaço aéreo livre bem acima do nível do solo. A onda de choque esférica causada pela detonação do explosivo atinge o edifício/construção sem que sofra amplificação até atingir a estrutura. As ondas refletidas são criadas quando a onda incidente atinge o edifício [23], [25]. A **Figura 5** constitui uma representação de uma explosão aérea perfeita:

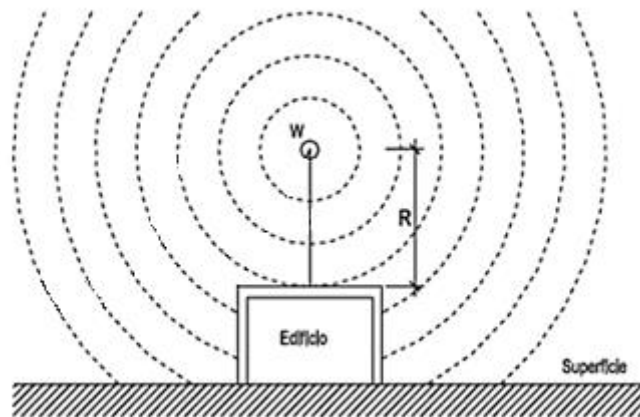


Figura 5 – Explosão aérea perfeita [18].

- b) Explosão próxima do solo – nesta categoria de explosão não confinada, a detonação do explosivo dá-se acima do nível do solo, porém, ocorre a amplificação intermédia causada pela reflexão com o solo, antes da chegada da onda de choque inicial à estrutura. Enquanto a onda de choque se continua a propagar ao longo da superfície do solo, forma-se uma onda ressonante, designada por onda de *Mach*, graças à interação entre a onda incidente e a onda refletida [23], [25]. O ponto triplo que se encontra na
- c) **Figura 6**, representa a interseção das 3 ondas (incidente, refletida e ressonante):

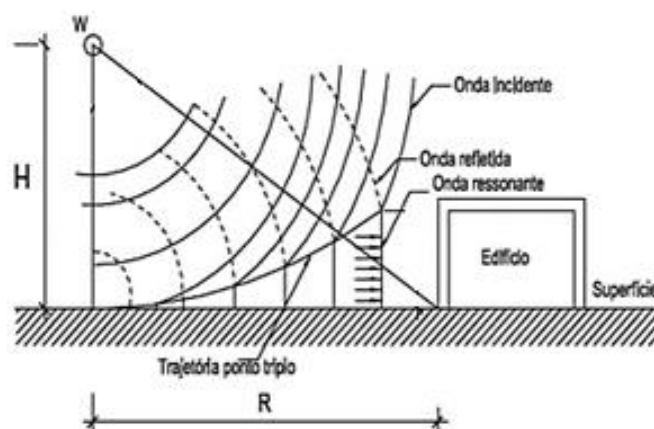


Figura 6 – Explosão próxima do solo [18].

- d) Explosão em contacto com o solo – uma explosão deste tipo ocorre quando a detonação se dá perto ou em contacto com a superfície do solo. A onda de choque inicial é amplificada e refletida pela superfície do solo em ordem a produzir a onda refletida (**Figura 7**). Contrariamente à explosão próxima do solo, a onda refletida funde-se com a onda incidente no momento da detonação, formando uma única onda de natureza similar à onda de *Mach* do tipo de explosões anterior. Fundamentalmente, é criada uma onda de choque hemisférica [23], [25].

A atividade terrorista tem lugar, maioritariamente, nas áreas urbanas das cidades, locais estes onde os dispositivos são colocados em contacto ou muito perto da superfície do solo. É necessário considerar o impacto das explosões próximas do solo e de reflexões das ondas de explosão ao determinar o seu efeito em edifícios, devido à proximidade entre os prédios dos centros urbanos [25];

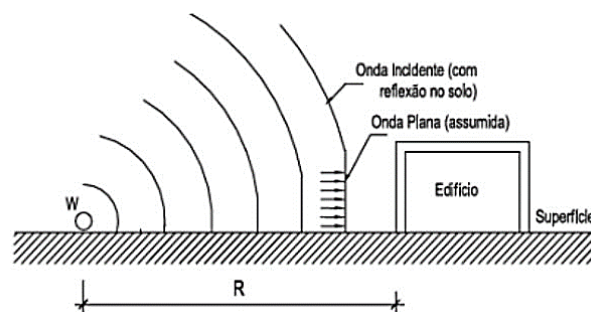


Figura 7 – Explosão em contacto com o solo [18].

No caso das explosões confinadas ou interiores, as mesmas ocorrem, obviamente, dentro de edifícios. Nestes casos as pressões associadas às ondas de choque iniciais serão bastantes elevadas pois serão amplificadas pelo fenómeno de reflexão dentro do próprio edifício. Não obstante, e dependendo do grau de confinamento, os efeitos das temperaturas elevadas e a acumulação de gases produzidos pela reação química da explosão resultarão num aumento da pressão e da duração da carga [23], [25], [26]. Portanto, existem 3 tipos de explosões confinadas, de acordo com a dimensão da ventilação em causa. É possível classificar em:

- e) Explosão totalmente ventilada – uma explosão deste tipo acontece dentro ou imediatamente junto a uma estrutura tipo barreira ou cubículo, em que uma ou mais superfícies estão abertas para a atmosfera. A onda inicial, que é amplificada pelas partes da estrutura não destruídas, e os produtos resultantes da detonação são totalmente ventilados em direção à atmosfera, quase instantaneamente, formando uma onda de choque (pressões de vazamento) que se propaga para fora da estrutura [23], [25]. (**Figura 8, 1)**)
- f) Explosão parcialmente confinada/ventilada – estas explosões são produzidas em edifícios onde a quantidade de superfícies abertas é mais limitada que nas explosões totalmente ventiladas. Uma explosão deste tipo dá-se dentro de uma estrutura do tipo barreira ou cubículo com aberturas de dimensão limitada e/ou superfícies quebradiças. A onda de

choque inicial é amplificada pelas partes quebradiças e não quebradiças da estrutura e os produtos da detonação são ventilados para a atmosfera depois de um curto período de tempo. O confinamento dos produtos da detonação, que consiste na acumulação de gases a elevadas temperaturas, fica então associado da pressão quase-estática (doravante referido a pressão de gases). Esta pressão tem longa duração comparada com a pressão da onda de choque [23]. (**Figura 8, 2)**)

- g) Explosão totalmente confinada – o total confinamento de uma explosão está associado à total ou quase total contenção das ondas por uma estrutura barreira. A carga de explosão interior estará associada a ondas de choque não ventiladas e pressões de gases de duração significativa, que são função do grau de confinamento. A intensidade das pressões de vazamento será, portanto, baixa e atingirá somente essas instalações imediatamente fora da estrutura de contenção [23]. (**Figura 8, 3)**)

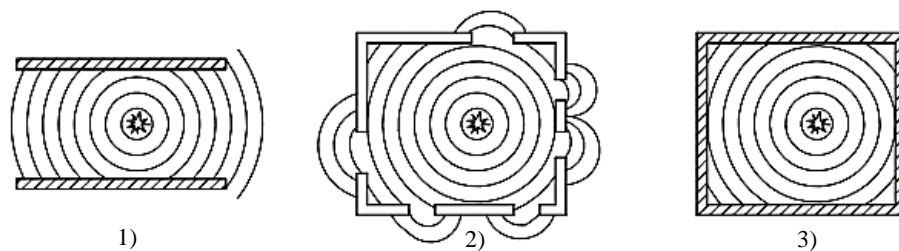


Figura 8 – Tipos de explosões confinadas (adaptado de [27]).

2.2. Caracterização das ondas de choque

A magnitude e a distribuição das cargas de explosão na estrutura resultantes das pressões aplicadas são função dos seguintes fatores [28]:

- 1) Propriedades do explosivo, mais propriamente o tipo de material explosivo, produção de energia (detonação ideal ou não-ideal), e a massa;
- 2) A localização da detonação relativamente às estruturas de proteção;
- 3) A intensidade e maximização da pressão por interação com a barreira que é o solo (reflexão), ou a própria estrutura.

A rápida libertação de energia gerada pela detonação de uma carga explosiva (sólida ou líquida) gera um aumento instantâneo da pressão do meio envolvente. Este aumento de pressão propaga-se radialmente no ar na forma de uma onda de choque. A onda de choque move-se, desde o centro da explosão, numa velocidade supersónica. Os efeitos de uma explosão apresentam-se, pois, na forma de uma onda de choque caracterizada pela sua alta intensidade e expande-se desde a superfície do explosivo para o ar circundante [19], [26], [28].

Atrás da onda de choque, a pressão decresce do valor de pico inicial. A uma determinada distância da carga, essa pressão cai para um valor abaixo da pressão atmosférica e a seguir aumenta novamente para um valor constante e igual ao da pressão atmosférica. A parte da onda de choque em que a pressão é superior à atmosférica designa-se de fase positiva e, imediatamente a seguir a esta, a parte em que a pressão é inferior à pressão atmosférica é chamada de fase negativa ou fase de sucção. A super-expansão no centro da explosão cria um vácuo e um movimento inverso de gás.

Portanto, esta região de pressão negativa expande-se, causando uma pressão negativa (abaixo da atmosférica), que segue a fase positiva. A pressão da fase negativa é normalmente mais baixa em valor absoluto de intensidade, mas superior no que toca à duração da fase positiva. A expansão da onda de choque faz com que as partículas de ar se movam no sentido da explosão durante a fase positiva e no sentido contrário ao da explosão durante a fase negativa. O fluxo de partículas de ar cria uma pressão análoga à pressão criada pelo vento. A pressão produzida por este fluxo é, portanto, designada de pressão dinâmica. Caracteriza-se, também, por aplicar uma pressão de arrastamento nos objetos que se encontram no raio de ação [19], [29].

A definição dos parâmetros das ondas de choque utilizada com maior frequência assenta nas expressões de Kinney e Graham [22] e nas propostas de Kingery e Bulmash, em 1984 [8]. Estas últimas são referências internacionais neste domínio e encontram-se na base dos ábacos da norma americana UFC 3-340-02 [23].

Na **Figura 9** encontra-se ilustrado o perfil idealizado de variação de pressão com o tempo de explosão, considerando uma explosão aérea perfeita, medida num elemento (edifício) localizado a uma determinada distância da detonação. A pressão envolvente do elemento é, inicialmente, a pressão atmosférica ambiente P_0 . O intervalo de tempo desde o momento em que ocorre a detonação até que a onda de choque atinge o elemento que se pretende estudar designa-se por t_a (tempo de chegada). Depois da chegada da onda de choque, a pressão sofre um aumento instantâneo até um valor característico máximo que se designa por pressão incidente de pico P_{so} . Seguidamente a pressão reduz-se praticamente de forma exponencial, de novo, para a pressão atmosférica, no momento $t_a + t_0$, em que t_0 corresponde à duração da fase positiva e é um intervalo de tempo infinitesimal. A área que se encontra abaixo da curva de pressão-tempo diz respeito ao impulso provocado aquando da detonação na estrutura, i_s , sendo que é a grandeza de maior relevância no que toca à quantidade de consequências em explosões não confinadas. Valores referentes à onda de choque, como a sobressão de pico e a velocidade de propagação, diminuem quanto maior for a distância ao centro da explosão/detonação [22], [28], [29].

Relativamente à fase negativa, esta tem duração t_0^- e P_{so}^- representa a pressão mínima (negativa). Em explosões exteriores, como nesta fase os elementos são sujeitos a forças de sucção é, então, normal que, por vezes, sejam encontrados fragmentos de envidraçados de fachadas no exterior da construção ao invés de o serem no interior, como seria esperado [8].

A seguinte equação modificada de Friendlander (2.1) propõe e é frequentemente utilizada para descrever a taxa de decréscimo nos valores da pressão da fase positiva:

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

onde, P_{so} [kPa] representa a pressão incidente de pico,
 t_0 [ms] é a duração da fase positiva,
 b é o coeficiente de decaimento da curva e
 t [ms] corresponde ao período entre o instante de chegada (t_a) e o instante em estudo [8].

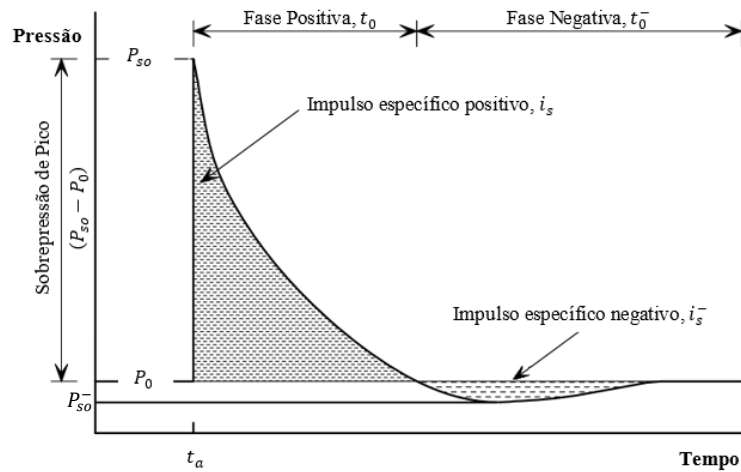


Figura 9 – Perfil idealizado de pressões (adaptado de [25]).

Apesar de existir bibliografia [20] que analisa em detalhe valores possíveis para o coeficiente de decaimento da curva (b), no dimensionamento de estruturas é usual tomar-se conservativamente uma taxa linear de decréscimo de pressões [24], [26], [30], [31]. De realçar que esta alternativa, que é mesmo muito conservativa se encontra expressa na equação (2.2).

$$P_s(t) = P_{so} \times \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \quad (2.2)$$

Representa-se na **Figura 10** os efeitos da onda de choque. No primeiro instante representado (A) tem-se a construção sem qualquer tipo de perturbação e à pressão ambiente (atmosférica). No instante B observa-se a pressão incidente de pico como ação resultante na estrutura, ou seja, a fase positiva. Ao momento C dá-se a inversão do diagrama de pressões, isto é, inicia-se a fase negativa e os seus efeitos de sucção. No instante final (D) vê-se o estado final da construção, depois da passagem da onda de choque e, novamente, à pressão atmosférica.

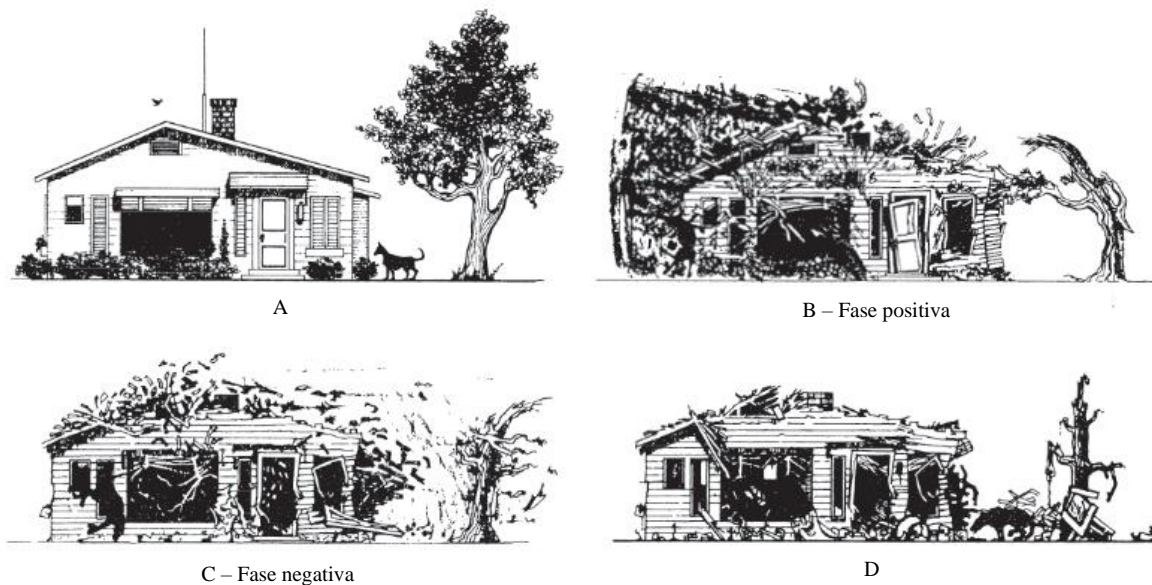


Figura 10 – Exemplo de representação dos efeitos da onda de choque (adaptado de [22]).

Quando a onda de choque atinge uma obstrução reflete, amplificando o efeito em relação ao valor incidente, a mesma reflete em amplitudes de valor superior ao inicial. A reflexão é função da força da explosão e do ângulo de incidência da frente da onda de choque [26].

2.2.1. Equivalência em TNT

O TNT é considerado o explosivo de referência, pois além de existir bastante conhecimento acerca das suas características, existe também um grande leque de explosivos com propriedades distintas no que toca à energia libertada. Portanto surge a necessidade de comparar os efeitos de explosões originadas por esses outros explosivos, o que pode ser feito pelo método do TNT Equivalente. A energia da explosão de TNT é geralmente a base do cálculo dos parâmetros da onda de choque; a potência do explosivo é avaliada pelo calor de explosão, que é função da pressão, da energia interna do explosivo e do volume de gases produzido [12], [18], [32].

A equivalência em TNT, do ponto de vista numérico, pode ser dada pela equação seguinte (2.3), presente no UFC 3-340-02 [23]:

$$W_{TNTe} = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} \times W_{EXP} \quad (2.3)$$

onde, W_{TNTe} representa a massa equivalente de TNT, W_{EXP} a massa de explosivo em questão, H_{EXP}^d o calor de explosão referente ao explosivo em questão e H_{TNT}^d o calor de explosão do TNT. Na **Tabela 2** estão apresentados alguns explosivos com a respetiva equivalência em massa de TNT.

Tabela 2 – Equivalência face a TNT de alguns explosivos (adaptado de [32])

Explosivo	Equivalência face a TNT
PETN	1.34
RDX	1.46
Composição B (RDX+TNT)	1.16
PE4-A	1.10

2.2.2. Distância reduzida

A distância reduzida constitui um conceito importante em função do qual é definida a propagação da onda aérea. O uso deste conceito permite, sem efetuar rebentamentos de várias magnitudes, comparar ondas de choque por similaridade escalar. A equação seguinte (2.4) define a relação, fórmula de Hopkinson (1915) e Cranz (1926):

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2.4)$$

onde Z é a distância reduzida $[m/kg^{1/3}]$ (escalar), R é a distância entre a superfície-alvo e o epicentro da carga explosiva $[m]$ e W a massa da carga explosiva $[kg]$ [23], [32].

2.2.3. Pressão incidente de pico

Uma das fórmulas que existem para caracterizar a pressão incidente de pico (P_{so} [MPa]), é a de Kinney e Graham [22]. A equação (2.5) a seguir apresentada é usada no presente trabalho:

$$P_{so} [MPa] = \frac{808 \times \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5}\right)^2\right] \times P_0}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,048}\right)^2\right]^{1/2} \times \left[1 + \left(\frac{Z}{0,32}\right)^2\right]^{1/2} \times \left[1 + \left(\frac{Z}{1,35}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (2.5)$$

2.2.4. Impulso específico incidente

O gráfico anteriormente apresentado referente ao perfil idealizado de pressões (**Figura 9**), possibilita, integrando a equação 2.1, a obtenção do impulso específico devido à onda de choque incidente. Este mesmo parâmetro de caracterização da onda de choque traduz-se na área abaixo (i_s) e acima (i_s^-) da curva. As equações seguintes traduzem os impulsos específicos positivo (2.6) e negativo (2.7):

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+t_0} P_s(t) dt = \frac{P_{so} \times t_0}{b} \times \left[1 - \left(\frac{1 - e^{-b}}{b}\right)\right] \quad (2.6)$$

$$i_s^- = \int_{t_a+t_0}^{t_a+t_0+t_0^-} P_s(t) dt = -\frac{P_{so} \times t_0}{b^2} \times e^{-b} \quad (2.7)$$

Kinney e Graham [22], desenvolveram ainda uma expressão empírica que permite, apenas com a variável distância reduzida, o cálculo do impulso específico em fase positiva:

$$i_s [MPa \cdot ms] = \frac{0,0067 \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,23}\right)^4}}{Z^2 \times \sqrt[3]{1 + \left(\frac{Z}{1,55}\right)^3}} \quad (2.8)$$

2.2.5. Pressão dinâmica de pico

Os efeitos de destruição de uma onda de choque, estão muitas vezes relacionados com a pressão incidente de pico. Todavia, em alguns edifícios torna-se importante a pressão dinâmica de pico, como parâmetro caracterizador dos efeitos destrutivos. Esta pressão ou efeito de sopro é cumulativo com a pressão incidente de pico [33]. Consiste na criação de pressões resultantes da aceleração do fluxo resultante do ar envolvente com produtos da explosão e sobrepõe-se à sobrepressão causada pela onda de choque, sendo função da pressão incidente de pico. As pressões resultantes geram sucções (análogas à ação do vento) nos elementos não diretamente carregados pela onda de choque, gerando-se forças laterais ou cargas de arrastamento (*drag loads*) nos mesmos [12], [32].

Na norma UFC 3-340-02 [23] está presente um gráfico que relaciona a pressão incidente de pico com a pressão dinâmica de pico. Tal gráfico encontra-se na **Figura 11**, juntamente com os resultados para as equações de Newmark's (2.9) (desenvolvida para baixas pressões e condições atmosféricas ao nível do mar) e de Rankine-Hugoniot (2.10) [12], [23]:

$$q_s = 0,022 \times (P_{so})^2 \quad (2.9)$$

$$q_s = \frac{5}{2} \frac{(P_{so})^2}{(7P_0 + P_{so})} \quad (2.10)$$

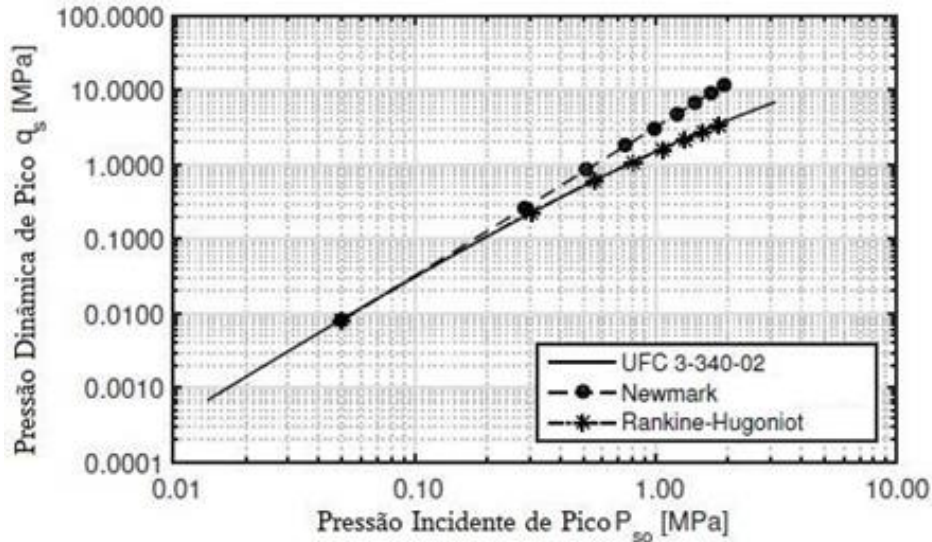


Figura 11 – Pressão dinâmica de pico [12].

2.2.6. Duração da fase positiva

Os danos que uma determinada estrutura sofre face a uma explosão são, em grande parte, dependentes da duração do carregamento. O mesmo está, portanto, relacionado com o tempo da fase positiva da explosão, t_0 [ms]. Kinney e Graham [22], mais uma vez, apresentam a equação (2.11) que possibilita calcular a duração da fase positiva (t_0):

$$t_0[\text{ms}] = \frac{980 \times \left[1 + \left(\frac{Z}{0,54}\right)^{10}\right] \times \sqrt[3]{W}}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,02}\right)^3\right] \times \left[1 + \left(\frac{Z}{0,74}\right)^6\right] \times \left[1 + \left(\frac{Z}{6,9}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (2.11)$$

2.3. Reflexão da onda de choque

A onda de choque, que interseja uma superfície sólida, sujeitar-se-á, no seu percurso, a fenómenos de amplificação e reflexão. Existem três tipos de reflexão, dependendo do ângulo de incidência, normal, oblíqua e a ressonante. O caso mais severo, no que toca a carregamento da estrutura sujeita à explosão, é a reflexão normal (**Figura 12**) que acontece quando a superfície é perpendicular à direção de propagação da onda. Portanto o contacto entre a onda de choque e a estrutura dá origem a pressões diferentes das idealizadas na anterior **Figura 9**. Verifica-se, pois, pela análise do gráfico presente na **Figura 13**, um acréscimo das pressões que originará um aumento do impulso, porém a duração das fases positiva e negativa, manter-se-á inalterada [8], [12], [32].

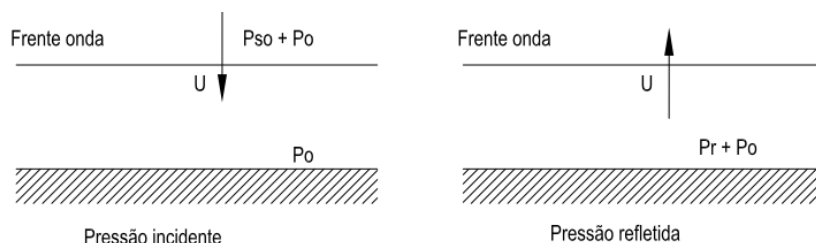


Figura 12 – Representação da reflexão normal [32].

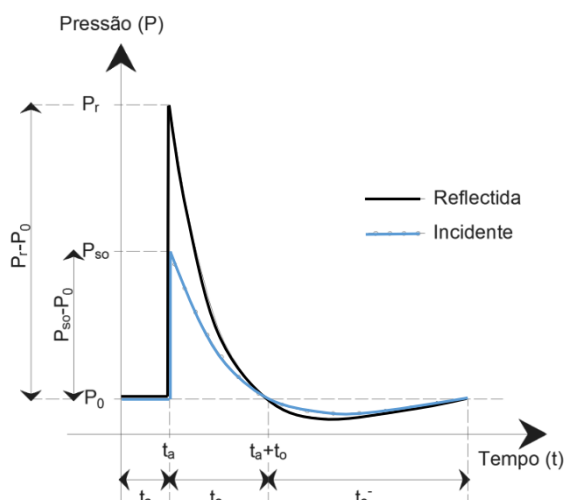


Figura 13 – Perfis idealizados das curvas de pressão incidente e refletida [18].

De entre vários métodos, o mais conhecido para calcular a pressão refletida (P_r), é o proposto por Rankine e Hugoniot (2.12). Este método admite que o ar tem o comportamento de um gás perfeito e considera o efeito de sopro das pressões dinâmicas originadas pelo fluxo de gases gerado pela passagem da onda de choque [34].

$$P_r[\text{MPa}] = 2 \cdot P_{so} \times \left(\frac{7 \cdot P_0 + 4 \cdot P_{so}}{7 \cdot P_0 + P_{so}} \right) \quad (2.12)$$

Seguidamente são apresentados na **Tabela 3** os valores de pressão refletida para várias combinações $W - R$ (massa em explosivo e distância do explosivo à superfície em estudo):

Tabela 3 – P_r [MPa] para várias combinações $W-R$ (adaptado de [15]).

$R[m]$	$W[kg]$	100	500	1000	2000
	TNT	TNT	TNT	TNT	TNT
1		165,8	354,5	464,5	602,9
2,5		34,2	89,4	130,8	188,4
5		6,65	24,8	39,5	60,19
10		0,85	4,25	8,15	14,7
15		0,27	1,25	2,53	5,01
20		0,14	0,54	1,06	2,13
25		0,09	0,29	0,55	1,08
30		0,06	0,19	0,33	0,63

No dimensionamento de estruturas, a pressão refletida de pico pode ser calculada através de uma aproximação triangular de um impulso, em que o valor máximo é P_r e o tempo de duração é t_0 . Portanto o impulso refletido, i_r , é calculado segundo a equação (2.13):

$$i_r = \frac{1}{2} \cdot P_r \cdot t_0 \quad (2.13)$$

Fica ainda importante realçar que Needham [34] sugere o uso da equação 2.14 ao contrário da equação anterior (2.13), pois afirma que sobrestima demasiado o valor do impulso refletido:

$$\frac{i_r}{i_s} \approx \frac{P_r}{P_{so}} \quad (2.14)$$

Contudo isto, existe uma expressão (2.15) que utiliza o coeficiente de reflexão, que tem valor adimensional, possibilitando, portanto, a análise da reflexão oblíqua (**Figura 14**). Esta é a expressão mais usual e abrangente [8], [25]:

$$P_r = P_{so} \times C_r \quad (2.15)$$

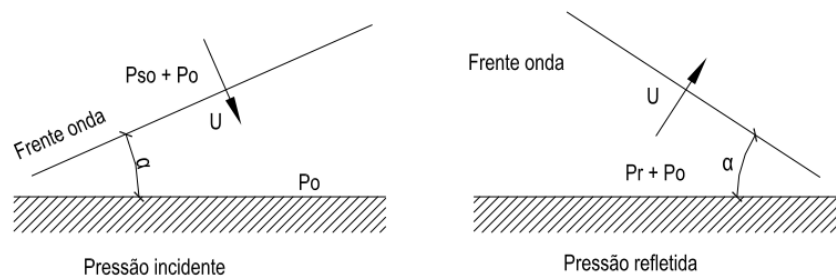


Figura 14 – Reflexão oblíqua [32].

Através do seguinte gráfico (**Figura 15**), a UFC 3-340-02 [23] sugere uma relação entre o coeficiente de reflexão e o ângulo de incidência, sendo possível obter o valor deste coeficiente em função da pressão incidente de pico (P_{so}).

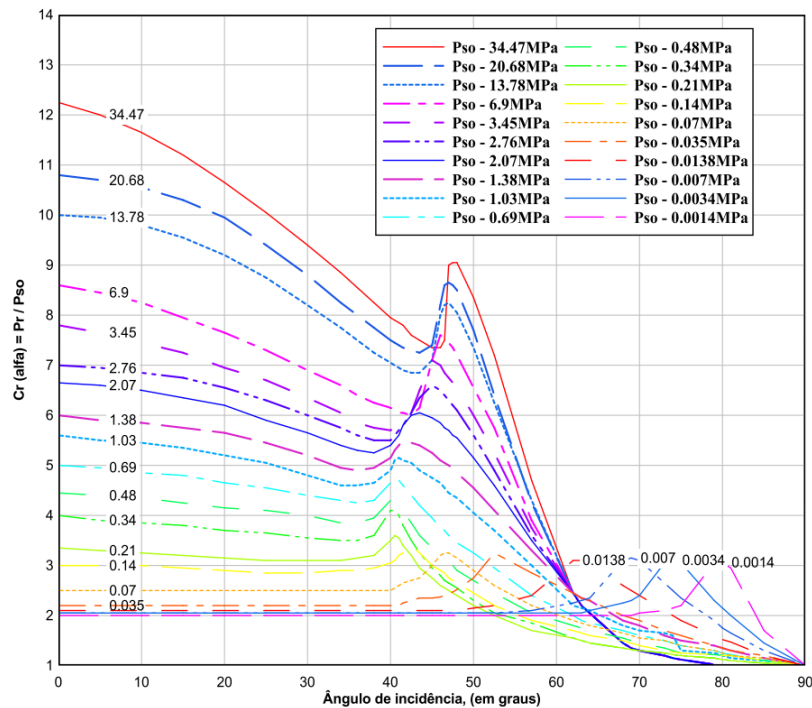


Figura 15 – Coeficiente de reflexão para pressões diferentes [32].

Nos casos em que a onda de choque refletida intersesta a incidente, resulta uma onda apenas, amplificada, formada no plano de reflexão. A onda que resulta é denominado de *Mach stem* ou onda ressonante (**Figura 16**) e acontece quando o ângulo de incidência excede o crítico, que para explosões superficiais é cerca de 40° . A onda ressonante baseia-se no facto de a onda incidente não poder ser ultrapassada pela onda refletida; é uma onda planar e a altura da mesma vai aumentando ao longo da propagação.

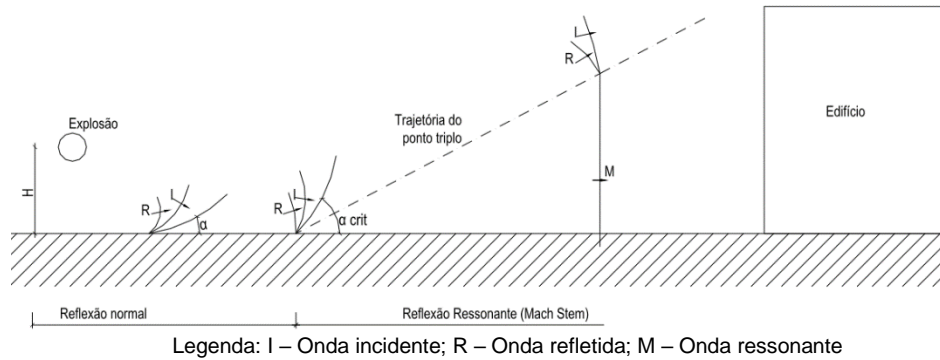


Figura 16 – Formação da onda de *Mach* [32].

2.4. Resposta à ação de explosão

Quando a onda de choque incide na face de uma estrutura, são criados fenómenos complexos consoante as pressões em causa, a geometria dos elementos, a disposição dos mesmos, e da distância e localização a que se encontram os obstáculos que originam fenómenos de reflexão. Dos dois casos típicos de comportamentos diferenciados, o primeiro dá-se com cargas de grande magnitude e localizadas a distâncias igualmente grandes; o segundo caso (objetivo de estudo deste trabalho) dá-se com cargas de baixa magnitude a distâncias reduzidas. Este segundo caso abrange tipicamente a maioria dos ataques terroristas (engenhos explosivos improvisados) [22].

Se se considerar uma estrutura de geometria retangular, a mesma será exposta a pressões na totalidade das suas faces. O comportamento da onda de choque que passa por esse edifício está exposto na **Figura 17**.

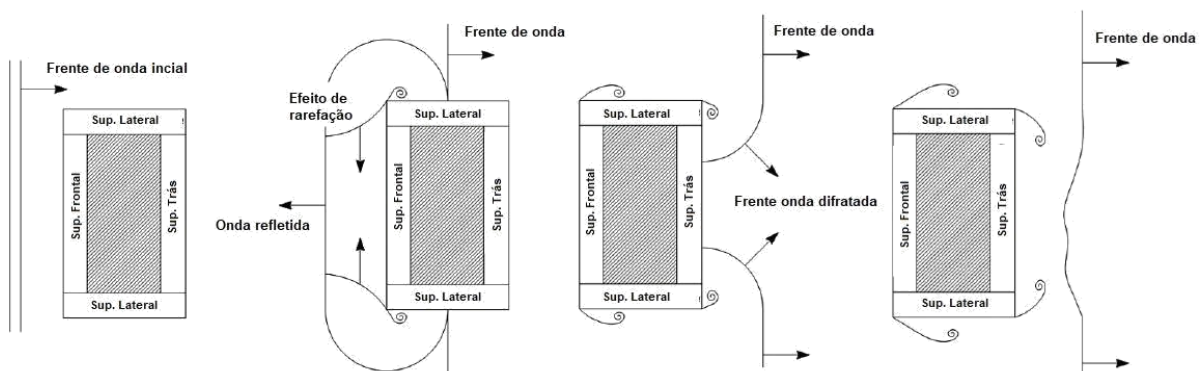


Figura 17 – Comportamento da onda ao passar por um edifício de base retangular [12].

O objetivo de, nesta dissertação, se considerar uma explosão a curta distância prende-se com o facto de desta forma se poder admitir uma superfície sujeita a uma carga, com inexistência de rarefações da onda no contorno da estrutura e sem ocorrência de difrações. Portanto, em suma, a

estrutura está sujeita a uma ação que será igual à pressão refletida pela mesma. Desta forma a análise da resposta da estrutura como um todo é caracterizada, não pela ação imposta à estrutura global, mas sim pela rutura de elementos considerados críticos [22], [32].

A superfície da frente da estrutura é, portanto, a mais condicionante pois é sujeita às pressões de pico, dinâmica e refletida. Na seguinte **Figura 18** estão graficados os perfis de pressões na superfície frontal da estrutura.

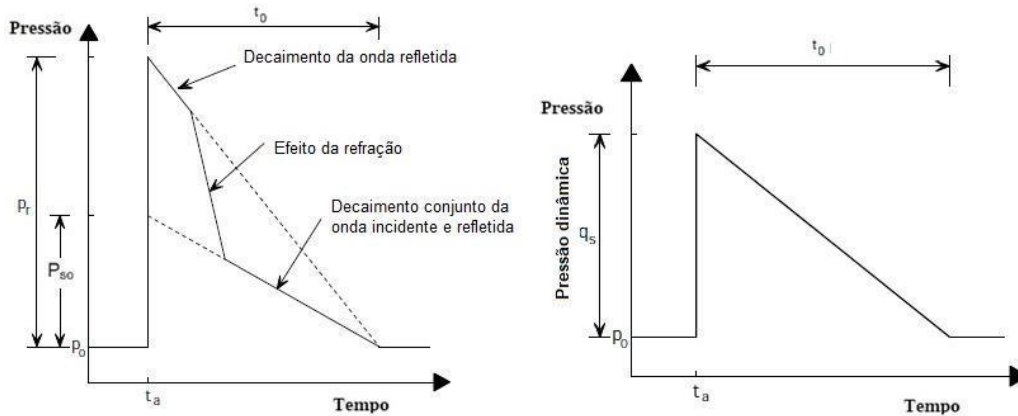


Figura 18 – Perfis de pressões na superfície frontal de uma estrutura [12].

A força de carga total de uma explosão é dada pela equação (2.16), em que $F_{impulsiva}$ (2.17) é a parcela referente à onda de choque, e $F_{dinâmica}$ (2.18) é a carga que resulta do fluxo de ar após a onda de choque (pressão dinâmica). A incógnita A_{proj} corresponde à área da estrutura em projeto de plano perpendicular à onda de choque e C_D representa o coeficiente de arrastamento. Este último para a superfície frontal de um edifício tem valor igual à unidade [25].

$$F(t) = F_{impulsiva}(t) + F_{dinâmica}(t) \quad (2.16)$$

$$F_{impulsiva} = P_r \cdot A_{proj} \quad (2.17)$$

$$F_{dinâmica} = q_s \cdot C_D \cdot A_{proj} \quad (2.18)$$

2.4.1. Regimes de resposta

A carga de uma explosão infligida a uma estrutura transmite energia, fazendo com que a mesma se comporte de forma dinâmica. Como uma estrutura ou elemento estrutural respondem a uma carga de explosão está inteiramente ligado à relação entre o seu período natural de vibração (T) e a duração da fase positiva da onda (t_0) (2.19). Constam na **Tabela 4** os tipos de regime de resposta existentes em função quociente seguinte [5]:

$$\frac{t_0}{T} \quad (2.19)$$

Tabela 4 – Identificação dos regimes de resposta (adaptado de [25]).

Regime de resposta	t_0/T
Impulsivo	$t_0/T \leq 0,4$
Dinâmico	$0,4 \leq t_0/T \leq 2$
Quase-estático	$t_0/T \geq 2$

Num regime de resposta impulsivo, a duração da carga da explosão é muito pequena comparada com o período natural da estrutura. A duração da carga é tal que a mesma acaba de atuar antes da estrutura ter tempo para responder como se estivesse a atuar uma carga estática equivalente. Grande parte das deformações ocorrem depois da onda de choque passar, graças à inércia da estrutura [25].

Entre o regime impulsivo e quase-estático, existe um mais complexo, geralmente designado de regime dinâmico. Neste regime, a duração da carga é idêntica ao período de vibração da estrutura e ao tempo que a mesma demora a responder, havendo, pois, amplificação da resposta. Esta resposta dá-se, portanto, ao mesmo tempo que o carregamento, o que torna possível uma análise correta num programa de cálculo automático [25].

Quando a duração da carga de explosão é muito superior ao período natural do elemento estrutural, a resposta designa-se quase-estática. Neste caso, a magnitude da carga pode ser considerada constante enquanto a estrutura atinge a sua máxima deformação. A resposta tende para uma força estática equivalente [25].

Para uma determinada estrutura e tipo de carga (e.g. pressão), pode ser graficada como na **Figura 19**, uma curva de iso-resposta, também denominada de diagrama pressão-impulso (P-I). A sua análise dá a entender que à medida que a duração da solicitação aumenta, a resposta torna-se mutável devido ao valor máximo de pressão e não de impulso (assíntota horizontal) [8]:

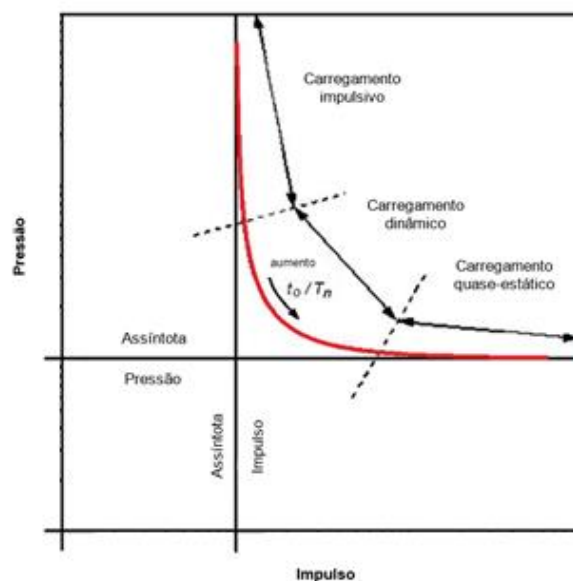


Figura 19 – Curva de iso-resposta (P-I) (adaptado de [8]).

No que toca a uma abordagem analítica, a maioria das estruturas tem um período natural bastante superior à duração da fase positiva da onda de choque, que é da ordem dos milissegundos. Estas estruturas quase não experienciam deformação antes da passagem total da onda de choque, sendo que o carregamento depende do valor do impulso. Por esta razão estas estruturas são geralmente consideradas rígidas durante toda a onda de choque. Tal significa que a resposta estrutural é calculada sem consideração da interação entre a pressão e a deformação da estrutura [8].

Capítulo III. Tecnologia das fachadas envidraçadas

3.1. Conceção geral de fachadas envidraçadas

Duma perspectiva histórica, a principal razão de qualquer construção para a criação de uma barreira eficaz contra o ambiente externo reside na necessidade de proteção associada ao mundo exterior, às condições climatéricas adversas [35].

Aliada à função principal de proteção face ao exterior, é possível referir ainda outras exigências relacionadas com o conforto de quem habita o espaço interior. A evolução da tecnologia fez com que esses requisitos aumentassem e, portanto, é importante referir que a responsabilidade das fachadas “aumentou” no que toca à eficiência da construção [35].

O vidro é um material transparente, que é amplamente utilizado em sistemas de fachadas modernas, nomeadamente em edifícios públicos e militares, de carácter estratégico, como edifícios governamentais, quartéis-generais, aeroportos, hospitais, museus e universidades.

O uso de elementos de vidro em fachadas exteriores de edifícios maximiza a entrada de luz natural, a ligação e a observação do espaço exterior, afetando positivamente o conforto dos seus ocupantes. Por outro lado, sob o ponto de vista arquitetónico, o uso do vidro em fachadas poderá melhorar a estética do edifício.

Estas características, aliadas à evolução da tecnologia do fabrico e produção do vidro e ao desenvolvimento de inovadoras soluções estruturais, têm levado ao uso crescente e generalizado de sistemas com fachadas envidraçadas em infraestruturas críticas, sendo um recente exemplo o novo Quartel General da NATO em Bruxelas, cuja construção foi concluída em 2016.

O desenvolvimento contínuo das fachadas envidraçadas engloba não só a qualidade do vidro mas também os sistemas de fixação, que têm por objetivo reduzir a presença de caixilharia com o intuito de aumentar a transparência [35].

3.2. Tipos de vidro e sua conceção

Em função da futura aplicação, a fabricação de vidro possui vários procedimentos. O vidro é um material que resulta de um rápido arrefecimento de matéria fundida, que atingirá uma certa rigidez no seu endurecimento, mas sem ocorrer a cristalização. Do ponto de vista químico, é possível fabricar vidros de vários tipos, conforme o seu desígnio. Na construção, o tipo de vidro mais comum é o sílico-sodo-cálcico, que possui grandes quantidade de dióxido de silício (ou sílica), que corresponde a um dos compostos que existem em maior quantidade no nosso planeta [35], [36].

De forma geral, e conforme a **Figura 20**, a sílica representa mais de 70% da totalidade da matéria original, à qual se adicionam, em pequenas quantidades, um fundente (e.g. óxido de sódio) para baixar o ponto de fusão da mistura para cerca de 550°; um estabilizante (e.g. óxido de cálcio) para suprimir a solubilidade do composto sílica-fundente melhorando a resistência química; e outros óxidos (e.g. de alumínio e magnésio) com vista a aumentar a resistência mecânica e a agentes atmosféricos do futuro vidro [36].



Figura 20 – Composição do vidro [36].

3.2.1. Vidro Float e Recozido

Na construção, o vidro utilizado é na maior parte das vezes fabricado pelo procedimento do vidro *float* (do inglês *float glass*) (Figura 21), que representa mais de 90% da produção de vidro plano. O vidro, através deste procedimento é obtido por escoamento da massa fundida sobre uma base líquida de estanho, num ambiente controlado. Como a massa, que chega a 1100° proveniente da secção de condicionamento a seguir ao tanque de fusão (1500°), é menos densa flutua sobre o estanho líquido e lentamente arrefece, solidificando. Na câmara fria, dá-se o arrefecimento lento que conduz a vidro comum/*float*. Se o objetivo for fazer vidro recozido então o vidro quando sai da área de flutuação entra na câmara de recozimento ou forno de Lehr, a cerca de 600°, e dá-se o recozimento, que suprime ao máximo esforços residuais [35]–[37].

À saída da câmara fria tem-se, portanto, somente o produto base (vidro comum/*float*) que futuramente irá ser tratado para que as suas propriedades correspondam aos objetivos exigidos. Este vidro constitui-se como matéria-prima da maior parte dos vidros tratados que existem no mercado. Tanto o vidro comum sem tratamento como o vidro recozido, são vidros que estilhaçam irregularmente em pedaços aguçados e com arestas cortantes. Podem ser furados e cortados e têm uma resistência mecânica média [35], [36].

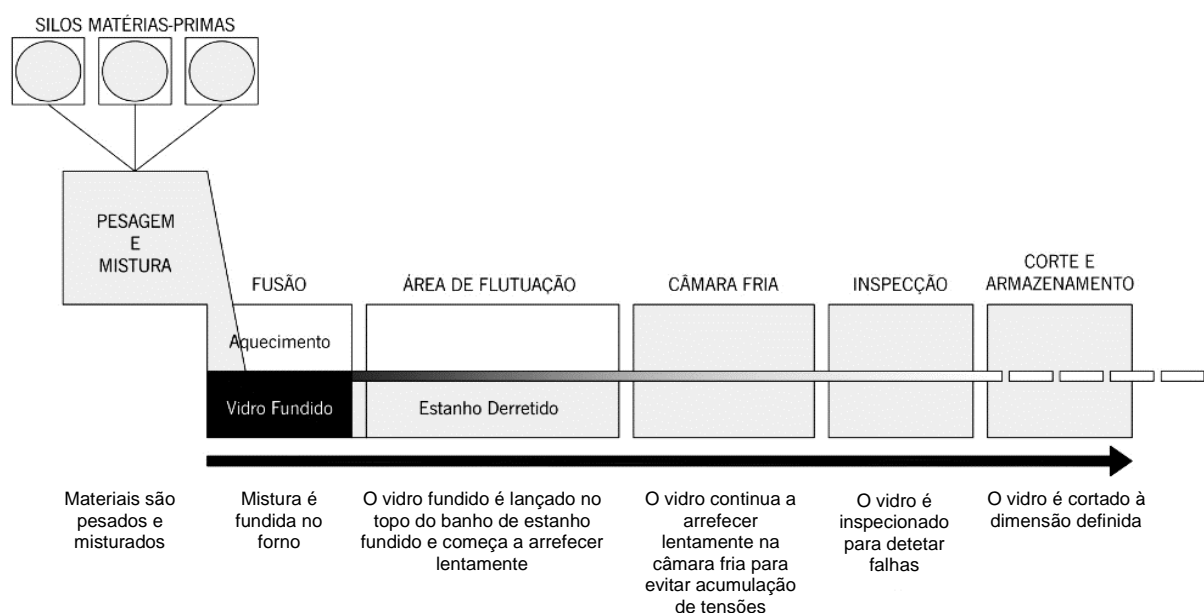


Figura 21 – Processo de fabricação do vidro *float* (adaptado de [38]).

Antes de ser transformado e de ser sujeito a tratamentos térmicos e químicos, com vista a melhorar o seu comportamento pós-rotura, o vidro recozido deve ser cortado às dimensões desejadas; as arestas deverão ser tratadas e feitos furos para posteriores ligações, conforme a **Figura 22**. Os furos devem ter diâmetro igual à espessura do painel no mínimo, mas preferencialmente deve ter o dobro [36].

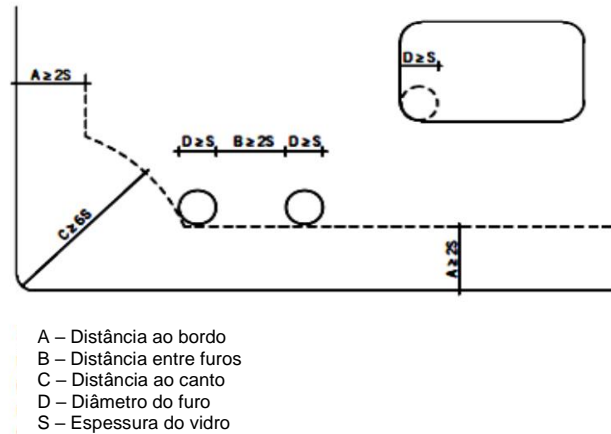


Figura 22 – Distâncias entre arestas e furos num painel (adaptado de [39]).

3.2.2. Vidro Temperado

Existem dois tipos de têmpera: a térmica e a química. No que toca à térmica, esta sujeita o vidro comum a um tratamento por temperatura, que visa aumentar a resistência mecânica e o tamanho dos estilhaços pós rotura. Neste tipo de tratamento, aquece-se o vidro *float*, a uma temperatura cerca de 650° num forno de têmpera e, posteriormente, de forma repentina procede-se a um arrefecimento por jatos de ar, de modo que haja choque térmico que aumente a resistência do vidro por compactação das camadas mais superficiais [35], [36].

O arrefecimento rápido possibilita a introdução de tensões de compressão nas camadas superficiais do vidro (20% da espessura nos dois lados), e de tensões de tração nos 60% restantes que corresponde à zona intermédia (**Figura 23**). Portanto o vidro temperado fica com uma tensão de cedência muito superior ao vidro recozido [35], [36].

Devido às suas tensões superficiais de compressão é possível reduzir o tamanho das fixações e das suas áreas em contacto com o vidro temperado. Torna-se possível, então, usar sistemas de fixação mais audaciosos como os sistemas de fixações pontuais modernos [35], [36].

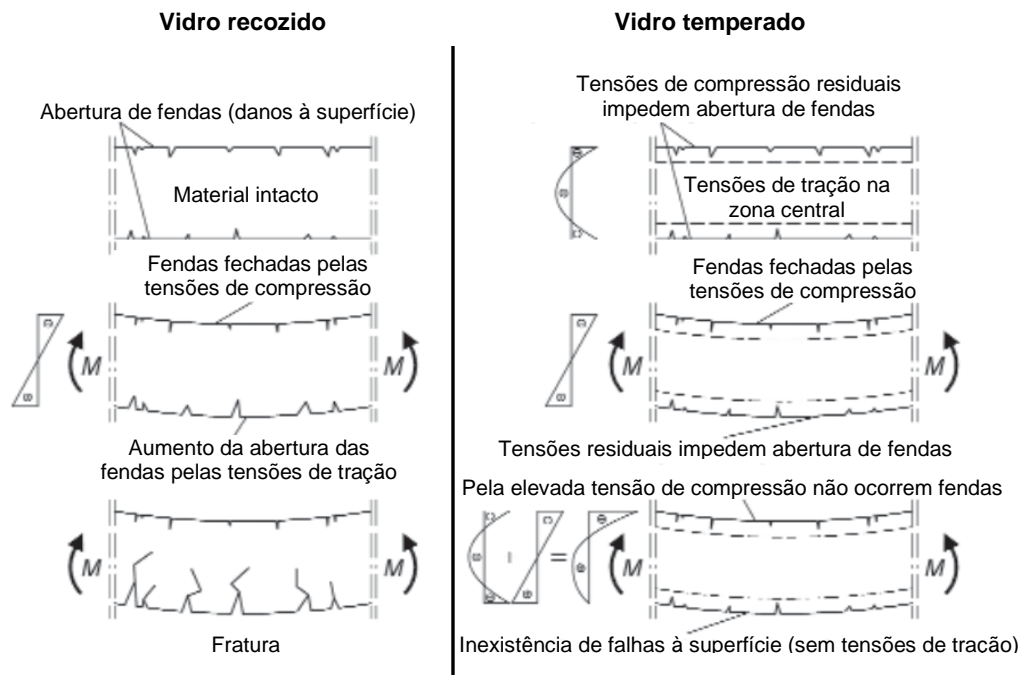


Figura 23 – Diferenças nas tensões no vidro recozido e temperado (adaptado de [40]).

No caso de quebra, as tensões que se encontram acumuladas no vidro temperado provocam que o mesmo, quando rompe, se fragmenta em estilhaços de reduzidas dimensões que, por sua vez, são menos perigosos que os pedaços irregulares e pontiagudos do vidro comum. Todavia se houver queda a uma altura grande de fragmentos agregados, constitui-se um perigo bastante elevado [35], [37].

Existem, pois algumas consequências e inconvenientes em todo o processo de têmpera. Uma delas é que devido à introdução de tensões superficiais, o vidro temperado não é tão plano quanto o vidro recozido. Estas tensões fazem ainda com que se alterem propriedades de reflexão e, portanto, se notem variações nas cores refletidas, o que, legalmente, não é considerado um defeito (flôr da têmpera) [35], [36].

Como já foi referido o arrefecimento é bastante rápido, o que, se existirem impurezas (e.g. sulfuretos de níquel - NiS), num posterior aquecimento superior a determinadas temperaturas pode provocar tensões locais em certos pontos no vidro temperado, seguidas de quebra espontânea do painel. No entanto este acontecimento pode ser mitigado através do *Heat Soak Test* (HST). O HST é um teste em que se introduz o vidro temperado numa câmara própria onde se aumenta a temperatura do ar durante 5 horas, até aos 300° sensivelmente. De seguida mantém-se essa temperatura por 6 a 8 horas e depois, começa-se a diminuir ao longo de 12 horas. Todo este processo tem o objetivo de ativar uma reação de mudança nos sulfuretos de níquel e provocar a quebra precoce dos painéis em que as concentrações desses compostos sejam mais críticas. Este é um teste que aumenta o custo do vidro produzido, nem sempre é realizado, mas é sempre aconselhado. O HST é indispensável quando a fixação do vidro é feita sem o uso de caixilharia e nos casos em que a sua substituição é complicada, demorada e muito dispendiosa, como por exemplo nas fachadas com vidros exteriores agrafados (VEA) (fixos pontualmente) e vidros exteriores colados (VEC) [35]–[37].

Todo o tratamento térmico possibilita que o vidro temperado além de possuir resistência mecânica muito superior ao vidro recozido, consegue aguentar variações de temperatura de até 200

graus. É, pois, por excelência considerado, devido a todas as características anteriormente enunciadas, um vidro de segurança para diversas aplicações [35], [37].

Relativamente à têmpera química, a mesma é um processo muito dispendioso e de poucas aplicações, sendo predominantemente utilizado na indústria aeronáutica. É um processo em que se dá a substituição dos íons de sódio da superfície do vidro por íons maiores de potássio. A utilidade desta têmpera reside no facto de serem permitidos a perfuração e o corte posteriores do painel, para além de conferir uma resistência mecânica superior (350 MPa), contrariamente ao vidro de têmpera térmica. No entanto, apenas é afetada uma espessura reduzida do vidro, logo pode não ser eficaz no caso de as fendas terem dimensão superior à parcela de espessura sujeita ao tratamento [35].

3.2.3. Vidro Termo-endurecido

A indústria desenvolveu o vidro termo-endurecido com o intuito de colmatar problemas de quebra espontânea do vidro temperado e também com a obtenção de vidros de elevada resistência a gradientes térmicos altos. Este tipo de vidro é obtido de forma semelhante ao vidro temperado, porém tem um arrefecimento mais lento na sua “têmpera”. O facto anterior faz com que o vidro resultante tenha tensões superficiais de compressão na ordem dos 30 a 60 MPa, e uma resistência mecânica duas vezes superior a um vidro recozido de espessura igual. Devido a tudo isto mitiga-se a existência de concentrações críticas de sulfuretos de níquel e por conseguinte o HST. Obtém-se então um vidro que resiste a gradientes térmicos de 100°C [35], [37].

O vidro termo-endurecido poderá exibir alterações nas propriedades reflexivas, havendo uma alteração nas cores refletidas, causadas pelas tensões superficiais de compressão. O acabamento, a perfuração e o corte, têm que ser feitos pré-termo-endurecimento. A quebra deste vidro é idêntica à quebra do vidro recozido, logo não se considera vidro de segurança [35], [37].

3.2.4. Vidro Monolítico, Laminado e Isolante

O vidro monolítico é, nem mais nem menos, um único painel de vidro de um dos tipos anteriormente citados (**Figura 27 a**).

Relativamente ao vidro laminado (**Figura 27 b**), inventado em 1903 pelo químico francês Eduard Benedictus, o mesmo é um vidro de segurança constituído por duas ou mais lâminas de vidro ligadas por uma ou mais camadas intermédias transparentes. No processo de produção de vidro laminado (**Figura 24**), os painéis de vidro e as camadas intermédias são aquecidos a cerca de 140° e pressionados a 14 bar com vista a eliminar quaisquer inclusões de ar e formar a ligação [37].

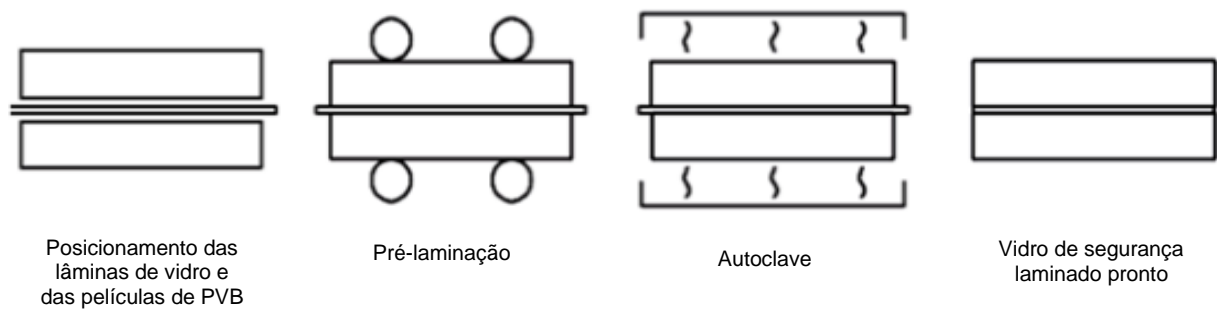


Figura 24 – Processo de produção de vidro laminado (adaptado de [36]).

A camada intermédia mais usada é o Polivinil Butiral (PVB), um polímero, com espessura de 0,38mm ou múltipla. No entanto, começa a ser comum, com o objetivo de aumentar a resistência ao impacto, a produção de vidro laminado com camadas intermédias feitas de outros materiais como: poliamida, policarbonato, *SentryGlasPlus*® (SGP), espuma vinílica acetinada (EVA), poliuretano termoplástico (TPU), etc [16], [35], [37].

O vidro laminado com camada intermédia em PVB é representado por dois algarismos que indicam as espessuras das lâminas de vidro, seguidos de um ponto e outro algarismo que indica o número de películas de PVB. Por exemplo, um vidro laminado 86.1 é um vidro composto por duas lâminas, uma de 8 mm e outra de 6 mm e entre elas uma única película de PVB [35]. Então, não é obrigatório que as lâminas de vidro presentes num painel de vidro laminado tenham a mesma espessura (**Figura 25**).



Figura 25 – Vidros laminados de diferentes dimensões na espessura total (adaptado de [36]).

Nota: A linha a traço ponto em cada uma das figuras a), b) e c) encontra-se a linha média.

O vidro laminado não foi desenvolvido para atingir resistências mecânicas mais elevadas, pois se tiver a mesma espessura que um vidro monolítico, a sua capacidade é inferior. Isto deve-se ao facto de as deformações das lâminas sobrepostas obrigam que o vidro não trabalhe como um todo, de forma unitária [35].

Em caso de rotura de uma das camadas de vidro, não haverá danos maiores pois a ou as camadas restantes ilesas sustentarão a que quebrou. Em caso de rotura total, a camada intermédia mantém os fragmentos juntos fazendo com que o vidro quebrado não se projete em pedaços grandes

e afiados, continuando a conferir uma pequena resistência ao painel de vidro laminado. A camada de PVB confere isolamento sonoro devido ao efeito de amortecimento e bloqueia parcialmente a radiação ultravioleta (UV). O vidro laminado é usado nos locais onde existe a possibilidade de a sua quebra atingir seres humanos, onde possa cair se estilhaçado e para assegurar resistência pós-rotura (e.g. varandas, coberturas, etc.) [35], [37].

De seguida, na **Figura 26**, são enunciadas as formas como se comportam pós-rotura vidros laminados constituídos por vidro recozido, temperado e termo-endurecido, para que melhor se compreenda a diferença de funcionamento entre cada vidro de segurança.

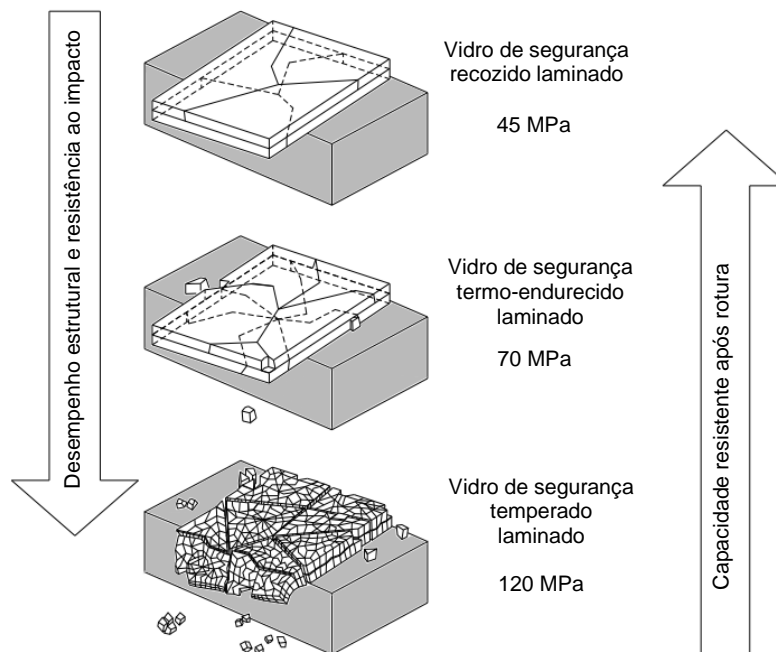


Figura 26 – Comportamento pós-rotura de cada tipo de vidro (adaptado de [37]).

No que toca ao vidro isolante (**Figura 27 c**), este corresponde a um conjunto de dois ou mais painéis hermeticamente selados que formam uma unidade envidraçada simples com um espaçamento entre cada painel. A sua função é melhorar o comportamento térmico do vidro. Este espaçamento pode conter o ar que se respira ou então outros gases como árgon ou krípton, o que prevenirá o aparecimento de condensações e melhorará o isolamento. Um espaçamento de 16 milímetros é geralmente utilizado como o espaçamento ótimo, sendo que tal depende de vários fatores. Fatores esses são o tamanho do envidraçado, a diferença de temperatura entre os dois painéis e se estão na horizontal ou vertical. Os vidros isolantes mais usados são compostos por duas camadas de vidro. Vidros isolantes com três ou mais camadas são geralmente usados em climas frios severos [37].

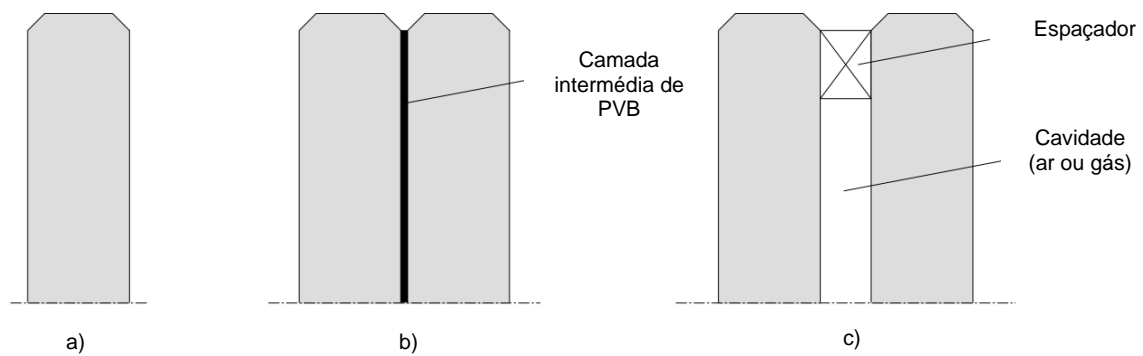


Figura 27 – Vidro monolítico a), laminado b) e isolante c) (adaptado de [37]).

3.3. Materiais constituintes

3.3.1. Vidro

As propriedades importantes, do ponto de vista da capacidade de carregamento e durabilidade do vidro estrutural serão, de seguida, descritas. Outras propriedades como por exemplo valores de transmissão, efeitos de revestimentos, valores de isolamento são admitidos como sendo não relevantes em combinação com o Eurocódigo de dimensionamento de vidro estrutural [41].

No seu estado rígido, o vidro pode ser considerado como um sólido amorfo, devido ao seu comportamento mecânico bastante frágil sem qualquer capacidade plástica de deformação. Sob carregamento a sua resposta é perfeitamente linear seguida de rotura súbita. O facto de o vidro ser um material isotrópico faz com que seja a sua composição química e velocidade de arrefecimento durante a sua produção que ditam as suas propriedades, e não a direção e/ou orientação em causa [36], [41].

Propriedades físicas

Relativamente às propriedades físicas a salientar no vidro, estas são a densidade, resistência à abrasão e dureza. O vidro tem uma densidade de 2500 kg/m^3 , podendo este valor variar conforme a constituição do mesmo. É um material que o seu aspeto físico é alterado por fricção e erosão sucessivas. No entanto possui uma grande resistência à abrasão ou desgaste. O vidro possui uma dureza de 6.5 segundo a Escala de Mohs, que determina a dureza relativa entre minerais, ou seja, a resistência que o vidro possui quando riscado, isto é, quando são retiradas partículas da sua superfície, situa-se entre a resistência dos minerais feldspato e quartzo. Sabendo que esta escala vai até valor 10 que corresponde a diamante, pode-se dizer que o vidro tem uma dureza bastante elevada [36], [42].

Propriedades térmicas

Do ponto de vista térmico, o vidro dificulta a transmissão de calor, ou seja, tem uma condutividade térmica baixa. Por outras palavras, se uma aresta do painel aquece, esse calor demora algum tempo até chegar a outra aresta. Ao contrário de um arrefecimento rápido (e.g. têmpera), o aquecimento brusco do vidro faz com que o material dilate e surjam compressões que promovam a mitigação de fissuras. É necessário ter bastante atenção relativamente à rotura térmica do vidro. Se o vidro for aquecido de forma lenta e apenas numa parcela, a parcela que não for aquecida contraria a dilatação, instalando-se assim tensões de tração. Se estas tensões forem superiores às tensões de tração admissíveis para o tipo de vidro em causa, este simplesmente quebra, atingindo-se a rotura térmica [36], [43].

Outra propriedade associada à temperatura, é a resistência ao choque térmico. A capacidade que o vidro tem de resistir a uma variação abrupta de temperatura é tanto maior quanto menor foi a dilatação térmica, ou seja, relacionam-se inversamente. A dilatação é influenciada pela composição química que o vidro possui. Em vidros de composição igual, a diferença de temperatura entre as duas faces vai ser tanto maior quanto maior for a espessura total, e conseqüentemente menor é a resistência ao choque térmico. A têmpera e a alteração da constituição do vidro são duas formas de melhorar o comportamento do vidro face ao choque térmico. Na têmpera, seria necessária uma variação de temperatura maior que a variação que a têmpera proporcionou para abolir as tensões de compressão instaladas e surgirem tensões de tração. A alteração da constituição do vidro, por sua vez, pode ser alterada para que o mesmo tenha uma dilatação menor quando é sujeito a calor [36], [43].

Na seguinte **Tabela 5**, estão descritos valores das propriedades térmicas do vidro:

Tabela 5 – Propriedades térmicas do vidro (adaptado de [36] e [43]).

Propriedade	Valor
Condutividade térmica (λ)	$1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Coefficiente de expansão térmica (α)	$9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Resistência ao choque térmico (ΔT)	40 K
Calor Específico (c_p)	$720 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Propriedades mecânicas

Em referência às propriedades mecânicas do vidro, é possível dizer imediatamente que é um material frágil. É um material que, quando submetido a tensões de tração crescentes, se deforma elasticamente, ou seja, volta à sua posição original quando deixa de ser carregado pelas forças que o deformam. Não tem capacidade de deformação plástica logo não tem capacidade de redistribuição de esforços. Quando chega ao fim da sua capacidade elástica, parte-se subitamente, isto é, o seu limite de elasticidade é igual ao de quebra. De seguida, na **Figura 28**, ver-se-á a comparação das leis constitutivas do vidro e do aço, material com que se possui a capacidade de se deformar tanto elástica como plasticamente [36], [41].

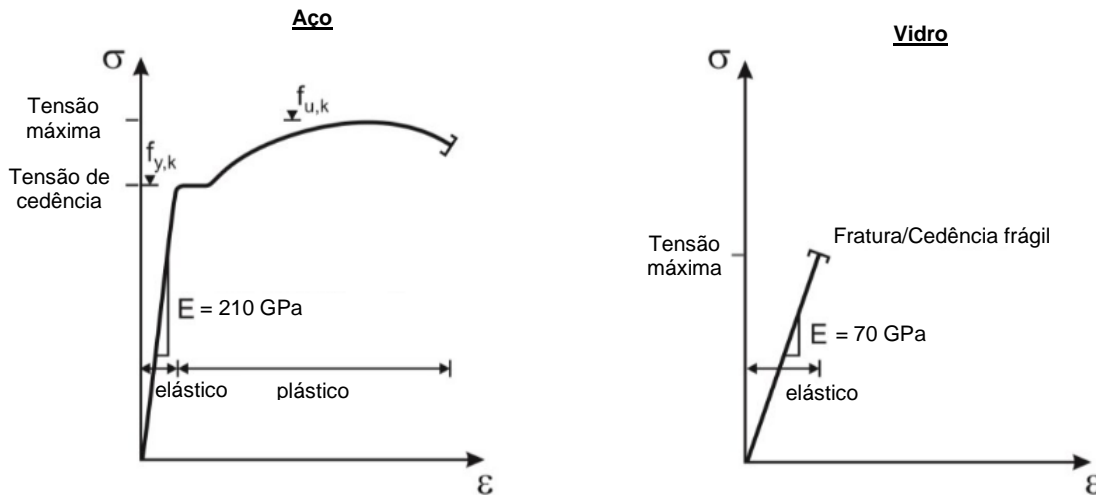


Figura 28 – Comparação das leis constitutivas do aço e do vidro (adaptado de [41]).

O vidro considera-se, então, um material elástico perfeito e não acomoda deformações permanentes. Comparativamente ao aço (210 GPa), o vidro tem um módulo de elasticidade (E) de 70 GPa que se revela sendo relativamente alto, uma vez que, corresponde a sensivelmente um terço do módulo do aço [36].

Outra propriedade da mesma natureza é o coeficiente de Poisson. Segundo a bibliografia consultada, o material vidro possui coeficiente de Poisson positivo na ordem dos 0,20 a 0,25, ou seja, alonga na direção e sentido que essa tensão é aplicada, e estreita na direção contrária. Este valor não representa a resistência prática do vidro, não obstante ser obtido através de ensaios padrão [36].

Teoricamente, o vidro possui uma resistência à tração de 8 GPa. Este valor é calculado com base na força das ligações entre os seus átomos constituintes. No entanto é um pouco incerto saber a resistência à tração na prática. Fabricar painéis de vidro, sem qualquer tipo de imperfeição ou defeito, tem uma probabilidade próxima de zero. O facto de o vidro possuir uma estrutura bastante irregular e de ser sujeito a grande desgaste/abrasão justificam a disparidade entre o valor teórico da resistência à tração e o seu valor real, que é sensivelmente 1% do teórico. Esta discrepância também pode ter por base a duração da ação, a humidade relativa do meio que promove o agravamento de imperfeições, o tipo, a idade e as dimensões do painel que quanto maiores mais provável é a existência de fissuras [36].

No que toca à resistência prática à compressão, é aproximadamente 0,5 GPa, mais baixa que a resistência teórica de 0,9 GPa, todavia este parâmetro varia menos do que a resistência à tração quando se considera a existência de defeito no vidro. Se o vidro estiver sujeito a uma carga permanente, então a sua resistência à compressão diminui para o valor de 170 MPa. Portanto, o vidro tem melhor comportamento à compressão do que à tração, tal como o betão [36].

Relativamente à propagação e agravamento de fissuras, os esforços de tração nas zonas fissuradas aumentam a probabilidade de concentração de tensões no início da fissura, ao contrário dos esforços de compressão. A concentração e tensões nesse local promove o agravamento da

imperfeição e, conseqüentemente, o aumento da debilidade do painel de vidro. Quando é atingido o limite de tensões, as imperfeições/fissuras rapidamente se estendem até à outra face do painel, quebrando-o [36] (**Figura 29**).

Existem formas de melhorar a resistência mecânica do vidro, tais como as que já foram enunciadas anteriormente na produção de vidro termo-endurecido e temperado. Estas formas mitigam a existência e agravamento de fissuras e possibilitam a utilização do vidro como parte integrante de uma estrutura, aumentando a sua resistência à tração e flexão.

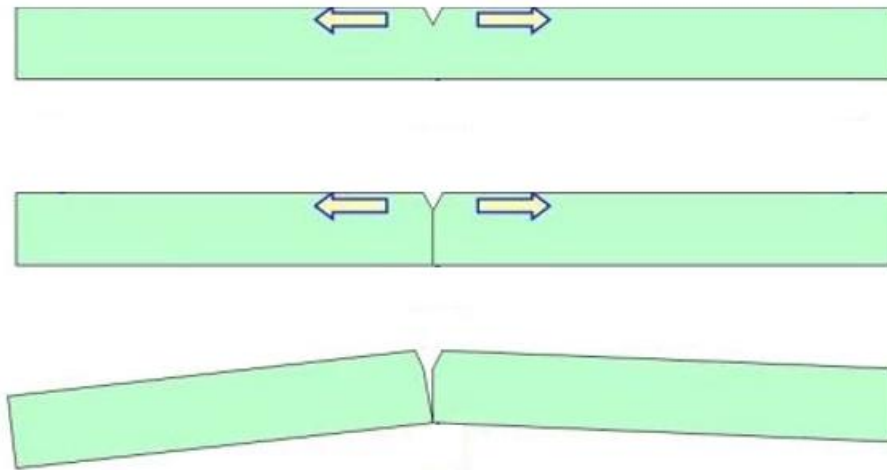


Figura 29 – Agravamento de fissuras no vidro.

Na seguinte **Tabela 6** tem-se, em suma, valores para as propriedades mecânicas do vidro:

Tabela 6 – Propriedades mecânicas para cada tipo de vidro (adaptado de [36]).

Propriedade \ Tipo de Vidro	Recozido	Termo-endurecido	Temperado
Módulo de elasticidade E (GPa)	70 – 75		
Módulo de distorção G (GPa)	26 – 33		
Coefficiente de Poisson ν	0,20 – 0,25		
Resistência à compressão (MPa)	400 – 1000		
Resistência à tração (MPa)	50	110	250
Resistência à flexão (MPa)	45	70	120

No caso do vidro laminado é ainda importante falar no seu comportamento pós-rotura. O mesmo é dependente da capacidade de transmissão de carga da camada intermédia que une as lâminas de vidro. A camada intermédia irá ser estudada mais aprofundadamente na secção seguinte da presente dissertação. O módulo de distorção (G), que caracteriza a resistência ao corte dos materiais, é de importância extrema neste tópico. Como já foi referido, as camadas intermédias mais conhecidas são os compostos à base de PVB e os polímeros ionoplásticos (SGP). Os desempenhos

destas *interlayers* são bastante díspares conforme as condições em que são utilizadas. As *interlayers* de PVB possuem grande dominância do mercado (cerca de 90%), sendo que são as mais usadas em vidro laminado atualmente. Todavia, devido à sua grande rigidez, os polímeros ionoplásticos têm vindo a ganhar espaço de mercado nos anos mais recentes [16], [30].

Teoricamente, é possível admitir dois casos distintos para o comportamento do vidro laminado. No primeiro caso toma-se G de valor infinito, portanto o vidro laminado terá comportamento semelhante ao vidro monolítico, ou seja, a transmissão de esforços entre lâminas é integral. No segundo caso, considera-se um módulo de distorção quase nulo, isto é, as duas lâminas comportam-se separadamente e dá-se o deslizamento entre ambas. O que se verifica na realidade é um comportamento intermédio entre estes dois casos teóricos e os materiais usados levam a que seja mais semelhante ao primeiro ou ao segundo [16].

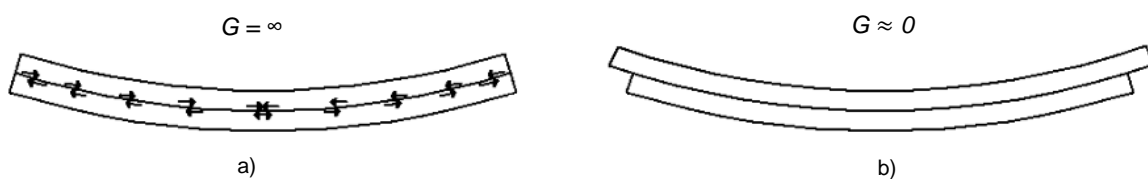


Figura 30 – a) G infinito; b) G aproximadamente nulo (adaptado de [16]).

3.3.2. Camada intermédia

No caso do PVB (camada intermédia utilizada no desenvolvimento desta dissertação), este é um polímero termoplástico, de comportamento viscoelástico na gama de temperaturas que afetam, em condições de serviço, os edifícios (-20°C a 80°C). Como polímero viscoelástico que é, possui um comportamento mecânico de ligação muito estreita com a duração da carga e com a temperatura do meio onde se insere. A fluência e relaxação que exhibe, são diretamente proporcionais ao tempo de carregamento, e agravados na presença de temperaturas altas [15], [30].

Para que se possa determinar as propriedades mecânicas de vidro laminado, é imperativo saber, com precisão, as propriedades do PVB para uma grande amplitude térmica e para diferentes ações; e caracterizar o carregamento de forma correta para o tempo de vida útil do elemento [15].

Na maioria dos casos, as curvas características dos polímeros viscoelásticos obtêm-se através de *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA) ou análise mecânica dinâmica e do emprego da teoria da sobreposição de Williams-Landell-Ferry (WLF). A WLF possibilita a caracterização de natureza reológica do material utilizando as curvas de resposta para várias gamas de temperaturas e frequências de atuação do carregamento, que podem ser consultadas em bibliografia especializada ou fabricantes [15], [30], [44].

Finalmente na **Tabela 7**, estão descritas as principais propriedades do material polimérico PVB.

Tabela 7 – Propriedades do PVB (adaptado de [16], [43], [45]).

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade (E)	985 MPa
Tensão de tração (f_t)	28 MPa
Alongamento de rotura (ε_t)	≥ 300 %
Densidade (ρ)	1,07 g.cm ⁻³
Coefficiente de expansão térmica (α)	80×10^{-6} K ⁻¹
Coefficiente de Poisson (ν)	0,49

3.4. Sistemas de fixação

O objetivo principal de um sistema de fixação de estruturas de vidro reside na mitigação do contacto direto entre o envidraçado e os componentes metálicos que normalmente são utilizados no suporte. Hoje em dia é, perfeitamente, possível construir fachadas envidraçadas sem o uso da caixilharia tradicional, possibilitando assim uma diminuição da obstrução visual por diminuição do tamanho dos sistemas de fixação/conexão. No entanto, esta diminuição promove o aumento das tensões instaladas no envidraçado [16], [36].

A bibliografia consultada afirma que se podem dividir os sistemas de fixação em dois tipos: os sistemas de fixação mecânicos e os sistemas de fixação aderentes. Cada um destes divide-se em vários grupos e subgrupos. A **Figura 31** sintetiza cada tipo e subtipo de fixação que caracterizam as tipologias de fachadas existentes.

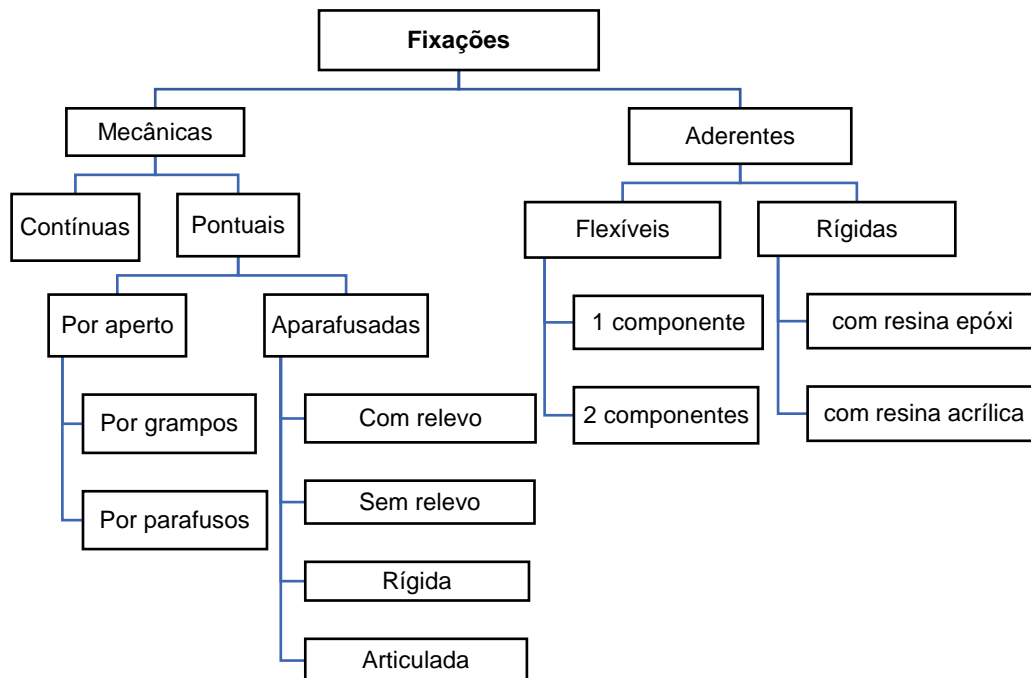


Figura 31 – Esquema-resumo dos tipos de fixação de painéis de vidro.

De seguida serão descritos estes sistemas, sendo apresentados alguns exemplos.

3.4.1. Fixações mecânicas

Este tipo de fixação abrange os casos em que a transferência de esforços se dá por intermédio de um elemento mecânico. Corresponde à ligação mais utilizada em elementos de vidro, existindo bastante mercado e várias soluções para o mesmo tipo de fixação. Estas variam em resposta estrutural e aspeto e têm de ser protegidas face à corrosão. As fixações mecânicas dividem-se em fixações contínuas e fixações pontuais [36], [43].

3.4.1.1. Fixações contínuas

As fixações mecânicas contínuas ou, por outras palavras, suportes lineares, correspondem à solução de fixação mais comum e antiga. Este tipo de fixação consiste no suporte de painéis de vidro em dois ou três lados ou em todo o seu contorno, recorrendo ao uso de caixilharias em alumínio, madeira ou plástico [36], [43].

Neste caso, o caixilho, através dos calços de apoio compostos por polímeros ou neopreno® colocados no bordo inferior, suporta o peso próprio do painel. Isola-se este sistema por impedimento do contacto vidro-metal, recorrendo à colocação de silicone ou juntas de etileno-propileno-dieno (EPDM) (borracha). Nas fachadas cortina, as cargas devido à ação do vento (direção horizontal) percorrem o seu caminho até à estrutura por dois perfis que fixam o vidro. Tanto na vertical como na horizontal são colocadas tampas embelezadoras como mostra a **Figura 32** [36], [43].

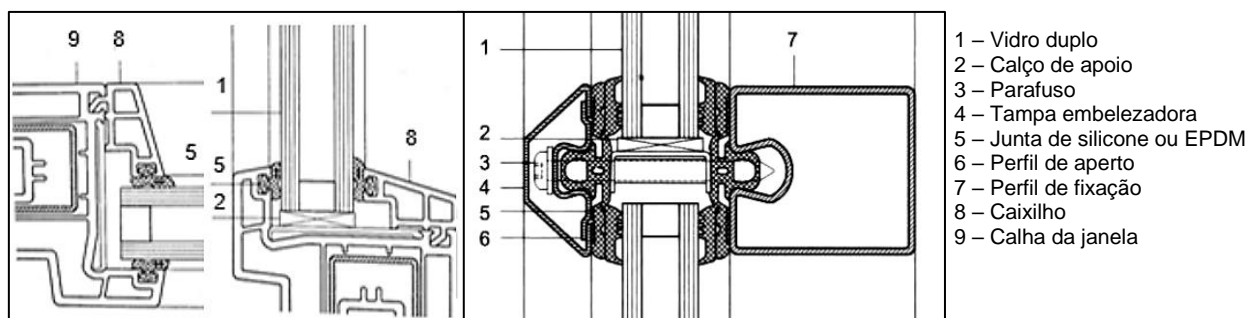


Figura 32 – Sistema de fixação contínuo (fachada em cortina) (adaptado de [43]).

3.4.1.2. Fixações pontuais

No que concerne a fixações mecânicas pontuais, como o nome evidencia, os envidraçados são fixos à estrutura em determinados pontos. Evita-se, mais uma vez, o contacto entre vidro e sistema de fixação por recorrência a materiais intermédios. Este método de fixação pelo facto de possuir menos material em contacto com o envidraçado possibilita que se possa tirar maior partido do potencial do vidro, obtendo-se uma fachada mais transparente. Estas fixações dividem-se ainda em dois subgrupos: as fixações pontuais por aperto e as fixações pontuais aparafusadas [16], [36], [43].

As fixações por aperto (**Figura 33**) são aplicadas por uma estrutura de aperto em pontos discretos dos bordos do painel. Subdividem-se, ainda, em dois tipos: aperto por grampos e aperto por parafusos. A transferência de cargas, nos dois tipos, faz-se por atrito na zona em aperto, evitando que se concentrem tensões como no caso de ligações pontuais totalmente aparafusadas, e dissipando as tensões pela área de contacto com o vidro [16], [43].

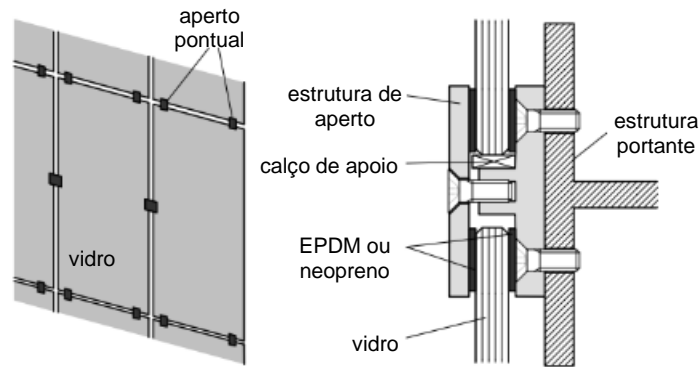


Figura 33 – Exemplo de fixação pontual por aperto (adaptado de [43]).

Nas fixações por aperto com grampos (**Figura 34**), a constituição da estrutura de fixação é: estrutura de aperto, calços de apoio e borracha EPDM ou neopreno; evitando, também, o contacto do vidro com o metal. Utilizam-se grampos neste tipo de fixação quando se pretende transferir cargas que atuam normalmente à fachada de vidro. Nas fixações por aperto de parafusos, utilizam-se parafusos pré-esforçados, ao invés de grampos, por forma a assegurar a resistência ao corte e a transferência de ações que atuam no plano do painel. Esta fixação é muito utilizada para ligações longitudinais de dois painéis em soluções que o exijam. Um exemplo disso são vigas de vidro verticais ou horizontais, também denominadas de *glass fins* (**Figura 35**). É evitado o contacto vidro-metal recorrendo a um material intermédio colocando entre o vidro e o parafuso que preenche a folga e veda o furo. O material intermédio mais usado neste caso é o alumínio, pois apresenta módulo de elasticidade semelhante ao módulo de elasticidade do vidro [43].



Figura 34 – Grampo [46].



Figura 35 – *Glass fins* [47].

Nas fixações totalmente aparafusadas (**Figura 36**) é obrigatória a perfuração do painel de vidro, de modo que o elemento de fixação atravesse todo o painel, deixando ou não relevo na faceta exterior do vidro. Este aspeto do relevo é, pois, importante. As fixações em que haja relevo na face exterior utilizam-se por forma a não impedir a continuidade de elementos que estão limitados pelo seu comprimento (e.g. vigas, são mais apropriadas à transferência de esforços no plano do vidro). As

fixações sem relevo na faceta exterior funcionam como locais pontuais de suporte e não são apropriadas para a transmissão de esforços no plano do vidro. As fixações aparafusadas podem dividir-se, também, em articuladas ou rígidas. Esta divisão caracteriza os movimentos restringidos no apoio [36], [43].

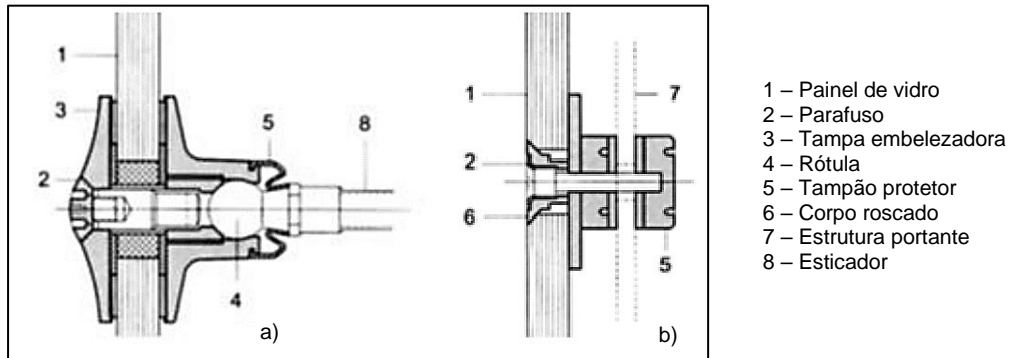


Figura 36 – Fixação aparafusada: com relevo e articulada (a); sem relevo e rígida (b) (adaptado de [43]).

À semelhança das fixações mecânicas pontuais por aperto, neste tipo de fixações também se utilizam materiais intermédios para reduzir o contacto entre vidro e metal. Os parafusos são, geralmente, envolvidos em roscas de nylon ou EPDM, evitando a concentração de esforços. Os materiais intermédios usados deverão ter resistência necessária para que se mantenha a capacidade de transmissão de tensões, isto é, devem ser flexíveis e rígidos. Flexíveis no sentido de possibilitarem uma distribuição apropriada de esforços, não apresentando fluência para que a tensão de aperto do parafuso não seja reduzida. Suficientemente rígidos para não deslizarem do furo para fora. Este é o tipo de ligações constantemente utilizado em sistemas de fachadas de vidro exterior agrafado [16], [36], [43] (**Figura 37**).

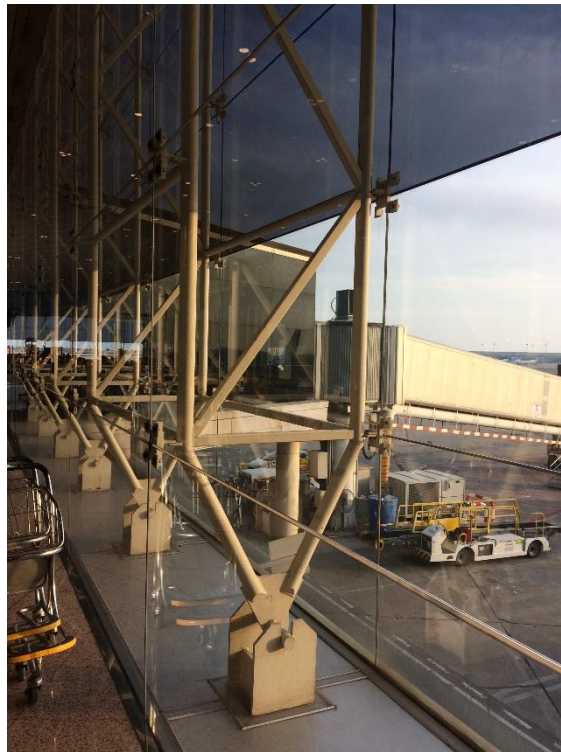


Figura 37 – Fachada do Aeroporto de Madrid.

Os acessórios em metal, são geralmente de aço inoxidável e preço baixo, material capaz de se deformar sem perder resistência, dúctil [36]. De seguida, nas **Figura 38** e **Figura 39**, apresenta-se um exemplo de fixação mecânica pontual bastante utilizado em fachadas – a aranha de quatro braços.

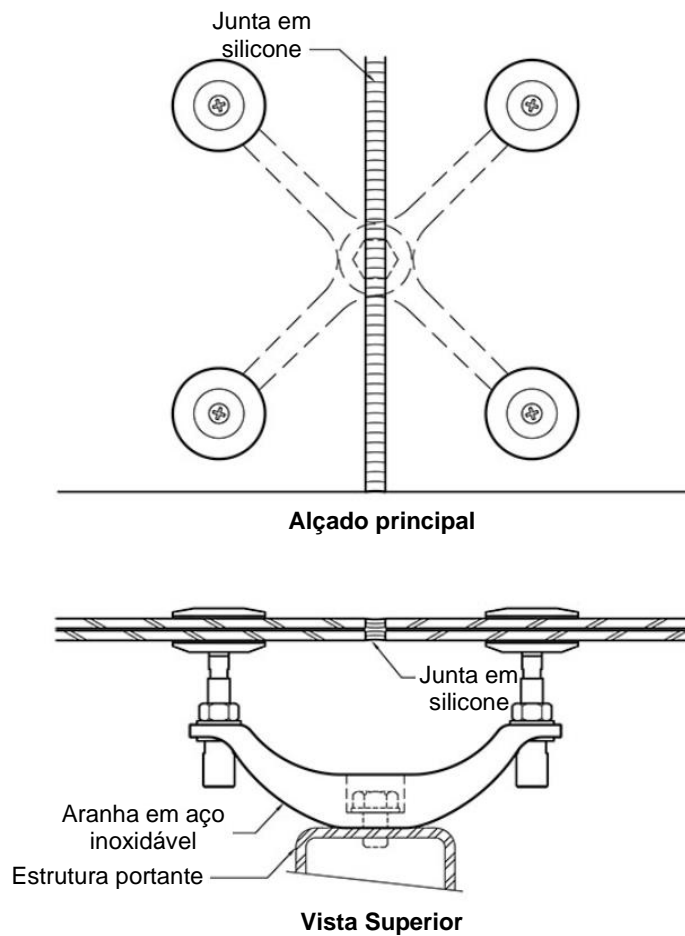


Figura 38 – Fixação mecânica pontual – aranha (adaptado de [48]).



Figura 39 – Fachada da Universidade Nova de Lisboa.

3.4.2. Fixações aderentes

As fixações aderentes, contrariamente às fixações mecânicas, não fazem uso de um elemento mecânico, mas sim de silicões ou adesivos estruturais, que garantem a ligação entre o vidro e a estrutura portante [16], [36].

A tensão aderente é influenciada pelos aspetos mecânicos da fixação, da forma como é aplicado e duração do carregamento, das dimensões da conexão adesiva, do polimento das superfícies e das condições termo-higrométricas da envolvente [36].

A principal aplicação deste tipo de fixações em fachadas é o vidro exterior colado (VEC). As fachadas em VEC, foram inicialmente desenvolvidas na década de 80 e possibilitam a conceção de envidraçados de grande dimensão sem uso de fixações mecânicas. O principal benefício das fachadas VEC é a sua grande capacidade de transmitir tensões uniformemente do vidro para toda a superfície de contacto com a estrutura, devido ao baixo módulo de elasticidade. Desta forma mitiga-se o aparecimento de tensões pontuais, tensões estas a que o vidro apresenta bastante fragilidade [43].

As fixações aderentes podem ainda dividir-se em dois subgrupos que diferem na rigidez do material adesivo: as fixações aderentes flexíveis e as fixações aderentes rígidas.

3.4.2.1. Fixações aderentes flexíveis

As fixações aderentes flexíveis ou em silicões estruturais, atualmente, são utilizadas com o intuito de conceber um isolamento de borracha flexível entre elementos de vidro e aço. Este isolamento tem a finalidade de absorver os esforços relativos ao carregamento a que se sujeita a fachada, garantindo que as suas propriedades se mantenham intactas o maior tempo possível. A silicone possui grande elasticidade e, devido a tal, possibilita, sem inconvenientes, a manutenção da estanqueidade da fachada, permitindo a sua fácil contração e expansão [36].

Pode-se dividir as fixações por silicões estruturais em dois subgrupos, conforme o processo de cura do silicone e dimensão de junta pretendida: as fixações de silicone de uma componente e de duas componentes.

Nas fixações de um componente, a silicone inicia a sua cura logo após contacto com o ar. Pode demorar até três semanas consoante a temperatura e humidade do ar circundante e dimensão da junta. Neste tipo de fixações o quociente espessura/largura da junta situa-se entre 1:1 e 1:3, a espessura é maior que 6 mm e a largura menor do que 20 mm. É importante referir que se a espessura da junta for demasiada, o silicone mais interior não cura de forma unânime [36], [43].

Em fixações de silicone de duas componentes (90% composto base e 10% catalisador), primeiro tem de haver a mistura de dois compostos e só depois é que se inicia a cura, que demora até 3 dias e homogénea independentemente da espessura da junta. O quociente espessura/largura da junta pretendida deve situar-se entre 1:1 e 1:4, a espessura deve ser maior que 6 mm, também, e a largura menor que 50 mm [36], [43].

No mercado atual, existe grande preocupação relativamente à dimensão da junta pois o silicone tem coeficiente de Poisson de 0,49 (alto), o que influencia de forma direta a rigidez das juntas. Existem valores diferentes, consoante quem fabrica, para as propriedades mecânicas do silicone estrutural. No entanto na **Tabela 8**, são apresentados os valores gerais para as mesmas [43].

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do silicone estrutural (adaptado de [43]).

Propriedade	Duração do carregamento	Valor
Módulo de elasticidade (E)	Curta	1.0 – 2.5 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	-	0.49
Tensão admissível normal (σ_{adm})	Curta	0.14 MPa
	Longa	0.014 MPa
Tensão admissível de corte (τ_{adm})	Curta	0.07 – 0.128 MPa
	Longa	0.007 – 0.011 MPa
Extensão admissível máxima (ε_{adm})	-	$\approx 12.5\%$

3.4.2.2. Fixações aderentes rígidas

As fixações aderentes onde se usam adesivos estruturais possuem rigidez e resistência elevadas e são bastante utilizadas em aeronaves e automóveis. Possibilitam a execução de juntas com dimensão menor que as fixações coladas com silicone. O adesivo escolhido para execução da fixação deve obedecer a critérios específicos. Esses critérios estão relacionados com o forma como é aplicado, o seu processo de cura, as dimensões da(s) junta(s), a temperatura durante a aplicação e em serviço e se é quimicamente compatível com os constituintes que entra em contacto [43].

Os materiais mais utilizados, atualmente, possuem base de resina acrílica ou epóxi. Consoante se usa adesivos à base de uma outra resina, ter-se-ão espessuras limites diferentes nas juntas. Os adesivos epóxi ou de preenchimento são, normalmente, utilizados nas juntas para vidro temperado e com espessuras maiores que 5 mm. Como a têmpera provoca flutuações à superfície do vidro, torna-se apropriado usar adesivos de preenchimento. Por sua vez, os adesivos acrílicos ou de contacto utilizam-se, em maior parte, na formação de juntas de dimensão menor que 1 mm [36], [43].

Como estes materiais possuem uma rigidez e resistência elevadas, a capacidade de absorção de deformações e esforços é mais difícil comparativamente ao silicone estrutural (usado nas fixações aderentes flexíveis). Portanto, é importante considerar e ter atenção a espessura da junta, pontos onde existam singularidades e bordos aguçados que conduzam a concentrações de esforços [36].

Relativamente à durabilidade e fluência destes adesivos, é a humidade o principal vetor de degradação que a influencia negativamente [43].

3.5. Propriedades da estrutura de suporte

Apesar de mais adiante, nesta dissertação, ser explicada detalhadamente a estrutura de suporte da fachada do caso de estudo, nas próximas duas secções enunciam-se as propriedades das estruturas de suporte principal e de suporte secundária ou sistema de fixação.

3.5.1. Principal

No que respeita à estrutura principal de suporte da fachada do caso de estudo, a mesma é composta por perfis IPE200, como vai ser estudado e referido no Capítulo V. O perfil laminado a quente (**Figura 40**) (

Tabela 9) possui um aço S275 e tem 3 metros de altura, simbolizando assim a estrutura modular da fachada do estudo. Nas **Figura 41** e **Figura 42** apresenta-se o fabrico da estrutura da fachada.

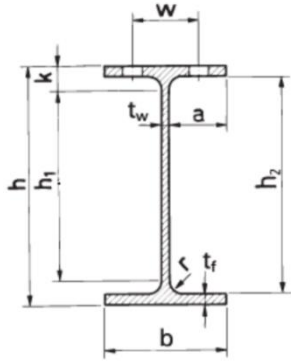


Tabela 9 – Dimensões IPE200 (adaptado de [49]).

b (mm)	100
h (mm)	200
tf (mm)	8.5
tw (mm)	5.6
h1 (mm)	158
h2 (mm)	183
b (mm)	100
h (mm)	200
tf (mm)	8.5
tw (mm)	5.6
h1 (mm)	158
h2 (mm)	183
w (mm)	56
k (mm)	21
r (mm)	12
a (mm)	47
A (mm ²)	2850
A _v (mm ²)	1400

fachada.

do perfil

Figura 40 – Secção de um perfil IPE [49].

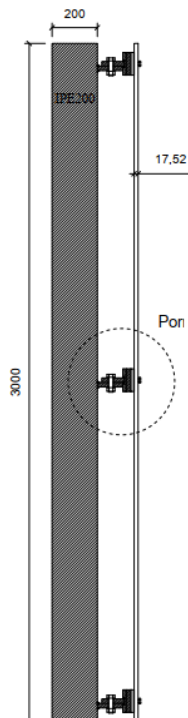


Figura 41 – Vista lateral da estrutura de suporte.

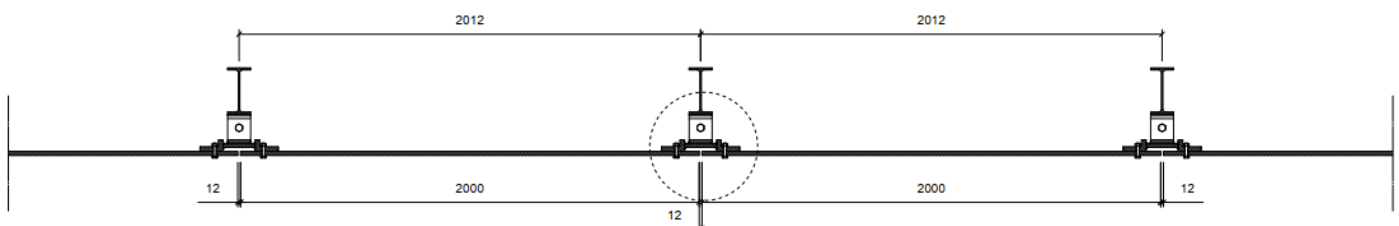


Figura 42 – Vista superior da estrutura de suporte.

Segundo a norma EN1993 inserida no formulário da unidade curricular de Estruturas Metálicas [50] lecionada no Instituto Superior Técnico, as propriedades (**Tabela 10**) do IPE200 em S275 são:

Tabela 10 – Algumas propriedades do IPE200 em S275 (adaptado de [50]).

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade (E)	210 GPa
Módulo de distorção (G)	81 GPa
Coefficiente de Poisson em regime elástico (ν)	0,3
Coefficiente de dilatação térmica linear (α)	$12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (para $T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$)
Tensão de cedência (f_y)	275 MPa
Tensão última (f_u)	430 MPa
Massa (m)	22,4 kg/m
Momento de inércia segundo y (I_y)	$19,4 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Momento de inércia segundo z (I_z)	$1,42 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Módulo de flexão elástico segundo y (W_{ely})	$194 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Módulo de flexão elástico segundo z (W_{elz})	$28,5 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Módulo de flexão plástico segundo y (W_{ply})	$220 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Módulo de flexão plástico segundo z (W_{plz})	$44,7 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Raio de giração segundo y (i_y)	82,6 mm
Raio de giração segundo z (i_z)	22,4 mm

3.5.2. Secundária

A estrutura de suporte secundária é constituída por um conjunto de chapas ligadas entre si, aos painéis de vidro e ao banzo do IPE200, recorrendo a cordões de soldadura e parafusos. Os envidraçados do caso de estudo são fixos à estrutura de suporte principal, cada um em 6 pontos: 2 na base, 2 a meia altura e 2 no topo. Cada elemento de fixação, como se apresenta nas **Figura 43**, **Figura 44** e **Figura 45**, é fixado a dois pontos da mesma altura e de painéis diferentes (conforme **ANEXOS A** e **B**).

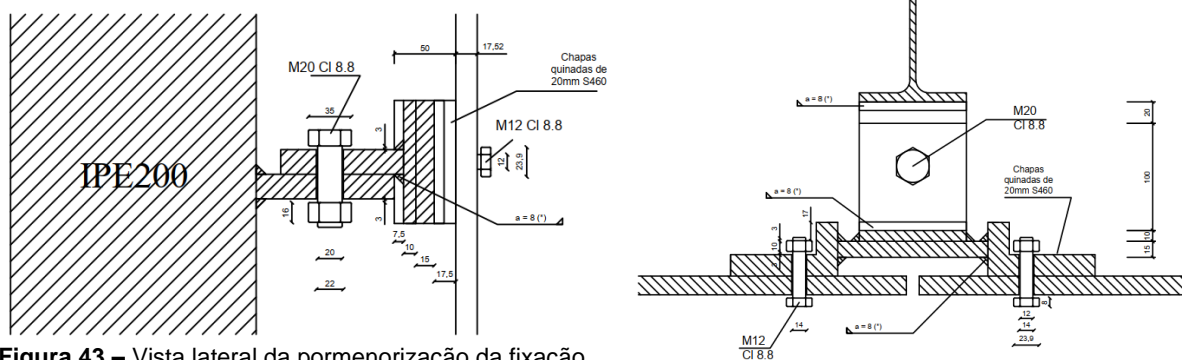


Figura 43 – Vista lateral da pormenorização da fixação.

Figura 44 – Vista superior da pormenorização da fixação.

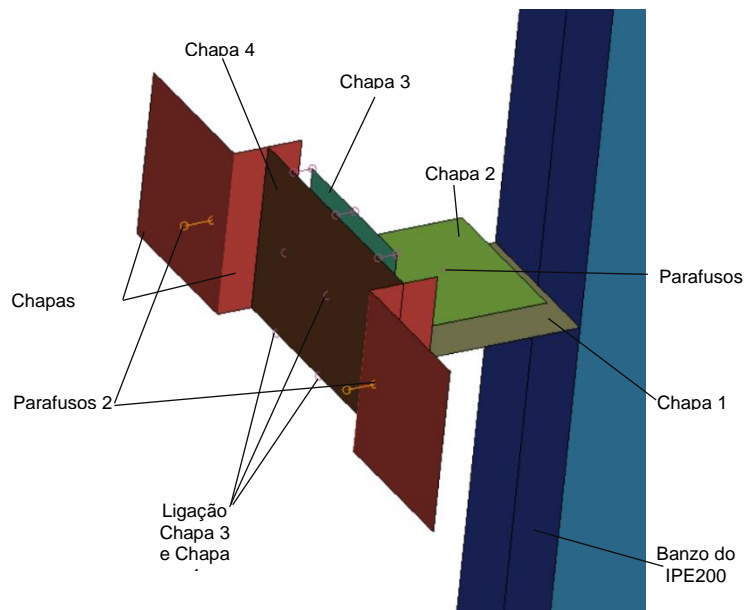


Figura 45 – Sistema de fixação da fachada envidraçada do caso de estudo.

De seguida, apresentam-se as características do que aos elementos assinalados na figura anterior diz respeito:

- *Chapa 1* corresponde a uma chapa de aço S275, de dimensões em milímetros 100x100x20;
- A *Chapa 2* é exatamente igual à *Chapa 1*;
- Os *Parafusos 1* correspondem ao parafuso M20 Classe 8.8 que une as chapas 1 e 2. Sendo de Classe 8.8 possui uma tensão de cedência de 640 MPa e uma tensão última de 800 MPa [50];
- A *Chapa 3* tem aço S275 e dimensões em milímetros 100x100x10;
- A *Chapa 4* também possui um aço S275 mas de dimensões 140x100x15;
- A *Ligação Chapa 3 e Chapa 4* é uma ligação soldada entre estas chapas, cordão de 8 mm, aço A500;
- As *Chapas quinadas* possuem S460, ou seja, tensão de cedência de 460 MPa e tensão última de 540 MPa [50]; A que constitui a aba pequena tem dimensões 50x100x20 e a que constitui a aba grande 100x100x20;
- Na prática, também existem ligações soldadas entre: a *Chapa 1* e o *Banzo do IPE200*; a *Chapa 2* e a *Chapa 3*; e entre duas das *Chapas quinadas* e a *Chapa 4*. No entanto estas não se encontram desenhadas na figura porque, como ligam elementos perpendiculares optou-se por modelar de outra forma no programa;
- Os *Parafusos 2* correspondem a parafusos M12 Classe 8.8 que fixam os painéis de vidro laminado às *Chapas quinadas*.

3.6. Dispositivos poliméricos de absorção de energia

Os dispositivos de absorção de energia que se torna importante estudar, são dispositivos de constituição polimérica, devido ao facto de a solução de proteção que se pretende desenvolver, nesta dissertação, envolve um dissipador de energia em politereftalato de etileno modificado com glicol (PETg).

Os materiais de baixa densidade, capazes de minimizar os danos causados por uma carga de impacto, são de extrema importância para a proteção de estruturas que o necessitem. Os materiais produzidos que estão, atualmente, a ganhar grande relevância são as chamadas redes pentamódicas (do inglês *pentamode lattices*, PL) que apresentam tensões de corte quase nulas. No entanto as PL podem ser capazes de parar ou atenuar abruptamente tensões de corte. As estruturas em favos de mel (do inglês *honeycomb*) apresentam versões em duas dimensões (2D) das tais redes PL. As redes em kirigami (versão do origami em que também se fazem cortes) apresentam grandes coeficientes de Poisson positivos ou negativos. A resposta auxética devido a coeficientes de Poisson negativos demonstra possuir uma grande capacidade de resiliência e dissipação de energia quando se fala em cargas de impacto [51]. Tudo isto introduz o conceito de metamateriais.

Enquanto que os materiais convencionais têm propriedades dependentes da sua composição e estabilidade de ligações químicas, os metamateriais possuem propriedades que dependem da geometria física das estruturas que os constituem. Por outras palavras, estas tais estruturas, comparativamente aos materiais convencionais, trabalham como os átomos/moléculas, que se houver interações com ondas eletromagnéticas, podem exibir propriedades superiores fora da linha dos materiais comuns [52].

Portanto, os metamateriais mecânicos (**Figura 46**) funcionam como uma parcela do mundo dos metamateriais. Os mecânicos são constituídos por materiais convencionais. No entanto, a sua geometria faz com que possuam propriedades físicas mais interessantes e superiores às do material constituinte convencional [52].

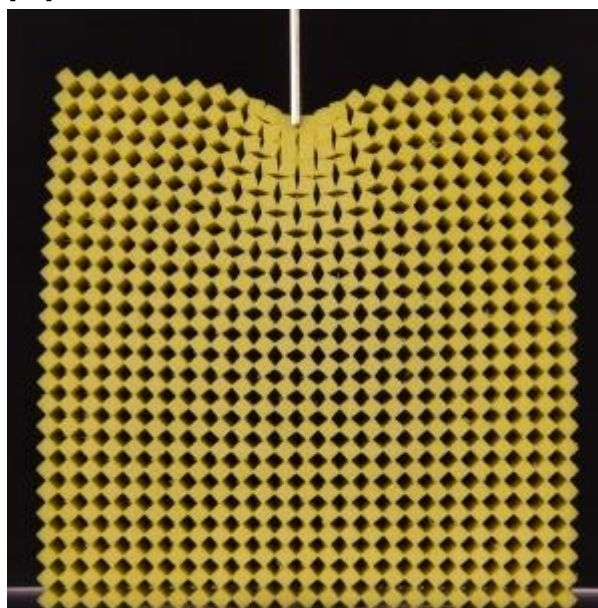


Figura 46 – Exemplo de metamaterial mecânico [53].

Têm surgido avanços relativamente ao fabrico aditivo (do inglês *additive manufacturing*, AM). O AM possibilita a produção rápida de protótipos de elementos sacrificiais leves para proteção contra impactos. A produção destes protótipos não seria viável pelas técnicas tradicionais de fabrico subtrativo (do inglês *subtractive manufacturing*, SM) que parte de um bloco sólido. A modelação por deposição fundida (do inglês *fused deposition modeling*, FDM) corresponde à tecnologia AM mais utilizada, posta em prática até por impressoras 3D comuns e de preço reduzido. Esta técnica recorre a um carretel de filamento termoplástico que terá de ser fundido e extrudido através de uma ponteira aquecida e, posteriormente, depositado formando camadas em duas dimensões que darão origem a um objeto 3D [51].

Um metamaterial, produzido como foi anteriormente enunciado, é geralmente composto por um núcleo esmagável que é colocado entre duas placas que lhe conferem rigidez. A FDM faz com seja possível personalizar de forma fácil a geometria do núcleo e otimizar o seu comportamento estrutural no que toca à rigidez apropriada, dissipação de energia que acomoda e/ou propriedades mecânicas. Recorrendo a FDM, podem ser produzidas inúmeras geometrias de PL, o que permite uma impressão fácil e rápida de metamateriais mecânicos novos, com propriedades excelentes devidas à geometria interior do material [51].

Têm sido estudadas diferentes geometrias para a rede interior, sendo que se tem vindo a dar ênfase nas redes baseadas em células hexagonais (**Figura 47**), devido à sua alta porosidade, baixa densidade. Também os metamateriais auxéticos (**Figura 48**) possuem a capacidade de acomodar grandes deformações sob tensões baixas constantes devido à sua geometria específica. Em contrapartida os elementos sacrificiais de geometria alveolar (*honeycomb*) possibilitam estruturas muito rígidas que podem suportar grandes deformações plásticas da mesma forma que dissipam grandes quantidades de energia [51], [52].

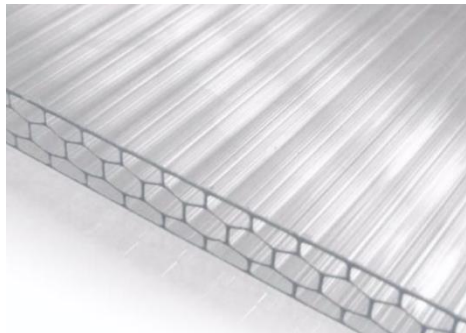


Figura 47 – Metamaterial mecânico de geometria hexagonal [52].

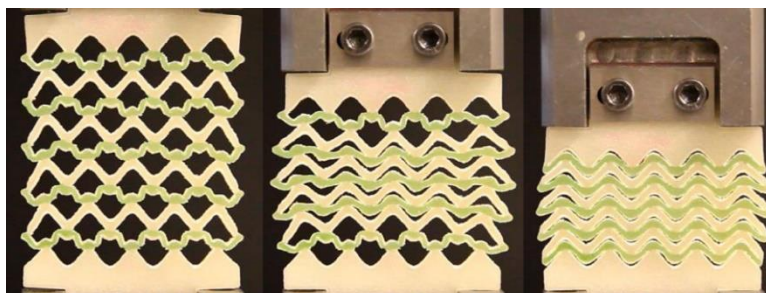


Figura 48 – Metamaterial de geometria auxética [52].

Como o comportamento estrutural dos metamateriais sob cargas de impacto depende, principalmente, da geometria e dimensões dos núcleos internos celulares, é importante definir materiais otimizados para posterior impressão de elementos sacrificiais. Um desses materiais é o ácido polilático (PLA) que é um poliéster termoplástico viável, de fácil impressão pelo consumidor comum e tem sido bastante utilizado no FDM em impressões de elementos sacrificiais. Porém, o PLA possui capacidade limitada de absorção de energia causada por impactos. Devido à sua grande flexibilidade e boas propriedades mecânicas, têm-se usado, também, filamentos para FDM em PETg, que poderá ser o substituto do PLA no que toca a impressão 3D de soluções de proteção [51].

Capítulo IV. Análise estrutural de fachadas sujeitas as explosões

No que concerne a bibliografia existente sobre o efeito de explosões em fachadas envidraçadas, a mesma é bastante recente, tendo a maioria começado a desenvolver-se após a primeira década do século XXI.

O comportamento estrutural que cada fachada apresenta face a uma explosão é dependente de vários fatores como: distância da carga, altura da carga em relação ao solo, massa de explosivo, tipo de fixações dos painéis de vidro, características da estrutura portante principal e secundária, etc.

4.1. Análise estrutural do comportamento de elementos envidraçados sujeitos a uma explosão

Devido ao uso crescente do vidro em fachadas de edifícios, os envidraçados constituem, em grande parte, a primeira linha de defesa da construção e dos seus ocupantes contra explosões. Os envidraçados são, também, o que provoca a maior quantidade de danos relativos a uma explosão, como por exemplo lacerações devidas a fragmentos de vidro aguçados [54]. Portanto, compreender o comportamento estrutural de fachadas envidraçadas sob o efeito de explosões é de carácter fulcral para a presente dissertação.

Como já foi referido, o principal dever de uma fachada é funcionar como uma barreira entre o exterior e o interior de uma construção. Quando são aplicados carregamentos num vidro, estes deverão ser transmitidos pela fachada envidraçada à estrutura portante principal. Pelo facto de o vidro possuir comportamento frágil, os envidraçados são, por norma, a parte mais frágil e sensível de uma estrutura. Como cada tipo de vidro resulta em fragmentos de dimensões diferentes, se os mesmos não forem vidros de segurança laminados, então os seus estilhaços violarão o espaço que se pretende proteger. No caso do vidro monolítico, a carga da explosão não é transmitida à estrutura de suporte se o mesmo partir. Tal acontece porque os fragmentos de vidro laminado se conseguem libertar para o interior da construção ou espaço protegido. Quando é utilizado vidro laminado, surge um problema de dimensionamento da estrutura de fixação, uma vez que, vai ter de suportar carregamentos muito mais elevados do que se fosse usado vidro monolítico [54].

Por norma a fase negativa das explosões não é considerada no dimensionamento, pois na maior parte dos casos, não provoca grandes danos na estrutura [55]. Todavia, para envidraçados, tem sido provado que, para certas distâncias, a fase negativa provoca grandes deformações, o que poderá provocar a falha mesmo que fique intacto após a fase positiva [54]. Aliás, como a fase negativa é a fase de sucção, aumentará a probabilidade de projecção de estilhaços para a área circundante e de posteriores danos em transeuntes.

A quebra de envidraçados monolíticos de vidro recozido devido a uma carga de explosão constitui um perigo enorme para os ocupantes de um dado edifício, tanto pelos fragmentos projetados para o espaço protegido como, também, a onda de choque. Existem algumas tecnologias que permitem a melhoria do comportamento das fachadas envidraçadas sujeitas a explosões [54].

Quando se fala em novas aplicações, os envidraçados de vidro laminado são, em larga escala, a melhor escolha na conceção em vidro sujeito a explosões. Como foi dito, os estilhaços de vidro laminado continuam aderentes à camada intermédia no pós-rotura (**Figura 49**), reduzindo-se, pois, a ameaça da projeção para a área envolvente. Se a camada intermédia for dimensionada de forma correta então não rasga e funciona como uma fronteira entre a onda de choque e o interior do edifício. O acondicionamento constitui-se como uma opção quando a resistência a explosões de um edifício tem de ser aumentada. Os filmes anti-estilhaço podem ser usados na parte interior dos envidraçados, mantendo os pedaços todos juntos após o vidro partir. Existem também as cortinas anti-estilhaço que funciona como uma rede que contém os fragmentos de vidro quando são projetados. Porém, estas últimas, não são muito utilizadas pois reduzem a visibilidade e têm fraca estética [54].

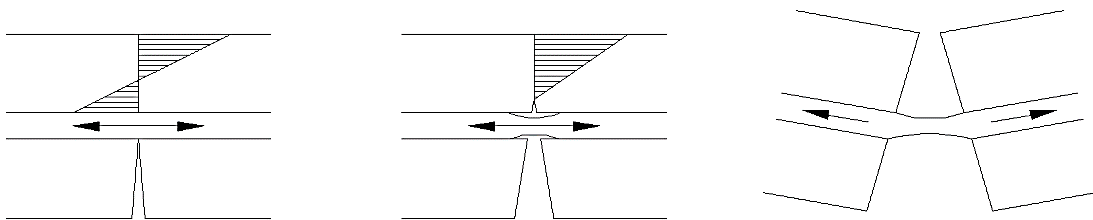


Figura 49 – Comportamento pós-rotura do vidro laminado (adaptado de [54]).

São necessários métodos analíticos e numéricos para que se possa determinar o comportamento estrutural do vidro laminado sob explosões, pois existe grande complexidade no que diz respeito à carga e à resposta estrutural. Seguidamente apresentam-se três métodos possíveis de serem utilizados na análise estrutural de elementos envidraçados.

4.1.1. Sistemas de um grau de liberdade

Elementos estruturais sujeitos a ações dinâmicas podem ser modelados de forma simplificada recorrendo a um sistema de um grau de liberdade (do inglês *simple-degree-of-freedom*, SDOF), constituído por uma massa, uma mola e um amortecedor. No caso de uma carga de explosão, o amortecimento é, na maior parte dos casos, desprezado devido ao facto de significar reduzida influência durante o primeiro pico de deslocamento, considerado, por muitos, a característica da resposta mais interessante. Portanto, neste caso, o SDOF (**Figura 50**) tenta simplificar toda a ação usando apenas: a massa concentrada m_{SDOF} e a mola k_{SDOF} com rigidez que reproduza o sistema em estudo [12], [54].

Este método confere resultados aproximados para as deformações máximas instaladas, sem que se possam determinar enquadradas num intervalo de tempo. Para acelerações, este método revela piores aproximações, pois revela-se demasiado simples no caso de uma estrutura complexa, como é o caso desta dissertação [12].

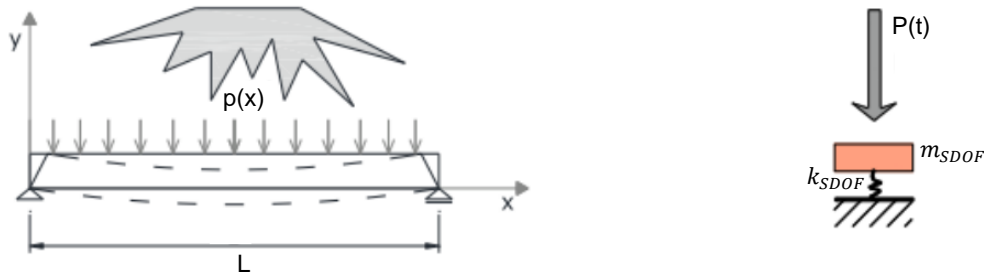


Figura 50 – Esquema de um SDOF (adaptado de [12]).

4.1.2. Comportamento da placa de vidro

O comportamento da placa de vidro pode ser aproximado utilizando a teoria das lajes de Kirchhoff. Segundo esta teoria, uma laje é um elemento estrutural de espessura com dimensão muito inferior às restantes dimensões sujeito a ações fora do seu plano, que produzem uma curvatura da superfície da laje de vidro [54].

A teoria das lajes fornece resultados adequados quando ocorrem pequenas deformações. Contudo, os painéis de vidro sofrem grandes deformações sob cargas de explosão (sendo também ativados os esforços de membrana). Estes esforços de membrana têm também influência no grau de curvatura quando a deformação ultrapassa a espessura do painel. De forma geral, as equações básicas da teoria das lajes, utilizadas em painéis finos com grandes deformações, são extremamente difíceis de resolver por causa da não-linearidade geométrica associada ao problema em questão. Existem apenas algumas soluções analíticas específicas para problemas básicos [30]. Assim, a solução destes problemas é, normalmente, obtida por métodos numéricos iterativos baseados no Método de Elementos Finitos.

4.1.3. Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (do inglês *Finite Element Method*, FEM) consiste no método numérico mais adequado para resolver problemas complexos (que os métodos analíticos não conseguem resolver ou muito dificilmente) associados a: propriedades dos materiais, carregamentos ou geometria complicada. Os modelos do FEM necessitam de uma discretização onde são criados elementos ligados por nós. São resolvidas certas e determinadas equações para cada nó de ligação, até que surja uma solução estável [54].

Programas de análise automática como o ANSYS®, o ABAQUS®, o SAP2000®, o Robot Structural Analysis® e o LS-Dyna®, são alguns dos programas de análise estrutural por FEM

comercializados atualmente. Nestes programas o utilizador deverá definir totalmente o problema, ou seja, desenhar ou importar a geometria, estabelecer os modelos de materiais apropriados e critérios de rotura, criar a malha de elementos finitos e aplicar o carregamento e as condições de fronteira. Os programas FEM são bastante utilizados por investigadores que usam resultados experimentais para validar os seus modelos computacionais. Em contrapartida, o FEM considera-se muito dispendioso em termos de tempo, para quem dimensiona no dia-a-dia, isto é, o FEM serve maioritariamente para problemas de dimensionamento complexos [54].

Na secção seguinte irá ser feita uma breve referência ao programa de análise automática utilizado na modelação do caso de estudo desta dissertação.

4.2. Programa de análise automática LS-Dyna

O LS-Dyna é um programa de análise automática avançado de aplicação geral em simulações desenvolvido pela empresa *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC). Efetua análises estruturais recorrendo a elementos finitos para simular problemas complexos da vida real e é muito utilizado na indústria militar, aeroespacial, automóvel, entre outras. O programa soluciona problemas que incluam não linearidades geométricas ou de contacto, complexas relações constitutivas de materiais ou grandes deformações. Os modelos que envolvem cálculo explícito possuem, na maior parte dos casos, intervalos de tempo muito reduzidos, como é o caso que esta dissertação pretende estudar. No cálculo explícito de elementos finitos, a equação do movimento é resolvida por incrementos, sendo que a matriz de rigidez é atualizada no final de cada incremento de deslocamento e carga, baseando-se na mudança da definição do material e da geometria. Relativamente ao incremento de tempo, o mesmo é automaticamente determinado pelo LS-Dyna, com base no algoritmo proposto por Newmark, que foi desenvolvido estudando a velocidade do som num certo material. Geralmente são comparados os resultados experimentais obtidos pelo utilizador com os resultados obtidos pelas simulações do LS-Dyna [56], [57].

Capítulo V. Caso de estudo – Análise do comportamento estrutural

5.1. Descrição do caso de estudo

Conforme se mostra nos **ANEXOS A e B**, o caso de estudo consiste numa parcela de fachada envidraçada constituída por dois painéis em vidro laminado temperado 88.1, cada um com 3 metros de altura e dois de largura. Estes painéis estão apoiados pontualmente em 6 pontos cada um, como descrito na secção 3.5.2.

Realiza-se, seguidamente, uma descrição do caso de estudo no sentido IPE200 – carga explosiva.

O perfil IPE200 terá, então, os 3 metros de altura e será orientado para que resista a cargas horizontais com o seu eixo de maior inércia. Encontra-se encastrado na base e com apoio fixo no topo, sendo, portanto, uma estrutura hiperestática de grau 2.

Cada sistema de fixação é composto por 4 chapas, 2 chapas quinadas, 3 parafusos e vários cordões de soldadura, como foi descrito em 3.5.2. A geometria da fixação foi sofrendo alterações ao longo dos meses de trabalho e a geometria final foi inspirada em fotografias de fachadas envidraçadas do aeroporto de Madrid, fornecidas pelo orientador desta dissertação. Nas **Figura 51 e Figura 52**, é possível visualizar as semelhanças com o sistema de fixação adotado no presente trabalho.



Figura 51 – Sistema de fixação do Aeroporto de Madrid, vista 1.



Figura 52 – Sistema de fixação do Aeroporto de Madrid, vista 2.

No que toca aos painéis de vidro laminado, primeiramente decidiu-se utilizar vidro laminado pelo facto de, quando se fala numa ação de explosão, é necessário vidros de segurança que retenham ao máximo os fragmentos de vidro que possam danificar quem se encontra na área envolvente. Em segundo lugar, vidro laminado temperado pelas suas evidentes propriedades e vantagens superiores, como consta no Capítulo III.

No entanto, é necessário dimensionar o vidro para a ação de explosão, e isso foi feito segundo a pré-norma Europeia 16612 (prEN16612).

Relativamente ao dimensionamento da capacidade resistente do vidro temperado, a mesma pode ser calculada usando a seguinte expressão (5.1), qualquer que seja a composição do vidro:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod}k_{sp}f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v(f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} \quad (5.1)$$

onde

$f_{g;k}$ é o valor característico da tensão de flexão para vidro recozido

$\gamma_{M;A}$ é o coeficiente parcial de segurança para o vidro recozido

k_{sp} é o coeficiente de comportamento da superfície do vidro

k_{mod} é o coeficiente de duração da carga

$\gamma_{M;v}$ é o coeficiente parcial de segurança do vidro temperado

$f_{b;k}$ é valor característico da tensão de flexão do vidro temperado

k_v é o fator de endurecimento do vidro temperado

O valor de k_{mod} pode ser calculado pela fórmula seguinte (5.2), pois a mesma pode ser usada para durações de carregamento abaixo dos 20 milissegundos:

$$k_{mod} = 0,663t^{-\frac{1}{16}} \quad (5.2)$$

Conservativamente, para uma duração de 15 ms correspondente à ação da explosão, obtém-se pela expressão anterior um k_{mod} de 1,438, utilizando o tempo em horas.

Para o coeficiente de comportamento da superfície do vidro k_{sp} , toma-se o valor de 1,0 para vidro laminado, referente à coluna “Como produzido” (**Tabela 11**).

Tabela 11 – Coeficiente de comportamento da superfície do vidro (adaptado de [58]).

Material vidro (qualquer composição)	k_{sp}	
	Como produzido	Com jato de areia
Vidro float	1,0	0,6
Vidro laminado	1,0	0,6
Vidro esmaltado e laminado	1,0	0,6
Vidro estampado	0,75	0,45
Vidro esmaltado estampado	0,75	0,45
Vidro com arame polido	0,75	0,45
Vidro com arame estampado	0,6	0,36

Considera-se 45 N/mm² (MPa) como o valor característico da tensão de flexão, $f_{g,k}$, tal como afirma a pré-norma.

O valor do coeficiente parcial de segurança do material para vidro recozido ($\gamma_{M;A}$) é então 1,8 e para vidro temperado ($\gamma_{M;v}$) é 1,2, para o ELU (únicos valores fornecidos na pré-norma) (**Tabela 12**).

Tabela 12 – Valores recomendados para o coeficiente parcial de segurança do material [58].

	Estado Limite Último
Vidro recozido	$\gamma_{M;A} = 1,8$
Vidro temperado	$\gamma_{M;v} = 1,2$

Para o valor do fator de reforço do vidro pré-esforçado (k_v) usar-se-á 1,0 que corresponde a um endurecimento horizontal relativamente ao processo de manufatura (**Tabela 13**).

Tabela 13 – Coeficiente de endurecimento [58].

Processo de manufatura	Fator de endurecimento, k_v
Endurecimento horizontal (ou outro processo que não faça uso de pinças ou outro instrumento para segurar o vidro)	1,0
Endurecimento vertical (ou outro processo que use pinças ou outro instrumento para segurar o vidro)	0,6

No que toca ao valor da tensão de flexão característica para o vidro temperado toma-se o valor de 120 N/mm² correspondente a vidro de segurança termicamente endurecido ou endurecido por embebimento em calor (como é possível ver na **Tabela 14**).

Tabela 14 – Valores da tensão característica para o vidro temperado [58].

Material vidro por produto (qualquer composição)	$f_{b,k}$		
	Vidro de segurança termo-endurecido da EN 12150, e vidro de segurança temperado termicamente da EN 14179	Vidro reforçado por calor da EN 1863	Vidro temperado quimicamente da EN 12337
Vidro comum/float ou laminado	120 N/mm ²	70 N/mm ²	150 N/mm ²
Vidro estampado	90 N/mm ²	55 N/mm ²	100 N/mm ²
Vidro esmaltado ou laminado	75 N/mm ²	45 N/mm ²	
Vidro esmaltado estampado	75 N/mm ²	45 N/mm ²	

Finalmente, tem-se uma capacidade resistente necessária de:

$$f_{g;d} = \frac{1,438 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0 \cdot (120 - 45)}{1,2} = 98,45 \text{ MPa}$$

Segundo a norma, utilizando este valor e um conjunto de expressões, seria possível tirar o valor da espessura de cada uma de duas lâminas de um painel de vidro laminado temperado, o pretendido. No entanto, os valores a que se chegou eram muito baixos. Então, e de uma forma um pouco empírica por experiência da orientação da presente dissertação, decidiu-se em algumas reuniões, utilizar duas lâminas de vidro temperado de 8 mm de espessura ligadas por um filme de PVB.

Relativamente à espessura da película de PVB a utilizar, podemos inferi-la a partir da **Tabela 15**:

Tabela 15 – Espessura do filme de PVB consoante espessura do painel e dimensão do menor vão (adaptado de [59]).

Espessura ordinária do painel de vidro laminado	Espessura da película de PVB	
	Dimensão do menor vão ≤ 800 mm	Dimensão do menor vão > 800 mm
≤ 6 mm	0,38	0,38
8 mm	0,38	0,76
10	0,76	0,76
12 mm	1,14	1,14
15 mm / 19 mm	1,52	1,52

Ora, sabendo que a temos duas lâminas de 8 milímetros, teremos 16 mm de espessura ordinária, logo última linha da tabela. Como cada painel de vidro do caso de estudo tem 2 metros de largura (que é o menor vão), então precisaremos de um filme de PVB com 1,52 mm de espessura.

Portanto, como foi dito, precisar-se-á de um vidro laminado 88.1, ou seja, duas lâminas de 8 mm mais um filme de PVB de 1,52 mm, que perfaz uma espessura total necessária de 17,52 mm. Esta espessura já é aceitável para uma fachada que está a ser dimensionada para a ação de uma explosão.

Relativamente à carga explosiva tem-se 10 kg de TNT colocados a 5 metros de distância da face exterior da fachada e a uma altura de 1,5 metros do solo, que corresponde a metade da altura da fachada. Considerou-se que o caso mais gravoso para a estrutura seria alinhar a carga com o perfil, que simboliza a estrutura principal, e à altura dos apoios da metade dos painéis, para potenciar a resposta do apoio que se encontra nesse local e a meio vão do perfil.

5.2. Descrição do modelo de análise

O modelo de referência é um modelo tridimensional que resulta de uma simplificação de simetria do caso de estudo. Nesta simplificação tem-se um perfil metálico IPE200 apenas; e neste estão ligados 3 apoios para fixação de duas metades de dois painéis seguidos, conforme se apresenta na

Figura 53:

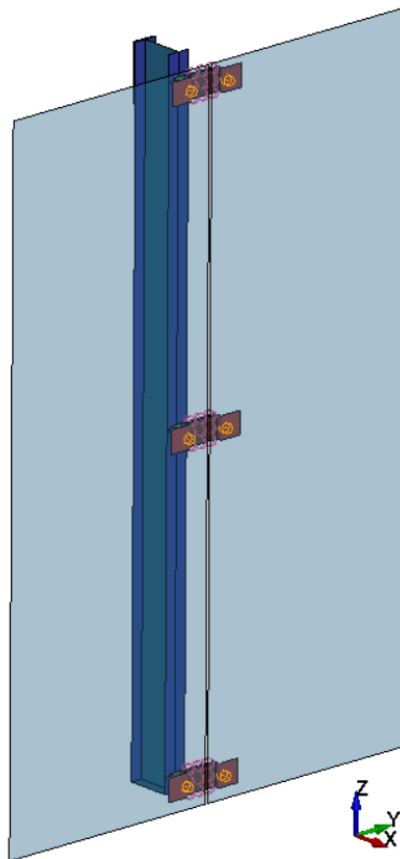


Figura 53 – Modelo de referência.

Todo o modelo tem a sua geometria desenhada à linha média para que fosse possível trabalhar só com elementos 2D, do tipo *Shell* ou *Beam*, com o intuito de tornar o modelo tridimensional mais leve e que não demorasse tanto tempo a correr quanto um modelo tridimensional constituído por elementos 3D. A geometria do modelo foi feita e importada, quase na sua totalidade, do programa AutoCAD para que fosse apenas necessário caracterizar os elementos, condições de fronteira e ações no LS-Dyna, considerado um programa complexo. Depois de ter a geometria inserida no programa, procedeu-se, por ordem:

- À criação de entidades (as *keywords* PART) para cada elemento com características diferentes;
- Criação de elementos placa e viga (*keywords* ELEMENT_SHELL e ELEMENT_BEAM) a partir das linhas importadas do programa de desenho AutoCAD;
- Criação da secção pretendida (espessura) para cada um dos elementos *Shell* e *Beam*, através das *keywords* SECTION_SHELL e SECTION_BEAM;
- Escolha, a partir do leque de opções do LS-Dyna, dos materiais a utilizar e atribuição das características pedidas pelo programa, na *keyword* MAT;
- Atribuição do tipo de elemento, secção e material a cada entidade na *keyword* existente PART;
- Escolha de uma malha relativamente fina para cada entidade, agora com características e propriedades definidas;

- Escolha das condições de apoio e fronteira da estrutura modelada, tendo em atenção a simplificação de geometria, na *keyword* BOUNDARY_SPC_SET;
- Definição dos contactos (*keyword* CONTACT) entre os vários elementos que se encontram ligados entre si e que poderão vir a tocar-se com o desenvolver da ação de carregamento;
- Definição dos parâmetros da ação de explosão e da área de incidência da explosão, nas *keywords* LOAD_BLAST_ENHANCED e LOAD_BLAST_SEGMENT_SET, respetivamente;
- Escolha dos parâmetros do tempo de desenvolvimento da ação de explosão, na *keyword* CONTROL;
- Seleção dos ficheiros que o programa cria com resultados da ação, na *keyword* DATABASE.

Relativamente a cada um dos elementos do modelo, os mesmos irão ser descritos nas próximas linhas, desde o IPE200 até à carga de TNT, à semelhança da secção anterior .

5.2.1. Propriedades dos materiais

O IPE200 é composto por duas entidades no modelo, os banzos e a alma. Estas duas entidades são em aço S275 que foi modelado com o material MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC. Este possui comportamento elasto-plástico com endurecimento isotrópico . Na **Figura 54**, E_t representa o declive da curva bilinear de tensão-deformação, l e l_0 correspondem ao comprimento deformado e indeformado em teste tração uniaxial, respetivamente.

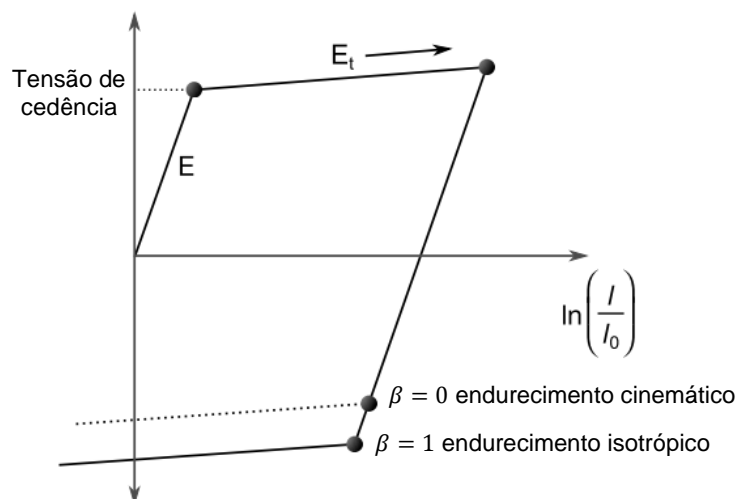


Figura 54 – Comportamento do MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC (adaptado de [60]).

Considera-se o efeito das ações dinâmicas na tensão de cedência deste material, dando valores aos parâmetros de Cowper-Symonds.

A *keyword* necessita então que sejam inseridos vários valores nas suas *cards*: a densidade (RO), o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (PR), a tensão de cedência (SIGY), os parâmetros de Cowper-Symons *D* e *q* (SRC e SRP, respetivamente) [12] e a extensão de rotura (FS). A seguinte **Tabela 16**, apresenta as propriedades inseridas nos *cards* referidos.

Tabela 16 – Propriedades inseridas no MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC.

Propriedade	RO (kg/m ³)	E (GPa)	PR	SIGY (MPa)	SRC (s ⁻¹)	SRP	FS
Valor	7850	210	0.3	275	40.00002	5	0.2

Relativamente à estrutura de fixação dos painéis de vidro ao perfil, a mesma é constituída por chapas de aço interligadas entre si, ao perfil e aos painéis de vidro (tal como na **Figura 45**). Como já foi referido, as quatro chapas e as duas chapas quinadas são constituídas por S275 e S460, respetivamente. Portanto, as propriedades inseridas nas *cards* do material MAT_003-PLASTIC_KINEMATIC são em tudo iguais às da **Tabela 16**, excetuando a tensão de cedência das chapas quinadas (SIGY) que é de 460 MPa.

O material escolhido para modelar os painéis de vidro foi, então, o material específico para vidro laminado do próprio programa LS-Dyna, utilizando-se a *keyword* MAT_032-LAMINATED_GLASS. O programa, neste caso, pede os seguintes valores: densidade (RO), módulo de elasticidade do vidro (EG), coeficiente de Poisson do vidro (PRG), tensão de cedência do vidro (SYG) (tensão calculada na secção anterior), deformação quando o vidro quebra (EFG), módulo de elasticidade do polímero (EP), coeficiente de Poisson do polímero (PRP) e tensão de cedência do polímero (SYP). Na **Tabela 17**, apresentam-se as propriedades inseridas no programa.

Tabela 17 – Propriedades inseridas no MAT_032-LAMINATED_GLASS.

Propriedade	RO (kg/m ³)	EG (GPa)	PRG	SYG (MPa)	EFG	EP (MPa)	PRP	SYP (MPa)
Valor	2500	70	0.22	98.45	0.0014060	985	0.49	28

No que toca a ligações, as mesmas foram feitas de três formas diferentes:

- Quando, no caso de estudo, as peças estão ligadas perpendicularmente uma à outra, então nesse caso a ligação é feita por interseção de linhas médias no modelo e posterior fusão de nós duplicados. Desta forma admitem-se, na prática, cordões de soldadura muito resistentes. Não é interesse desta dissertação que se estejam a correr modelos em que as soldaduras quebram; a atenção foi focada na carga que passa para a estrutura portante sem que existam falhas nas próprias soldaduras;
- No caso em que as peças do modelo estejam dispostas paralelamente utilizaram-se parafusos Classe 8.8, através de elementos *Beam*;
 - No entanto existe uma exceção. Na ligação entre a *Chapa3* e *Chapa4*, chapas paralelas, utilizaram-se elementos *Beam* como modelação para cordões de soldadura de 8 mm com A500. Mais adiante na dissertação, este ponto vai ser mais aprofundado.

Nestes dois últimos casos, devido ao facto de se terem utilizado elementos *Beam* como ligações entre elementos *Shell*, o material escolhido foi MAT_100-SPOTWELD. Nas suas *cards*, esta *keyword* pede os seguintes valores: densidade do aço usado (RO), módulo de elasticidade do aço (E), coeficiente de Poisson do aço (PR), tensão de cedência do aço (SIGY) e módulo de endurecimento plástico (EH). Apresentam-se, na **Tabela 18**, as propriedades inseridas no programa.

Tabela 18 – Propriedades inseridas no MAT_100-SPOTWELD.

Propriedade	RO (kg/m ³)	E (GPa)	PR	SIGY (MPa)	EH
Valores (parafusos)	7850	210	0.3	640	1
Valores (soldaduras)				500	

Para modelar os apoios do perfil, foi utilizado um material do LS-Dyna que não deforma, o MAT_RIGID. Este material, quaisquer que sejam as propriedades inseridas, funcionando como um material rígido e indeformável. Mais uma vez, a atenção foi focada na forma como a carga passa pela estrutura, e não na falha dos apoios. Este ponto vai ser aprofundado mais adiante na secção 5.2.5.

5.2.2. Propriedades das secções

Como foi referido, o modelo possui elementos do tipo *Shell* e do tipo *Beam*, especificando-se, ao nível do programa, no primeiro a espessura e no segundo o diâmetro.

Os elementos que se constituem como tipo *Shell* e tipo *Beam* apresentam-se nas **Tabela 19** e **Tabela 20**, respetivamente.

Tabela 19 – Espessuras dos elementos Shell.

<i>Shell</i>	Banzos IPE	Alma IPE	Chapa1	Chapa2	Chapa3	Chapa4	Chapas quinadas	Painéis LG
Espessura (mm)	8.5	5.6	20	20	10	15	20	17.52

Tabela 20 – Diâmetros dos elementos *Beam*.

<i>Beam</i>	Parafuso 1	Cordões de soldadura	Parafuso 2
Diâmetro (mm)	20	8	12

Para todos os elementos do tipo *Shell*, exceto os referentes ao vidro, a formulação matemática escolhida foi a de Belytschko-Tsay, que corresponde à *card* com ELFORM=2. Esta formulação, idêntica à quadratura de Gauss 2x2, confere 4 pontos de integração ao longo da espessura do elemento *Shell* e é a formulação *default* da própria *keyword* SECTION_SHELL. Pelo facto de ter 4 pontos de integração potencia-se uma análise relativamente precisa.

Nos elementos tipo *Shell* do vidro, a formulação matemática teve de ser diferente. Para o material MAT_032-LAMINATED_GLASS, o LS-Dyna propõe a utilização de uma *keyword* que prevalece sobre a ELFORM escolhida. Esta *keyword* tem o nome de INTEGRATION_SHELL e possibilita a definição de pontos de integração específicos nas lâminas de vidro e na película de PVB. Foram usados um total de oito pontos de integração: seis para o vidro e dois para o PVB (**Figura 55**).

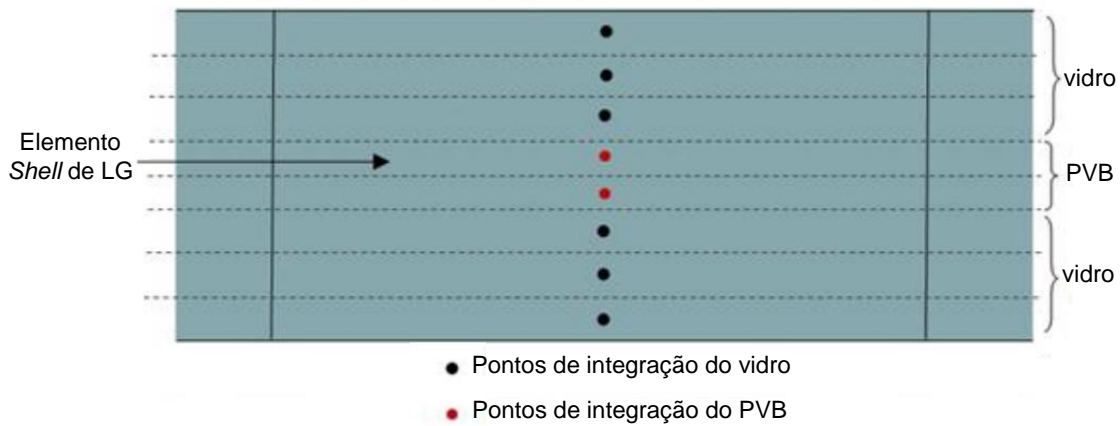


Figura 55 – Pontos de integração no elemento *Shell* do painel LG.

Na *keyword* mencionada, devem ser inseridos valores S e WF para cada ponto de integração. Os valores de S vão de -1 a 1 , sendo 0 o valor a meia espessura. Os valores de WF (*weighting factor*) correspondem à espessura associada a cada ponto de integração dividida pela espessura total ($\Delta t_i/t$). Na **Figura 56**, apresenta-se o esquema do que foi explicado anteriormente.

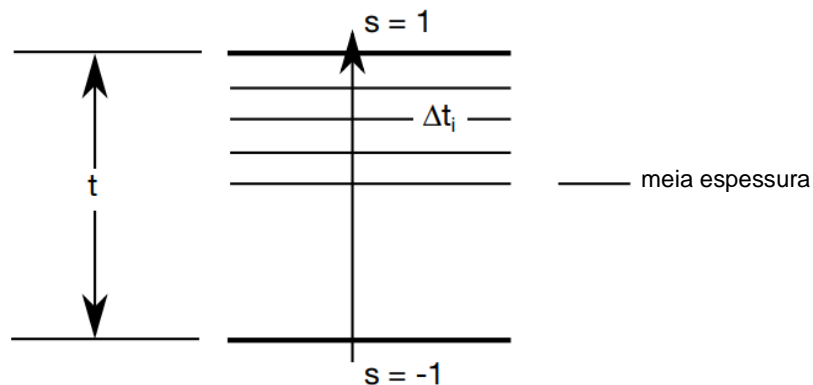


Figura 56 – Graficação da regra de integração da *keyword* INTEGRATION_SHELL (adaptado de [60]).

Os valores de S e WF calculados e inseridos para cada ponto de integração dos oito, encontram-se na **Tabela 21**:

Tabela 21 – Valores de S e WF.

Ponto integração	S	WF
1	0.7716895	0.152207
2	0.543379	0.152207
3	0.3150685	0.152207
4	0.0289193	0.043379
5	-0.028919	0.043379
6	-0.315068	0.152207
7	-0.543379	0.152207
8	-0.771689	0.152207

No que respeita aos elementos *Beam*, como estes são constituídos pelo material MAT_100-SPOTWELD, não é possível escolher a formulação matemática *default* da *keyword* SECTION_BEAM (Hughes-Liu com integração da secção – ELFORM=1), mas sim a formulação própria para elementos *Beam* que estejam a representar pontos de solda ou parafusos (ELFORM=9).

5.2.3. Contactos

De modo que não haja problemas, em modelação, é crucial, primeiramente, que a geometria do modelo esteja correta e que não existam incoerências. Porém, é preciso considerar a existência e formas de contacto entre os elementos de um modelo.

Para modelar os contactos (ligações) entre os elementos *Beam* e os elementos *Shell*, utilizou-se a *keyword* CONTACT_SPOTWELD, definida propriamente para este tipo de ligações. Nesta *keyword*, a entidade *Beam* é sempre considerada *slave* (escrava) da entidade *Shell* que é *master* (mestre), e obriga-se que não possa haver escorregamentos dos nós da *Shell*, estando os movimentos nos pontos de contacto restringidos.

É necessário definir o contacto entre elementos *Shell* que se toquem antes de atuar a ação, mas, também, entre elementos *Shell* que, eventualmente, se possam vir a tocar quando a ação decorrer. É de extrema importância fazer isto para que os elementos *Shell* não se atravessem em momento algum e que tornem os resultados falsos ou inválidos. O contacto utilizado para definir todos estes contactos foi o simples CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE. Nesta *keyword* o mais seguro é mesmo definir em duplicado, em que um contacto possui o elemento X como escravo e o elemento Y como mestre e o outro contacto vice-versa. Desta forma saber-se-á com certeza que o contacto definido é seguro e que os elementos não se intersejam.

Foi definido, ainda, o contacto CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_OFFSET para modelar o contacto com o apoio de topo do perfil. Neste tipo de contacto restringem-se os movimentos dos nós que estiverem ligados por este contacto à superfície determinada.

5.2.4. Ação de explosão

Como está descrito no início da secção 5.2. para definir a ação de explosão foram utilizadas as duas *keywords* (forma empírica de definir uma explosão – equações de ConWep) [12]: `LOAD_BLAST_ENHANCED` e `LOAD_BLAST_SEGMENT_SET`

Primeiramente pela *keyword* `LOAD_BLAST_SEGMENT_SET`, definiu-se a superfície recetora da explosão. No caso, essa superfície é a face dos painéis de vidro mais próxima da carga.

Em segundo lugar, na *keyword* `LOAD_BLAST_ENHANCED`, é necessário definir uma série de valores das *cards*: a massa de explosivo (M); as coordenadas a que se encontra (XBO, YBO e ZBO); o instante de detonação da carga (TBO); as unidades de medida da explosão (UNIT); o tipo de explosão (BLAST); consideração da fase negativa (NEGPHS); e identificação do plano do solo (GNID).

Utilizou-se então uma carga explosiva de TNT com 10 kg, situada a 5 metros de distância X da face exterior dos painéis de vidro e a uma altura de 1,5 metros (metade da altura da fachada). Para instante de detonação da carga considerou-se 0 ms, ou seja, assim que o modelo começa a correr a carga detona. As unidades de medida escolhidas correspondem a `UNIT=6` e são: quilograma, milímetro, milissegundo e gigapascal. Considerou-se uma explosão com `BLAST=4`, ou seja, uma explosão de superfície, em que há reflexão, criando-se a onda de *Mach* que potencia a onda incidente; o plano do solo encontra-se identificado na *card* GNID. Não se considerou a fase negativa da explosão, ou seja, `NEGPHS=1` pois as equações de ConWep também não a tomam em consideração.

5.2.5. Condições de apoio e fronteira

O perfil IPE encontra-se encastrado na base e com a apoio fixo no topo. A forma como estas condições de apoio foram modeladas teve como base a utilização de pratos rígidos no modelo, nas zonas dos apoios. Foram modelados dois pratos rígidos com o material `MAT_RIGID`, conforme a **Figura 57**.

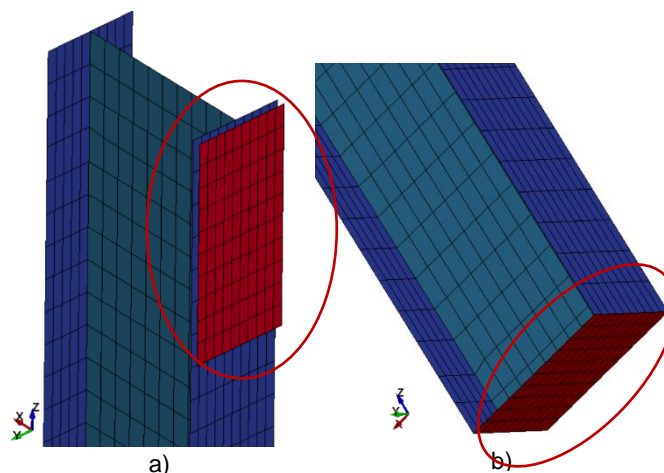


Figura 57 – Prato do apoio do topo (a) e Prato do apoio da base (b).

O prato do topo encontra-se ligado de forma muito restrita ao banzo do IPE, devido ao contacto enunciado na secção 5.2.3., e o prato da base tem nós coincidentes com a secção de base do IPE. Em ambos os pratos estão aplicadas condições de fronteira que restringem todas as translações e rotações nessas zonas.

Relativamente à simplificação de simetria do modelo, modelaram-se encastramentos deslizantes nas arestas dos dois painéis, como se apresenta na **Figura 58**. Nestes locais foram restringidas as translações em Y e as rotações em X e Z.

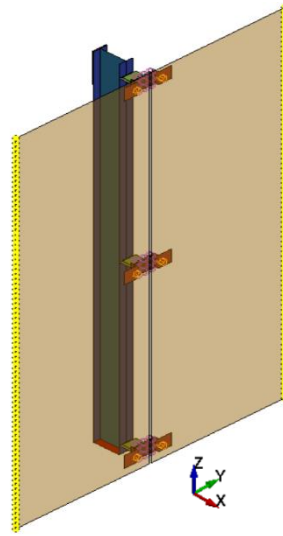


Figura 58 – Nós restringidos para simplificação de simetria.

5.3. Calibração do modelo de análise

A calibração deste modelo teve como fundamento experimental várias combinações de massa e distância até estabelecer uma carga e uma distância em x de referência (10kg a 5 metros). Tentou-se que a onda de choque não demorasse mais do que 10 ms a chegar à fachada modelada, recorrendo a várias combinações. Chegou-se, portanto, à combinação 10 kg a 5 metros. Com estas características, a onda, quando chega à fachada, ainda não atingiu a dimensão dos painéis de vidro, estando portanto, ainda a “estabilizar”, sendo um dos casos mais gravosos para a fachada em estudo.

Ao longo do desenvolvimento da presente dissertação foram-se alterando, também, algumas propriedades dos constituintes do sistema de fixação:

- Alterou-se a espessura das chapas 1 e 2 de 10 mm para 20 mm cada uma, pois verificou-se que, na maior parte das vezes, o parafuso que as une, as estava a puncionar, apresentando o modelo uma resposta não simétrica.
- Alterou-se, também, a espessura das chapas quinadas para 20mm, em vez de 10 mm, porque as mesmas estavam a plastificar na zona da aresta comum e isso dava uma resposta não simétrica ao modelo corrido (tal como acontecia no ponto anterior).

Outra forma de calibração foi a verificação de esforços axial e de corte nos parafusos 1 de forma identificar a ordem de grandeza do carregamento que passa para a estrutura de suporte principal. Investigaram-se, também, os deslocamentos em x a meia altura do perfil e as tensões de von-Mises na zona de contacto do sistema de fixação de meia altura com o perfil metálico, no apoio de topo e no apoio da base.

5.4. Resultados para a ação de explosão

Nesta secção considera-se importante apresentar os resultados que melhor quantificam o peso que a ação possui na estrutura. Um dos principais indicadores da carga que passa para a estrutura é o esforço axial e de corte máximos verificados nos *Parafusos 1*, ao longo da fachada. Nas próximas **Figura 59**, **Figura 60** e **Figura 61**, apresentam-se gráficos com esses resultados para uma análise de 70 ms.

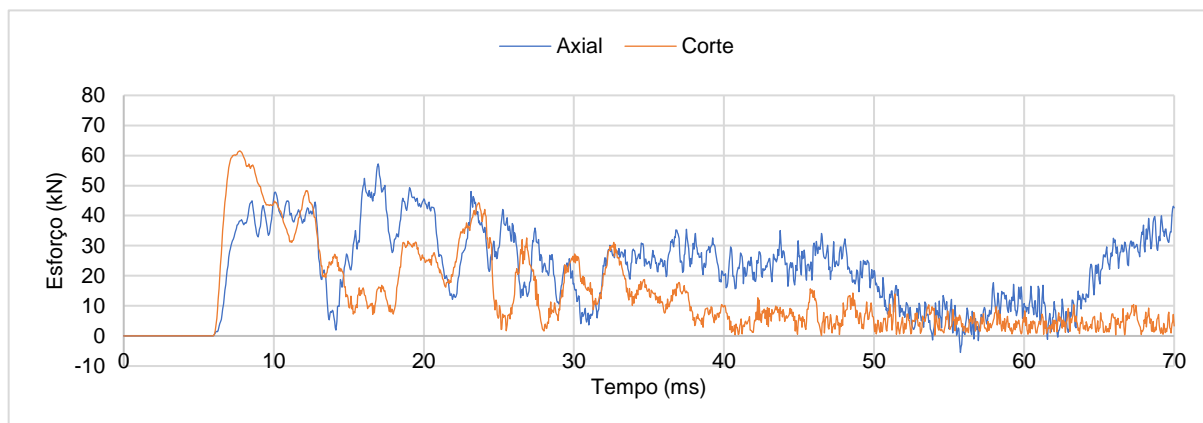


Figura 59 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de topo.

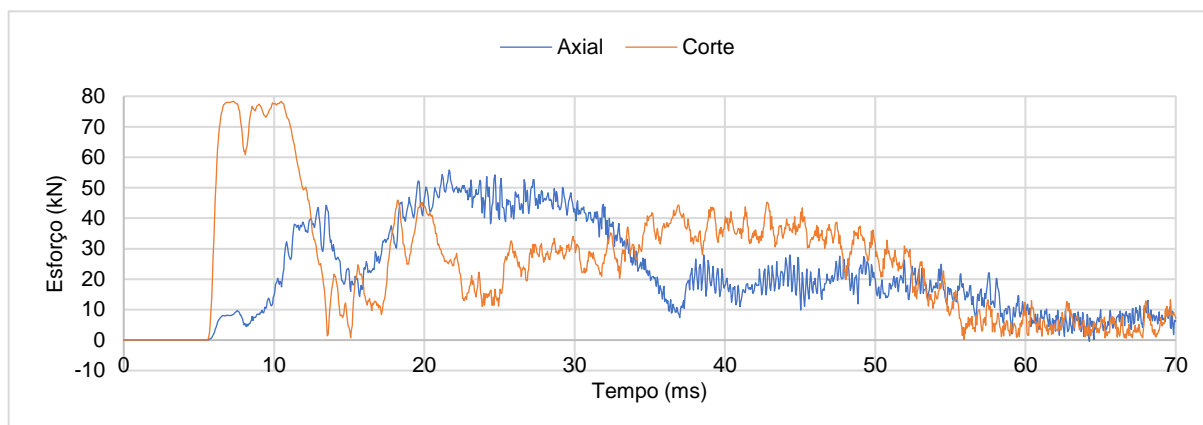


Figura 60 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de meia altura.

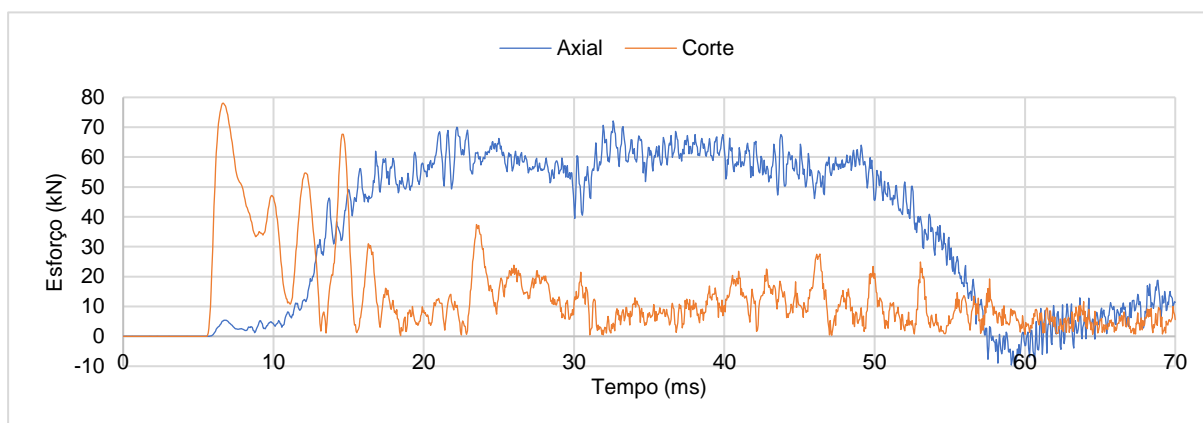


Figura 61 – Esforços axial e de corte para o Parafuso 1 de base.

De seguida, outro indicador que é possível apresentar, são as zonas em que o aço é S275 e que sofrem plastificação.

É possível saber as zonas em que o aço S275 está plastificado, atribuindo uma mudança de cores ao programa quando se atinge uma extensão de cedência de $0,275\text{GPa}/210\text{GPa} = 0,001310$. Seguidamente, apresentam-se esses mesmos resultados sob a forma de vistas obtidas (**Figura 62**, **Figura 63** e **Figura 64**).

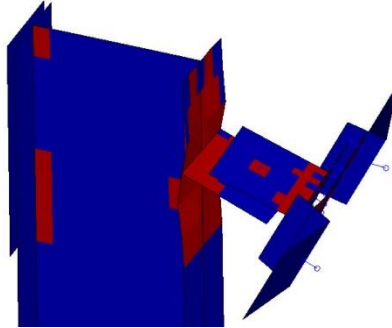


Figura 62 – Plastificação do S275 no topo da fachada.

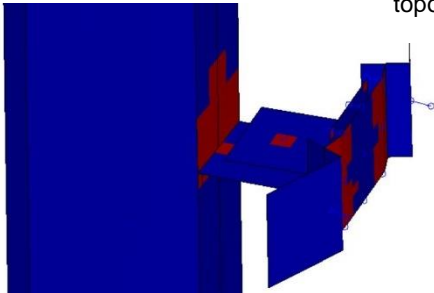


Figura 63 – Plastificação do S275 a meia altura da fachada.

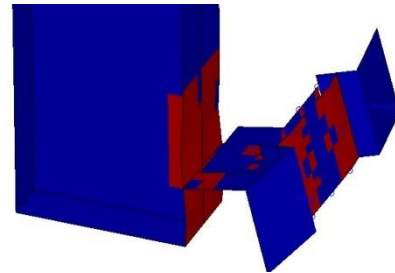


Figura 64 – Plastificação do S275 na base da fachada.

Pode ser feito o mesmo procedimento para saber em que zonas é que os elementos de aço S460, chapas quinadas, plastificam. No entanto, não é um resultado relevante, para ser apresentado aqui, porque se verificou que as chapas quinadas nunca plastificam. Um resultado relevante, é sim, executar este procedimento para saber em que zonas é que o vidro atinge a rotura, atribuindo uma mudança de cores ao programa quando se atinge uma extensão de cedência de $0,09845\text{GPa}/70\text{GPa} = 0,001406$. A vista afastada seguinte apresenta este resultado na **Figura 65**.

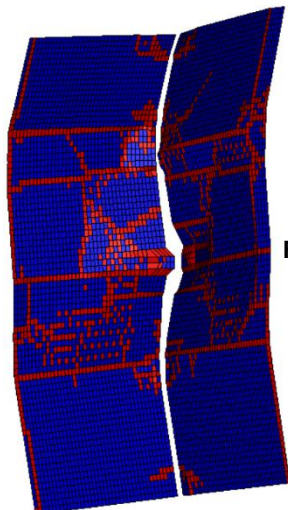


Figura 65 – Locais onde o vidro atinge a rotura.

De seguida apresenta-se (**Figura 66**) a variação do deslocamento em x, a meio vão do perfil, outro aspeto importante a verificar.

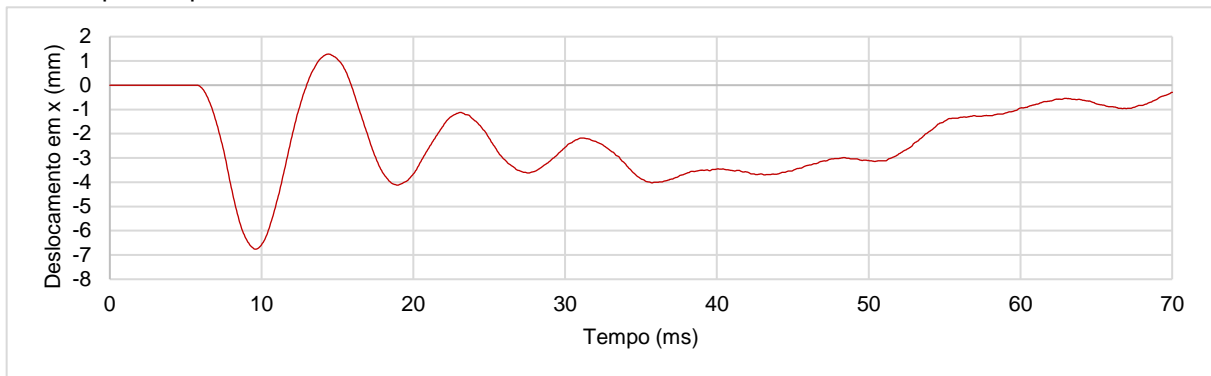


Figura 66 – Deslocamento em x do perfil a meio vão.

5.5. Interpretação dos resultados

A presente secção destina-se à análise e interpretação dos resultados obtidos na secção anterior. Através do primeiro conjunto de resultados, os referentes aos esforços axial e de corte nos *Parafusos 1*, é possível retirar várias ideias e reparar em alguns aspetos que a seguir serão descritos.

Existem dois parafusos que recebem maior energia que um outro. Está-se a falar em diferenças de esforços na ordem dos 20 kN. Os parafusos de meia altura e da base são sujeitos, claramente, a esforços maiores que o parafuso do topo da fachada, de forma rigorosa 80kN e 60kN, respetivamente, no instante máximo de corte ($\approx 7,5$ ms). Isto quer dizer que a onda de choque é refletida no solo pouco antes de chegar à estrutura, criando-se o *Mach stem*, que potencia ainda mais a explosão.

Estes elementos (parafusos) trabalham, essencialmente, ao corte, em quase toda a análise. No entanto, é importante ressaltar que, o parafuso da fixação da base, trabalha grande parte do tempo também axialmente. Tal deve-se ao facto de, quando o vidro cede e começa a curvar-se, o mesmo traciona a fixação inferior dos painéis de vidro.

Seguidamente, é importante, destacar as zonas em que a estrutura plastifica e tecer alguns comentários acerca disso.

As zonas do perfil em que o aço plastifica são: as três zonas onde estão ligados os elementos de fixação dos envidraçados; e a zona superior do apoio fixo. Tal como plastificam estas zonas, plastificam, também, as *Chapas 1* no local onde estão ligadas ao IPE. Na área circundante dos *Parafusos 1* é atingida a tensão de cedência do aço S275 e nas zonas laterais das *Chapas 4* onde estão ligadas as *Chapas quinadas*, tal acontece de novo.

Relativamente ao elemento vidro, este forma um padrão de rotura interessante e apenas continuou inteiro devido ao facto de o filme de PVB, apesar de também ter atingido a cedência em alguns locais dos painéis, manter os fragmentos unidos a si, e, conseqüentemente, a integridade (não estrutural) do envidraçado.

No que respeita a deslocamentos, estamos a falar em diferenças muito pouco significativas (máximo de 7 mm).

5.6. Estudo de dissipador com metamaterial de estrutura hexagonal

Em referência ao subtítulo da presente dissertação, procurou desenvolver-se uma solução de proteção de fachadas envidraçadas contra explosões. No caso essa solução é um dissipador fabricado em metamaterial PETg e com estrutura celular hexagonal, tal como se apresenta na **Figura 67**. A lei constitutiva do dissipador ensaiado, com as dimensões estabelecidas de $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$, está expressa na **Figura 68**.



Figura 67 – Dissipador de geometria *honeycomb*, em PETg (facultado pelo coorientador científico).

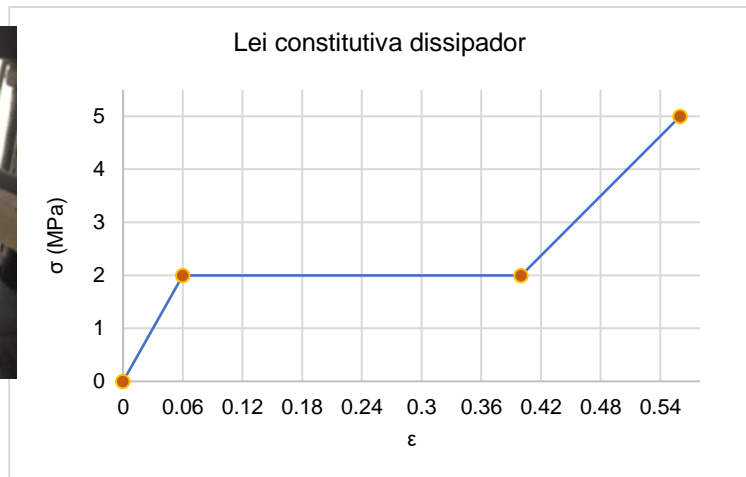


Figura 68 – Lei constitutiva do dissipador estudado (fornecida pelo coorientador científico).

O dissipador foi modelado, primeiramente, inserindo as suas propriedades no material MAT-100_SPOTWELD: densidade (RO) igual a 20% da densidade do material PETg (devido à quantidade de alvéolos), ou seja, 20% de $1.290 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ é igual a $2.58 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$; módulo de elasticidade (E) igual a 40 MPa; coeficiente de Poisson (PR) igual a 0.19; módulo de endurecimento plástico (EH) igual a 0; e deformação plástica efetiva na rotura (EFAIL) igual a 0.8. Relativamente à tensão de cedência do material e restante lei constitutiva, a mesma foi modelada associando à *keyword* do material, um DEFINE_CURVE. Esta *keyword* permite que seja inserida a lei constitutiva específica do metamaterial usando os pares de “coordenadas” tensão-extensão dos pontos do gráfico da **Figura 68**. Todavia, não foram esses os pares usados. Com a continuidade de modelos corridos, ao longo do desenvolvimento da dissertação, verificou-se que seria necessário aumentar a resistência do dissipador, pois para a ação dinâmica de explosão, as suas características não se revelaram suficientes. Então procedeu-se ao aumento de 20% da rigidez do dissipador, que na prática significa aumentar a espessura das paredes dos alvéolos do metamaterial, ficando com uma tensão de cedência de 2,4 MPa (em vez de 2 MPa) e com uma tensão última de 6 MPa (em vez de 5 MPa). Por outras palavras, a lei constitutiva usada no modelo, ao qual a seguir se apresentam resultados, foi em tudo igual à da **Figura 68**, porém onde estava 2 MPa, leia-se agora 2,4 e onde estava 5 MPa, leia-se agora 6.

Seguidamente aumentou-se o tamanho dos 9 elementos *Beam* que se encontram entre a *Chapa 3* e a *Chapa 4*, para que o dissipador tivesse os 5 centímetros de altura na prática. Relativamente à secção destes 9 elementos, foi feita uma aproximação grosseira, dando um diâmetro de 37.61264 mm para que cada elemento possuísse 1/9 da área total (100×100) do dissipador em estudo.

Nos próximos parágrafos, serão apresentados e comentados os resultados obtidos dos modelos com dissipador.

Relativamente aos esforços nos parafusos obtiveram-se os seguintes resultados (**Figura 69, Figura 70 e Figura 71**):

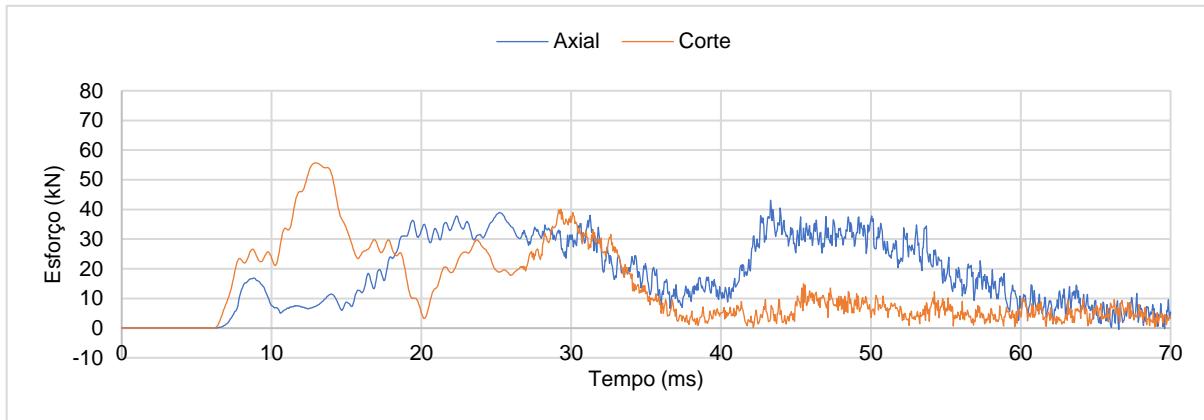


Figura 69 – Resultados do *Parafuso 1* de topo no modelo com dissipador.

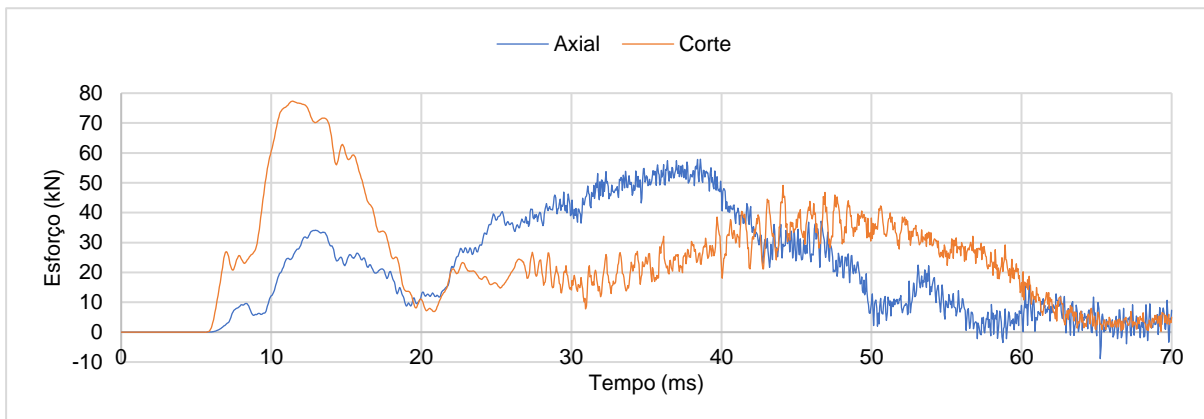


Figura 70 – Resultados do *Parafuso 1* de meia altura no modelo com dissipador.

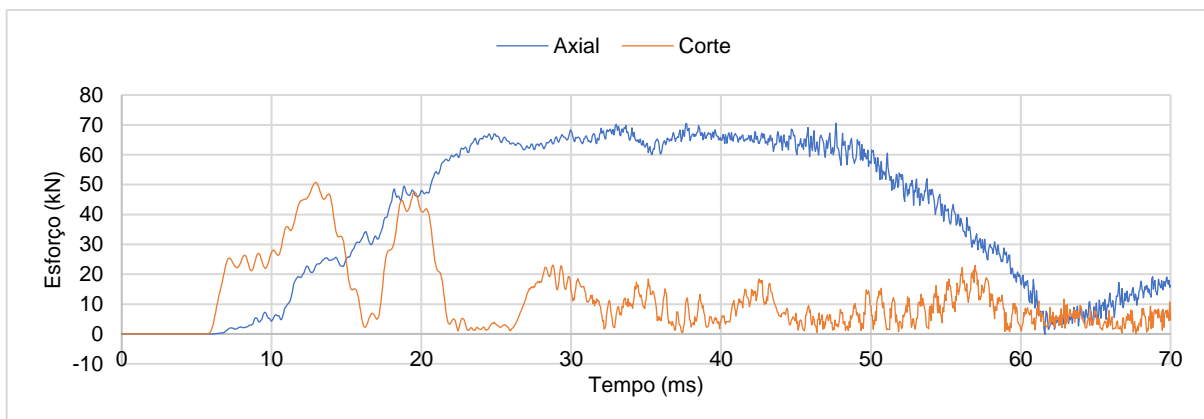


Figura 71 – Resultados do *Parafuso 1* de base no modelo com dissipador.

Em primeira instância, é possível dizer que, os esforços que chegam aos *Parafusos 1* deste modelo, são menores comparativamente ao modelo de referência. Analogamente ao modelo de referência, para o *Parafuso 1* da fixação de topo houve uma melhoria de cerca de 5 kN; para o parafuso da fixação de meia altura, praticamente, não houve diferenças no que toca ao esforço de corte máximo; e no que respeita ao parafuso da fixação da base da fachada, esse sim, teve uma diferença significativa, cerca de 30 kN.

É possível, ainda, afirmar que, pela observação dos 6 gráficos dos parafusos, a resposta da estrutura com dissipador integrado é uma resposta mais amortecida, e não uma resposta com grande dissipação de energia, ou seja, existem menos variações, menos “altos e baixos”. Isto acontece pelo menos até cerca dos 25 ms de análise, que corresponde ao momento em que o dissipador sofre a sua máxima compressão e consequente densificação. Esta densificação induz uma resposta mais rígida e a partir desse momento o modelo começa a ter uma resposta mais parecida ao modelo de referência. É importante referir, também, que o instante de corte máximo nos parafusos, acontece sensivelmente mais tarde, cerca dos 12,5 ms; e que já não se dá, assim que a onda de choque chega à estrutura, um pico de esforço de corte tão abrupto quanto no modelo de referência.

De seguida, irão ser analisadas as zonas onde o aço S275 da estrutura plastifica (**Figura 72, Figura 73 e Figura 74**):

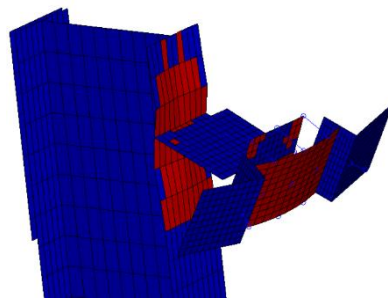


Figura 72 – Plastificação do S275 no topo da fachada, com dissipador.

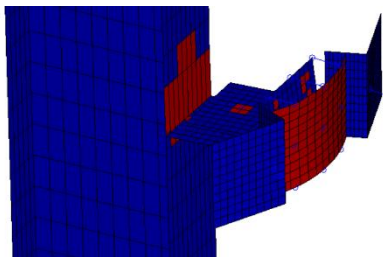


Figura 73 – Plastificação do S275 a meia fachada, com dissipador.

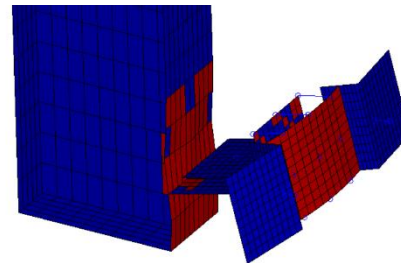


Figura 74 – Plastificação do S275 na base da fachada, com dissipador.

Neste modelo, só plastifica a área circundante do parafuso de meia altura. Tal facto poderá dever-se ao dissipador que faz com que a estrutura de fixação responda mais uniformemente à ação e redistribua melhor as tensões. As zonas plastificadas do perfil IPE também são praticamente as mesmas do modelo de referência. No modelo com dissipador, acontece que a *Chapa 4* sofre uma curvatura grande e plastifica totalmente, e não só as arestas laterais, tal como no modelo de referência.

O vidro do modelo com dissipador, apresenta outro mas semelhante padrão de rotura, sofrendo maior curvatura entre a fixação de topo e de meia altura, do que a que apresentava no modelo de referência. Tal poderá dever-se ao facto de o sistema de fixação com o dissipador ser menos rígido e não dificultar tanto os deslocamentos verticais (**Figura 75**).

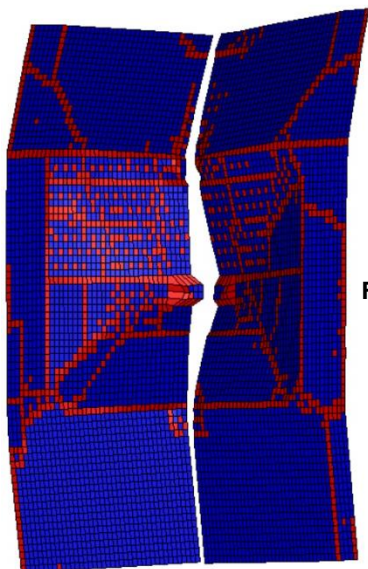


Figura 75 – Zonas onde o vidro chega à rotura no modelo com dissipador.

Nos deslocamentos em X a meio vão do perfil, no modelo com dissipador, não há mudanças significativas. Apenas considerar que desta vez o perfil já não tem deslocamentos (2 mm) no sentido da carga (ordenadas positivas do gráfico da **Figura 76**) e que a flecha máxima para a ser 5 mm em vez de 7 mm.

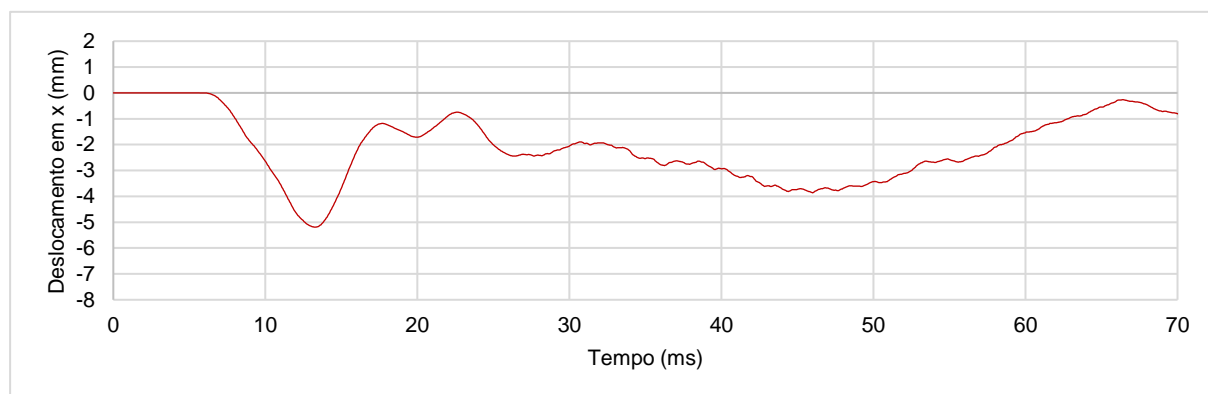


Figura 76 – Deslocamentos em x a meio vão do perfil, no modelo com dissipador.

Seria, ainda, importante fazer referência ao parâmetro deformação plástica máxima (*Effective Plastic Strain at Failure*, EFAIL). O valor dado a EFAIL foi a única diferença entre dois modelos iguais de LS-Dyna. Neste modelo, ao qual se apresentaram os resultados acima, o valor do EFAIL é 0,80, muito superior à deformação correspondente à tensão última de 6MPa (0,56). Com esta esta diferença permitiu-se que mesmo atingindo a tensão última, o metamaterial se continue a deformar até que comece a densificar. Em seguida, irão ser mostradas algumas vistas deformadas do modelo com dissipador anteriormente referido (denominado agora MODELO A) e de outro modelo com dissipador (MODELO B) em que o valor dado ao EFAIL foi de 0,6 (muito próximo de 0,56) (**Figura 77**, **Figura 78**, **Figura 79**, **Figura 80**, **Figura 81** e **Figura 82**).

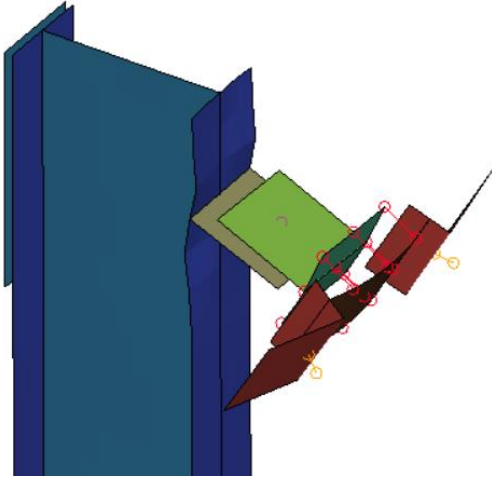


Figura 77 – MODELO A, fixação de topo.

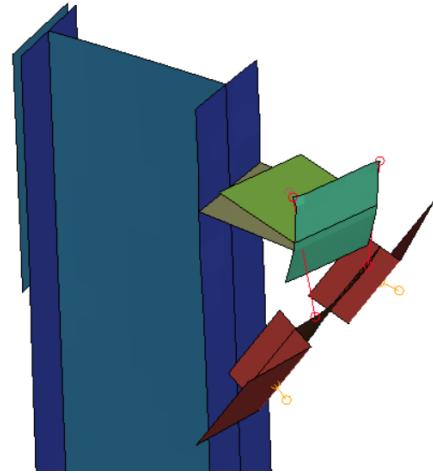


Figura 78 – MODELO B, fixação de topo.

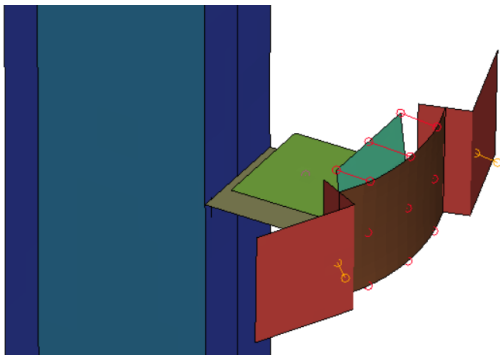


Figura 79 – MODELO A, fixação de meia altura.

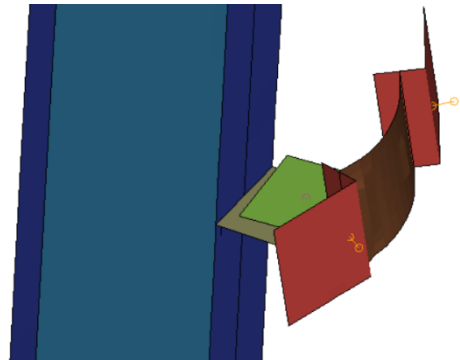


Figura 80 – MODELO B, fixação de meia altura.

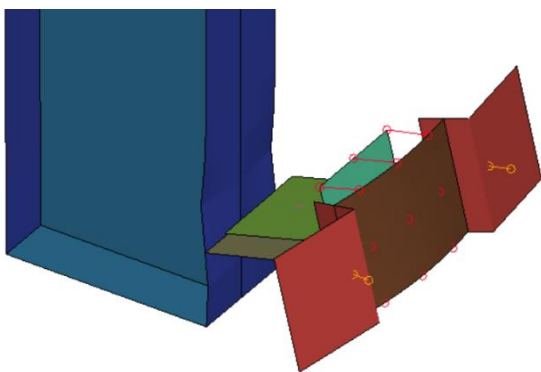


Figura 81 – MODELO A, fixação de base.

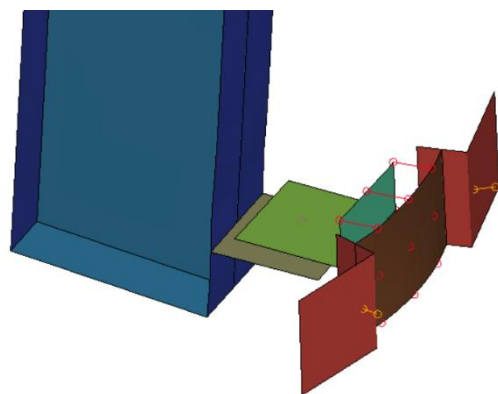


Figura 82 – MODELO B, fixação de base.

Analisando as vistas acima, é possível inferir que no geral, a mudança de EFAIL fez uma diferença grande. No MODELO B, apenas na fixação de base é que os elementos *Beam* do dissipador

não desapareceram por terem chegado ao seu limite. Nos outros dois apoios, além de terem desaparecido vários elementos *Beam*, isso tornou a resposta extraordinariamente assimétrica, deslizando chapas com chapas, estando o que resta do dissipador da fixação de topo a funcionar à tração.

Por fim, apresentam-se vistas laterais do que acontece ao vidro (elemento de cor castanha), no MODELO A e no MODELO B (**Figura 83** e **Figura 84**):



Figura 83 – MODELO A, vista lateral.



Figura 84 – MODELO B, vista lateral.

Apesar de o MODELO A ter melhor comportamento que o MODELO B, é possível afirmar que o MODELO A não é um modelo ótimo.

Para que se consiga um bom comportamento do dissipador, este terá de possuir ainda melhores características dissipativas. Os níveis de dissipação apresentados não são muito significativos.

No **ANEXO B**, estão disponíveis os desenhos pormenorizados do dissipador inserido na estrutura de fixação.

5.7. Programa dos ensaios experimentais

A realização de ensaios considera-se a forma mais fiável de determinar a resistência de elementos de vidro, variando as intensidades da carga de explosivo. Os métodos mais utilizados são: o ensaio de explosão de arena e o de tubo de choque. No primeiro, as amostras, normalmente designadas de alvos, são colocadas numa estrutura de reação. Monta-se uma carga a uma determinada distância do alvo, sendo possível alterar a massa de explosivo e a distância a que se encontra de modo a atingir a distância reduzida pretendida (conforme secção 2.2.2.). No ensaio em tubo de choque, utiliza-se ar comprimido para simular a explosão. Este tubo divide-se em duas secções por um diafragma, que é utilizado para romper a uma certa pressão. Uma secção do tudo é preenchida com ar. Se o diafragma falhar, tal faz com que o gás se mova a alta velocidade para a secção onde a pressão é mais baixa, formando assim uma onda de choque sem explosivo. A amostra que se pretende ensaiar monta-se no final da secção com pressão baixa. Estes dois métodos foram adotados em ensaios normalizados de envidraçados resistentes a explosões na Europa e na América do Norte [54].

Tendo em vista futuros desenvolvimentos no seio desta dissertação, seguidamente explicam-se os *setups* para a prescrição de ensaios sem dissipador e com dissipador.

Pretende-se que os ensaios experimentais sejam feitos à escala real e, portanto, ensaiar-se-ão explosões reais devidamente controladas, e não dentro de um tubo de choque.

Tanto nos ensaios de referência como nos ensaios com dissipador, a carga encontrar-se-á a 10 metros de distância da face exterior do vidro e a uma altura de 1,5 metros (metade da altura da fachada envidraçada).

Esta fachada é suportada por 3 perfis IPE200 com 3 metros de altura que sustentam dois painéis de vidro laminado temperado com 3 metros de altura e dois metros de largura.

No que toca a ensaios com dissipador, é necessário que este se insira, como já foi referido, entre as duas chapas verticais da estrutura de suporte secundária.

Podem, obviamente, ser ajustados alguns dos valores que anteriormente foram enunciados, de modo a considerar uma explosão com um parâmetro distância reduzida diferente:

- Massa de TNT da carga = X quilogramas de TNT;
- Altura da carga acima do solo = Y metros;
- Distância horizontal da carga = Z metros.

Serão precisos, evidentemente, alguns equipamentos de instrumentação para que se possa caracterizar os ensaios. Poderão ser os seguintes ou semelhantes:

- Sensores de deformações;
- Sensores de pressão;
- Câmaras de alta velocidade;
- Acelerómetros.

No **ANEXO C** estão esquematizados os *setups* para prescrição dos ensaios acima explicados.

Capítulo VI. Considerações finais

6.1. Síntese das principais conclusões

Uma análise correta de um qualquer sistema de proteção de uma estrutura, é fulcral ter em consideração três elementos: o sistema de proteção, os elementos estruturais e as ações.

Na presente dissertação foram investigados vários aspetos respeitantes ao vidro e ao seu comportamento como elemento estrutural. O vidro pode ser um elemento estrutural inserido em fachadas VEC e VEA. Nas fachadas de vidro exterior agrafado, as possibilidades de soluções de fixação são imensas ou quase infinitas. Tal como neste trabalho, se inventou uma geometria de sistema de fixação, pode surgir um sistema novo a cada dia que passa. As hipóteses são muitas e a liberdade é grande.

Para que os painéis de vidro modelados não apresentassem tanta curvatura, teriam de ter propriedades mecânicas melhores, ter espessura maior ou condições de apoio diferentes.

Em todos os modelos se verificou uma clara formação da onda de *Mach*, para as características dadas à explosão, pois a fachada recebe maior carregamento desde meia altura até à base. Portanto, existe, evidentemente, reflexão no plano do solo e posterior potenciação da onda de choque e do próprio impulso incidente.

Pela análise dos resultados, o dissipador não teve um impacto dissipativo tão grande, quanto era esperado obter-se no início do desenvolvimento desta dissertação. É certo que consegue amortecer um pouco a carga que passa para a estrutura, no entanto não absorve o que é necessário para poder ser implementado em infraestruturas que necessitem.

Os modelos, que geraram os resultados presentes no Capítulo V, demoraram cerca de 2 horas e 20 minutos a correr totalmente. Apesar de serem modelos tridimensionais resultantes de elementos com geometria 2D, é possível concluir, em primeira instância, que este programa gera, por norma, análises muito morosas e pesadas. No entanto, considera-se um programa de múltiplas aplicações em que é possível especificar a mais ínfima característica.

Foram corridos mais de 80 modelos no total e cada um demorou 2 horas em média. Tal possibilitou um ganho de sensibilidade face a erros no modelo. Tornou-se cada vez mais fácil detetar o que estava a correr mal em cada modelo.

Aprender a modelar no programa LS-Dyna, sem ter dito qualquer tipo de formação, foi bastante desafiante pois permitiu encontrar outras maneiras de obter informação e esclarecer dúvidas, porém foi uma tarefa árdua. O programa de análise automática LS-Dyna não é o comum programa de elementos finitos lecionado durante o mestrado.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Finalmente, é possível dizer que, apesar do comportamento da solução de proteção desenvolvida não ser o melhor, de uma forma geral conseguiu-se cumprir o pretendido. No entanto, no decorrer do desenvolvimento da presente dissertação foram surgindo algumas ideias que vale a pena dar importância no futuro:

- Evidentemente faltaram resultados experimentais para comparar com os modelos computacionais desenvolvidos, e por isso, considera-se importante fazê-lo futuramente;
- Estudo do comportamento de fachadas envidraçadas aquando da fase negativa de explosões e formas de as proteger ou mitigar impactos;
- Desenvolvimento de dissipadores em metamateriais com outras geometrias e enquadramentos diferentes em estruturas portantes de fachadas envidraçadas. Seria interessante considerar vidros apoiados em todo o seu bordo em elementos deste tipo ou apoiados pontualmente, mas em sistemas de fixação com outras características;
- Utilização de metamateriais em mais estudos a decorrer no nosso país, pois constituem uma nova parcela de conhecimento que merece ser estudada e entendida por mais portugueses;
- Utilização de metamateriais na proteção de estruturas face à ação sísmica.

Referências Bibliográficas

- [1] «Human Rights , Terrorism and Counter-terrorism - Fact Sheet No. 32», New York, 2008.
- [2] Sistema de Segurança Interna - Gabinete do Secretário-Geral, «Relatório Anual de Segurança Interna 2017», *Relatório Anu. Segurança Interna*, p. 254, 2017.
- [3] University of Maryland, *Global Terrorism Database Codebook*, n. junho. 2017.
- [4] A. Roberts, «The Changing Faces of Terrorism», *BBC*, n. August, p. 6, 2002.
- [5] O Público, «11 de Setembro de 2001: o mundo depois das Torres», 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://www.publico.pt/2018/03/05/mundo/noticia/11-de-setembro-de-2001-o-mundo-depois-das-torres-1805199>. [Acedido: 21-Mai-2020].
- [6] S. and T. Department of Homeland Security, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*, n. outubro. 2011.
- [7] L. Conceição, «Proteção e Segurança de Edifícios face a Ataques Terroristas», 2008.
- [8] V. Karlos e G. Solomos, «Calculation of blast loads for application to structural components», 2013.
- [9] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, e J. Ramsay, «Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview», *Electronic J. Struct. Eng.*, n. janeiro, pp. 76–91, 2007.
- [10] U.S. Department Of Homeland Security, «Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks», *Risk Management Series - FEMA 427*. 2003.
- [11] U. S. Department of Homeland Security, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*, n. dezembro. 2003.
- [12] J. Pinto, «Comportamento de Estruturas de Aço sob a Ação de Explosões - Conceção de dissipadores de energia», Academia Militar, 2018.
- [13] RTP Arquivos, «1985 – FP 25 de Abril », 1985. [Em linha]. Disponível em: <https://arquivos.rtp.pt/conteudos/1985-fp-25-de-abril/>. [Acedido: 22-Mai-2020].
- [14] M. Förch, «Analysis of Glass Panels Subjected to Blast Load», 2019.
- [15] L. Valarinho, F. Branco, G. Chiumiento, e J. Correia, «Instabilidade lateral por flexão-torção de vigas em vidro estrutural. Estudo experimental e analítico.», *5as Jornadas Port. Eng. Estruturas*, pp. 1–16, 2014.
- [16] J. M. C. P. de N. Sanches, «Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro», Universidade Técnica de Lisboa, 2013.
- [17] H. S. Norville e E. J. Conrath, «Simplified Design Procedure for Blast Resistant Glazing», *ResearchGate*, n. junho, pp. 18–21, 2001.
- [18] V. Pereira, «Sistema Inovador de Protecção de Edifícios face a Explosões , composto por Painéis de Fachada em Betão Armado e Conectores em Aço de Parede Fina com Capacidade de Absorção de Energia», Academia Militar, 2017.
- [19] A. Longinow e F. Alfawakhiri, «Blast Resistant Design with Structural Steel - Common Questions Answered», *Mod. Steel Constr.*, n. outubro, 2003.
- [20] V. Karlos, G. Solomos, e M. Larcher, «Analysis of the blast wave decay coefficient using the Kingery–Bulmarsh data», *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 7, n. 3, pp. 409–429, 2016.
- [21] R. Meyer, J. Köhler, e A. Homburg, *Explosives. Sixth, Completely Revised Edition*. Wiley-VCH,

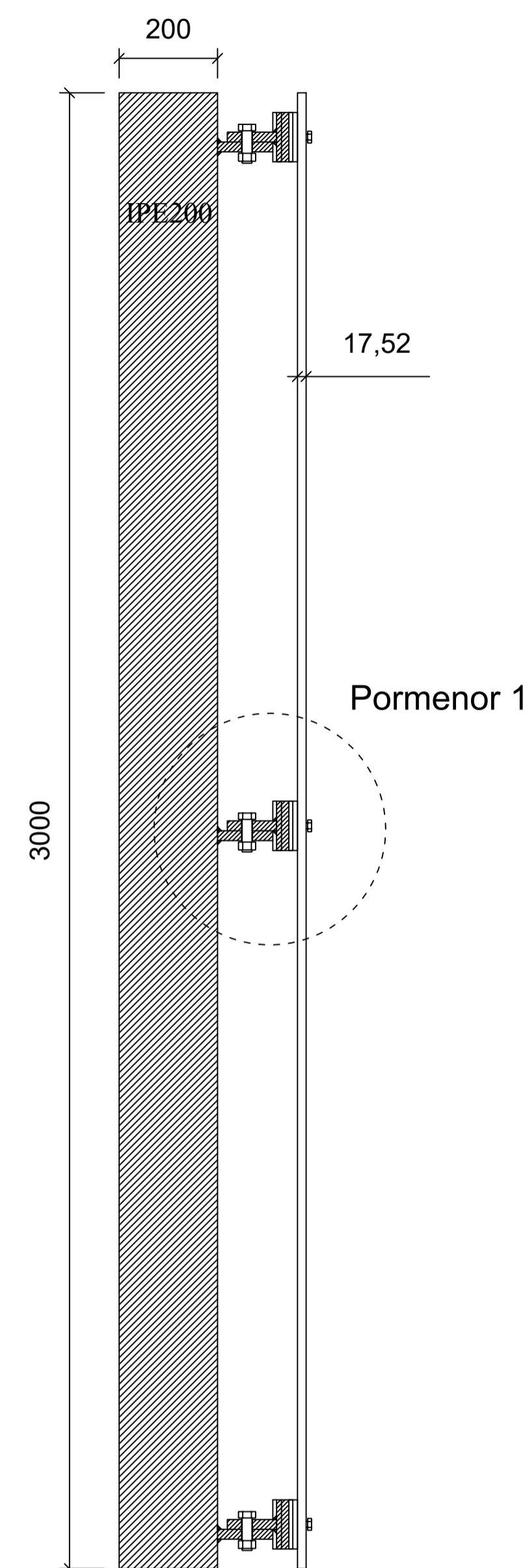
- 2007.
- [22] G. Kinney e K. Graham, *Explosive shocks in air*, 2ª. Nova Iorque: Springer Science + Business Media, LLC, 1985.
- [23] «Unified Facilities Criteria (UFC) - Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions», 2008.
- [24] H. Draganić e V. Sigmund, «Blast Loading on Structures», *Technical Gazette* 19, vol. 19, n. 3, Ozijek, pp. 643–652, 2012.
- [25] E. Yandzio e M. Gough, «Protection of Buildings against Explosions», *Steel Constr. Inst.*, p. 120, 2011.
- [26] M. Shaheen, «Numerical Modelling of Blast Loads effects on a Reinforced Concrete Structure Using LS-DYNA Software», Islamic University Of Gaza, 2015.
- [27] Z. Kocczaz, F. Sutcu, e N. Torumbalci, «Architectural and Structural Design for Blast Resistant Buildings», *14th World Conf. Earthq. Eng.*, p. 8, 2008.
- [28] «Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions», Washington, 1990.
- [29] D. Dusenberry, Ed., *Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings*. 2010.
- [30] M. Förch, «Analysis of Glass Panels Subjected to Blast Load», HafenCity Universität Hamburg, Hamburg, 2019.
- [31] S. B. Janney, «Blast Resistant Design of Steel Structures», University of Tennessee, Knoxville, 2007.
- [32] G. de J. Gomes, «Reutilização de edifícios correntes para fins operacionais - Blast Assessment», 2016.
- [33] D. M. Nabais, «Desenvolvimento de um Sistema Inovador de Proteção de Estruturas de Betão contra Explosões», Academia Militar, 2016.
- [34] C. E. Needham, *Blast Waves*. Albuquerque, 2010.
- [35] J. M. P. Bogas, «Fachadas de Vidro: Explorar os limites da utilização do vidro na construção», Universidade do Minho, 2011.
- [36] S. M. M. Pereira, «Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro», Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [37] D. Mocibob, «Glass Panel under Shear Loading - Use of Glass Envelopes in Building Stabilization», École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [38] Tangram Technology Ltd., «Float Glass Production», 11-Mar-2010. [Em linha]. Disponível em: <http://www.tangram.co.uk/TI-Glazing-Float-Glass.html>. [Acedido: 03-Out-2020].
- [39] J. Wurm, «Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins», 2007. [Em linha]. Disponível em: https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=3VnTAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Glass+Structures.+Design+and+Construction+of+Self-Supporting+Skins&ots=oSYOrbXsKR&sig=pDBJyDfHWGPD5VFdFXcg0BpqtQI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [Acedido: 27-Out-2020].
- [40] M. Overend, «Recent developments in design methods for glass structures», *Struct. Eng.*, vol. 88, n. 14, pp. 18–26, 2010.

- [41] M. Feldmann e R. Kasper, «Guidance for European Structural Design of Glass Components», Luxembourg, 2014.
- [42] Wikipédia - A enciclopédia livre, «Escala de Mohs», 02-Ago-2020. [Em linha]. Disponível em: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/387714/Mohs-hardness>. [Acedido: 05-Nov-2020].
- [43] C. S. M. P. Costa, «Controlo da Qualidade de Fachadas em Vidro - Fachadas-Cortina e Fachadas em Vidro Exterior Agrafado», Universidade de Lisboa, 2018.
- [44] Wikipédia - A enciclopédia livre, «Reologia», 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Reologia>. [Acedido: 08-Nov-2020].
- [45] H. D. Hidallana-Gamage, D. P. Thambiratnam, e N. J. Perera, «Computational analysis of laminated glass panels under blast loads: a comparison of two dimensional and three dimensional modelling approaches», *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 2, n. 8, pp. 69–79, 2013.
- [46] Dah Shi Metal Industrial, «Clipes de vidro de aço inoxidável (suportes)», 2020. [Em linha]. Disponível em: https://www.dahshi.com.tw/pt/category/Clipes-de-vidro-de-ao-inoxidavel-suportes/handrail_fittings_cat_10.html. [Acedido: 08-Nov-2020].
- [47] Glasscon, «Glass Fins & Mullions - Spider Glass», 2015. [Em linha]. Disponível em: <https://www.glasscon.com/products/spider-glass-suspended-glass-fins-cable-system/glass-fins-mullions-spider-glass>. [Acedido: 18-Nov-2020].
- [48] DeaMor, «Point-Supported Canopy Systems | DeaMor», 2020. [Em linha]. Disponível em: <http://www.deamor.com/solutions/products/glass-canopies/point-supported/>. [Acedido: 08-Nov-2020].
- [49] «Tabela de perfis laminados a quente», Lisboa, 2018.
- [50] «Estruturas Metálicas – Formulário», 2017.
- [51] F. A. Santos *et al.*, «Low velocity impact response of additively manufactured lattice protectors», p. 11, 2020.
- [52] M. Lopo e P. Coutinho, «Mitigação de impactos com estruturas auxéticas impressas em 3-D .», 2019.
- [53] Inovação Tecnológica, «Metamateriais mecânicos revelam novo fenómeno da física», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=metamateriais-mecanicos&id=010160171016>. [Acedido: 11-Nov-2020].
- [54] M. Parratt, «Behaviour of Multi-Layered Laminated Glass Under Blast Loading», University of Toronto, 2016.
- [55] Ł. Mazurkiewicz, J. Małachowski, P. Baranowski, e K. Damaziak, «Comparison of numerical testing methods in terms of impulse loading applied to structural elements», *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 51, n. 3, pp. 615–625, 2013.
- [56] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Ed., *LS-DYNA ® Theory Manual*. Califórnia, 2015.
- [57] «LS-DYNA, Um solver para múltiplas aplicações», *Distrim*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.distrim.pt/ls-dyna/>. [Acedido: 04-Set-2020].
- [58] «prEN16612: Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by

- calculation and testing», 2013.
- [59] «PVB Film Selection Specification», 2019.
- [60] *LS-DYNA - Keyword User's Manual, Material Models*, vol. II, n. February. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2002.
- [61] «Uniform Building Code», *Wikipedia*, 28-Mai-2018. [Em linha]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Uniform_Building_Code. [Acedido: 23-Mai-2020].

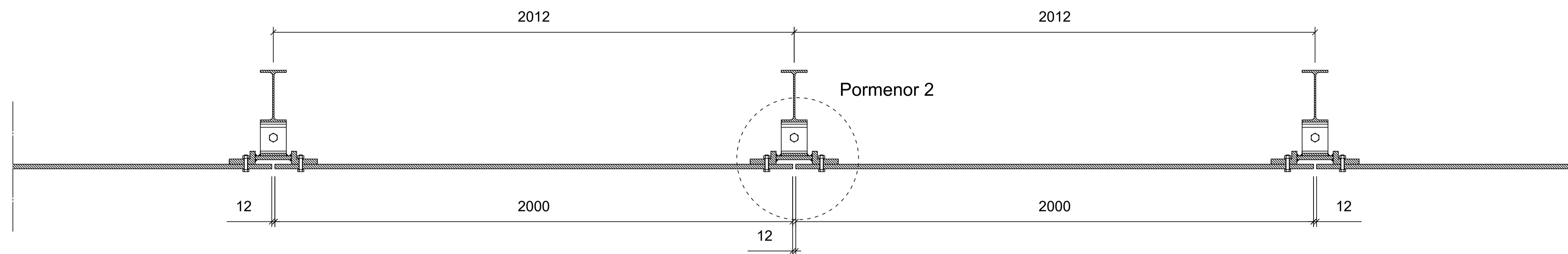
Anexos

Corte A-A'



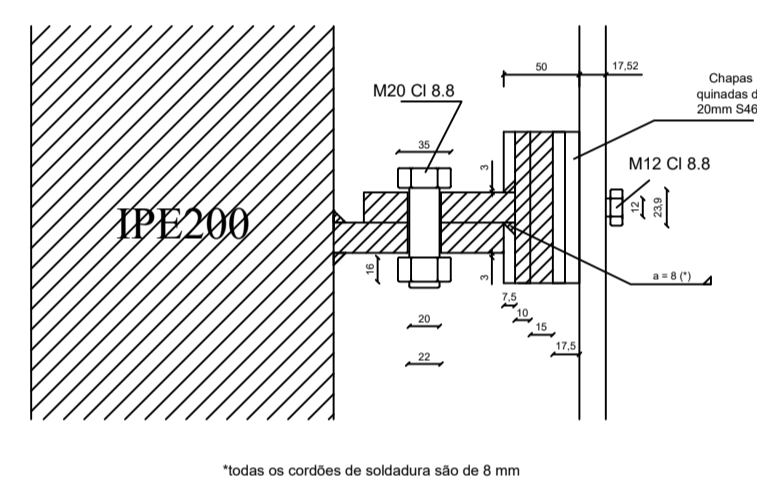
Escala 1:100

Corte B-B'



Escala 1:100

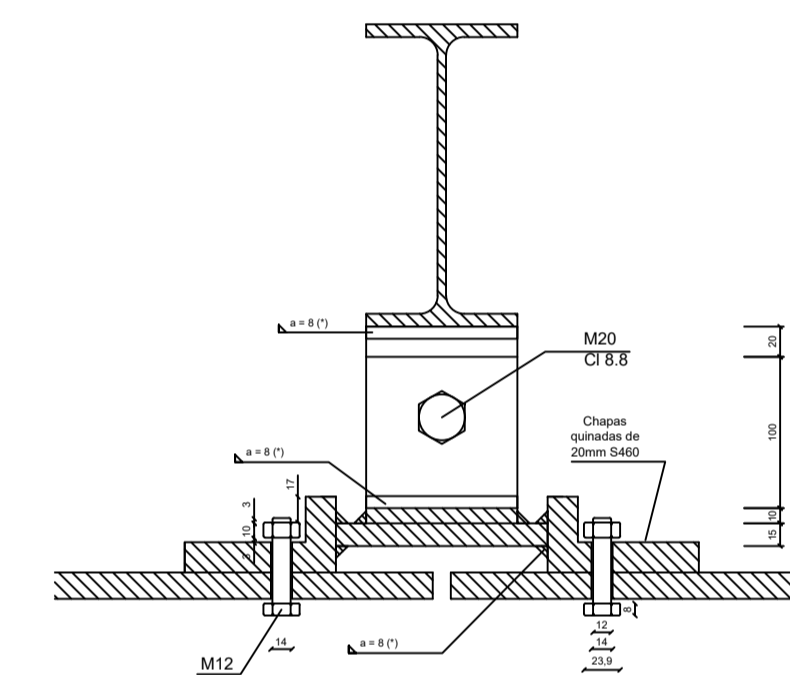
Pormenor 1



*todas as condições de soldadura são de 6 mm

Escala 1:50

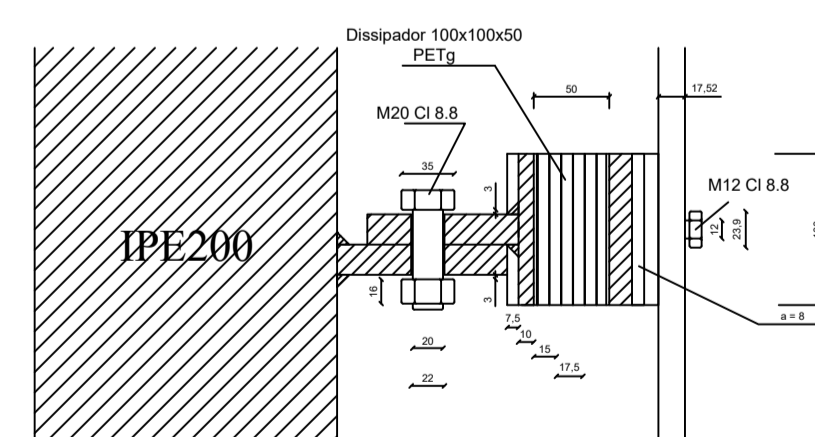
Pormenor 2



*todas as condições de soldadura são de 8 mm

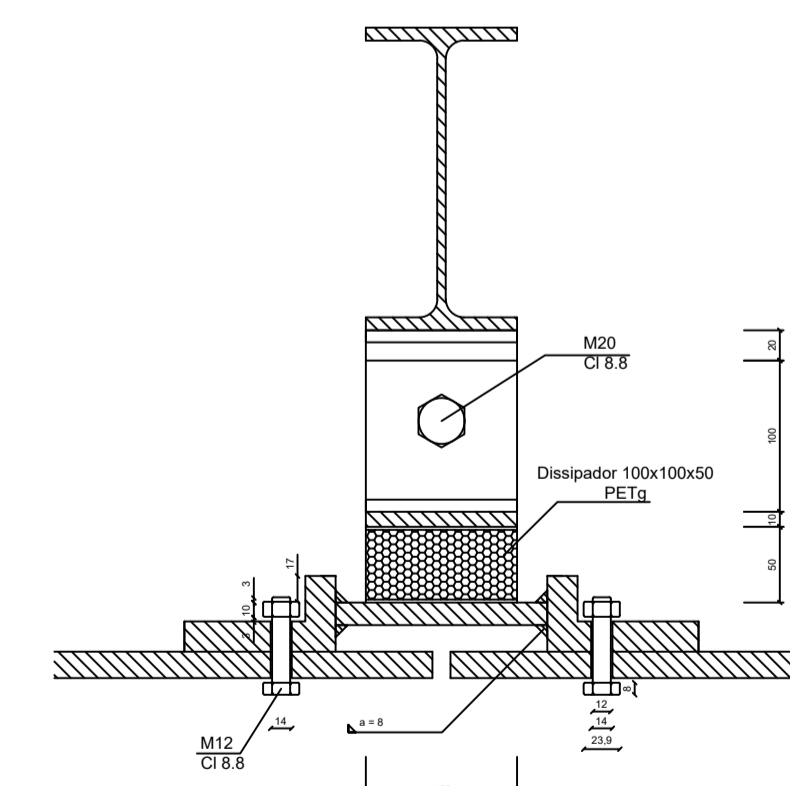
Escala 1:50

Pormenor 1 (com dissipador)



Escala 1:50

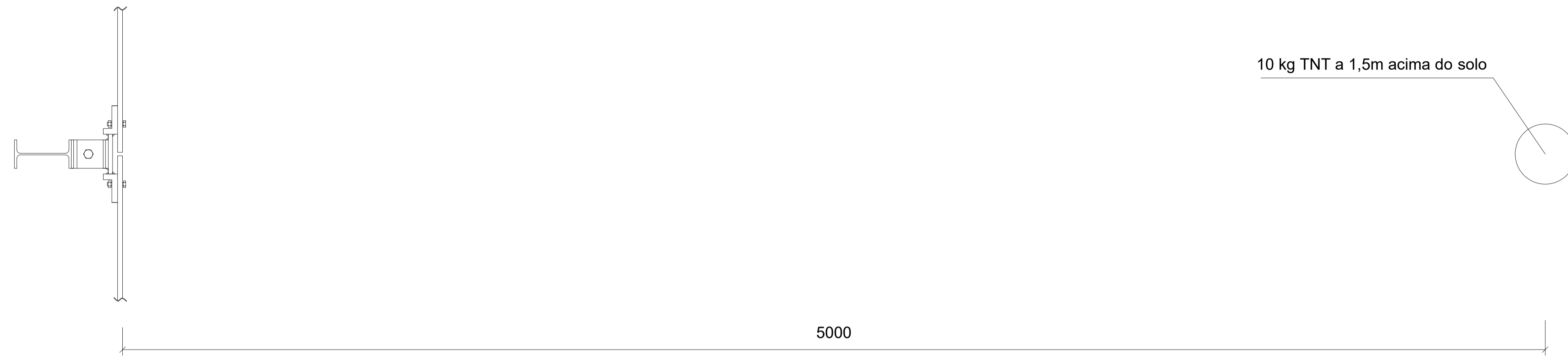
Pormenor 2 (com dissipador)



Escala 1:50

	ANEXO B – Cortes e Pormenores 1 e 2 (Sem e Com dissipador)
	Data – dezembro de 2020
	Escala – Indicadas
	Autor – Alferes de Engenharia Rui Jorge Lourenço Rita
	Página C

Setup para prescrição de ensaios de referência



Setup para prescrição de ensaios com dissipador

