

DM

Projeto de Estruturas em Vidro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Joana Maria Nóbrega Andrade

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2021

Projeto de Estruturas em Vidro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Joana Maria Nóbrega Andrade

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

José Manuel Martins Neto dos Santos

AGRADECIMENTOS

Antes de mais é fundamental mencionar que a realização desta dissertação só foi possível graças ao contributo de várias pessoas que sempre me incentivaram e de algum modo ajudaram na concretização da mesma. Assim sendo, expresso desde já os meus agradecimentos por todo apoio prestado a todos os intervenientes.

Em primeiro lugar, o agradecimento vai para o meu orientador, Professor Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos, pela sua disponibilidade, e principalmente por todos os saberes que me foi transmitindo ao longo deste percurso académico.

O certo é que também nada disto seria possível sem os meus pais. Agradeço o apoio incondicional, o carinho e o facto de me proporcionarem oportunidades como esta em prol do meu futuro.

Ainda à minha irmã, por toda a ajuda no desenrolar desta dissertação e incentivo, e ao meu irmão, pela compreensão.

Ao António, pelo carinho, por estar sempre ao meu lado prestando um enorme apoio e nunca me ter deixado desistir.

Aos meus amigos, Eng. Lino Borges e colegas de trabalho por todo o apoio, incentivo e compreensão durante este percurso.

RESUMO

Nos dias de hoje começam a surgir nos mais diversos tipos de construções alguns casos de aplicação de vidro em que toma uma função estrutural. Embora a sua aplicação atualmente não seja tão extensiva, acredita-se que isso se deva ao facto de ser um material que apresenta alguma fragilidade, e a investigação desenvolvida e as normas disponíveis são ainda escassas, comparativamente aos materiais de construção mais correntes, como o betão e o aço.

O vidro é um material isotrópico, possui um comportamento elástico, é resistente quando se encontra no estado sólido, mas é extremamente frágil, tal como já mencionado. Pode ser transparente, translúcido ou brilhante, dependendo das quantidades dos seus constituintes básicos.

Neste sentido, nesta dissertação apresenta-se o material propriamente dito, em termos das suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas. Acrescenta-se ainda, os diversos tipos de vidros que é possível encontrar no mercado, bem como os sistemas de fixação utilizados nas suas aplicações. É possível aferir que embora a aplicação do vidro com função estrutural não seja tão extensiva, existem alguns exemplos de aplicação no estrangeiro, em Portugal Continental e no Arquipélago da Madeira.

O vidro é um material que tem vindo a ser estudado nas últimas décadas como um material a ser aplicado na construção com função estrutural. Como tal, nesta dissertação são apresentados alguns dos resultados obtidos em diversos estudos. Além disso, são abordadas algumas normas destinadas ao dimensionamento de elementos em vidro, nomeadamente EN 16612 e CNR-DT 210.

Posteriormente, são propostos tabelas e gráficos de pré-dimensionamento que visam auxiliar a escolha, em termos de espessuras e dimensões de elementos estruturais, como vigas, pilares, *glass fins*, painéis aplicados em pavimentos, coberturas e fachadas.

Por fim, procede-se à aplicação das tabelas e gráficos mencionados anteriormente a um caso de estudo. Este consiste numa estrutura totalmente em vidro, com dois pisos, onde os elementos estruturais (vigas, pilares, *glass fins*, pisos e fachadas) são dimensionados de acordo com as normas adotadas para o estudo.

Palavras-chave: Vidro estrutural; EN 16612; CNR-DT 210; dimensionamento; vidro laminado; tabelas de dimensionamento; caso de estudo.

ABSTRACT

Nowadays, in the most diverse types of constructions, some cases of application of glass in which it takes on a structural function begin to appear. Although its application is currently not so extensive, it is believed that this is because it is a material that presents some brittleness, and the research carried out and the standards available are still scarce, compared to the most common construction materials, such as the concrete and steel.

Glass is an isotropic material, it has an elastic behavior, it is resistant when it is in the solid state, but it is extremely brittle, as already mentioned. It can be transparent, translucent or shiny, it depends on the amounts of its basic constituents.

This dissertation intends to present the material itself, in terms of chemical, physical, mechanical, and thermal properties. There are several types of glass that can be found on the market, as well as the fixing systems used in their applications. Even if the application of glass with a structural function is not so extensive, there are some examples in Portugal and in the Madeira Island.

The glass is a material that has been studied in recent decades as a material to be applied in construction with a structural function. Thus, it is possible to check some examples of studies in this dissertation. Some standards for the design of glass elements are addressed, namely EN 16612 and CNR-DT 210.

Tables and graphs are also proposed that aim to help the choice, in terms of thickness and dimensions of structural elements, such as beams, columns, glass fins, panels applied to floors, roofs and facades.

Finally, the above mentioned tables and graphs are applied to a case study. case study. It has an all-glass structure, with two floors, where the structural elements (beams, columns, glass fins, floors and facades) are dimensioned in accordance with the standards adopted for the study.

Keywords: structural glass; EN 16612; CNR-DT 210; design; laminated glass; design tables; case study.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 O Vidro como material de construção	5
2.1 Enquadramento histórico	5
2.2 Propriedades do material.....	8
2.2.1 Propriedades químicas.....	9
2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	9
2.2.3 Propriedades térmicas.....	12
2.2.4 Propriedades físicas, mecânicas e térmicas	12
2.3 Processo de fabrico	13
2.4 Tipos de vidro	15
2.4.1 Vidro recozido	16
2.4.2 Vidro temperado	17
2.4.3 Vidro termo-endurecido	20
2.4.4 Vidro curvo.....	21
2.4.5 Vidro laminado.....	22
2.4.6 Vidro isolante	24
2.4.7 Vidro decorado	25
2.4.8 Vidro revestido	26
2.5 Sistemas de fixação.....	27
2.5.1 Fixações mecânicas	28
2.5.2 Fixações adesivas	32
3 Estado da Arte – Vidro estrutural.....	35
3.1 Exemplos de aplicação.....	35
3.1.1 Pilares	35

3.1.2	Vigas	36
3.1.3	Coberturas	38
3.1.4	Pavimentos.....	42
3.1.5	Fachadas.....	43
3.1.6	Outros elementos	46
3.2	Custos e fabricantes.....	48
3.3	Investigação sobre vidro estrutural	49
4	Regulamentação e metodologia de dimensionamento.....	53
4.1	Normas do produto.....	53
4.2	Normas de ensaios.....	53
4.3	Normas de dimensionamento	54
4.3.1	Norma EN 16612	56
4.3.2	Documento técnico CNR-DT 210.....	62
5	Pré-dimensionamento de estruturas em vidro estrutural	69
5.1	Generalidades.....	69
5.2	Folha de cálculo	69
5.2.1	Pisos, Coberturas e Fachadas.....	69
5.2.2	Vigas	71
5.2.3	Pilares.....	74
5.2.4	Glass fins.....	76
5.3	Tabelas e Gráficos de Pré-dimensionamento	79
5.3.1	Pavimento e Cobertura.....	79
5.3.2	Vigas	80
5.3.3	Pilares.....	81
5.3.4	Glass fins.....	83
5.3.5	Fachadas.....	85
6	Caso de estudo.....	89
6.1	Generalidades.....	89
6.2	Ações	90
6.2.1	Cargas permanentes	90
6.2.2	Cargas Variáveis	90
6.3	Combinações.....	91
6.4	Regulamentos e Normas	91
6.5	Verificação de segurança	91
6.5.1	Pavimento	91
6.5.2	Cobertura	92
6.5.3	Vigas	92

6.5.4	Pilares	94
6.5.5	Glass fins	95
6.5.6	Fachadas	96
6.6	Ligações	97
7	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	99
7.1	Conclusões	99
7.2	Propostas para trabalhos futuros	100
	Referências bibliográficas	101
	Anexos	109
I.	Algumas normas de conceção e utilização do vidro	111
II.	Plantas do projeto proposto	115
III.	Cálculo da ação do vento segundo a norma EN1991	119
IV.	Cálculo para o elemento estrutural primário – painéis em pavimentos	121
V.	Cálculo para o elemento estrutural primário – painéis em coberturas	123
VI.	Cálculo para o elemento estrutural primário - vigas aplicadas em pavimentos	125
VII.	Cálculo para o elemento estrutural primário - vigas aplicadas em coberturas	127
VIII.	Cálculo para o elemento estrutural primário – pilar primeiro piso	129
IX.	Cálculo para o elemento estrutural primário – pilar segundo piso.....	131
X.	Cálculo para o elemento estrutural primário – glass fins primeiro piso.....	133
XI.	Cálculo para o elemento estrutural primários – glass fins segundo piso	137
XII.	Cálculo para o elemento de preenchimento – painel em fachadas com 2,54x3,21m	141
XIII.	Cálculo para o elemento de preenchimento – painel em fachadas com 3,21x3,21m	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Vidro natural, a obsidiana (Schimmrich, 2012).....	5
Figura 2.2: Fabricação de vidro utilizando a técnica de sopro (Ventura Vidros, 2009).....	6
Figura 2.3: Vitral da Catedral de Reims, França (Wikipédia, s.d.)	6
Figura 2.4: a) Palm House, no Royal Botanical Garden, de H. e D. Bailey, em Londres (Wikipédia, s.d.); b) Crystal Palace, de Joseph Paxton, em Londres (Bruna, et al., 2011)	7
Figura 2.5: Residência Farnsworth, de Mies Van de Rohe (Hunter, 2010)	8
Figura 2.6: Representação esquemática da curva de tensão-deformação do vidro (adaptado de (Feldmann & Kasper, 2014)).....	10
Figura 2.7: Representação esquemática: a) ensaio <i>coaxial double ring</i> , b) ensaio <i>four point bending</i> , respetivamente (Haldimann, et al., 2007)	12
Figura 2.8: Esquema representativo das etapas do processo <i>float</i> (adaptado de (Louter, 2011))	14
Figura 2.9: Representação esquemática das formas do bordo do vidro ((NP EN 12150-1, 2015; EN 1863-1, 2011)	14
Figura 2.10: Regras para o posicionamento e diâmetro dos furos (adaptado de (Wurm, 2007)).....	15
Figura 2.11: Tipos de vidros (adaptado de (Haldimann, et al., 2007)).....	16
Figura 2.12: Comparação do padrão de fratura (Haldimann, et al., 2007).....	17
Figura 2.13: Processo do tratamento químico (têmpera) (adaptado de (Haldimann, et al., 2007)).....	18
Figura 2.14: Comparação do comportamento entre o vidro recozido e temperado (adaptado de (Haldimann, et al., 2007)).....	19
Figura 2.15: Molde utilizado para dar forma ao vidro curvo (Wurm, 2007)	21
Figura 2.16: Exemplos de vidros laminados (adaptado de (Wurm, 2007)).....	22
Figura 2.17: Comportamento do vidro laminado após a rotura para os diferentes tipos de vidro (adaptado de (Haldimann, Luible, & Overend, Structural use of Glass, 2007)).....	23
Figura 2.18: Representação das etapas de fabrico do vidro laminado (adaptado de (Wurm, 2007))	23
Figura 2.19: Representação dos constituintes do vidro duplo (adaptado de (Guardian Industries Corp., 2010)).....	24
Figura 2.20: Vidro colorido esmaltado (Archiproducts, s.d.).....	25
Figura 2.21: a) Vidro refletivo (Archiproducts, 2015); b) Vidro de controlo solar de baixa emissividade (Archiproducts, s.d.)	27
Figura 2.22: Fachada cortina (Navarra, s.d.).....	28
Figura 2.23: Sistema de fixação de suporte linear com caixilho (Navarra, s.d.).....	29
Figura 2.24: a) Fachada e cobertura em vidro exterior agrafado; b) Exemplo de ligação aparafusada (Archiproducts, s.d.)	30
Figura 2.25: Ligações aparafusadas (Valarinho, 2010).....	30
Figura 2.26: Fixação com grampos (Archiproducts, s.d.)	31
Figura 2.27: Fixação por aperto-fricção (Haber, 2015).....	31
Figura 2.28: Representação dos elementos constituintes de um grampo (Haldimann, et al., 2007)	32

Figura 2.29: Representação da constituição da fixação por aperto-fricção (Haldimann, et al., 2007)	32
Figura 2.30: Fachada de VEC com juntas entre painéis de silicone estrutural (Socimateus, s.d.)	33
Figura 3.1: a) Pilares de vidro no Centro Cívico de Saint-Germain, França (ArchDaily, 2009); b) Pilares de vidro na sede Danfoss Domicil, Dinamarca (Architectour, s.d.)	36
Figura 3.2: a) Museu do Vidro em Kingswinford, Reino Unido (View, s.d.); b) Loja Apple, Nova Iorque (Eckersley O'Callaghan, s.d.)	37
Figura 3.3: Sede da EDP no Porto, Portugal (APEL, s.d.)	37
Figura 3.4: <i>Glass fins</i> utilizados numa fachada da Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal (Martifer, s.d.)	38
Figura 3.5: Cobertura de vidro em balanço, Japão (Firman Glass Projects, s.d.)	39
Figura 3.6: Teto de vidro suportado por vigas em vidro no colégio Keble, no Reino Unido (Firman Glass Projects, s.d.)	39
Figura 3.7: Cobertura em vidro laminado na Filadélfia, Estados Unidos da América (Eckersley O'Callaghan, s.d.)	40
Figura 3.8: Cobertura de vidro na Technische Universität de Berlim, Alemanha (Saint-Gobain Glass, s.d.)	41
Figura 3.9: Ponte que liga dois edifícios na Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal	41
Figura 3.10: a) Vista exterior da cobertura de vidro do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira, Portugal (Saint-Gobain Glass, s.d.); b) Vista pelo interior da cobertura do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira, Portugal (Martifer, s.d.)	41
Figura 3.11: a) Pavimento de vidro apoiado em vigas de vidro, em Inglaterra (Firman Glass Projects, s.d.); b) Ponte de vidro no Eaton Centre, em Calgary, Canadá (Wellershoff, Sendelbach, & Schmitt, 2011)	42
Figura 3.12: Interior da ponte que liga dois edifícios na Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal (Bellapart, s.d.)	43
Figura 3.13: Pavimento em vidro no miradouro do Cabo Girão, Arquipélago da Madeira (Camacho, 2012)	43
Figura 3.14: a) Fachada do Museu do Vidro em Kingswinford, Reino Unido (Detail, s.d.); b) Fachada da Fundação Champalimaud (Saint-Gobain Glass, 2011)	45
Figura 3.15: Fachada de VEA da Weststadthallen (Folkwang Musikschule) em Essen, Alemanha (Saint-Gobain Glass, s.d.)	45
Figura 3.16: Edifício Dynamic em Braga, Portugal (Bracarae, 2012)	46
Figura 3.17: Loja da Volkswagen no Funchal, Arquipélago da Madeira (VSA Madeira, s.d.)	46
Figura 3.18: a) Escadaria em vidro numa loja da Apple em Leidseplein, Amesterdão; b) Sede da EDP no Porto, Portugal (Agência PH, s.d.)	47
Figura 3.19: Guarda-corpos do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira (Martifer, s.d.)	48
Figura 4.1: Exemplo de dimensões das espessuras do vidro laminado (adaptado de (EN 16612, 2019))	60
Figura 4.2: Exemplo de dimensões das espessuras do vidro laminado (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))	67
Figura 5.1: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pisos e cobertura) e elementos de preenchimento (fachadas)	70

Figura 5.2: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (vigas).....	72
Figura 5.3: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pilares).....	74
Figura 5.4: Folha de cálculo para elementos estruturais secundários (<i>glass fins</i>).....	76
Figura 5.5: Secções das vigas em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm).....	81
Figura 5.6: Secções dos pilares em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm).....	82
Figura 5.7: Secções dos <i>glass fins</i> em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm).....	83
Figura 5.8: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos <i>glass fins</i> , com 300mm de altura em vidro laminado.....	84
Figura 5.9: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos <i>glass fins</i> , com 400mm de altura em vidro laminado.....	84
Figura 5.10: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos <i>glass fins</i> , com 500mm de altura em vidro laminado.....	85
Figura 6.1: Perspetiva da estrutura projetada para o caso de estudo.....	89
Figura 6.2: a) Sistema de fixação das fachadas (Oldcastle BuildingEnvelope, s.d.); b) Sistema de ligação entre painéis de fachada e <i>glass fins</i> e painéis de pavimento/ cobertura e vigas (GLASSCON GmbH, s.d.).....	98
Figura 6.3: Sistema de ligação entre vigas e entre vigas e <i>glass fins</i> (GLASSCON GmbH, s.d.).....	98
Figura 6.4: Sistema de ligação dos pilares na sede Danfoss, Dinamarca (Heugten, 2013).....	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química do vidro sílica-soda-cal (adaptado de (NP EN 572-1, 2012)).....	9
Tabela 2.2: Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do vidro (adaptado de (Wurm, 2007; Romão, 2014)).....	13
Tabela 2.3: Espessuras e respetivas tolerâncias do painel de vidro recozido (adaptado de (EN 572-2, 2012)).....	17
Tabela 2.4: Propriedades do PVB e SGP (adaptado (Sanches, 2013))	22
Tabela 3.1: Preços por m ² do vidro simples, temperado, laminado e impresso (Top-Informática, s.d.)	48
Tabela 4.1: Fatores parciais (adaptado de (prEN 16612, 2013)).....	56
Tabela 4.2: Valores reduzidos (adaptado de (EN 16612, 2019))	57
Tabela 4.3: Fatores parciais de segurança do vidro (adaptado de (EN 16612, 2019)).....	58
Tabela 4.4: Fatores de modificação (adaptado de (EN 16612, 2019)).....	58
Tabela 4.5: Coeficientes referentes à superfície do painel (adaptado de (EN 16612, 2019))	58
Tabela 4.6: Fatores de tensão residual (adaptado de (EN 16612, 2019)).....	59
Tabela 4.7: Coeficiente k1 para o cálculo da tensão máxima (EN 16612, 2019)	61
Tabela 4.8: Coeficiente k4 para o cálculo da deformação máxima (EN 16612, 2019).....	62
Tabela 4.9: Coeficiente C1, em função da distribuição do momento fletor (adaptado de (CNR-DT 210, 2013)).....	65
Tabela 4.10: Fatores de redução R _M (adaptado de (CNR-DT 210, 2013)).....	66
Tabela 4.11: Fatores parciais de segurança do vidro (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))	67
Tabela 5.1: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro recozido, presentes em pavimentos ou coberturas.....	79
Tabela 5.2: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro termo-endurecido, presentes em pavimentos ou coberturas	80
Tabela 5.3: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro temperado, presentes em pavimentos ou coberturas.....	80
Tabela 5.4: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 300mm	81
Tabela 5.5: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 400mm	81
Tabela 5.6: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 500mm	81
Tabela 5.7: Esforço axial resistente de pilares com altura de 200mm	82
Tabela 5.8: Esforço axial resistente de pilares com altura de 300mm	82
Tabela 5.9: Esforço axial resistente de pilares com altura de 400mm	82
Tabela 5.10: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro recozido, presentes em fachadas.....	86

Tabela 5.11: Cargas limite (F_d) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro temperado, presentes em fachadas	86
Tabela 5.12: Cargas limite (F_d) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro termo-endurecido, presentes em fachadas	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
EC	Eurocódigo
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
EN	Norma Europeia
EPDM	Etileno-propileno-dieno
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP EN	Norma Portuguesa
prEN	Rascunho de Norma Europeia
PVB	Polivinil butiral
VEA	Vidro exterior agrafado
VEC	Vidro exterior colado

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

O vidro é muito utilizado nos dias de hoje como material de construção, dado o vasto desenvolvimento do material nas últimas décadas. A sua utilização é vantajosa na medida em que permite um aproveitamento da luminosidade, dada a sua transparência ou translucidez, aumenta o conforto e economia, além disso permite acabamentos de grande estética que outros materiais de construção não conseguem. Note-se que a sua aplicação tem vindo a multiplicar-se, sob a forma de painéis aplicados em pisos, tetos, escadas, pilares, entre outros.

Inicialmente o vidro era utilizado essencialmente em revestimentos, no âmbito da construção. Atualmente já é possível aferir a sua aplicação em elementos estruturais, que por consequência necessitam de verificações de segurança, tal como acontece com os elementos estruturais de outros materiais utilizados na construção. O facto é que a função estrutural acaba por ser nova para este material antigo, o que implica uma atenção redobrada no dimensionamento e na sua utilização. No entanto, sendo efetuadas todas as verificações necessárias, acaba por ser possível a utilização de vidro com o mesmo nível de fiabilidade e segurança de outros materiais, como o betão e o aço.

Este material é isotrópico, possui um comportamento elástico, é resistente quando se encontra no estado sólido, mas é extremamente frágil. Pode ser transparente, translúcido ou brilhante, depende das quantidades dos seus constituintes básicos. Tem a capacidade de absorver, refletir e transmitir a luz (Haldimann, Luible, & Overend, 2007; Punmia, Jain, & Jain, 2003).

Note-se que a sua fragilidade, a elevada resistência à compressão e o comportamento elástico do material são muito importantes para a conceção de estruturas de vidro (Wurm, 2007).

No que concerne à utilização do termo vidro estrutural ou estrutura de vidro, esta é um pouco subjetiva. Nos casos em que o vidro compõe os elementos estruturais, como pilares, vigas ou outros elementos de suporte, que em caso de falha a estabilidade da estrutura é afetada, pode referir-se ao termo vidro estrutural. Quando se trata de um elemento não estrutural, que não é essencial para garantir a estabilidade da estrutura, trata-se de uma estrutura de vidro. O certo é que neste caso o vidro mesmo não tendo que suportar cargas permanentes, como o peso próprio da estrutura, tem que ter resistência suficiente para determinadas cargas como o vento, impactos, entre outros. Daí a distinção entre ambas as designações ser tão subjetiva (Chaunac & Serruys, 1997; Costa, Miranda, Varum, & Dias, 2005).

Pelo facto de ser um material utilizado recentemente em elementos estruturais, existe ainda a pouca informação e escassez de regulamentação, comparativamente a outros materiais.

1.2 Objetivos e metodologia

Face ao referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação passa por reunir e elaborar um conjunto de informações técnicas que auxiliem os projetistas no dimensionamento de estruturas em vidro. Para atingir este objetivo foram definidos os seguintes objetivos secundários:

- efetuar uma pesquisa sobre o material propriamente dito, bem como das normas existentes;
- pesquisar trabalhos de investigação baseadas no conceito de vidro estrutural;
- identificar e comparar as normas de dimensionamento de vidro estrutural existentes;
- criar tabelas e gráficos de pré-dimensionamento para elementos estruturais, como: pisos, coberturas, vigas, pilares, *glass fins* e fachadas;
- aplicar as tabelas e gráficos de pré-dimensionamento supracitados a um caso de estudo;
- demonstrar a aplicação de algumas normas de dimensionamento.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se subdividida em sete capítulos.

No Capítulo 1, tem-se um enquadramento geral do tema, a identificação dos objetivos e a respetiva descrição da organização da dissertação.

Quanto ao Capítulo 2, este contempla uma apresentação do material em estudo, destacando-se o seu enquadramento histórico, tanto a nível mundial como nacional. Posteriormente são apresentadas algumas características do vidro como material, tais como: as suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas. É ainda apresentado o método de fabrico deste material, os diversos tipos de vidro que é possível encontrar no mercado, bem como algumas das propriedades dos mesmos. Menciona-se, também, alguns dos sistemas de fixação do vidro, tanto mecânicas como adesivas.

No Capítulo 3, apresenta-se alguns exemplos de aplicação do vidro no estrangeiro, em Portugal Continental e no Arquipélago da Madeira, sob a forma de pilares, vigas, coberturas, pavimentos, fachadas, escadas, entre outros. Tem-se ainda uma breve apresentação de alguns custos e fabricantes deste material. Considerou-se destacar alguns dos estudos já efetuados tendo como essência o vidro.

Em relação ao Capítulo 4, visto que um dos objetivos desta dissertação é dar a conhecer alguns dos regulamentos e metodologias de dimensionamento, optou-se por apresentar algumas das normas do produto, de ensaios e de dimensionamento referentes ao vidro, sendo aprofundadas duas normas, a EN 16612 e a CNR-DT 210.

Já no Capítulo 5, são apresentadas algumas tabelas e gráficos de pré-dimensionamento para estruturas em vidro de acordo com as normas mencionadas anteriormente. As tabelas permitem a escolha de espessuras de vidros, de tipos de vidro e de dimensões para alguns elementos estruturais.

Tendo em conta o supramencionado, optou-se por aplicar as tabelas de pré-dimensionamento geradas. Assim sendo, no Capítulo 6 é apresentado um caso de estudo com a aplicação das tabelas e verificações detalhadas dos elementos estruturais com base nas normas selecionadas para o estudo.

Por fim, no Capítulo 7, apresentam-se algumas conclusões que foram surgindo ao longo do desenvolvimento desta dissertação. São, ainda, feitas propostas para trabalhos futuros relacionados com este tema.

2 O VIDRO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

2.1 Enquadramento histórico

Existem diversas teorias de quando e onde surgiu o material em estudo denominado por vidro.

No que diz respeito ao seu aparecimento natural, alguns historiadores descobriram que o vidro se forma no interior de um vulcão, que com as altas temperaturas provenientes de uma erupção derretem a areia originando uma rocha denominada por obsidiana (ver Figura 2.1). Esta rocha vulcânica raramente é transparente, mas permite que alguma luz atravesse sobre a mesma. Na Idade da Pedra eram utilizadas obsidianas para diversos fins, tal como para as pontas das lanças (White, 2007).



Figura 2.1: Vidro natural, a obsidiana (Schimmrich, 2012)

Quanto à origem do vidro pela mão do Homem, esta é um pouco incerta. O certo é que foram descobertos por alguns arqueólogos objetos de vidro nas necrópoles egípcias que remontam para 4000 antes de Cristo (a. C.) (Akerman, 2000).

Segundo Leitch (2005), um historiador romano chamado Plínio, conta que os fenícios, durante um acampamento nas margens do rio Belus, fizeram uma fogueira onde apoiaram pedaços de trona e carbonato de sódio natural, para pousar os utensílios necessários para cozinhar. A fogueira foi mantida acesa algum tempo, o que levou a que o carbonato de sódio e a areia fundissem, originando um líquido brilhante e quase transparente que desconheciam até então. Tratava-se de vidro fundido.

Até por volta de 1500 a. C. o vidro era utilizado como adorno, essencialmente produzido pelos egípcios. Posteriormente, os romanos começaram a fabricar recipientes, mas devido à dificuldade para a sua obtenção só era acessível à classe mais rica (Akerman, 2000; Bauer, 1994).

Por volta de 300 a. C. surge uma técnica denominada por técnica do sopro (ver Figura 2.2). A técnica mencionada consiste em recorrer ao uso de um tubo e sobre uma das extremidades colocar uma porção de vidro fundido e soprar na outra extremidade, resultando assim uma bolha no interior (Akerman, 2000).



Figura 2.2: Fabricação de vidro utilizando a técnica de sopro (Ventura Vidros, 2009)

O método supracitado era utilizado para a fabricação de recipientes. É de salientar que esta técnica é utilizada nos dias de hoje para a produção de embalagens. O facto é que com este método surgiu o vidro plano colorido e o vitral, que era obtido através do sopro e rotação do tubo, em simultâneo, ganhando assim uma forma de disco achatado (ver Figura 2.2) (Bruna, et al., 2011). Nesta fase, começam a ser utilizados em igrejas e catedrais, sendo a Catedral de Reims (ver Figura 2.3) a primeira referência na Europa e o Mosteiro da Batalha a primeira referência em Portugal (Gonçalves & Margarido, 2012).

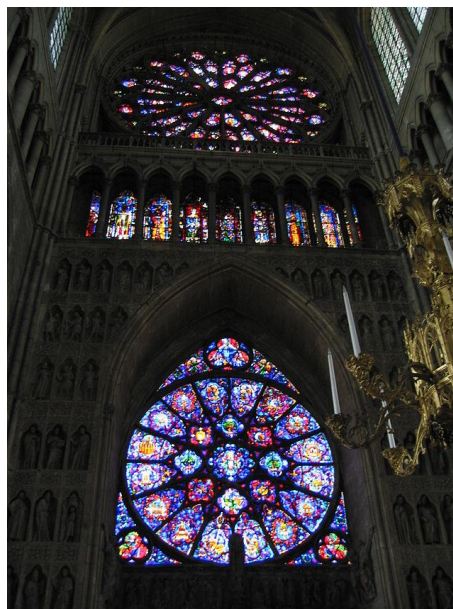


Figura 2.3: Vitral da Catedral de Reims, França (Wikipédia, s.d.)

Posteriormente, a fabricação dos vidros passou a ser feita por pessoas especializadas, na ilha de Murano, em Itália, por volta do século XIII, sendo que os conhecimentos da sua fabricação eram mantidos em sigilo. Alguns dos artesãos acabam por deixar Itália para abrir fábricas de vidro em outras partes da Europa (Akerman, 2000).

Por volta do século XVII surgem vidros produzidos por uma técnica que consiste na passagem de um rolo por cima da massa de vidro fundida que é depositada sobre uma mesa metálica. O facto é que foi uma técnica desenvolvida com o passar do tempo e com o surgimento de novas tecnologias melhorou a sua produção, tornando a superfície do vidro muito mais lisa e homogénea (Bruna, et al., 2011; Romão, 2014). Nesta época passou a ser muito utilizado em janelas, evidenciando-se a sua utilização nas construções mais importantes de Roma, em algumas vilas mais luxuosas de Pompeia e ainda em algumas casas de Inglaterra (Bauer, 1994).

No século XIX a produção do vidro aumentou. É essencial destacar que nesta época começaram a surgir construções de estufas e pavilhões para exposições onde era utilizado o vidro como material principal em conjunto com o aço. Neste contexto, pode-se destacar a obra Palm House, de H. e D. Bailey, de 1843 (ver Figura 2.4 a)). E, ainda, uma obra de Paxton, de 1851, o Crystal Palace, em Londres (ver Figura 2.4 b)) (Bruna, et al., 2011).



a)



b)

Figura 2.4: a) Palm House, no Royal Botanical Garden, de H. e D. Bailey, em Londres (Wikipédia, s.d.); b) Crystal Palace, de Joseph Paxton, em Londres (Bruna, et al., 2011)

As primeiras construções, onde era utilizado vidro, apresentavam diversos problemas no material, como o facto de possuir pouca capacidade de isolamento térmico e acústico, reflexos indesejáveis e distorções. Os problemas mencionados deviam-se à pouca exploração de novas técnicas para o seu fabrico (Costa, et al., 2005).

No século XX, as técnicas de fabricação do vidro são melhoradas com o avanço da ciência e da tecnologia. É então inventado na empresa Pilkington Glass Limited, pelo Sir Alistrain Pilkington, na década de 50, um método de produção de vidro, o processo *float*, que ainda é o processo mais utilizado nos dias de hoje para a produção do vidro recozido. Este processo permitiu uma melhoria das propriedades do vidro, sendo possível fabricá-lo com superfícies planas e espessuras constantes, e ainda possibilitou uma grande redução do seu custo. Consequentemente, a taxa de produção aumentou (Bauer, 1994; Costa, et al., 2005). O processo de fabrico é explicado mais detalhadamente na Secção 2.3 desta dissertação.

Uma vez desenvolvidas novas técnicas de produção e construção começam a surgir diversas obras onde o vidro era o material predominante, uma vez que possuía grandes vantagens, como: uma grande resistência, a capacidade de deixar entrar a luz, a possibilidade da visualização do exterior, por ser transparente e ainda por ser impermeável. Começaram a surgir diversas obras marcantes, como a residência Farnsworth, de Mies Van de Rohe (ver Figura 2.5) (Bruna, et al., 2011).



Figura 2.5: Residência Farnsworth, de Mies Van de Rohe (Hunter, 2010)

Atualmente, dispõe-se de diversos tipos de vidro com grandes melhorias a nível da resistência e das propriedades de isolamento térmico e acústico e da resistência ao fogo (Costa, et al., 2005). Também têm vindo a ser desenvolvidas estruturas de suporte e sistemas de fixação, possibilitando a construção de estruturas mais complexas. Tem sido um material muito utilizado na construção civil e na arquitetura, podendo-se encontrar em fachadas, coberturas, pavimentos, guarda-corpos e até em pilares e vigas.

Em Portugal, segundo Silva, et al. (2013), no século XVIII é introduzida a indústria vidreira pelos irmãos ingleses, Guilherme e João Diogo Stephens, na cidade da Marinha Grande. A indústria era inicialmente conhecida por Real Fábrica de Vidros, mais recentemente denominada por Fábrica-Escola Irmãos Stephens. Na atualidade, funciona como um museu direcionado à indústria vidreira no país, uma vez que a fábrica faliu após a morte dos fundadores e passou para a administração direta do Estado.

Nos dias de hoje, já existem algumas empresas ligadas à indústria vidreira pelo país, mas no que diz respeito à produção do vidro plano, ainda são poucas.

2.2 Propriedades do material

O vidro é um material que possui diversas propriedades, podendo destacar-se algumas físicas e químicas, tais como: o facto de ser transparente, impermeável, duro, incombustível, resistir bem ao envelhecimento, à abrasão e à corrosão, e ainda possuir muito brilho (Mascarenhas, 2009).

Em seguida, serão apresentadas algumas propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas do vidro.

2.2.1 Propriedades químicas

O vidro é um material que só se pode desenvolver por justaposição de alguns elementos, ou seja, é um material inorgânico e resulta do arrefecimento de uma massa em fusão que vai ganhando rigidez ao arrefecer, não havendo cristalização, assim sendo é um material amorfo (Wurm, 2007).

É um material composto essencialmente por sílica, podendo esta rondar quase 75% (Wurm, 2007). Além da sílica, que funciona como vitrificante, o vidro é combinado com outros elementos químicos, tais como: o óxido de sódio, que serve para reduzir a temperatura da massa em fusão, favorecendo assim o amolecimento, o que facilita o processo de fabricação; e o óxido de cálcio, que aumenta a resistência química e consequentemente a durabilidade do material (Martins & Pinto, 2004; Mascarenhas, 2009; Punmia, et al., 2003).

Além dos elementos químicos mencionados anteriormente, poderão ser adicionadas outras substâncias em pequenas percentagens, como o alumínio e o magnésio, que melhoram as propriedades físicas, especialmente aquelas relacionadas com a resistência à ação dos agentes atmosféricos. Ainda, em determinados vidros são introduzidos diversos óxidos metálicos que influenciam a cor do mesmo sem alterar a sua resistência (Martins & Pinto, 2004).

O vidro mais utilizado na indústria da construção civil é o vidro sílica-soda-cal, também designado por vidro *float*. Na Tabela 2.1 pode conferir-se a composição química do vidro sílica-soda-cal, que se encontra de acordo com a NP EN 572-1, intitulada por “*Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties*” (Haldimann, et al., 2007).

Tabela 2.1: Composição química do vidro sílica-soda-cal (adaptado de (NP EN 572-1, 2012))

Elemento químico	Símbolo químico	Massa
Sílica	SiO ₂	69-74%
Óxido de cálcio	CaO	5-14%
Óxido de sódio	Na ₂ O	10-16%
Óxido de magnésio	MgO	0-6%
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	0-3%
Outros	-	0-5%

2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas

O vidro é um material isotrópico, isto é, as suas propriedades são as mesmas independentemente da direção ou orientação considerada, mas diferem com o processo de fabrico utilizado e a sua composição química (Wurm, 2007).

No que diz respeito às suas propriedades físicas, a sua densidade é cerca de 2500 kg/m^3 e a sua dureza superficial, ou seja, a resistência do material ao ser riscado, ronda os 6,5 na escala de Mohs (Martins & Pinto, 2004).

Quanto às propriedades mecânicas do vidro, tais como: a elasticidade, a resistência à tração e à compressão, estas serão explicadas, detalhadamente, mais abaixo. Antes disso, é importante mencionar que estas propriedades pertencem ao vidro comum, também denominado por vidro recozido (ver Subsecção 2.4.1), aquele que não foi submetido a qualquer tratamento térmico depois do processo de recozimento, estando as suas propriedades presentes na norma europeia deste tipo de vidro, mais precisamente na EN 572, na parte 1, já mencionada na Subsecção anterior.

Este material possui um comportamento mecânico linear perfeitamente elástico, como se pode observar na Figura 2.6. A sua linearidade na fase elástica permite que a peça recupere a forma e as dimensões iniciais quando a tensão aplicada é removida. Já o facto de não se deformar plasticamente, leva a que este tenha uma rotura frágil, partindo sem aviso antecipado quando é excedida a sua capacidade (Gonçalves & Margarido, 2012).

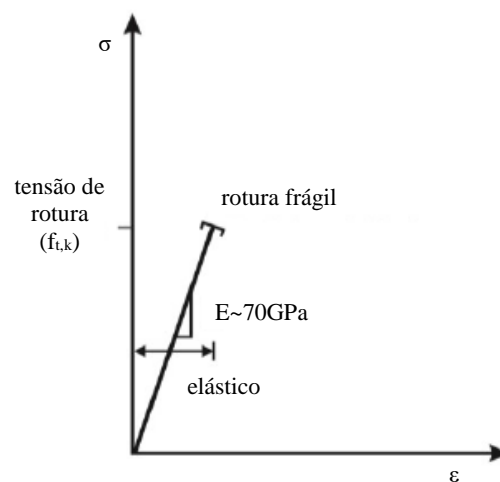


Figura 2.6: Representação esquemática da curva de tensão-deformação do vidro (adaptado de (Feldmann & Kasper, 2014))

No que concerne ao módulo de elasticidade, que mede a rigidez do material, este é de 70 GPa, ou seja, é um valor elevado o que significa que tem uma grande resistência à deformação. O coeficiente de Poisson é de 0,2, tal como indicado na norma NP EN 572-1.

A resistência deste material depende da ligação entre os elementos químicos que constituem o vidro e ainda do estado da superfície. A nível teórico podem ser obtidas resistências elevadas tendo em conta as ligações químicas. No entanto, devido a pequenas fendas existentes na superfície do painel de vidro, dificilmente visíveis a olho nu, causadas por abrasão, vento ou até pela corrosão, causada pela exposição à água ou humidade, em conjunto com o carregamento a longo prazo, entre outros efeitos

mecânicos ocorridos durante a sua utilização, leva a que a resistência mecânica real seja muito inferior (Wurm, 2007).

No que concerne à resistência à tração, a nível teórico pode atingir valores extremamente altos, de 5000 MPa a 8000 MPa. Contudo, acaba por ser irrelevante, dado que na prática o valor é muito menor devido aos defeitos presentes na superfície, referidos anteriormente. As fendas concentram tensões elevadas, e o vidro não tem a capacidade de as redistribuir por não ser um material dúctil, o que leva a uma rotura repentina do vidro. Devido a estes acontecimentos a resistência à tração toma valores muito menores, entre 30 MPa a 80 MPa (Feldmann & Kasper, 2014; Wurm, 2007). No entanto, a NP EN 572-1 apresenta uma resistência de 45 MPa para o vidro recozido.

O certo é que a resistência à tração não é constante uma vez que depende de vários fatores, como: a idade do painel, o tamanho do mesmo, a duração da solicitação, o tipo de vidro e o ambiente exterior (Wurm, 2007).

Salienta-se que há a possibilidade de melhorar a tensão de rotura do vidro através de tratamentos térmicos, como a têmpera, de onde resultam os vidros temperados (ver Subsecção 2.4.2) e termoendurecidos (ver Subsecção 2.4.3), cujas resistências à tração tomam os 120 MPa e os 70 MPa, respetivamente.

Quanto à resistência à compressão, é cerca de dez vezes superior à resistência à tração. Segundo Wurm (2007), o valor teórico da resistência à compressão ronda os 900 MPa, mas na realidade a resistência obtida é cerca de 500 MPa. Note-se que um elemento quando é sujeito apenas à compressão, surgem tensões de tração devido a fenómenos de instabilidade, sendo assim é mais relevante a abordagem da resistência à tração que à compressão (Haldimann, et al., 2007; Wurm, 2007).

Os valores conhecidos da resistência à flexão simples dos painéis de vidro, isto é, quando uma face se encontra à compressão e outra à tração, são provenientes de determinados ensaios efetuados. No que concerne a esses ensaios, pode conferir-se quais são os mais utilizados perante a norma NP EN 1288, denominada por “Vidro na construção – Determinação da resistência do vidro à flexão”.

Um dos ensaios mais utilizados é o *coaxial double ring test*, outro também muito usual é o denominado por *four point bending test* (ver Figura 2.7). Em ambos, são utilizadas amostras de grandes painéis de vidro recozido.

No que concerne ao método dos ensaios mencionados anteriormente, entre outros pontos de interesse relativos aos mesmos, pode conferir-se nas normas NP EN 1288 partes 2 e 3.

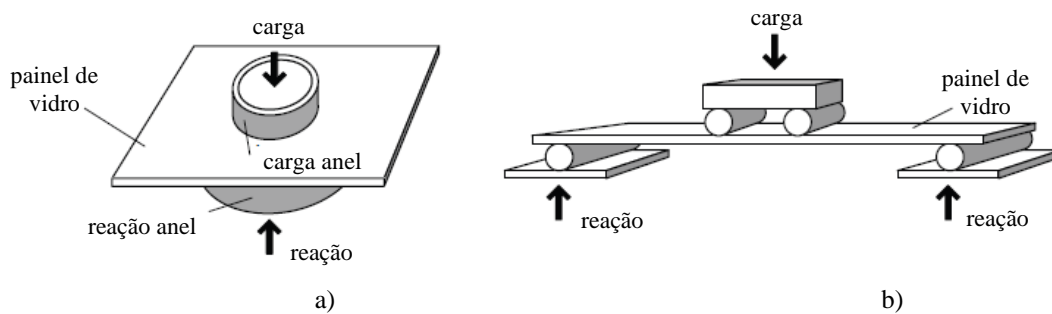


Figura 2.7: Representação esquemática: a) ensaio *coaxial double ring*, b) ensaio *four point bending*, respectivamente (Haldimann, et al., 2007)

2.2.3 Propriedades térmicas

O vidro possui algumas propriedades térmicas relevantes, tais como: o calor específico, a condutibilidade térmica, a dilatação térmica e ainda o choque térmico.

Relativamente ao calor específico, c , grandeza relacionada com a variação de temperatura aquando da receção de certa quantidade de calor, ronda os $720 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

No que concerne à condutibilidade térmica do vidro, λ , estando esta propriedade relacionada com a facilidade com que o calor atravessa o material, é cerca de $1,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Quanto ao coeficiente de dilatação térmica linear, α_T , que expressa o aumento de comprimento do material devido ao aumento da sua temperatura, é assumido o valor de $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. O facto é que esta propriedade leva à necessidade de criar espaços em torno dos painéis de vidro e outros materiais utilizados. Salienta-se ainda que quanto mais baixo for o coeficiente de expansão térmico maior será a resistência ao choque térmico (Giacomini, 2005).

Em relação à capacidade de o vidro resistir às mudanças bruscas de temperatura sem que surjam fissuras ou até mesmo que quebre, isto é, a resistência ao choque térmico, ΔT , esta é relativamente baixa, rondando os 40 K.

Assim sendo, deve ser evitado o contato direto entre os painéis de vidro e entre o vidro e o aço de modo que não hajam tensões concentradas, pois o vidro ao ter um comportamento elástico não consegue dispersar as tensões impostas que surgem com o choque de temperatura (Wurm, 2007).

É fundamental ter em atenção os requisitos de segurança relacionados com o fogo, uma vez que mesmo sendo um material incombustível, este possui uma baixa resistência ao choque térmico podendo levar à quebra do vidro.

2.2.4 Propriedades físicas, mecânicas e térmicas

Na tabela seguinte apresenta-se uma sintetização das propriedades do vidro.

Tabela 2.2: Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do vidro (adaptado de (Wurm, 2007; Romão, 2014))

	Característica	Símbolo	Valor numérico e unidade
Físicas	Peso volúmico	ρ	2500 kg/m ³
	Dureza (escala de Mohs)	-	6
Mecânicas	Módulo de elasticidade	E	70 GPa
	Módulo de distorção	G	28 GPa
	Coefficiente de Poisson	ν	0,2
	Resistência à tração	$f_{t,k}$	45 MPa
	Resistência à compressão	$f_{c,k}$	≈ 500 MPa
Térmicas	Calor específico	c	720 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
	Coefficiente de dilatação térmica linear	α_T	9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Resistência ao choque térmico	ΔT	40 K
	Condutibilidade térmica	λ	1,0 Wm ⁻¹ K ⁻¹

2.3 Processo de fabrico

O processo de fabrico do vidro recozido mais utilizado nos dias de hoje, em todo o mundo, é o processo *float*, desenvolvido por Alastair Pilkington. Este processo permite obter placas de vidro com boa qualidade e baixo custo (Wurm, 2007).

O processo de fabrico passa por várias fases (ver Figura 2.8), sendo que a fase inicial deste método consiste em colocar as matérias-primas misturadas num forno a temperaturas até 1550°C, onde entra em fusão. Em seguida, a massa fundida, com cerca de 1000°C, é derramada continuamente para um banho de estanho metálico fundido onde se espalha uniformemente e arrefece gradualmente. É importante salientar que o vidro tem um peso específico inferior ao do estanho, permitindo a flutuação da massa do vidro. Posteriormente, é encaminhado para o forno de recozimento que inicialmente se encontra a cerca de 600°C. Nesta fase, o vidro obtém a espessura pretendida, sendo que esta depende da velocidade dos rolos, quanto menor for a velocidade, maior será a espessura, e vice-versa. Salienta-se também que no forno de recozimento a temperatura é diminuída lentamente de modo a reduzir as tensões internas e evitar que surjam tensões residuais (Haldimann, et al., 2007).

Depois de recozido, o vidro é inspecionado por máquinas próprias de modo a garantir que não possui defeitos. No caso de haver defeitos, mesmo que sejam muito pequenos, é possível detetá-los. Contudo, a sua correção é impossível, levando-o assim a ser rejeitado.

O próximo passo é ser submetido ao corte, de modo a obter placas com as dimensões permitidas, e sujeito à retificação das arestas e perfuração, se necessário (Haldimann, et al., 2007).

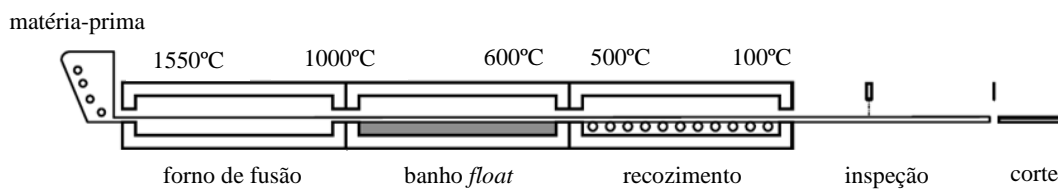


Figura 2.8: Esquema representativo das etapas do processo *float* (adaptado de (Louter, 2011))

Para o corte é utilizada uma broca de diamante ou então é efetuado um corte abrasivo através de um jato de água de alta pressão, sendo este último processo utilizado apenas em casos especiais por ser mais caro (Wurm, 2007).

Em relação aos tratamentos a que alguns vidros são submetidos após o recozimento, como a têmpera (ver Subsecção 2.4.2), estes devem ser feitos antes da fase de corte.

Uma vez cortada, a placa de vidro sofre alguns danos nos bordos, sendo assim necessário tratá-los, principalmente quando se trata dos vidros temperados e termo-endurecidos, uma vez que estes podem ser abatidos, roçados ou polidos, permitindo obter vários acabamentos. Além de permitir que o vidro possa ser manuseado sem risco de haver cortes, o tratamento dos bordos é recomendado para reduzir o risco de danos e evitar a concentração de tensões nas mesmas (Pinto, 2008; Wurm, 2007).

No que concerne ao tratamento dos bordos, apresentado na Figura 2.9, tem-se:

- arestas abatidas, que consiste na eliminação das duas arestas;
- bordo roçado com irregularidades, onde tanto o bordo como as arestas são roçados, podendo ser visível algumas irregularidades no bordo;
- bordo roçado sem irregularidades, onde as arestas são abatidas e o bordo é roçado de modo que deixe irregularidades visíveis no bordo;
- bordo polido, que consiste no tratamento feito no bordo roçado sem irregularidades, e é polido de modo a conseguir-se brilho no bordo (Pinto, 2008).

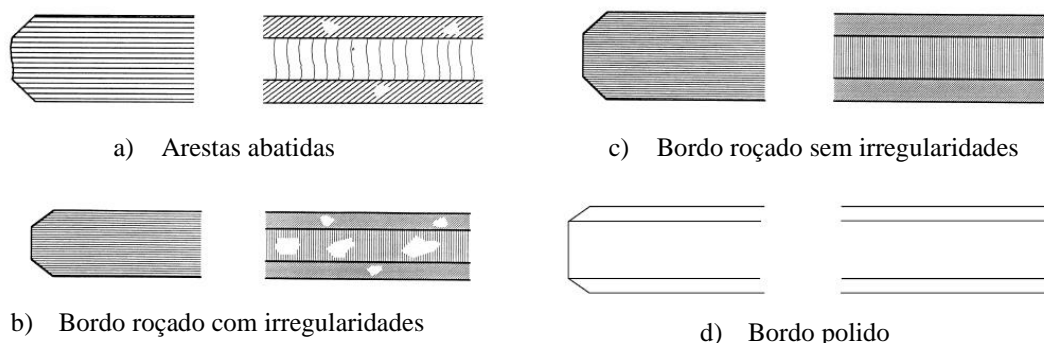


Figura 2.9: Representação esquemática das formas do bordo do vidro ((NP EN 12150-1, 2015; EN 1863-1, 2011)

Para a execução dos furos também é utilizada uma broca de diamante. Os furos devem ter um diâmetro mínimo igual à espessura do vidro, sendo que o recomendado é que seja o dobro da mesma. No respeitante à sua posição, deve considerar-se as distâncias apresentadas na Figura 2.10, quando se tratar de vidros temperados e termo-endurecidos, tal como enunciado nas normas relativas a estes tipos de vidro, NP EN 12150-1, “Vidro na construção - Vidro de segurança sílico-sodo-cálcico temperado termicamente - Parte 1: Definição e descrição”, e EN 1863-1, “*Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description*”, respetivamente (Wurm, 2007).

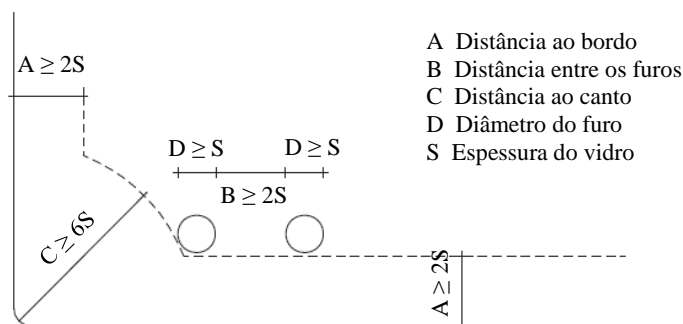


Figura 2.10: Regras para o posicionamento e diâmetro dos furos (adaptado de (Wurm, 2007))

2.4 Tipos de vidro

Nos dias de hoje já se consegue encontrar diversos tipos de vidro, o que faz com que aumente o número de possibilidades de aplicação deste material. Sendo que o tipo de vidro a utilizar depende de dois grandes fatores: o esforço a que o vidro será submetido e ainda o efeito desejado pelo cliente.

Salienta-se que os diversos tipos de vidro se diferenciam através do tipo de processamento a que foram sujeitos na fase de recozimento. O vidro recozido corresponde a um vidro base que normalmente é submetido a processos secundários, tais como: tratamentos térmicos, que têm como objetivo melhorar o seu desempenho a nível mecânico e alterar a sua forma; aplicação de revestimentos, de forma a melhorar a aparência; laminação, que melhora o desempenho do vidro após a rotura, entre outros (Haldimann, et al., 2007).

No que diz respeito aos processos supramencionados, destaca-se a têmpera de onde resultam o vidro temperado (Subsecção 2.4.2), o vidro termo-endurecido (Subsecção 2.4.3) e ainda o vidro curvo (Subsecção 2.4.4), resultante também de um tratamento térmico.

O vidro recozido, além de poder ser utilizado como um vidro monolítico, submetido ou não a tratamentos térmicos, também pode fazer parte de outros tipos de vidro, como o vidro laminado (Subsecção 2.4.5) e o vidro isolante (Subsecção 2.4.6) representados na Figura 2.11.

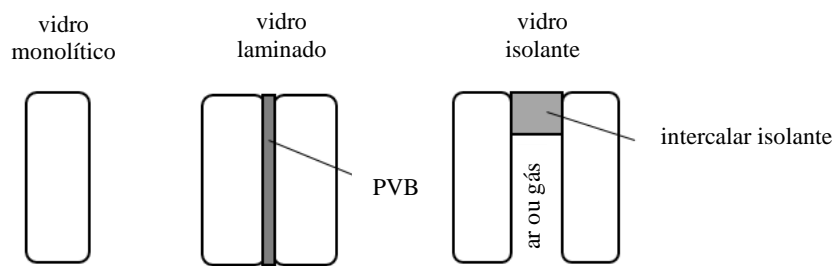


Figura 2.11: Tipos de vidros (adaptado de (Haldimann, et al., 2007))

Além dos vidros supramencionados, pode-se encontrar ainda outros tipos de vidro, também muito utilizados, tais como: esmaltado, impresso, antirreflexo, de baixa emissividade, de autolimpeza, fotovoltaico, entre outros. Estes resultam de certos tratamentos submetidos à superfície do vidro ou ainda da aplicação de determinados revestimentos depois do vidro estar fabricado, que além de modificarem a sua aparência, podem também alterar as suas propriedades, sendo assim necessário ter em atenção os efeitos negativos que podem resultar de tais tratamentos, principalmente relacionados com a resistência à flexão.

De seguida irá ser abordado de forma mais detalhada os tipos de vidro mais importantes e mais utilizados na construção, que são: vidro recozido, temperado, termo-endurecido, curvo, laminado, isolante, decorado e revestido.

2.4.1 Vidro recozido

O vidro recozido, também associado ao vidro *float*, é o vidro mais utilizado. Normalmente o vidro recozido é utilizado em janelas, fachadas e vidros interiores (Feldmann & Kasper, 2014).

Corresponde a um material monolítico e ao tipo de vidro que não recebeu qualquer tipo de tratamento térmico posterior com o intuito de aumentar as propriedades físicas e mecânicas (Costa, et al., 2005; Guardian Industries Corp., 2010).

No que diz respeito ao vidro recozido, resulta do processo de recozimento que tem como objetivo evitar o surgimento de tensões residuais internas através de um arrefecimento lento (Costa, et al., 2005; Guardian Industries Corp., 2010). O processo de fabrico do mesmo já foi mencionado anteriormente, na Subsecção 2.3.

O vidro recozido possui uma resistência à flexão de 45 MPa, tal como já referido anteriormente, como se pode aferir na Figura 2.12 a), comparativamente aos vidros termo-endurecidos e temperados (Haldimann, et al., 2007).

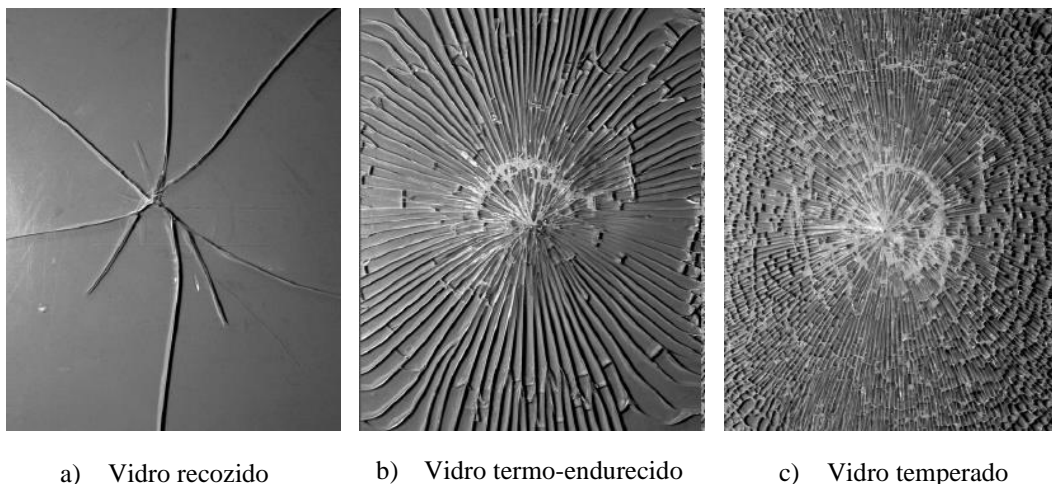


Figura 2.12: Comparação do padrão de fratura (Haldimann, et al., 2007)

Relativamente às propriedades geométricas do vidro recozido, está disponível em placas com 3,21 m de largura e em relação ao comprimento, pode variar entre os 4,50 m, 5,10 m e 6,00 m, sendo mais comum com 6,00 m. Posteriormente, os painéis de vidro podem ser cortados em tamanhos mais pequenos, mantendo-se a largura anterior e o comprimento pode variar entre 1,00 m e 2,55 m (EN 572-2, 2012).

No que respeita à espessura do vidro, esta pode variar entre 2 a 25 mm havendo algumas tolerâncias de erro estipuladas, como se pode verificar na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Espessuras e respetivas tolerâncias do painel de vidro recozido (adaptado de (EN 572-2, 2012))

Espessura nominal [mm]	Tolerância [mm]
2; 3; 4; 5; 6	±0,2
8; 10; 12	±0,3
15	±0,5
19; 25	±1,0

Quanto à norma do produto relacionada com a utilização do vidro recozido, esta é a EN 572-2, intitulada por “*Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass*”.

2.4.2 Vidro temperado

O vidro temperado corresponde àquele que foi submetido a um tratamento térmico, a têmpera, ou a um tratamento químico, sendo este último pouco usual na construção. Tem como objetivo modificar algumas das suas características, tal como: aumentar a sua resistência mecânica, melhorar o seu comportamento à variação de temperatura, e ainda aperfeiçoar o seu modo de rotura, tentando diminuir o tamanho dos fragmentos gerados.

O tratamento térmico, a têmpera, aumenta a resistência do vidro através da indução de tensões de compressão na superfície, uma vez que é um material frágil. Na maioria dos casos de materiais com este comportamento, possui uma grande resistência à compressão e pouca à tração. O objetivo de melhorar a resistência do vidro à superfície deve-se ao facto de que na maioria dos casos as fraturas no mesmo ocorrem devido a defeitos na superfície (Bauer, 1994).

O tratamento térmico supracitado, passa por algumas etapas representadas na Figura 2.13. O primeiro passo é tratar da limpeza do vidro recozido. De seguida, o vidro deve ser submetido a um processo de aquecimento a temperaturas em torno de 620-675°C. Posteriormente, realiza-se um arrefecimento rápido e controlado através de jatos de ar frio (Costa, et al., 2005; Haldimann, et al., 2007).

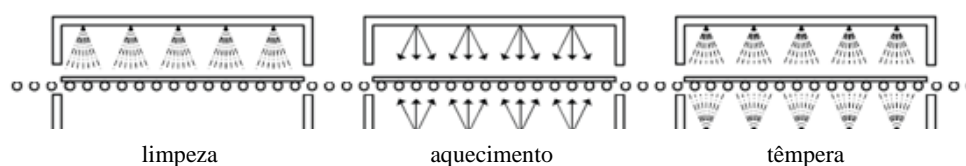


Figura 2.13: Processo do tratamento químico (têmpera) (adaptado de (Haldimann, et al., 2007))

O arrefecimento rápido do vidro implica que o exterior arrefeça mais rápido e contraia. Já o interior, ao arrefecer, tende a contrair, mas as camadas exteriores uma vez que se encontram num estado rígido acabam por impedir. Quando o vidro possui uma temperatura equilibrada com o ambiente surgem fortes tensões de tração no interior, e de compressão na superfície (Bauer, 1994; Costa, et al., 2005).

As tensões residuais resultantes deste processo são favoráveis, uma vez que ao aumentar a tensão de compressão superficial do material impede que os defeitos existentes no vidro sejam desenvolvidos, neste caso as fendas (ver Figura 2.14). Logo, para que a fenda cresça, as tensões aplicadas em tração terão de ultrapassar as tensões residuais de compressão induzidas na superfície do vidro, mais precisamente na zona de fendilhação (Costa, et al., 2005; Valarinho, 2010).

O vidro temperado possui uma resistência à tração de 120 MPa, indicado na parte 1 da NP EN 12150, denominada por “*Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description*”, valor bastante superior à tensão de rotura do vidro recozido, que é de 45 MPa.

É importante realçar que o vidro temperado apresenta um problema relacionado com a rotura, sendo que esta pode ser espontânea, devido à presença de impurezas. Dado que no processo de têmpera o vidro é submetido a um arrefecimento rápido, as minúsculas partículas de níquel presentes no vidro podem interromper o processo de cristalização, afetando o comportamento do vidro, o que pode levar à rotura súbita do mesmo (Mascarenhas, 2009). Assim sendo, por vezes é feito um teste depois do processo de têmpera, denominado por *heat soak test*, que permite detetar impurezas ou heterogeneidades

no vidro. Este confirma se existem pequenas partículas de sulfureto de níquel (NiS), que podem ser as causadoras da rotura espontânea do vidro quando sujeito a altas temperaturas, e elimina-as (Costa, et al., 2005). Neste caso, o vidro é submetido a um teste de aquecimento durante duas a oito horas, a uma temperatura de 280°C e no caso de existirem partículas de níquel o vidro parte (Mascarenhas, 2009).

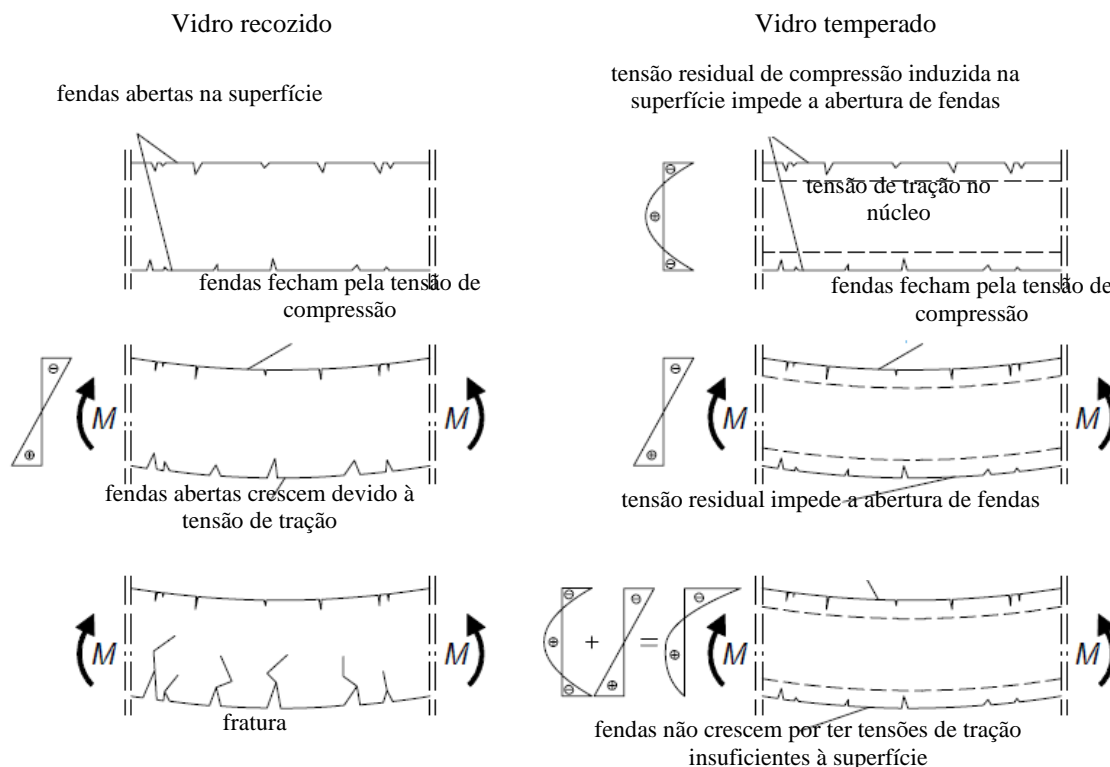


Figura 2.14: Comparação do comportamento entre o vidro recozido e temperado (adaptado de (Haldimann, et al., 2007))

O teste supramencionado é obrigatório nos vidros utilizados em sistemas de fachada agrafada (ver 2.5.1.1). Salienta-se, que quando é recorrido a esta verificação deve ser consultada a norma NP EN 14179, “*Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass*”.

Normalmente, este tipo de vidro ao quebrar gera fragmentos muito pequenos (ver Figura 2.12 c)) e pouco cortantes devido às tensões induzidas (Bauer, 1994). Tendo em conta estes fragmentos, aparentemente inofensivos, este tipo de vidro é conhecido como um “vidro de segurança”. Ressalta-se que este não é propriamente inofensivo, uma vez que ao cair de uma altura significativa pode causar ferimentos graves (Haldimann, et al., 2007).

É necessário ter em atenção à fragmentação, uma vez que é estipulado no regulamento o número de fragmentos por área que devem ser obtidos, de modo a melhorar a segurança dos utilizadores em caso de rotura.

Acontece que este tipo de vidro possui uma maior resistência estrutural que os outros tipos, mas o seu desempenho pós-rotura é fraco devido aos fragmentos. O certo é que estes fragmentos contribuem para uma menor estabilidade estrutural, por serem tão pequenos e dificilmente se manterem no lugar, levando-os a cair mais rapidamente (Haldimann, et al., 2007).

Quanto às dimensões e espessuras do painel de vidro temperado, são as mesmas do vidro recozido (ver 2.4.1), tal como indicado na norma em vigor para este tipo de vidro, sendo esta a NP EN 12150 “*Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass*”.

Salienta-se que é pouco usual nas aplicações arquitetónicas vidros temperados com 2 e 3 mm de espessura. Contudo, por vezes é utilizado no interior de vidros triplos, aproveitando assim o facto de ser um vidro pré-esforçado e possuir um peso mais reduzido (Feldmann & Kasper, 2014).

O vidro depois de temperado não pode ser submetido a tratamentos como cortes, perfuração, acabamentos, entre outros, porque podem levar à quebra do vidro (Guardian Industries Corp., 2010). Logo, qualquer alteração que seja necessária deve ser efetuada antes do processo de têmpera.

2.4.3 Vidro termo-endurecido

O vidro termo-endurecido, tal como o vidro temperado, é submetido a um mesmo processo de aquecimento e arrefecimento. Neste caso, o arrefecimento após o tratamento térmico é mais lento, o que leva a que a resistência à tração seja inferior que a do vidro temperado (Haldimann, et al., 2007).

Quanto à resistência à tração, esta ronda os 70 MPa tal como indicado na EN 1863, intitulada *por* “*Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass*”, norma a seguir para a utilização deste tipo de vidro.

Os fragmentos resultantes após rotura deste vidro são maiores que o vidro temperado, mas mais pequenos que os do vidro recozido, como se pode conferir na Figura 2.12 b). É estipulado no regulamento o número e tamanho máximo dos fragmentos obtidos.

O vidro termo-endurecido possui um bom desempenho estrutural por ter uma boa resistência, e por ter um bom comportamento após a rotura (Haldimann, et al., 2007; Valarinho, 2010). Neste caso não há o risco de rotura repentino devido à presença de níquel, tal como ocorre no vidro temperado, dado que o arrefecimento é mais lento.

No que concerne às propriedades geométricas, o vidro termo-endurecido difere do temperado nas espessuras nominais a que são produzidos, sendo estas de 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 e 12 mm (Feldmann & Kasper, 2014). Tal como o vidro temperado, este não pode ser cortado ou perfurado após o processo de têmpera.

Na construção, o vidro temperado e termo-endurecido, é utilizado normalmente em vidros laminados (ver 2.4.5) para projetos cujo vidro esteja sujeito a impactos ou choques térmicos, que requeiram resistência mecânica. Pode encontrar-se, essencialmente, em fachadas de edifícios, divisórias,

portas de entrada de edifícios, portas de contra-vento, guarda-corpos, entre outros (Bauer, 1994; Garg, 2007).

2.4.4 Vidro curvo

O vidro curvo resulta do vidro recozido que foi aquecido até um determinado ponto de amolecimento, que ronda os 600°C. Posteriormente, para ganhar forma podem ser utilizados vários métodos, um deles é passar por um molde onde obtém a curvatura desejada (ver Figura 2.15) (Haldimann, et al., 2007).



Figura 2.15: Molde utilizado para dar forma ao vidro curvo (Wurm, 2007)

As suas propriedades não são muito comparáveis com as do vidro plano. O facto é que não há normas deste produto que forneçam um valor característico da resistência à flexão, sendo assim é fundamental um maior controlo na produção deste tipo de vidro que no do plano (Feldmann & Kasper, 2014).

O vidro curvo pode ser utilizado para a produção de vidro laminado e vidro duplo.

Este tipo de vidro é menos flexível que o plano devido à forma que tem. Assim sendo, a sua capacidade de se deformar sob uma carga aplicada é menor que a do vidro plano (Schittich, 1999).

É necessário ainda ter em atenção à forma do vidro uma vez que introduzem tensões adicionais, daí ser importante ter em atenção ao raio de curvatura (Schittich, 1999). Normalmente o raio de curvatura é superior a 2 m dado que com raios mais pequenos pode levar à encurvadura (Wurm, 2007).

A norma referente ao vidro curvo é a ISO 11485 “*Glass in building - Curved glass*”.

Note-se que a produção do vidro curvo tem custos elevados, mesmo assim a sua utilização na construção civil tem vindo a aumentar. Pode encontrar-se aplicado em coberturas, fachadas, guarda-corpos de escadas, entre outros, sendo que permite que as obras sejam mais arrojadas e elegantes.

2.4.5 Vidro laminado

O vidro laminado é constituído por dois ou mais painéis de vidro ligados por uma, ou mais, películas de butiral de polivinilo (PVB), podendo também ser utilizado resinas líquidas (não é tão usual) (Costa, et al., 2005).

É fundamental mencionar que a escolha do tipo de película intermédia a utilizar é essencial no tipo de caso a que se irá aplicar. Deste modo, quando o vidro é sujeito à flexão, é importante que a película tenha uma boa resistência ao corte, G . Nos casos em que G se aproxima de 0, os painéis acabam por trabalhar em separado, havendo um escorregamento entre eles, enquanto se G tiver um valor elevado, o comportamento torna-se quase monolítico. Tal como mencionado anteriormente os adesivos mais conhecidos são os compostos de PVB e, ainda, os ionoplásticos (*SentryGlasPlus*). Estes últimos são produzidos pela empresa *Dupont*, e a sua utilização tem vindo a crescer devido à sua elevada resistência (Sanches, 2013). Em seguida, será apresentada uma tabela com as principais propriedades mecânicas de ambos os materiais.

Tabela 2.4: Propriedades do PVB e SGP (adaptado (Sanches, 2013))

Característica	Símbolo	Unidade	Valor numérico	
			PVB	SGP
Módulo de Young	G	MPa	11	300
Tensão de tração	f_y	MPa	28,1	34,5
Alongamento	ε	%	275	400
Densidade	ρ	g/cm^3	1,07	0,95
Coefficiente de dilatação térmico	α_T	K^{-1}	$41,2 \times 10^{-5}$	10 a 15×10^{-5}

Quanto aos painéis de vidro utilizados para o vidro laminado, podem ser iguais ou diferentes em tipo e espessura (ver Figura 2.16).



Figura 2.16: Exemplos de vidros laminados (adaptado de (Wurm, 2007))

O vidro laminado é dos tipos de vidro mais utilizados para elementos estruturais, dado que possui um bom comportamento, essencialmente após a rotura. Este vidro ao quebrar permite que os fragmentos se mantenham colados na película de PVB utilizada entre os painéis, diminuindo assim o risco de acidentes. Além disso, se um painel de vidro laminado quebrar, não implica que os painéis constituintes quebrem todos, o que é uma grande vantagem.

Salienta-se que tem um melhor desempenho consoante o tamanho dos fragmentos gerados, ou seja, quanto maiores forem, melhor o comportamento após a rotura (Haldimann, et al., 2007). Assim sendo, a melhor opção é utilizar vidro recozido, ao invés de vidro temperado (ver Figura 2.17).

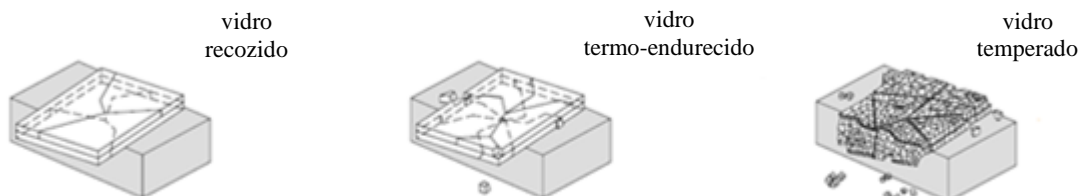


Figura 2.17: Comportamento do vidro laminado após a rotura para os diferentes tipos de vidro (adaptado de (Haldimann, Luible, & Overend, Structural use of Glass, 2007))

O processo de fabricação deste tipo de vidro passa por algumas fases representadas na Figura 2.18. Na primeira fase, os painéis de vidros necessárias são limpos e secos. Posteriormente, é colocado o PVB entre elas sendo pressionado com o intuito de eliminar o ar, com o recurso a equipamentos apropriados, tais como a calandra. Em seguida, passa pela autoclave onde é aquecido a uma temperatura de 140°C, para criar uma boa adesão entre as lâminas de vidro e o PVB (Wurm, 2007).

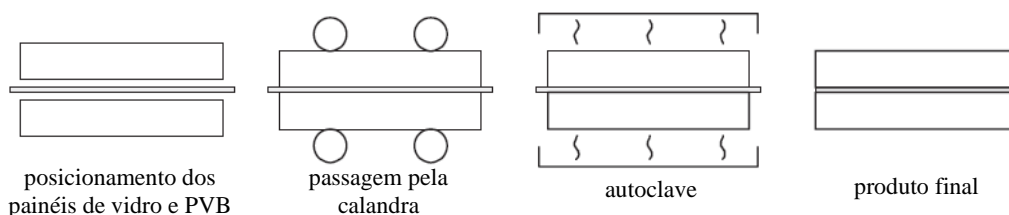


Figura 2.18: Representação das etapas de fabrico do vidro laminado (adaptado de (Wurm, 2007))

Quanto à película de PVB utilizada para a interligação dos painéis de vidro, esta deve ter uma espessura nominal de 0,38 mm, no caso de ser apenas uma. Normalmente, com dois intercalares tem uma espessura total de 0,76 mm; com quatro intercalares, 1,52 mm; ou, em casos especiais, com 6 intercalares, 2,28 mm (Feldmann & Kasper, 2014; Haldimann, et al., 2007).

No que concerne à espessura do painel de vidro propriamente dita, esta corresponde à soma da espessura nominal dos painéis de vidro utilizados e do intercalar. Relativamente às tolerâncias, estas não podem exceder a soma das referentes às dos painéis utilizados. É ainda fundamental ter em atenção às tolerâncias do elemento de ligação, cuja tolerância, de acordo com espessura, está presente na EN ISO 12543-5.

Além de segurança, o vidro laminado, dependendo do tipo e quantidade de painéis de vidro utilizados, confere uma boa capacidade de isolamento acústico e possui um melhor índice de isolamento

térmico. Permite também obter vidros resistentes ao fogo, ao impacto e à prova de bala (Costa, et al., 2005; Feldmann & Kasper, 2014).

No que concerne a este tipo de vidro, as normas a seguir são: EN ISO 12543, designada por “*Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass*” e NP EN 14449, intitulada por “Vidro na construção – Vidro laminado e vidro laminado de segurança – Avaliação da conformidade /Norma de produto”.

O vidro laminado pode ser utilizado em fachadas, coberturas, pavimentos, guarda-corpos, escadas, entre outros.

2.4.6 Vidro isolante

O vidro isolante é dos tipos de vidro mais utilizados e pode ser constituído pelos vidros mencionados anteriormente. Este tipo de vidro é constituído por dois (vidro duplo) ou mais painéis de vidro separadas por um espaço de ar, ou gás desidratado, selado por um vedante nas bordas (Haldimann, et al., 2007).

É utilizado para selar o espaço de ar, um intercalador tipicamente feito de alumínio, com uma largura de 12 a 22 mm, que garante a distância entre os painéis de vidro utilizados. Este é vedado, normalmente com silicone, de modo a reduzir a penetração do vapor de água, e ainda é incorporado um granulado desidratante ao intercalador, que absorve a humidade retida no espaço de ar no momento de fabrico e a que possa vir a infiltrar-se (ver Figura 2.19) (Almeida, 2013; Haldimann, et al., 2007).

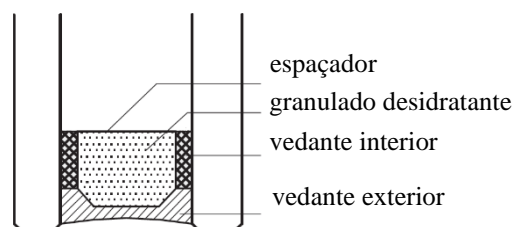


Figura 2.19: Representação dos constituintes do vidro duplo (adaptado de (Guardian Industries Corp., 2010))

Tem como principal objetivo reduzir as perdas térmicas, aumentando assim o conforto e ajudando na conservação de energia. O vidro duplo pode também ser um bom isolador acústico, principalmente se for composto por painéis de vidro com espessura assimétrica, e a largura da caixa de ar ser superior a 20mm.

No que concerne às suas propriedades, estas dependem do tipo de vidro utilizado, do tipo e posição do revestimento, do tamanho da cavidade, do gás e ainda da selagem utilizada na borda (Wurm, 2007).

É necessário ter em conta as tensões geradas na cavidade devido às mudanças de temperatura ou pressão de ar, uma vez que podem afetar o comportamento mecânico do vidro (Feldmann & Kasper, 2014).

Em relação à durabilidade deste, esta ronda os 20 e 30 anos, sendo que com o passar dos anos acaba por perder as suas propriedades de isolamento devido à presença de vestígios de humidade no interior do espaço de ar (Feldmann & Kasper, 2014).

Quanto à sua fabricação, passa por vários passos de modo a garantir que não apareça humidade, para que o seu conjunto seja sólido e a sua função isolante seja igualmente garantida. Assim sendo, primeiramente é dobrado o perfil separador, preenchido com um granulado desidratante, e em seguida o perfil é fechado. Os painéis de vidro a serem utilizados são lavados e então colocados à vez sobre o perfil. Uma vez colocados todo o conjunto é selado (Mascarenhas, 2009).

O vidro duplo deve estar em conformidade com a norma NP EN 1279, designada por “Vidro na construção – Unidades de vidro isolante”.

Este tipo de vidro é normalmente utilizado em elementos exteriores.

2.4.7 Vidro decorado

Relativamente ao vidro decorado, de onde resultam tipos de vidro como: o esmaltado (Figura 2.20) e o impresso, tem como objetivo controlar a transmissão luminosa e reduzir o ganho energético solar, podendo ser ou não transparente.

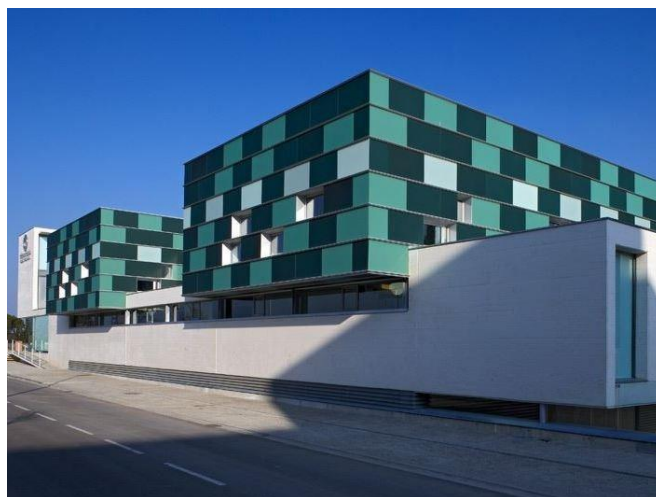


Figura 2.20: Vidro colorido esmaltado (Archiproducts, s.d.)

Para a sua obtenção, a superfície do vidro é submetida a alguns tratamentos, tais como: esmaltagem e foscagem.

No processo de esmaltagem, ou serigrafia, é utilizada uma tinta vitrificante, que resulta da combinação de um composto de vidro em pó e pigmentos à base de óxido, sobre a superfície do vidro. Posteriormente, passa pelo processo de têmpera (Haldimann, et al., 2007). A superfície colorida pode ser translúcida, opaca ou até mesmo transparente. Este processo pode permitir que o vidro seja capaz de controlar a energia solar fornecida e ainda funcionar como um vidro anti-refletivo (Wurm, 2007). Salienta-se que o vidro serigrafado tem um tempo de vida superior aos decorados sujeitos a ataques químicos ou por areia, dado que é tratado termicamente, minimizando assim o risco de quebra (Gonçalves & Margarido, 2012).

A foscagem é conseguida através da projeção de ácido fluorídrico ou então de areia. Esta tem como objetivo tornar o vidro mais baço, ou então servir para a execução de impressão na sua superfície para fins decorativos. Deste processo podem resultar os vidros impressos.

No tratamento submetido por projeção ácido fluorídrico, o vidro é coberto por cera, sendo depois removida das partes onde é pretendido o efeito de foscagem, mergulhado no ácido, onde este ataca as partes sem cera. Quanto à cera presente, é removida através do calor (Mascarenhas, 2009). É de salientar que quanto mais intenso for o processo de gravação mais rugosa será a superfície e consequentemente menos transparente (Schittich, 1999). Por fim, tem-se o processo com recurso a um jato de areia que projeta areia fina a alta pressão, tornando a superfície do vidro áspera (Schittich, 1999).

2.4.8 Vidro revestido

O vidro revestido corresponde aos tipos de vidro em que tenham sido aplicados revestimentos. É importante salientar que existem diversos tipos e que para a sua aplicação convém seguir a norma NP EN 1096, designada por “Vidro na construção – Vidro revestido”, que define e classifica os vários revestimentos e durabilidade dos mesmos.

Todos os vidros depois de revestidos podem ser utilizados nos vidros laminados e isolantes. Alguns deles também têm a capacidade de suportar determinados tratamentos térmicos, tais como os utilizados para a obtenção dos vidros temperados, termo-endurecidos e curvos (Schittich, 1999).

Um dos revestimentos mais conhecidos é o revestimento pirolítico, onde uma mistura em estado gasoso entra em contato com o vidro fundido. Devido às temperaturas elevadas este processo é integrado no processo *float*. Este revestimento é resistente a riscos, temperável e flexível, mas não tão flexível como os restantes. Um exemplo de vidro resultante deste, é o vidro refletivo (Figura 2.21 a)) (Haldimann, et al., 2007).

Existem também revestimentos macios, sendo que o mais comum é resultante do método de pulverização com magnetron onde o vidro, depois de produzido e cortado, é revestido com óxidos (Schittich, 1999). Este processo é muito preciso e garante que o vidro tenha um revestimento constante e muito flexível. A desvantagem deste revestimento é que são suscetíveis a ambientes agressivos, sendo assim necessário protegê-los com uma camada protetora ou então utilizá-lo em vidros isolantes.

Normalmente, estes revestimentos são utilizados para a fabricação de vidros de baixa emissividade (Haldimann, et al., 2007).

Tem-se, também, o revestimento de proteção solar que tem como objetivo controlar os níveis de transmissão, no visível, e de reflexão, no infravermelho e ultravioleta. O revestimento de controlo solar é conseguido pela combinação da absorção e reflexão. Faz parte deste tipo de revestimento o de baixa emissividade que consiste em colocar sobre uma das superfícies um filme metálico que atua como refletor. É um revestimento que aumenta o conforto dentro do edifício reduzindo a perda de calor. Habitualmente são utilizados nos vidros isolantes, sendo aplicado na superfície interior do painel de vidro. É possível combinar várias propriedades tais como a baixa emissividade e o controlo solar num único revestimento (Figura 2.21 b)) (Haldimann, et al., 2007).



Figura 2.21: a) Vidro refletivo (Archiproducts, 2015); b) Vidro de controlo solar de baixa emissividade (Archiproducts, s.d.)

2.5 Sistemas de fixação

Os sistemas de fixação para o vidro são fundamentais na medida em que evitam o contato direto entre o vidro e outros materiais mais duros. É essencial ter um cuidado especial com as ligações, dado que o vidro é um material frágil e, portanto, apresenta uma enorme sensibilidade a picos de tensão.

Normalmente são utilizados materiais intermédios, mais precisamente entre a ligação propriamente dita e o vidro, que têm uma rigidez menor ou igual à do vidro. Estes devem ter rigidez e resistência suficiente para transferir cargas e possuir uma durabilidade adequada (Haldimann, et al., 2007).

A escolha do tipo de fixação deve ter em conta a transferência das forças, sendo que estas devem ser uniformes entre o vidro e o elemento de ligação (Wurm, 2007).

Com o passar dos anos têm vindo a ser desenvolvidos diversos sistemas de fixação com o intuito de melhorar o nível estético, reduzindo o tamanho dos elementos de conexão o que diminui assim o impacto dos mesmos na estrutura.

Há vários tipos de ligação do vidro com o vidro, ou do vidro com outro material, subdividindo-se em fixações mecânicas e fixações adesivas. Estas podem ser combinadas de forma a melhorar o desempenho da ligação (Haldimann, et al., 2007).

2.5.1 Fixações mecânicas

As ligações mecânicas são as mais utilizadas, havendo vários tipos. Podem subdividir-se em dois tipos: as que transmitem forças individuais com recurso a parafusos ou grampos, tratando-se assim das fixações pontuais aparafusadas e fixações pontuais por aperto respetivamente, e as que transmitem forças distribuídas através de caixilho, ou seja, a fixação contínua.

2.5.1.1 Fixação contínua

Este tipo de fixação, sendo considerada a mais antiga e vulgar, é utilizada em construções como fachadas em cortina ou até mesmo em janelas (ver Figura 2.22). O vidro é suportado linearmente utilizando caixilhos de alumínio madeira ou plástico (Haldimann, et al., 2007).



Figura 2.22: Fachada cortina (Navarra, s.d.)

Neste caso, os painéis de vidro são suportados ao longo de duas ou até mesmo quatro arestas. As cargas provindas do peso próprio do painel de vidro são transferidas para o sistema através de calços de apoio de plástico ou neoprene colocados estrategicamente ao longo do caixilho. Estes acabam também por ter a função de evitar o contacto direto entre o vidro e o sistema de suporte. Neste sistema é ainda utilizado silicone ou juntas de EPDM, de forma a isolar o sistema e contribuir também para a transferência das cargas a que o elemento está sujeito. Uma vez que é aplicado, na maioria dos casos, em fachadas em cortina, além dos elementos mencionados, possui ainda do lado interior perfis de aperto e tampas embelezadoras do lado exterior (ver Figura 2.23) (Valarinho, 2010; Almeida, 2013).

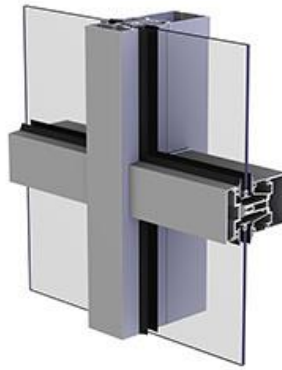


Figura 2.23: Sistema de fixação de suporte linear com caixilho (Navarra, s.d.)

2.5.1.2 Fixações pontuais aparafusadas

Com o intuito de minimizar o impacto das caixilharias, sistema de fixação mencionado anteriormente, foram desenvolvidos acessórios mais discretos para fixar os painéis de vidro, tal como as ligações aparafusadas. Estas são muito utilizadas principalmente pela estética, uma vez que são elementos mais discretos, aumentando assim a transparência do vidro.

O vidro exterior agrafado (VEA), também conhecido como sistema *spider glass*, trata-se da montagem de vidros com recurso a este tipo de ligação, frequentemente utilizado em fachadas e coberturas (ver Figura 2.24 a)).

Neste caso, os painéis de vidro são sustentados pontualmente com recurso a parafusos (ver Figura 2.24 b)), que normalmente são de aço inoxidável. Os parafusos são capazes de suportar esforços provindos do peso próprio dos painéis, de ações climáticas e dilatações, transferindo-os para uma estrutura de suporte.

Este tipo de fixação possui a desvantagem de serem necessários furos no painel de vidro para que o elemento de fixação atravesse o vidro, sendo que não é muito aconselhável para um material frágil como o vidro.

As ligações aparafusadas podem atravessar totalmente o vidro deixando ou não relevo na face exterior do painel. As que deixam um certo relevo na face exterior (ver Figura 2.25 b)) são indicadas para transferir cargas no plano, daí serem utilizadas, na maioria dos casos, para dar continuidade aos elementos que se encontram com limitações nas suas dimensões, tais como vigas e *glass fins*. Quanto ao outro tipo de ligação aparafusada (que não deixa relevo) (ver Figura 2.25 a)), é utilizada como ponto de suporte, uma vez que não é adequada para transferir cargas no próprio plano. Estas ligações podem ainda ser rígidas ou articuladas (Valarinho, 2010; Pereira, 2012).

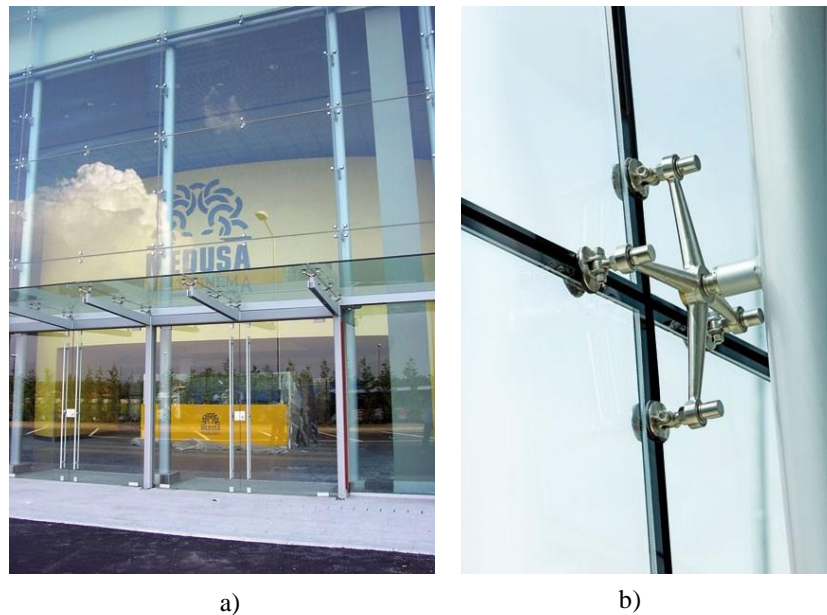


Figura 2.24: a) Fachada e cobertura em vidro exterior agrafado; b) Exemplo de ligação aparafusada (Archiproducts, s.d.)

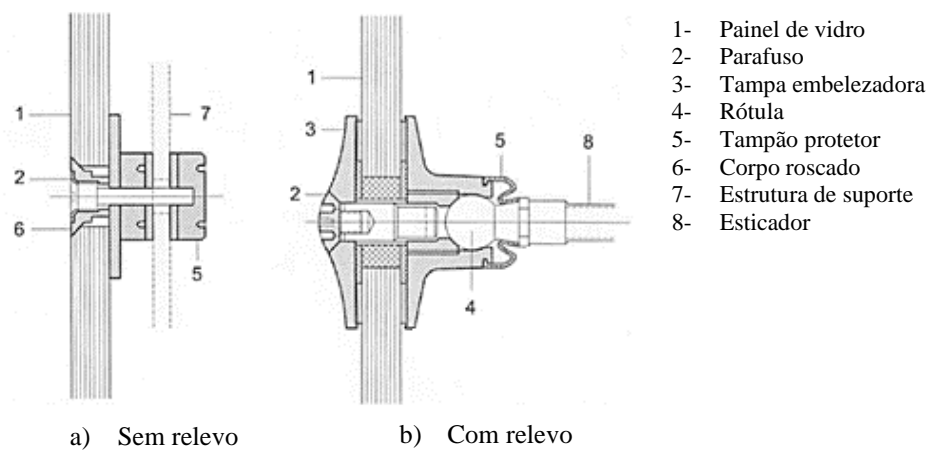


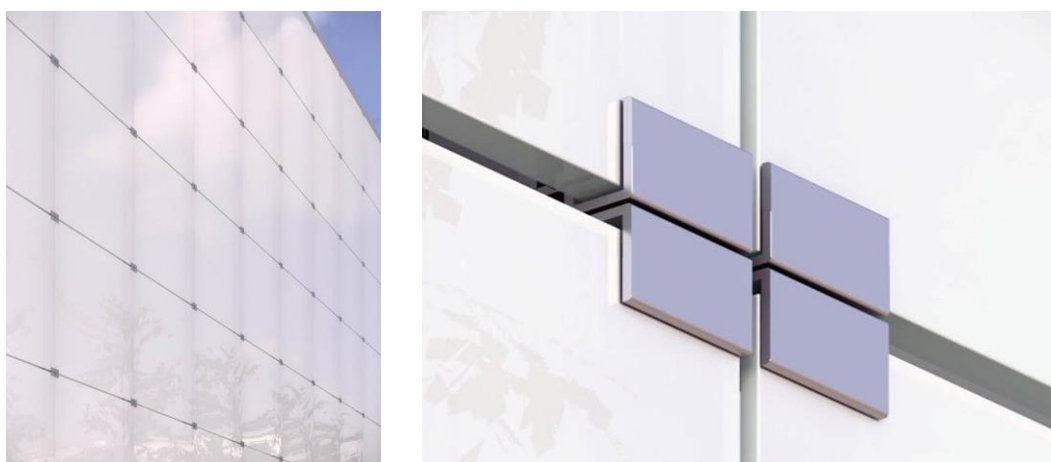
Figura 2.25: Ligações aparafusadas (Valarinho, 2010)

Como mencionado anteriormente, o contato direto entre o vidro e o aço deve ser evitado, principalmente nos furos, que possuem grandes tensões concentradas e também porque se trata de um material frágil. Assim sendo, normalmente são utilizados materiais intermédios, mais flexíveis, no furo que evitam a elevada concentração de tensões, como buchas de plástico, alumínio, entre outros. Estes devem ser capazes de redistribuir as tensões concentradas no furo antes de atingir o vidro e ainda garantir a estanqueidade (Haldimann, et al., 2007).

2.5.1.3 Fixações pontuais por aperto

Foram desenvolvidos diversos acessórios mais discretos de ligação dos painéis de vidro, tal como já referido. Neste caso, trata-se de elementos que ligam os painéis de vidro à estrutura portante através de ligações pontuais nos bordos do vidro.

No que concerne a este tipo de fixação destaca-se a utilização de dois tipos: as fixações por grampos (ver Figura 2.26) e as fixações por aperto-fricção (ver Figura 2.27). Ambas recorrem ao atrito na zona de aperto. Normalmente as fixações por grampos são destinadas à transferência de cargas perpendiculares ao plano, quanto à fixação por aperto-fricção, esta é adequada para os casos em que seja fundamental a transferência de cargas no plano.



a) Fachada

b) Pormenor

Figura 2.26: Fixação com grampos (Archiproducts, s.d.)

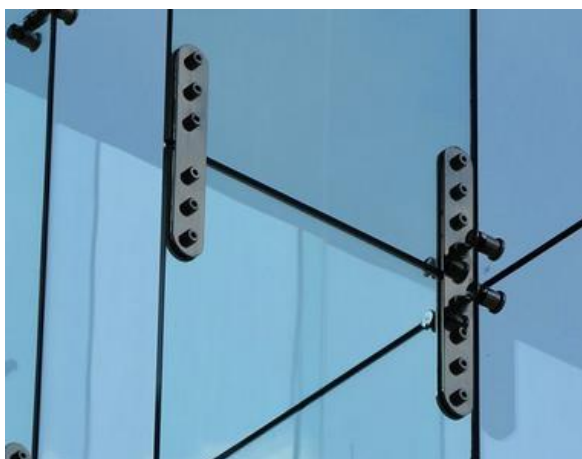


Figura 2.27: Fixação por aperto-fricção (Haber, 2015)

Relativamente às fixações por grampos, é importante mencionar que as mesmas são constituídas, tal como se pode aferir na Figura 2.28, por uma estrutura de aperto, os ditos grampos, calços de apoio,

e, para que não haja o contato direto entre o vidro e o grampo metálico, é utilizado um material intermédio, podendo ser neoprene ou borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM) (Valarinho, 2010).

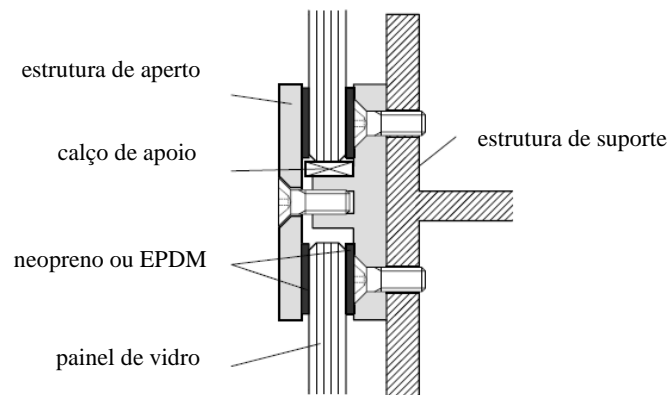


Figura 2.28: Representação dos elementos constituintes de um grampo (Haldimann, et al., 2007)

Em relação às fixações por aperto-fricção (ver Figura 2.29), estas possuem uma constituição muito semelhante à dos grampos. No entanto, em vez de serem utilizados grampos são utilizadas chapas metálicas em ambos os lados do painel aparafusadas com parafusos pré-esforçados.

Quanto ao contato direto entre o vidro e o parafuso, é deixada uma margem que deve ser drenada, para combater o risco de penetração de humidade. O preenchimento é feito com um material adequado, que seja suficientemente rígido, de modo a não transbordar após o aperto, sendo normalmente utilizadas juntas de alumínio ou fibra de vidro (Haldimann, et al., 2007; Sanches, 2013).

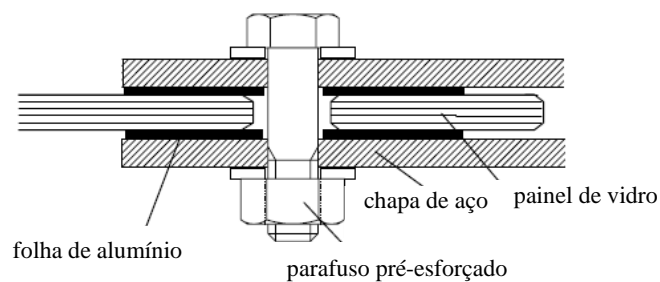


Figura 2.29: Representação da constituição da fixação por aperto-fricção (Haldimann, et al., 2007)

2.5.2 Fixações adesivas

Neste tipo de fixação os painéis de vidro são colados entre eles e a estrutura de suporte através de materiais não metálicos que garantem uma superfície mais plana e transparente.

Os materiais utilizados devem ser suficientemente rígidos, de modo a garantir uma boa interação entre o vidro e o aço, ou entre o vidro e o vidro. Também devem ser flexíveis, permitindo uma redistribuição uniforme das tensões, uma vez que o vidro é um material frágil e sensível à concentração

de tensões. Além do mencionado, deve ainda ser capaz de melhorar as imperfeições geométricas que o vidro possa ter (Feldmann & Kasper, 2014).

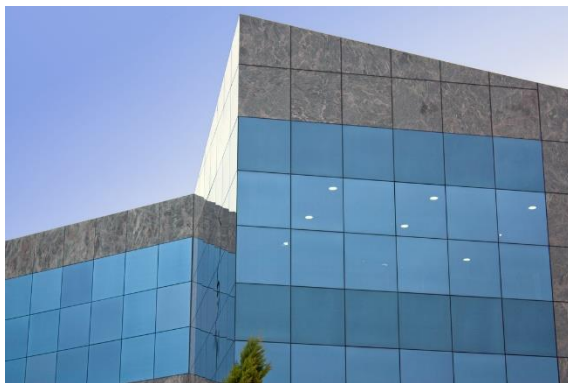
É fundamental ter em atenção diversos fatores que podem afetar o comportamento do material adesivo, tais como: tipo de adesivo, superfícies de união, carregamento a que está sujeito, forma e espessura da camada adesiva, efeitos atmosféricos no adesivo e durabilidade do mesmo, entre outros fatores (Wurm, 2007).

Destaca-se dois tipos de fixações adesivas: as fixações adesivas elásticas e as fixações adesivas rígidas (Haldimann, et al., 2007).

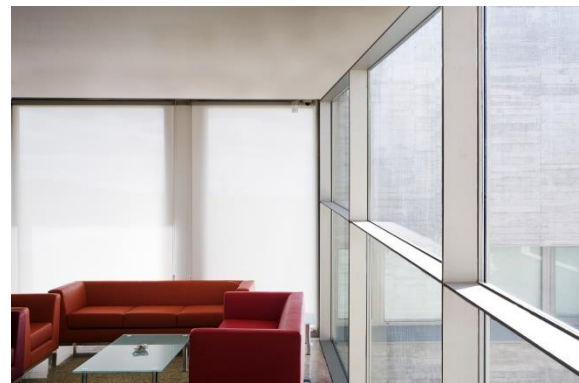
2.5.2.1 Fixações adesivas elásticas

As fixações adesivas elásticas tratam-se das ligações com silicone estrutural. O silicone estrutural era inicialmente utilizado para unir os painéis de vidro aos caixilhos de alumínio. Atualmente, também é aplicado para unir os painéis de vidro a elementos de aço inoxidável, ou até mesmo de vidro com vidro (Haldimann, et al., 2007).

O sistema de vidro exterior colado (VEC) trata-se de um sistema com recurso a este tipo de fixação (ver Figura 2.30 a)). No sistema VEC os painéis de vidro são colados no interior a uma subestrutura metálica a partir da qual os esforços atuantes nos painéis de vidro são transmitidos para uma estrutura de suporte (Figura 2.30 b)) (Haldimann, et al., 2007) Este tipo de fixação apresenta uma grande elasticidade e ainda consegue garantir a estanqueidade da estrutura.



a) Vista do exterior



b) Vista do interior

Figura 2.30: Fachada de VEC com juntas entre painéis de silicone estrutural (Socimateus, s.d.)

Em alguns países não é permitido o uso de silicone estrutural como único elemento de ligação. Assim sendo, deve ser utilizado algum tipo de fixação mecânica para prevenir a queda do vidro (Haldimann, et al., 2007).

2.5.2.2 Fixações adesivas rígidas

As fixações adesivas rígidas referem-se à utilização de adesivos acrílicos, adesivos de resina epóxi e ainda, adesivos de poliéster. Estes possibilitam a criação de juntas mais discretas dada a maior resistência e rigidez comparativamente com a aplicação de silicone estrutural.

Os referidos adesivos não têm grande capacidade para redistribuir as tensões e absorver deformações devido à sua elevada rigidez, daí não serem tão usuais na construção civil (Haldimann, et al., 2007).

3 ESTADO DA ARTE – VIDRO ESTRUTURAL

Tal como já mencionado, nas últimas décadas com o desenvolvimento do material tem-se verificado uma expansão surpreendente de aplicações do vidro. Deste modo, serão apresentados alguns exemplos de aplicação de elementos em vidro tanto a nível internacional, como nacional e regional, esta informação é possível aferir na Secção 3.1. Achou-se por bem investigar alguns custos do material (ver Secção 3.2).

A utilização do vidro em elementos estruturais que estão sujeitos a esforços consideráveis, reflete-se no aumento de trabalhos de investigação sobre o tema. Neste sentido, optou-se por apresentar alguns trabalhos referentes ao tema em estudo, tal como é possível aferir na Secção 3.3.

3.1 Exemplos de aplicação

Quando se fala em vidro estrutural na construção, remete-se desde logo para construções mais modernas, mesmo que se trate de pequenas aplicações, tais como escadas e guarda-corpos. O vidro é um material que pode garantir uma estética que a maioria dos materiais não consegue. Salienta-se a sua grande transparência e elegância da construção. Com o passar dos anos foi melhorado o material, aumentando assim o seu campo de aplicação.

Como mencionado na Secção 2.1, as primeiras aplicações do vidro foram em janelas. Nos dias de hoje já há uma grande diversidade de aplicações, especialmente em elementos estruturais. Tal facto deve-se à melhoria do comportamento através dos processos de tratamento já referidos, e também ao seu aspeto. Em seguida, serão apresentados alguns exemplos de aplicação do vidro a nível estrutural em elementos como, pilares, vigas, entre outros. No entanto, e uma vez que a definição de vidro estrutural é um pouco subjetiva, também se considerou relevante apresentar alguns exemplos onde o vidro não toma a função estrutural.

No que concerne a outras aplicações, tais como fachadas, coberturas, pavimentos, escadas e guarda-corpos, cujo desempenho estrutural não depende essencialmente do vidro, são de algum modo elementos que não deixam de ser importantes referenciar dado que têm que resistir a algumas ações, como o vento e outras.

3.1.1 Pilares

A aplicação do vidro sob a forma de pilares, não é muito usual ainda, uma vez que o vidro possui uma rotura frágil.

Um exemplo de aplicação do vidro como elemento estrutural, como se pode aferir na Figura 3.1 a), são os pilares de vidro utilizados no Centro Cívico de Saint-Germain em França construído em 1994. Estes possuem uma forma em cruz, com uma altura de 3,20 m, composta por três placas finas de vidro

float, duas de 10 mm e uma de 15 mm, cujo comportamento destas é idêntico à dos elementos esbeltos sujeitos à compressão (ArchDaily, 2009; Wurm, 2007; Eliášová, s.d.).

Na sede Danfoss Domicil (ver Figura 3.1 b)), na Dinamarca, também se encontram pilares de vidro em cruz, à semelhança do exemplo supracitado.



Figura 3.1: a) Pilares de vidro no Centro Cívico de Saint-Germain, França (ArchDaily, 2009); b) Pilares de vidro na sede Danfoss Domicil, Dinamarca (Architectour, s.d.)

3.1.2 Vigas

Segundo Wurm (2007), desde o final da década de 80, começaram a surgir algumas aplicações de vigas em vidro em estruturas de coberturas. Com o passar dos anos também se começou a utilizar em estruturas de pavimentos.

É fundamental destacar as *glass fins*, que são vigas colocadas perpendicularmente às fachadas de vidro. Estas começam a aparecer por volta de 1950, e são capazes de absorver os esforços provindos da ação do vento. Atualmente verifica-se um aumento da sua aplicação, pois permitem a substituição das estruturas autoportantes em aço utilizadas nos sistemas de fachadas, garantindo uma maior transparência da fachada (Wurm, 2007).

Apesar das *glass fins* se encontrarem fixadas na vertical, estas têm um comportamento idêntico ao das vigas, dado que estão sujeitas a ações perpendiculares, resultantes principalmente da ação do vento, originando assim flexão na mesma. Em alguns casos funcionam também como pilares, isto é, quando são transferidos esforços desde a cobertura para as mesmas (Valarinho, 2010).

Geralmente, as vigas de vidro são de vidro laminado de três camadas, cujo painel interior garante a capacidade estrutural do vidro, e os exteriores garantem a sua proteção e possuem um comportamento pós rotura aceitável. Neste sentido, há combinação de vidro recozido com termo-endurecido ou temperado (Valarinho, 2010).

O Museu do Vidro (ver atentamente Figura 3.2 a)), localizado no Reino Unido, possui vigas em vidro e pilares em vidro, também designados por *glass fins*. Além de vigas e pilares, é constituído

também por fachadas e cobertura de vidro. Note-se que as vigas possuem um vão de 5,70 m e uma secção retangular com altura de 300 mm, e os pilares uma altura de 3,50 m, com secção retangular também com uma altura de 200 mm, sendo utilizado para as mesmas o vidro laminado. Em relação às fachadas e cobertura, é utilizado o tipo de vidro isolante, constituído por uma camada exterior de vidro *float* com 10 mm, uma cavidade entre painéis de 10 mm, e ainda, no interior, painéis de vidro temperado com 6 mm (Eliášová, s.d.).

Um exemplo muito parecido é a entrada da loja da Apple, em Nova Iorque, (ver atentamente Figura 3.2 b)), que tem a forma de um cubo, sendo este composto por vidro.



a)



b)

Figura 3.2: a) Museu do Vidro em Kingswinford, Reino Unido (View, s.d.); b) Loja Apple, Nova Iorque (Eckersley O'Callaghan, s.d.)

Em Portugal também é possível encontrar-se a utilização de vigas e *glass fins*. Como se pode aferir na Figura 3.3, a Sede da EDP, no Porto, possui uma estrutura toda ela em vidro, cujas fachadas e cobertura são suportadas por vigas e *glass fins*. Um outro caso, onde são utilizadas *glass fins*, é na fachada da Fundação Champalimaud, em Lisboa (ver Figura 3.4).



Figura 3.3: Sede da EDP no Porto, Portugal (APEL, s.d.)



Figura 3.4: *Glass fins* utilizados numa fachada da Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal (Martifer, s.d.)

Nos casos supracitados, as vigas surgem como elementos de suporte de coberturas, e as *glass fins* de fachadas. Contudo é importante salientar que além destas aplicações, também surgem como elementos estruturais de pequenos pavimentos ou até de pontes pedonais, como se pode constatar em alguns exemplos apresentados posteriormente.

3.1.3 Coberturas

O vidro começou por ser utilizado, essencialmente, em coberturas. Com o desenvolvimento do material e a possibilidade de reduzir a quantidade de aço utilizada nas estruturas autoportantes, a sua aplicação cresceu, encontrando-se aplicado sob a forma de cúpula ou até mesmo plano.

Na maioria dos casos não funciona como material estrutural, sendo esta função atribuída aos materiais utilizados para a sua ligação, que na sua maioria são em aço. O facto é que começam a surgir pequenas coberturas onde o vidro toma a função de elemento estrutural, sendo substituído os elementos de fixação e estrutura autoportante de aço por vigas de vidro.

Uma vez que está sujeito a ações como o seu peso próprio, precipitação, impacto, entre outros, deve ser utilizado um vidro adequado às mesmas. Salienta-se ainda que em alguns casos a sobrecarga sobre o vidro pode não ser tão elevada, como por exemplo, em algumas coberturas inacessíveis, onde considera-se sobrecargas menores de modo a ter em conta os casos em que é necessário a limpeza ou manutenção do vidro. Noutros casos, o cuidado é fundamental, como em pavimentos de vidro mais suscetíveis à sobrecarga provinda das pessoas, especialmente naqueles que se encontram num espaço comercial, de saúde, entre outros. Nestes casos, é adequado utilizar painéis de vidro laminado ou de vidro isolante, sendo aconselhável a combinação de tipos de vidro, como o recozido e temperado.

Os casos em que o vidro surge como material estrutural em coberturas são poucos. Em Tóquio, no Japão, em 1996 foi construída uma cobertura de vidro em consola, como se pode aferir na Figura 3.5, cuja dimensão ronda os 10,60 m x 4,80 m. A sua estrutura é constituída por vigas de vidro com 9,2 m de comprimento. É fundamental salientar que as vigas são constituídas por quatro feixes triangulares que contribuem para obter uma forma curva. Em relação aos painéis da cobertura, possuem uma secção retangular com 1,9 m por 2,5 m. Quanto ao tipo de vidro utilizado na estrutura em questão, para os painéis da cobertura foi utilizado vidro laminado, composto por dois painéis de vidro temperado com 15 mm de espessura, e para as vigas, vidro laminado, constituído por dois painéis de 19 mm de espessura cada, mais um painel acrílico de 40 mm. Por fim, o sistema de fixação adotado foi o sistema aparafusado (Macfarlane & MacFarlane, s.d.; Eliášová, s.d.).



a) Vista geral

b) Pormenor das vigas

Figura 3.5: Cobertura de vidro em balanço, Japão (Firman Glass Projects, s.d.)

Um outro exemplo é o teto de vidro em balanço, suportado em vigas estruturais de vidro, presente no colégio Keble, no Reino Unido (ver Figura 3.6).



Figura 3.6: Teto de vidro suportado por vigas em vidro no colégio Keble, no Reino Unido (Firman Glass Projects, s.d.)

Considerada uma das maiores construções em vidro laminado estrutural, é a cobertura na entrada para os transportes públicos que se encontra abaixo da praça central da cidade de Filadélfia (ver Figura 3.7).



a) Vista geral da estrutura



b) Vista para o interior da estrutura

Figura 3.7: Cobertura em vidro laminado na Filadélfia, Estados Unidos da América (Eckersley O'Callaghan , s.d.)

A referida estrutura possui fachadas e cobertura em vidro. No entanto, apesar de estar a ser apresentada como exemplo de cobertura, é importante também fazer referência às fachadas. Estas são compostas por painéis de vidro laminado, composto por cinco camadas, das quais três são de vidro termo-endurecido e as outras duas com um intercalar. A cobertura possui painéis de vidro laminado com sete camadas, de vidro termo-endurecido e um intercalar. O objetivo desta estrutura passou por garantir que não houvesse qualquer elemento, sem ser de vidro, acima do solo, daí os painéis estarem ligados entre si com silicone estrutural. Esta encontra-se simplesmente apoiada sobre os painéis de vidro das fachadas, e as mesmas são suportadas por vigas de aço e lajes de betão abaixo do solo (Eckersley O'Callaghan , s.d.).

No que concerne a exemplos de aplicação onde é utilizada uma estrutura complementar, normalmente em aço, para dar apoio aos painéis em vidro. Considerou-se importante apresentar alguns exemplos de coberturas em vidro onde são utilizados alguns dos sistemas de fixação mais comuns. Do estrangeiro, optou-se por analisar a cobertura da Technische Universität em Berlim (ver Figura 3.8). Já em Portugal, apesar de não se encontrarem muitas aplicações, temos como exemplo a ponte de vidro da Fundação Champalimaud em Lisboa. Esta ponte, que liga dois edifícios, contém uma cobertura em vidro serigrafado curvo e ainda pavimento e guarda-corpos em vidro (ver Figura 3.9).



Figura 3.8: Cobertura de vidro na Technische Universität de Berlim, Alemanha (Saint-Gobain Glass, s.d.)



Figura 3.9: Ponte que liga dois edifícios na Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal

No Arquipélago da Madeira são poucos os exemplos de coberturas de vidro. Segue-se o caso da cobertura do La Vie Funchal, como se pode aferir na Figura 3.10 a) e b).

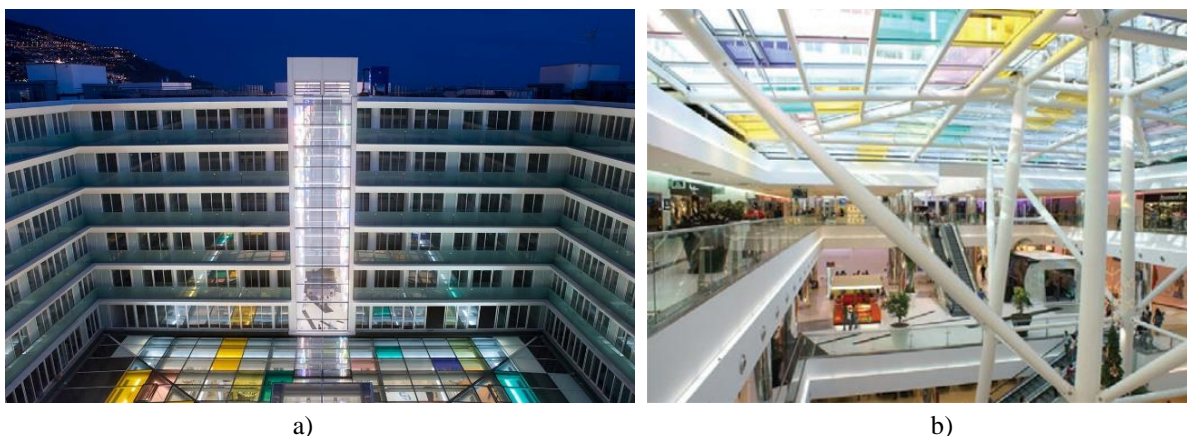


Figura 3.10: a) Vista exterior da cobertura de vidro do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira, Portugal (Saint-Gobain Glass, s.d.); b) Vista pelo interior da cobertura do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira, Portugal (Martifer, s.d.)

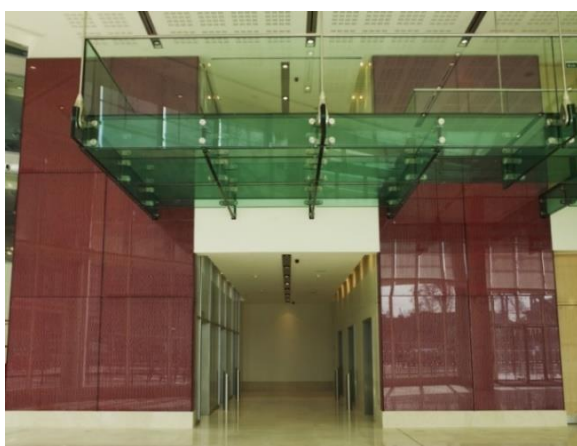
3.1.4 Pavimentos

Quando se fala em aplicações do vidro sob a forma de pavimentos, refere-se aos casos onde o vidro se encontra sujeito a uma sobrecarga adicional devido ao tráfego das pessoas, que nos casos anteriormente mencionados não acontece. Os pavimentos envidraçados têm vindo a ser cada vez mais usuais, sendo que começaram a surgir, essencialmente, por volta dos anos 70 (Valarinho, 2010).

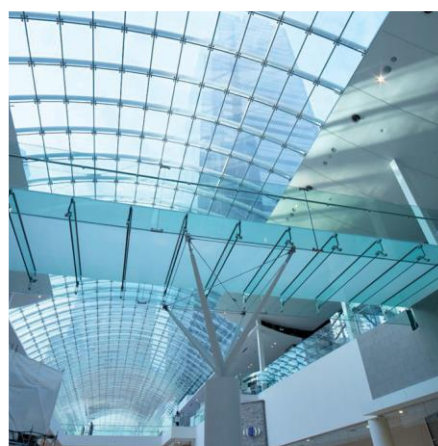
Normalmente o tipo de vidro utilizado para pavimentos é o vidro laminado de pelo menos três painéis, combinado com vidro temperado e recozido ou termo-endurecido. Esta combinação permite garantir um bom desempenho estrutural, tanto antes como após a rotura. Nos casos em que é adotado o uso de vidro temperado, o mesmo deve encontrar-se na face superior, uma vez que tem uma maior resistência ao impacto. É importante destacar ainda que os painéis utilizados são na maioria translúcidos, uma vez que transmitem mais segurança ao utilizador que um painel transparente, e ainda devem possuir propriedades antiderrapantes, sendo estas resultantes de processos de impressão, jateamento de areia, entre outros.

Relativamente a exemplos de aplicação, desconhece-se casos em que o vidro possua a função estrutural em Portugal Continental e no Arquipélago da Madeira. No estrangeiro encontraram-se alguns exemplos, mesmo sendo poucos. Assim sendo, como se pode aferir na Figura 3.11 a), verificou-se um pavimento envidraçado apoiado sob vigas de vidro, num edifício em Inglaterra.

Na Figura 3.11 b) é possível observar-se uma ponte no Eaton Centre, em Calgary, com uma extensão de 14,25 m e largura de 3,66 m. O material de eleição para a estrutura é o vidro laminado, tanto em vigas, como no pavimento e no guarda-corpos. Ao longo da ponte tem-se vigas em vidro, sendo que as vigas que se encontram no centro são suportadas por uma coluna em aço (Wellershoff, Sendelbach, & Schmitt, 2011).



a)



b)

Figura 3.11: a) Pavimento de vidro apoiado em vigas de vidro, em Inglaterra (Firman Glass Projects, s.d.); b) Ponte de vidro no Eaton Centre, em Calgary, Canadá (Wellershoff, Sendelbach, & Schmitt, 2011)

Em Portugal, apesar de serem desconhecidos casos deste tipo de aplicação, em que o vidro funcione unicamente como material estrutural, apresenta-se o pavimento da ponte da Fundação Champalimaud, em Lisboa (Figura 3.9) (já falado na Subsecção anterior) e o pavimento em vidro do miradouro do Cabo Girão, no Arquipélago da Madeira, sendo que este possui uma estrutura autoportante em aço.



Figura 3.12: Interior da ponte que liga dois edifícios na Fundação Champalimaud em Lisboa, Portugal (Bellapart, s.d.)



Figura 3.13: Pavimento em vidro no miradouro do Cabo Girão, Arquipélago da Madeira (Camacho, 2012)

3.1.5 Fachadas

A aplicação do vidro em fachadas é o tipo de aplicação mais comum, sendo que o seu aumento se deveu à grande transparência que era conseguida e, conseqüentemente, maior elegância da construção. Assim sendo, desenvolveram-se novas técnicas que permitiram fabricar vidros de melhor qualidade.

O vidro, neste caso, encontra-se na vertical e está sujeito a ações provindas do vento e do seu peso próprio. Estas devem ser encaminhadas para a estrutura de suporte, de modo a evitar que haja a concentração de tensões e o vidro se quebre. Há ainda ações acidentais a que pode estar sujeito, como o impacto de uma pessoa, entre outros.

É fundamental ter em atenção ao tipo de vidro utilizado, de modo que resista às ações supramencionadas, e garanta a segurança das pessoas no caso de quebra. O certo é que os painéis de vidro utilizados não devem ser unicamente de vidro recozido. Assim sendo, habitualmente usa-se vidro duplo ou vidro laminado, de dois ou mais painéis, combinados com vidro recozido e termo-endurecido ou temperado, de modo a garantir um melhor comportamento estrutural e controlar a absorção térmica do edifício, dado que o vidro é um fraco isolador de calor no inverno e no verão absorve muito calor.

A sua aplicação em fachadas levou ao desenvolvimento de alguns tipos de sistemas que diferem consoante o tipo de fixação. São conhecidos alguns sistemas de fachadas, como o sistema VEC e o sistema VEA.

O sistema VEC não é tão usual nos dias de hoje. Neste sistema o vidro não é considerado material estrutural, uma vez que se encontra apoiado nos quatro lados, tal como as janelas. Este sistema consiste na fixação dos painéis de vidro fixo através de caixilhos de alumínio com recurso a silicone estrutural, posteriormente fixo a uma estrutura autoportante. O silicone estrutural garante a absorção das ações provindas do vento e através do caixilho, que também absorve o peso próprio do vidro, transmite as ações para a estrutura autoportante. É um sistema que não garante uma leveza da construção tão grande como o sistema VEA.

No VEA os painéis são fixos de forma pontual, através de parafusos ou grampos, ligados a uma estrutura autoportante. Nos últimos tempos, a estrutura autoportante tem vindo a ser substituída por *glass fins*, já referido na Subsecção 3.1.2.

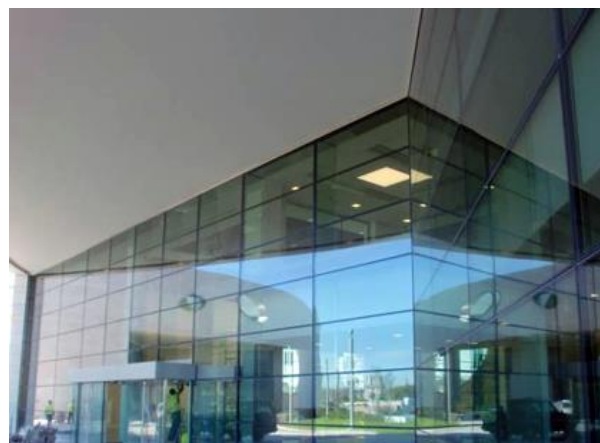
Um exemplo de fachadas em vidro, cuja estrutura de suporte das mesmas é igualmente em vidro, é o Museu do Vidro em Kingswinford (ver Figura 3.14 a)), já apresentado anteriormente. Além das vigas e *glass fins*, o Museu de Vidro também possui fachadas e cobertura de vidro. Na altura da sua construção era considerada a maior estrutura do mundo em vidro.

Também já mencionado, em Portugal, tem-se a fachada da Fundação Champalimaud (ver Figura 3.14 b)), onde são também utilizadas *glass fins* para o suporte da mesma.

Não obstante ao reduzido número de aplicações de fachadas em vidro cuja estrutura de suporte são as *glass fins*, é relevante apresentar-se exemplos em que são utilizados elementos de fixação em aço (já referidos na Secção 2.5). Assim sendo, pode observar-se o caso da fachada da Weststadthallen, em Essen, na Alemanha, onde o vidro é fixo através do sistema VEA (ver Figura 3.15).



a)



b)

Figura 3.14: a) Fachada do Museu do Vidro em Kingswinford, Reino Unido (Detail, s.d.); b) Fachada da Fundação Champalimaud (Saint-Gobain Glass, 2011)

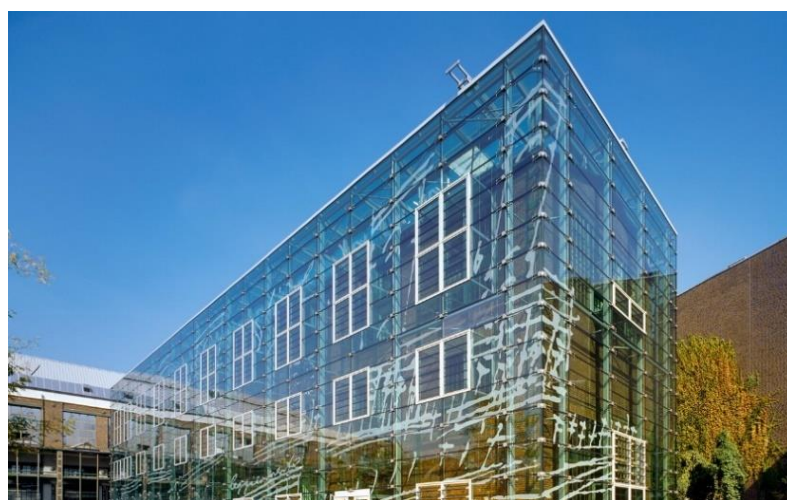


Figura 3.15: Fachada de VEA da Weststadthallen (Folkwang Musikschule) em Essen, Alemanha (Saint-Gobain Glass, s.d.)

Em Portugal, é possível encontrar diversos exemplos de aplicação de fachadas em vidro, essencialmente com recurso aos sistemas de VEC e VEA. Um exemplo da sua aplicação é no edifício Dynamic, em Braga. Neste, é utilizado vidro refletivo fixo através do sistema de fachada VEA (ver Figura 3.16).

No Arquipélago da Madeira, apesar de não ser abundante a sua utilização, pode deparar-se com alguns casos aplicados sob a forma de VEC e VEA em pequenos edifícios. Como se pode aferir na Figura 3.17, observaram-se as fachadas de vidro, onde é utilizado o sistema VEA, na loja da Volkswagen no Funchal.



Figura 3.16: Edifício Dynamic em Braga, Portugal (Bracarae, 2012)



Figura 3.17: Loja da Volkswagen no Funchal, Arquipélago da Madeira (VSA Madeira, s.d.)

3.1.6 Outros elementos

O vidro é um material muito versátil, assim sendo a sua aplicação é extensa. Para além das aplicações do vidro na construção abordadas anteriormente, pode encontrar-se ainda outros tipos de aplicação, em escadas e em guarda-corpos.

Uma vez que as escadas são essenciais na maioria das construções, e normalmente acabam por afetar um pouco a estética do edifício, utilizam-se certos materiais que acabam por enquadrar melhor e tornar a sua aparência mais agradável. Optar pelo vidro tem sido muito corrente, tanto no uso dos degraus, como na sua totalidade. No caso da aplicação completa do vidro, em degraus e em guarda-corpos, este acaba por assumir uma função estrutural. Um exemplo da situação anteriormente descrita é

a escadaria da loja da Apple em Leidseplein, em Amesterdão. Os degraus em vidro são fixos ao corrimão, também ele em vidro curvo temperado através de um sistema de fixação aparafusado (ver Figura 3.18 a)).

Em Portugal, na sede da EDP, no Porto, são utilizados painéis de vidro em escadas, sendo que estes são fixos a uma estrutura em aço, tal como o guarda-corpos (Figura 3.18 b)).



a)



b)

Figura 3.18: a) Escadaria em vidro numa loja da Apple em Leidseplein, Amesterdão; b) Sede da EDP no Porto, Portugal (Agência PH, s.d.)

Nos casos em que surge como guarda-corpos, o vidro não toma a função estrutural, dado que se encontra pouco solicitado. Assim sendo, a denominação de vidro estrutural não se enquadra neste caso, apesar de ser uma designação um pouco subjetiva. Este acaba por estar sujeito a ações como o vento, ou ações pontuais devido a impacto, ou pelo apoio das pessoas sobre as mesmas, daí fazer parte de algum modo das aplicações estruturais em vidro.

Uma vez que a construção de guarda-corpos é fundamental para a segurança das pessoas em varandas e escadas, por exemplo, os projetistas acabam por utilizar o vidro de modo a conseguir uma maior elegância no edifício. Nesta linha, surgem imensos casos em que se pode encontrar o vidro aplicado em guarda-corpos fixos de diversos modos. Destaca-se o exemplo do guarda-corpos numa varanda do La Vie Funchal, no Arquipélago da Madeira (Figura 3.19), cujos painéis são fixos através do sistema de fixação aparafusado.



Figura 3.19: Guarda-corpos do La Vie Funchal, Arquipélago da Madeira (Martifer, s.d.)

3.2 Custos e fabricantes

O vidro é um material fabricado por grandes empresas. Uma fábrica consegue produzir mais de 750 toneladas (cerca de 50000 m²) de vidro por dia. Segundo Wurm (2007), os quatro fabricantes mundiais que lideram no mundo do vidro são: *Nippon Sheet Glass*, *Asahi*, *Saint-Gobain* e *Guardian*. As empresas mencionadas fornecem cerca de dois terços da produção mundial de vidro *float*.

Relativamente aos custos, salienta-se que os mesmos aumentam com a necessidade de transformação e dimensões do produto. No que diz respeito à complexidade do transporte, também tem influência no custo, dado que é necessário um cuidado especial para que o material não seja danificado, não risque ou nem quebre, por exemplo.

Neste trabalho optou-se por apresentar alguns dos valores constantes no gerador de preços da Top-Informática, sendo que inclui o custo do material propriamente dito:

Tabela 3.1: Preços por m² do vidro simples, temperado, laminado e impresso (Top-Informática, s.d.)

Tipo de vidro		Espessura (mm)	Preço unitário por m ² (€)
Vidro simples		4	13,21
		5	16,64
		6	18,97
		8	30,50
		10	34,98
Vidro temperado	Incolor	5	18,09
		6	21,38
		8	27,96
	Colorido	10	35,35
		6	28,78
		10	47,69
		De controlo solar	8

Tabela 3.1 (continuação): Preços por m² do vidro simples, temperado, laminado e impresso (Top-Informática, s.d.)

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Preço unitário por m² (€)	
Vidro laminado com película de PVB	Incolor	3+3	22,17
		4+4	25,09
		5+5	28,43
		6+6	31,42
		10+10	58,39
	Colorido	3+3	26,57
		4+4	29,49
		5+5	32,83
		6+6	35,82
		10+10	62,79
Translúcido	3+3	34,17	
	4+4	37,09	
	5+5	40,43	
	6+6	43,42	
	10+10	70,39	
Vidro impresso	Incolor	4	11,25
		6	23,87
		11	51,22
	Colorido	4	13,51

3.3 Investigação sobre vidro estrutural

Sendo o vidro um material de grande interesse, tem vindo a ser alvo de alguns estudos nos últimos anos. Quanto mais estudos forem feitos e surgirem formas de melhorar o seu desempenho estrutural, maior será o seu campo de aplicação e garantia de maior segurança.

Assim sendo, considerou-se fundamental fazer uma recolha e abordagem mais detalhada de alguns estudos já realizados, destacando-se autores que investigaram o comportamento de elementos estruturais.

Leitch (2005), tal como a maioria dos autores, aborda a história do material, bem como as propriedades do mesmo, os diversos tipos de vidro e modos de fixação. Apresenta, ainda, alguns casos de estudo de elementos estruturais em vidro, tendo como base construções já existentes, tais como: vigas, pilares, fachadas, pavimentos e coberturas. Na mesma linha, tem-se Santos Silva (2017), que também aborda o material propriamente dito, as particularidades na conceção de projetos e algumas normas de apoio no dimensionamento e execução de ensaios.

Almeida (2013), optou por um estudo teórico e experimental do vidro duplo, colocado na vertical, quando é sujeito a diferenças de pressão uniformemente distribuídas, através da comparação de três normas de referência: a Norma Francesa, a Norma Europeia e a Norma da ASTM. Note-se que Almeida (2013) conclui que os resultados obtidos com base na Norma Europeia são mais concordantes

com os do estudo experimental, comparativamente com as outras duas normas, que acabam por exigir espessuras menores para o vidro. Um outro autor que também se centrou no estudo de fachadas em vidro foi o Patterson (2008).

Pereira (2012) desenvolveu também um estudo relacionado com fachadas em vidro. Esta autora, analisou estruturalmente uma fachada do Teatro Camões, em Lisboa, através de um modelo de elementos finitos. Fez ainda um estudo paramétrico alterando as tipologias estruturais, garantindo o mesmo nível de deslocamentos da estrutura original. Nesta linha, Romão (2014), analisa o comportamento estrutural de uma fachada em vidro suspensa através de cabos tensionados sujeitos à ação dinâmica da explosão, recorrendo a um método de integração numérica de Newmark e ainda ao cálculo automático através de um programa de elementos finitos. Um outro estudo centrado na aplicação de vidro em fachadas, é o da autora Garanito (2018). A mesma apresenta um estudo com base no cálculo de espessuras em vidro a aplicar numa fachada de uma moradia, apresentado quatro soluções, baseadas na norma francesa DTU 39, nos métodos do LNEC e em informação disponibilizada por uma vidreira. A autora conclui que a norma francesa acaba por ser mais conservativa. Ainda, Libos (2017) também se centra na análise de uma fachada com 154m^2 , a aplicar num centro comercial, com recurso a um software RFEM 5, aplicando a teoria da flexão de placas e método dos elementos finitos.

Ouwerkerk (2011), sabendo que por norma os arquitetos e clientes apresentam algum desagrado perante a necessidade de haver pilares em determinadas zonas, optou por centrar-se no estudo de pilares em vidro, sendo que estes são mais atraentes e minimizam o impacto na arquitetura. Deste modo Ouwerkerk (2011) estuda o comportamento destes elementos estruturais, tanto a nível numérico, como experimental. Neste estudo, salienta que existem alguns aspetos que devem ser considerados, como: a diferença na posição vertical entre as placas de vidro montadas, a suscetibilidade de tensões de pico nos bordos, as propriedades de rigidez do adesivo utilizado, e ainda as imperfeições que possa ter, tais como furos e arranhões. De forma a considerar alguns dos aspetos mencionados anteriormente, Ouwerkerk desenvolve um modelo numérico bidimensional para o estudo, e ainda diversos modos experimentais para a análise do comportamento estrutural de um pilar.

Desingrini (2019), tal como na maioria dos autores aborda as principais características do vidro, os sistemas de ligação e suporte existentes, e, ainda, opta por comparar resultados obtidos com recurso a normas e ensaios laboratoriais. Apresenta ainda um caso de estudo onde se centra no dimensionamento de *glass fins*.

As normas existentes atualmente para o dimensionamento de elementos estruturais em vidro apresentam muitas limitações. Muitas delas são aplicáveis a casos especiais, tais como para: placas retangulares, cargas aplicadas na lateral, cargas constantes e para distribuições de tensões independentes do tempo (Haldimann, 2006). Deste modo a necessidade de efetuar testes laboratoriais é frequente, sendo uma análise que apresenta um custo elevado. Assim sendo, Haldimann (2006) optou por realizar

um estudo que permite prever a vida útil de elementos estruturais em vidro, tendo em conta as propriedades mecânicas do material.

Sendo o vidro um material frágil, e tal como já mencionado em secções anteriores, muitas das vezes o vidro acaba por quebrar devido a imperfeições nas bordas. Neste sentido, Lindqvist (2013) centrou-se na determinação da resistência do vidro recozido tendo em conta as falhas nas bordas.

Um outro autor que se centrou no estudo de casos práticos, foi o Sanches (2013). Este autor analisou o comportamento estrutural de alguns elementos com base em normas existentes. Apresentou assim uma análise, através de modelos de elementos finitos, de uma fachada autoportante de vidro com uma altura de 15m, composta por vidro duplo e apoiada em *glass fins*. O dimensionamento dos painéis foi efetuado de acordo com as normas ASTM E 1300-09 e NF DTU39. Analisou, ainda, um pavimento, apoiado nos quatro bordos, com várias espessuras, também ele com recurso a modelos de elementos finitos, e com base na norma ASTM E 275-11. Por fim, efetuou uma análise a um guarda-corpos em vidro laminado, aparafusado a uma estrutura metálica. Para o estudo do guarda-corpos foi adotada a norma NF DTU39.

Tal como já mencionado anteriormente, a regulamentação existente é um pouco incompleta, e a autora Tavares (2015) acaba por estudar o comportamento estrutural de vigas em vidro sujeito a uma solicitação cíclica, sendo uma ação que não contempla nos regulamentos. Deste modo, para auxiliar a criação de regulamentos que contemplem esta ação, a autora realizou ensaios monotónicos e cíclicos à escala real, com e sem cabo de pré-esforço, de modo a conseguir aferir diferenças entre eles e caracterizar o seu comportamento estrutural. Conclui que existem alterações mais significativas no comportamento estrutural das vigas sujeitas a solicitações cíclicas, em comparação com os ensaios monotónicos. Sendo que o dano estrutural é mais significativo no regime pós-rotura, mas também é possível aferir o mesmo no regime elástico.

Quanto à aplicação de vidro em pontes pedonais, que tem vindo a ser comum em alguns edifícios e diversos locais emblemáticos, é alvo de estudo por parte de Andrade (2017). O autor constata a escassez de regulamentação e o fato de serem pouco estruturadas, especialmente para este caso de aplicação. Deste modo, o autor estuda soluções para pontes pedonais em vidro estrutural com base em normas existentes e algumas recomendações práticas. Com o estudo efetuado conclui que as vibrações excessivas acabam por ser a problemática intrínseca às pontes pedonais em vidro. As mesmas não comprometem a segurança estrutural, mas acabam por causar algum desconforto.

A utilização de vidro em piscinas e aquários, toma a função estrutural. Sendo um caso de aplicação muito comum, Sousa (2014) estudou algumas soluções estruturais de vidro laminado sujeito a um ambiente submerso, com recurso a ensaios experimentais. Posteriormente, realizou uma avaliação através de modelos numéricos, do comportamento estrutural dos elementos em vidro estudados.

Encontram-se diversos artigos científicos relacionados com o comportamento do vidro, tais como: o ao estudo do comportamento de elementos em vidro sujeito à compressão (Aiello, Campione,

Minafò, & Scibilia, 2011), o comportamento de vigas em vidro, após a rotura, através de vários testes (Biolzi, Cattaneo, & Rosati, 2009) e o comportamento do vidro laminado com diferentes películas intermédias (Serafinavicius, Kvedaras, & Sauciūvenas, 2013).

Constatou-se ainda a existência de alguns estudos a nível comportamental de elementos estruturais mistos. Isto trata-se da combinação de vidro com outro material, de forma a aumentar a resistência dos elementos e obter modos de rotura dúcteis. Entre as várias soluções estudadas tem-se a combinação do vidro com diferentes elementos como: aço inoxidável, do Pieter Louter (Louter, 2011); polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) de Palumbo; madeira, de João Cunha (Cunha, 2012); e polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) do Valarinho (Valarinho, 2010). Em seguida são abordados, de forma mais detalhada, alguns destes estudos e outros.

Cunha (2012) avaliou o comportamento de vigas mistas, vidro-madeira, com a variação da Secção transversal e o tipo de material de ligação entre os dois materiais.

Uma vez que cada vez mais é utilizado o vidro na construção com função estrutural e dada a fragilidade do material, Louter (2011) optou por estudar a segurança das vigas em vidro, reforçadas através de secções em aço inoxidável, que melhora significativamente o seu desempenho.

A utilização do vidro como material estrutural apresenta algumas desvantagens em relação aos materiais de construção tradicionais. Têm sido desenvolvidas soluções estruturais mistas, em que o vidro surge associado a outro material, com o intuito de aumentar a rigidez e resistência, e ainda obter modos de rotura mais dúcteis (Valarinho, 2010). Assim sendo, Valarinho (2010) estudou o comportamento estrutural de vigas mistas, vidro-GFRP, através de vários ensaios experimentais, complementando com modelos numéricos.

Verificou-se também que há diversos estudos referentes a determinadas características do material, associados ao seu comportamento térmico, entre outros. Bogas (2011) centrou-se no estudo do vidro aplicado em fachadas, onde aprofunda algumas características do material em questão, tais como: o fator solar e o coeficiente de transmissão térmica. O objetivo do estudo da autora é permitir que os projetistas consigam efetuar uma escolha do tipo de vidro de modo a aumentar a eficácia da luz do dia, o conforto dos utilizadores e diminuir o uso de energia na utilização dos edifícios.

4 REGULAMENTAÇÃO E METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

As normas referentes ao vidro têm vindo a ser desenvolvidas com o passar dos anos com um enorme cuidado dada a fragilidade do mesmo. Certamente, por vezes, não é por falha do projetista nem do engenheiro em obra, que o vidro quebra inesperadamente. Entre outros acidentes, muitas vezes os painéis ao serem transportados podem sofrer danos nas bordas, ou até na superfície devido a algum impacto que passa despercebido, acabando por alterar o seu comportamento. Deste modo, é fundamental que os projetistas das estruturas em vidro garantam que, em caso de colapso da estrutura em vidro, a integridade estrutural do sistema em geral não seja ser comprometida (Feldmann & Kasper, 2014).

Relativamente à regulamentação propriamente dita, as normas em vigor em Portugal são na sua maioria ligadas às necessidades térmicas e acústicas, e à proteção dos edifícios contra incêndios (Bogas, 2011). Dada a existência de diversas normas, tanto europeias, como internacionais, referentes ao produto, a ensaios do material, e direcionadas ao dimensionamento de elementos em vidro e tipos de ligação dos mesmos, estas acabam por ser adaptadas e utilizadas na atividade vidreira.

Constata-se que na sua maioria, as normas existentes são destinadas ao produto propriamente dito, estando assim em falta normas referentes ao seu dimensionamento. Em termos de dimensionamento não se encontram normas para a aplicação de todos os casos, ou seja, a sua maioria aplica-se a painéis de vidro apoiados em algumas bordas, sujeito a ações uniformemente distribuídas.

4.1 Normas do produto

Salientam-se algumas normas do produto, que contemplam os processos de fabrico, dimensões dos painéis e respetivas tolerâncias, propriedades físicas e mecânicas, entre outros, como: a NP EN 572 para o vidro recozido fabricado através do processo *float*, a NP EN 12150 para o vidro temperado, a NP EN 1863 para o vidro termo-endurecido, e a EN ISO 12543, ou NP EN 14449, para o vidro laminado. Alguns pontos destas normas já foram referidos na Secção 2.4. Ressalta-se algumas normas portuguesas resultantes da adaptação de determinadas partes das normas europeias mencionadas. No Anexo I é possível identificar algumas normas referentes à conceção e utilização do vidro.

Para utilizar o produto na construção e indicar que estão em cumprimento com os regulamentos, o vidro deve estar em conformidade com as normas, possuindo assim a marca CE, na Europa.

4.2 Normas de ensaios

Atualmente o vidro tem vindo a ser aplicado em elementos estruturais, sendo assim fundamental a execução de ensaios de modo a determinar as suas principais propriedades mecânicas, tais como: a

resistência à flexão, e a resistência a certas ações, como o fogo, impacto devido a balas ou vandalismo. Para tal, dispõe-se de normas direcionadas a determinados métodos de ensaio, como a NP EN 1288, a EN 356 e a EN 12600.

Relativamente à norma NP EN 1288, intitulada por “Vidro na construção – Determinação da resistência do vidro à flexão”, subdividida em cinco partes, esta engloba informação acerca de quatro ensaios que permitem a determinação da resistência à flexão do vidro. Como já foi mencionado na Subsecção 2.2.2, os ensaios mais usuais são descritos nas partes 2 e 3.

Quanto à norma EN 356, denominada por “*Glass in building – Security glazing – Testing and classification of resistance against manual attack*”, destina-se à determinação da resistência a ações pontuais através de dois ensaios distintos, um ensaio de queda e um ensaio de martelo. No ensaio de queda é utilizada uma esfera metálica que embate sobre uma placa de vidro a uma certa altura, sendo assim determinada a resistência do vidro perante a sua resposta a três impactos sucessivos. O ensaio de martelo consiste em utilizar o martelo para dar uma pancada a determinada velocidade no vidro, de modo que através do número de pancadas e velocidade seja possível determinar a resistência do vidro (Valarinho, 2010).

No respeitante à norma EN 12600, designada por “*Glass in buildings – Pendulum test – Impact test method and classification for flat glass*”, esta tem como objetivo determinar a resistência do vidro ao impacto. Neste caso tem-se o ensaio do pêndulo que permite a determinação da resistência do vidro ao impacto através do embate de um pêndulo sobre o vidro, que simula o impacto de uma pessoa (Valarinho, 2010).

4.3 Normas de dimensionamento

Uma vez que o vidro tem vindo a ser aplicado em elementos estruturais, é fundamental a sua análise estrutural. O facto é que o dimensionamento dos elementos estruturais formados pelo material que tem vindo a ser abordado não se encontra ainda muito claro. No entanto, e tal como acontece com todos os outros materiais utilizados na construção, a estrutura deve ser dimensionada através de processos iterativos, cálculos analíticos e ensaios experimentais. Além disso, deve garantir também os requisitos do estado limite último (resistência às ações previstas, estabilidade da estrutura, etc.) e do estado limite de serviço (controlo de deformações, vibrações, deslocamentos, etc.).

O vidro ao contrário dos materiais de construção mais comuns, como o betão e o aço, não possui um Eurocódigo específico para o projeto de estruturas de edifícios. Mas, segundo o LNEC, já se encontra uma comitiva a desenvolver um EC referente às regras de projeto de elementos estruturais em vidro. Este está em conformidade com alguma regulamentação europeia já existente em relação ao vidro e ainda com os regulamentos base, nomeadamente o EN 1990 e EN 1991. É de realçar que foi publicado um documento pré-normativo que acaba por apresentar a base do EC10 que está a ser desenvolvido para

o projeto de vidro estrutural, intitulado por “*Guidance for European Structural Design of Glass Components*”. Além de incluir a parte do material propriamente dita, como os tipos e as suas propriedades, engloba também a parte das regras básicas para o projeto de elementos estruturais em vidro (Feldmann & Kasper, 2014; LNEC, s.d.).

O documento pré-normativo mencionado anteriormente, faz referência a diversas normas de dimensionamento, tais como: a norma alemã DIN 18008, a norma europeia EN 16612, a norma austríaca Ö B 3716, a norma holandesa NEN 2608, a norma norte americana ASTM E1300, e a norma italiana CNR-DT 210 (Feldmann & Kasper, 2014; Sousa, 2014). Note-se que as normas apresentam métodos de dimensionamento distintos levando à obtenção de resultados diferentes.

Assim sendo, no caso do vidro, em termos de regulamentação, esta ainda é escassa, havendo algumas normas a nível internacional e europeu, tal como foi mencionado anteriormente, e alguns artigos publicados com recomendações para o dimensionamento de estruturas em vidro, tendo como base a experiência. Na sua maioria, nem se podem aplicar a todos os casos, uma vez que só se encontram para determinadas formas de vidro, certos carregamentos e condições de apoio. Em geral, é limitado para elementos de forma retangular, com apoios laterais contínuos e sujeitos a cargas uniformemente distribuídas perpendiculares ao plano (Sousa, 2014; Valarinho, 2010).

No que concerne aos regulamentos portugueses referentes ao projeto de estruturas em vidro, verificou-se a inexistência de normas e documentos pré-normativos de apoio ao dimensionamento, devendo assim ser utilizadas as normas europeias e internacionais existentes para o dimensionamento.

Deste modo, optou-se por aprofundar dois regulamentos na presente dissertação. A norma europeia EN 16612, publicada em 2019, intitulada por “*Glass in building - Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*”, dado que aparenta ser a mais utilizada e a mais recente norma europeia. Esta norma veio a substituir a prEN 13474 “*Glass in building - Design of glass panes*”, que viria a ser a norma de referência até há alguns anos no dimensionamento de elementos em vidro (Sousa, 2014). Note-se que houve a necessidade de recorrer também à norma provisória prEN 16612, intitulada por “*Glass in building - Determination of the load resistance of glass*”, em alguns casos. E, ainda, a norma italiana CNR-DT 210, intitulada por “*Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*”, publicado em 2013, uma vez que se trata da norma recomendada para as verificações de segurança de alguns elementos estruturais, como os pilares e vigas (Feldmann & Kasper, 2014).

Relativamente às ações a ter em conta nas estruturas de vidro, são as mesmas que nos outros tipos de estruturas, salientando-se: o peso próprio, as sobrecargas, o vento, a neve, a temperatura, o impacto, a explosão e as sísmicas (Haldimann, et al., 2007). Além das ações supramencionadas, deve ainda ter-se em conta, no dimensionamento da estrutura de vidro, possíveis impactos acidentais, vandalismo, e detritos levados pelo vento. Estas ações estão presentes na Norma Portuguesa (NP EN) 1991-1 (Eurocódigo 1 – Ações em estruturas).

4.3.1 Norma EN 16612

A EN 16612, intitulada por “*Glass in building - Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*”, centra-se na determinação da resistência à flexão dos painéis de vidro, apoiados linearmente. Nesta norma não constam todas as ações a que o material pode estar sujeito, tais como: a ação sísmica, e a resistência ao impacto e à explosão.

Salienta-se, ainda, que nesta norma os elementos são divididos, por: elementos estruturais primários (como vigas, pilares e pavimentos), elementos estruturais secundários (como *glass fins*, quando estes não comprometem a estrutura principal), e painéis de preenchimento (como vidros das fachadas) (prEN 16612, 2013).

Para a determinação da capacidade resistente do vidro, este regulamento teve por base o Eurocódigo EN 1990 e em relação às ações encontram-se de acordo com o Eurocódigo EN 1991.

Tal como é habitual noutros tipos de estruturas, com diferentes materiais, as verificações necessárias referentes ao ELU e ao ELS devem ser cumpridas, deste modo para garantir que a estrutura se encontra em segurança, devem ser respeitadas duas condições ligadas à resistência e à deformação.

Quanto às combinações de ações a considerar, de acordo com a EN 1991, tem-se:

Para o estado limite último,

$$F_d = \gamma_G \times G + \gamma_Q \times Q_{k,1} + \gamma_Q \times \sum_i \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (4.1)$$

E para o estado limite de serviço,

$$F_d = G + \psi_1 \times Q_{k,1} + \sum_i \psi_{2,i} \times Q_{k,i} \quad (4.2)$$

No que concerne aos fatores parciais e valores reduzidos a adotar, segundo a EN 16612, são os apresentados nas tabelas seguintes.

Tabela 4.1: Fatores parciais (adaptado de (prEN 16612, 2013))

Tipo de elemento	γ_Q	$\gamma_G^{(3)}$	
		Favorável	Desfavorável
Estrutura primária ⁽¹⁾	1,5	1,0	1,3
Estrutura secundária ⁽¹⁾	1,3	1,0	1,2
Painéis de preenchimento ⁽²⁾ (classe de consequência CC1)	1,2	1,0	1,1
Painéis de preenchimento ⁽²⁾ (classe de consequência mais baixo que CC1)	1,1	1,0	1,1

Notas:

(1) Elementos estruturais que constam nos Eurocódigos.

(2) Elementos não estruturais que não constam nos Eurocódigos.

(3) O menor valor é utilizado quando a ação permanente tem um efeito favorável na combinação com outras ações. O maior valor é utilizado quando a ação permanente atua sozinha ou tem um efeito desfavorável combinado com outras ações.

Tabela 4.2: Valores reduzidos (adaptado de (EN 16612, 2019))

Ação		Estrutura primária ⁽¹⁾	Estrutura secundária ⁽¹⁾	Painéis de preenchimento ⁽²⁾
Vento	ψ_0	0,6	0,6	0,6
	ψ_1	0,9	0,9	0,9
	ψ_2	0,2	0,2	0,2
Neve	ψ_0	0,6	0,6	0,6
	ψ_1	1,0	1,0	1,0
	ψ_2	0,2	0,2	0,2
Outras	ψ_0	Ver Eurocódigo ou anexos nacionais.		
	ψ_1			
	ψ_2			

Notas:

(1) Elementos estruturais que constam nos Eurocódigos.

(2) Elementos não estruturais que não constam nos Eurocódigos.

Primeiramente tem-se a verificação ao ELU, relacionada com a resistência do elemento, que deve garantir a seguinte condição,

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \quad (4.3)$$

onde, σ_{ef} corresponde à tensão efetiva atuante, e $f_{g,d}$ à tensão efetiva admissível.

No que respeita à tensão efetiva admissível, possui duas fórmulas distintas, uma para o do tipo de vidro recozido, outra para os tipos de vidro sujeitos a tratamentos térmicos.

Deste modo, tem-se para o vidro recozido,

$$f_{g,d} \equiv \frac{k_e \times k_{mod} \times k_{sp} \times f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (4.4)$$

E, para os vidros sujeitos a tratamentos térmicos, como o vidro temperado e o vidro termo-endurecido, tem-se,

$$f_{g,d} \equiv \frac{k_{mod} \times k_{sp} \times f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v \times (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,V}} \quad (4.5)$$

Onde,

- $f_{g,k}$ diz respeito ao valor característico da resistência à flexão do vidro recozido, ou seja, tal como já referido anteriormente, tem uma resistência à flexão de 45 MPa;

- $f_{b,k}$ corresponde aos valores característicos da resistência à flexão de acordo com o tipo de vidro sujeito a tratamento térmico. E, tal como também já foi apresentado anteriormente, tem-se para o vidro termo-endurecido, 70 MPa, para o temperado, 120 MPa, e para o temperado quimicamente, 150 MPa;

- γ_M corresponde ao fator parcial de segurança do vidro, que depende da resistência do mesmo. Assim sendo, tem-se para o vidro recozido e para os vidros sujeitos a tratamentos os valores apresentados na Tabela 4.3;

Tabela 4.3: Fatores parciais de segurança do vidro (adaptado de (EN 16612, 2019))

Tipo de vidro	Fator parcial de segurança
Vidro recozido	$\gamma_{M,A} = 1,8$
Vidro sujeito a tratamento	$\gamma_{M,V} = 1,2$

- k_e corresponde ao fator de resistência da borda, sendo que nos casos em que as tensões são baixas, no caso dos painéis com todas as arestas apoiadas, o valor do fator considerado é de 1, quando as bordas são tensionadas, ou seja, nos casos em que os painéis têm apenas duas bordas apoiadas, ou três, o fator toma valores inferiores a 1;

- k_{mod} corresponde ao fator que tem em conta a duração do carregamento, a combinação de cargas e as condições ambientais;

Tabela 4.4: Fatores de modificação (adaptado de (EN 16612, 2019))

Tipo de ação	Duração da carga	k_{mod}
Carga de Pessoas (normal)	30 s	0,89
Carga de Pessoas (multidões)	5 min	0,77
Carga para manutenção	30 min	0,69
Rajada de vento	5 s ou menos	1,0
Vento	10 min	0,74
Neve	3 semanas	0,45
Variação de temperatura	8 h	0,58
Peso próprio	permanente (50 anos)	0,29

- k_{sp} corresponde a um coeficiente que tem em conta a superfície do painel de vidro (valores apresentados em seguida na Tabela 4.5);

Tabela 4.5: Coeficientes referentes à superfície do painel (adaptado de (EN 16612, 2019))

Tipo de vidro	k_{sp}
Vidro recozido	1,0
Vidro impresso	1,0
Vidro esmaltado ou impresso	1,0
Vidro estampado	0,75
Vidro estampado esmaltado	0,75
Vidro polido estampado	0,75
Vidro aramado estampado	0,6

- k_v corresponde ao coeficiente parcial para a tensão residual devido à têmpera, sendo possível conferir os valores tomados na Tabela 4.6 apresentada em seguida;

Tabela 4.6: Fatores de tensão residual (adaptado de (EN 16612, 2019))

Processo de fabricação	k_v
Endurecimento horizontal (ou outro processo sem o uso de pinças ou outros dispositivos para segurar o vidro)	1,0
Endurecimento vertical (ou outro processo usando pinças ou outros dispositivos para segurar o vidro)	0,6

Relativamente à deformação admissível, nos casos em que as normas ou regulamentos não o limitam, devem ser admitidos os valores estabelecidos pelos fabricantes.

A deformação máxima calculada, w_{max} , não deve ser superior à deformação de cálculo, w_d , na condição mais desfavorável (ver equação 3.2), tal como indicado na condição seguinte,

$$w_{max} \leq w_d \quad (4.6)$$

Os valores mencionados anteriormente devem ser definidos com base na distribuição de carga, geometria do material e condições e apoio.

Note-se que o vidro laminado é o mais usual nas estruturas em vidro, e tal como é possível aferir na norma em estudo há determinados pontos a ter em conta para as verificações. Um dos pontos tem a ver com a consideração do *interlayer* dos painéis de vidro, quando a secção se encontra sujeita ao corte, e o ligante e vidro se encontra em paralelo ao desenvolvimento da carga pode ser considerado na resistência ao corte. O facto é que ao ser considerado o *interlayer* torna as verificações mais complexas. Deste modo, é apresentado um método de cálculo em alternativa mais simples, onde é utilizado uma espessura efetiva nas verificações.

Assim sendo, para a determinação da resistência do vidro tem-se uma espessura efetiva dada pela expressão seguinte,

$$h_{ef;\sigma;j} = \sqrt{\frac{h_{ef;w}^3}{h_j + 2 \times \omega \times h_{m;j}}} \quad (4.7)$$

Quanto à determinação da deformação máxima do vidro tem-se uma espessura efetiva dada pela expressão seguinte,

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12 \times \omega \times \left(\sum_k h_k \times h_{m,k}^2 \right)} \quad (4.8)$$

Onde,

- ω diz respeito a um coeficiente de transferência de corte que toma o valor 0 no caso de os panos trabalharem em separado, e 1 se tiverem um comportamento monolítico;

- h_k e h_j correspondem às espessuras das placas de vidro que compõe o vidro laminado;

- $h_{m,k}$ e $h_{m,j}$ correspondem às distâncias médias das placas de vidro que compõe o vidro com o meio do vidro laminado (ver Figura 4.1);

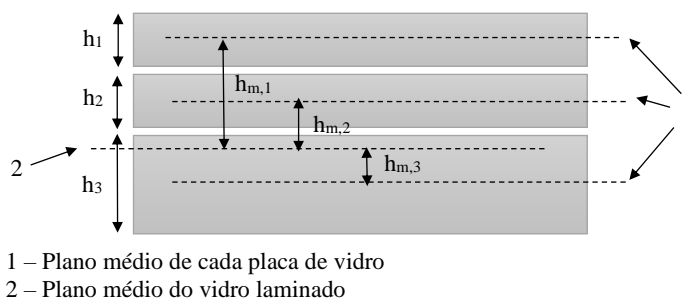


Figura 4.1: Exemplo de dimensões das espessuras do vidro laminado (adaptado de (EN 16612, 2019))

É possível ainda aferir, no anexo B do regulamento EN 16612, expressões que permitem a determinação da tensão máxima e deformação máxima de painéis retangulares apoiados em todas as bordas.

Assim sendo, para a determinação da tensão máxima à flexão tem-se a seguinte equação,

$$\sigma_{max} = k_1 \times \frac{A}{h^2} \times F_d \quad (4.9)$$

E ainda para a determinação da deformação máxima tem-se a seguinte equação,

$$w_{max} = k_4 \times \frac{A^2}{h^3} \times \frac{F_d}{E} \quad (4.10)$$

Onde,

- A corresponde à área do painel;

- k_1 e k_4 correspondem a coeficientes dimensionais que dependem do rácio $\lambda = \frac{a}{b}$, onde a e b correspondem às dimensões laterais do painel, sendo que a deverá corresponder à menor, e ainda da carga não dimensional definida por $p^* = \left(\frac{A}{4 \times h^2}\right)^2 \times \frac{F_d}{E}$, que são possíveis obter através de expressões específicas, ou então com recurso a tabelas disponíveis no regulamento através de interpolação linear (ver Tabela 4.7 e Tabela 4.8).

Tabela 4.7: Coeficiente k_1 para o cálculo da tensão máxima (EN 16612, 2019)

$\lambda = a/b$	p^*										
	0	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,268	0,261	0,244	0,223	0,190	0,152	0,135	0,130	0,129	0,128	0,128
0,9	0,319	0,309	0,286	0,260	0,218	0,172	0,152	0,145	0,144	0,144	0,144
0,8	0,380	0,369	0,341	0,309	0,257	0,199	0,173	0,164	0,162	0,162	0,162
0,7	0,449	0,437	0,408	0,372	0,311	0,236	0,199	0,186	0,184	0,184	0,184
0,6	0,524	0,515	0,490	0,457	0,391	0,294	0,238	0,215	0,212	0,211	0,211
0,5	0,600	0,595	0,580	0,559	0,506	0,395	0,302	0,255	0,247	0,245	0,245
0,4	0,671	0,669	0,664	0,655	0,631	0,551	0,429	0,322	0,297	0,290	0,289
0,3	0,724	0,723	0,722	0,721	0,716	0,694	0,629	0,471	0,388	0,356	0,349
0,2	0,747	0,747	0,747	0,747	0,747	0,745	0,738	0,699	0,613	0,502	0,457
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,749	0,748	0,740	0,729

For the purposes of calculation:

$$k_1 = \frac{1}{4 \left[\frac{1}{z_2^2} + \frac{p^{*2}}{(z_3^2 + (z_4 p^*)^2)} \right]^{0.5}}$$

where $z_2 = 24 \left[0,0447 + 0,0803 \left(1 - e^{\left(-1,17 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,073} \right)} \right) \right]$

$$z_3 = \frac{1}{\lambda} \left(4,5 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^2 + 4,5 \right)$$

$$z_4 = \frac{1}{\lambda} \left(0,585 - 0,05 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) \right)$$

Tabela 4.8: Coeficiente k_4 para o cálculo da deformação máxima (EN 16612, 2019)

$\lambda = a/b$	p^*										
	0	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,046 1	0,041 4	0,035 4	0,031 0	0,025 5	0,018 9	0,013 7	0,008 8	0,006 2	0,004 4	0,003 6
0,9	0,055 9	0,050 5	0,043 4	0,038 1	0,031 4	0,023 3	0,016 8	0,010 8	0,007 7	0,005 4	0,004 4
0,8	0,068 3	0,062 4	0,054 0	0,047 7	0,039 5	0,029 3	0,021 3	0,013 7	0,009 7	0,006 9	0,005 6
0,7	0,082 6	0,076 9	0,068 0	0,060 7	0,050 7	0,038 0	0,027 7	0,017 8	0,012 7	0,009 0	0,007 3
0,6	0,098 4	0,094 1	0,085 8	0,078 1	0,066 6	0,050 8	0,037 3	0,024 2	0,017 2	0,012 2	0,010 0
0,5	0,114 8	0,112 5	0,106 9	0,100 5	0,088 9	0,070 3	0,052 7	0,034 5	0,024 7	0,017 6	0,014 4
0,4	0,130 3	0,129 5	0,127 3	0,124 2	0,116 6	0,099 4	0,078 1	0,052 8	0,038 2	0,027 3	0,022 4
0,3	0,142 1	0,141 9	0,141 6	0,141 0	0,139 2	0,132 4	0,117 0	0,087 2	0,065 4	0,047 7	0,039 3
0,2	0,147 4	0,147 4	0,147 4	0,147 3	0,147 2	0,146 8	0,145 2	0,136 3	0,119 5	0,096 2	0,082 2
0,1	0,148 0	0,148 0	0,148 0	0,148 0	0,148 0	0,148 0	0,148 0	0,147 9	0,147 7	0,147 1	0,146 0

For the purposes of calculation:

$$k_4 = \frac{\left[\left(\frac{\left(\frac{1}{z_1^4} + 4p^{*2} \right)^{0.5} - \frac{1}{z_1^2}}{2} \right)^{-0.5}}{16\lambda^2 p^*} \right]}$$

where $z_1 = 192(1 - \mu^2)\lambda^2 \left[0,004\,06 + 0,008\,96 \left(1 - e^{\left(-1,123 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,007} \right)} \right) \right]$

Note: For $p^* = 0$, $k_4 = \frac{z_1}{16\lambda^2}$

4.3.2 Documento técnico CNR-DT 210

O documento técnico italiano CNR-DT 210, intitulada por “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*”, publicado em 2013, tem como objetivo apresentar uma visão geral dos aspetos a considerar em projeto. Sendo possível aferir diversos assuntos relacionados com os elementos estruturais em vidro, tais como: a resistência, a estabilidade, a rigidez, a robustez, a durabilidade e o dimensionamento. Os métodos propostos neste documento normativo têm por base a EN1990 e a EN 16612 (CNR-DT 210, 2013).

O documento normativo em estudo contempla diversos capítulos, associados à caracterização do material, apresentação dos princípios básicos de cálculo, as ações que são de maior interesse a ter em conta em projetos de estruturas de vidro e a apresentação de equações que permitem definir a resistência de cálculo e verificações de segurança (CNR-DT 210, 2013). Deste modo optou-se por aprofundar o

capítulo relacionado com a apresentação das equações e respetivas verificações de segurança, mais especificamente para os elementos sujeitos a cargas de compressão e flexão.

Quanto aos elementos comprimidos, como é o caso dos pilares, tem-se a verificação à encurvadura, tal como é usual nas verificações à encurvadura de pilares metálicos. Assim sendo, deve ser verificada a seguinte condição,

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (4.11)$$

Onde,

- N_{Ed} corresponde ao valor de cálculo do esforço axial de compressão;
- $N_{b,Rd}$ diz respeito ao valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido, que é obtido com base na equação 4.12.

$$N_{b,Rd} = \chi \times A \times f_{g;d} \quad (4.12)$$

Onde,

- χ corresponde ao coeficiente de redução obtido pela equação 4.13, apresentada em seguida;

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (4.13)$$

- Φ corresponde a um parâmetro obtido através da equação 4.14, apresentada em seguida;

$$\Phi = 0,5 \times \left[1 + \alpha_{imp} \times (\bar{\lambda} - \alpha_0) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (4.14)$$

- α_{imp} e α_0 correspondem a fatores de imperfeição, sendo propostos os valores de 0,71 e 0,60, respetivamente;
- $\bar{\lambda}$ corresponde à esbelta normalizada do elemento estrutural, obtido pela seguinte equação;

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_{g;k;st}}{N_{cr}^{(E)}}} \quad (4.15)$$

- A diz respeito à área da secção transversal;
- $f_{g;k;st}$ corresponde à resistência à tração do material, obtida através da equação apresentada em seguida;

$$f_{g;k;st} = k_{mod} \times k_{ed} \times k_{sf} \times \lambda_{gA} \times \lambda_{gI} \times f_{g;k} + k'_{ed} \times k_v \times (f_{b;k} - f_{g;k}) \quad (4.16)$$

- k_{mod} corresponde ao fator que tem em conta a duração do carregamento, a combinação de cargas e as condições ambientais, sendo que este parâmetro se encontra em conformidade com a norma EN 16612. Deste modo tem-se na Tabela 4.4 os valores correspondentes;

- k_{ed} e k'_{ed} correspondem a fatores de redução da tensão de resistência do vidro recozido e com tratamentos térmicos, respetivamente. Estes fatores dependem do acabamento das bordas do vidro ou

da distância dos orifícios ao bordo. De modo a simplificar, o valor adotado é de 1, para ambos, mas é possível a sua obtenção com recurso a e estudos ou métodos experimentais;

- k_{sf} corresponde a um coeficiente que tem em conta a superfície do painel de vidro, sendo os mesmos idênticos aos da norma apresentada anteriormente, EN 16612 (valores apresentados na Tabela 4.5);

- λ_{gA} corresponde a um fator de escala que tem em conta os possíveis defeitos no vidro, sendo obtido por uma expressão presente no documento normativo, limitado por 1;

- λ_{gl} corresponde a um fator de escala das tensões nos bordos, sendo obtido por uma expressão presente no documento normativo, limitado por 1;

- k_v corresponde ao coeficiente parcial para a tensão residual devido à têmpera, tal como outros parâmetros anteriores, este também se encontra de acordo com a norma EN 16612. Assim sendo, tem-se os mesmos presentes na Tabela 4.6;

- $f_{g,k}$ diz respeito ao valor característico da resistência à flexão do vidro recozido, ou seja, tal como já referido anteriormente, tem uma resistência à flexão de 45 MPa;

- $f_{b,k}$ corresponde aos valores característicos da resistência à flexão de acordo com o tipo de vidro sujeito a tratamento térmico. E, tal como também já foi apresentado anteriormente, tem-se para o vidro termo-endurecido, 70 MPa, para o temperado, 120 MPa, e para o temperado quimicamente, 150 MPa;

- $N_{cr}^{(E)}$ corresponde à carga crítica de Euler, obtida pela equação apresentada de seguida,

$$N_{cr}^{(E)} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_0^2} \quad (4.17)$$

- E corresponde ao módulo de elasticidade do vidro;

- I_y diz respeito à inércia da secção;

- L_0 corresponde ao comprimento de encurvadura.

Quanto aos elementos sujeitos à flexão, como é o caso das vigas, tem-se a verificação à encurvadura lateral e torsão. Assim sendo, deve ser verificada a seguinte condição,

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} \quad (4.18)$$

Onde,

- M_{Ed} corresponde ao momento fletor atuante;

- $M_{b,Rd}$ diz respeito ao momento fletor resistente à encurvadura, dado pela equação seguinte;

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times M_R \quad (4.19)$$

Sendo que,

- χ_{LT} corresponde ao coeficiente de redução da estabilidade lateral, obtido através da equação anteriormente apresentada (ver equação 4.13);

- α_{imp} e α_0 correspondem a fatores de imperfeição, sendo propostos os valores de 0,26 e 0,20 respetivamente;

- $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{LT}$ corresponde à esbelteza normalizada de torção do elemento estrutural, obtido pela seguinte equação;

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_x \times f_{g;k;st}}{M_{cr}^{(E)}}} \quad (4.20)$$

- W_x corresponde ao módulo de resistência elástico da secção, dado pela equação seguinte;

$$W_x = \frac{h_{ef,w} \times h^2}{6} \quad (4.21)$$

- $f_{g;k;st}$ corresponde à resistência à tração do material, obtida através da equação apresentada anteriormente, na equação 4.16;

- $M_{cr}^{(E)}$ corresponde ao momento crítico de Euler, obtida pela equação apresentada de seguida,

$$M_{cr}^{(E)} = C_1 \times \frac{\pi}{L} \times \sqrt{E \times J_{ed} \times G \times J_{t,tot}} \quad (4.22)$$

- C_1 corresponde a um fator de correção, relacionado com a distribuição do momento fletor, que pode ser aferido na Tabela 4.9: Coeficiente C1, em função da distribuição do momento fletor (adaptado de);

Tabela 4.9: Coeficiente C1, em função da distribuição do momento fletor (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))

Distribuição do momento fletor	C₁
Constante	1,00
Bi-linear	2,70
Parabólico	1,13
Triangular	1,36

- E corresponde ao módulo de elasticidade do vidro;

- J_{eq} diz respeito ao momento de inércia da secção, obtido através da equação apresentada em seguida. Salienta-se que a espessura efetiva é obtida através da equação 4.18;

$$J_{eq} = \frac{h_{ef,w} \times h^3}{12} \quad (4.23)$$

- G corresponde ao módulo de elasticidade tangencial do vidro;

- $J_{t,tot}$ diz respeito ao momento de inércia à torção da secção, sendo que para um vidro laminado constituído por três painéis é obtido através da equação seguinte;

$$J_{t,tot} = 2 \times J_{t,1} + J_{t,2} + J_{t,int} \quad (4.24)$$

- $J_{t,i}$ corresponde ao momento de inércia à torção de cada vidro monolítico;

$$J_{t,i} = \frac{h \times hi^3}{3} \quad (4.25)$$

- $J_{t,int}$ corresponde ao momento de inércia à torção do intercalar, que resulta da seguinte equação;

$$J_{t,int} = 4 \times d^2 \times A^* \times \left(1 - \frac{\tanh\left(\frac{\lambda \times h}{2}\right)}{\frac{\lambda \times h}{2}} \right) \quad (4.26)$$

- h corresponde à altura da viga;

- d corresponde a um parâmetro relacionado com às distâncias médias das placas de vidro que compõe o vidro laminado, resultando da equação apresentada anteriormente, a equação 4.20;

- A^* esta relacionado com a área da secção transversal, sendo obtido através da seguinte equação;

$$A^* = \frac{A_1 \times A_2}{A_1 + A_2} \quad (4.27)$$

- λ é obtido através da seguinte equação;

$$\lambda = \sqrt{\frac{GJ_{int}}{G} \times \frac{h_1 + h_2}{h_1 \times h_2 \times h_{int}}} \quad (4.28)$$

- M_R corresponde ao momento resistente elástico, dado pela equação seguinte;

$$M_R = W_x \times f_{g;d} \quad (4.29)$$

- $f_{g;d}$ corresponde à resistência à tração do material, obtida através da equação apresentada em seguida;

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} \times k_{ed} \times k_{sf} \times \lambda_{gA} \times \lambda_{gI} \times f_{g;k}}{R_M \times \gamma_M} + \frac{k'_{ed} \times k_v \times (f_{b;k} - f_{g;k})}{R_{M,v} \times \gamma_{M,v}} \quad (4.30)$$

- R_M corresponde a fatores de redução dos coeficientes parciais, sendo que os mesmos variam consoante a classe de verificações, sendo que toma o valor de 1 para as verificações de segunda classe, e inferior a um para as verificações de primeira classe, tal como se pode aferir na Tabela 4.10;

Tabela 4.10: Fatores de redução R_M (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))

Classe	Vidro recozido	Vidro sujeito a tratamento térmico
Primeira	$R_M = 0,7$	$R_{M,v} = 0,9$
Segunda	$R_M = 1$	$R_{M,v} = 1$

- γ_M corresponde ao fator parcial de segurança do vidro, que depende da resistência do mesmo. Assim sendo, tem-se para o vidro recozido e para os vidros sujeitos a tratamentos os valores apresentados na Tabela 4.11;

Tabela 4.11: Fatores parciais de segurança do vidro (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))

Tipo de vidro	Fator parcial de segurança
Vidro recozido	$\gamma_M = 2,50$
Vidro sujeito a tratamento	$\gamma_{M,V} = 1,35$

No que concerne ao vidro laminado, tal como na norma apresentada anteriormente, nos parâmetros correspondentes à espessura do vidro, deve ser adotada uma espessura efetiva obtida através da equação seguinte,

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12 \times \Gamma_b \times I_s} \tag{4.31}$$

Onde,

- Γ_b é obtido pela equação seguinte;

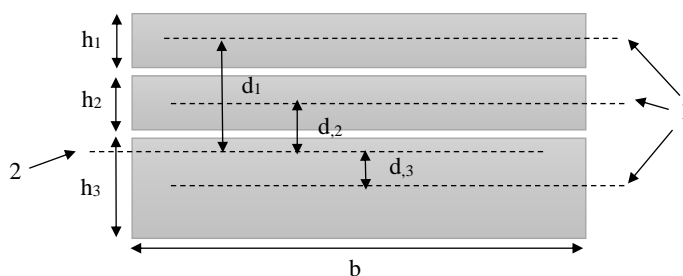
$$\Gamma_b = \frac{1}{1 + \pi^2 \times \beta \times \frac{h_{int} \times E \times I_s}{G_{int} \times \zeta^2 \times d^2}} \tag{4.32}$$

- β e ζ tomam o valor de 1;

- G_{int} corresponde ao módulo de elasticidade do intercalar;

- d corresponde a um parâmetro relacionado com às distâncias médias das placas de vidro que compõe o vidro laminado, resultando da equação apresentada em seguida (ver Figura 4.2);

$$d = d_1 + d_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} + h_{int} \tag{4.33}$$



1 – Plano médio de cada placa de vidro
2 – Plano médio do vidro laminado

Figura 4.2: Exemplo de dimensões das espessuras do vidro laminado (adaptado de (CNR-DT 210, 2013))

- I_s resulta da equação seguinte;

$$I_s = \frac{h_1 + h_2}{h_1 \times h_2} \times d^2 = h_1 \times d_1^2 + h_2 \times d_2^2 \tag{4.34}$$

5 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM VIDRO ESTRUTURAL

5.1 Generalidades

De modo a tornar o dimensionamento mais expedito de alguns elementos estruturais de uma estrutura em vidro, optou-se por gerar tabelas, com cargas limite para aplicação em pavimentos, coberturas e fachadas. Ainda, tabelas de esforços resistentes para vigas e pilares, com determinadas secções. E, ainda, gráficos com a combinação de esforços resistentes para os *glass fins*. Quanto ao tipo de vidro adotado para este estudo, optou-se por uma solução combinada de vidros dispostos de forma intercalada por uma película de PVB, ou seja, vidros laminados, constituídos por vidros recozidos, temperados e termo-endurecidos. Este vidro laminado adotado para o estudo será composto por três vidros com as mesmas espessuras.

Assim sendo, de forma a facilitar a obtenção dos resultados anteriormente mencionados, foram geradas folhas de cálculo com base na norma EN 16612, apresentada na Subsecção 4.3.1, e no documento técnico CNR-DT 210, apresentado na Subsecção 4.3.2, para os vários tipos elementos estruturais em estudo. Em seguida será explicado de forma mais detalhada o processo e resultados obtidos.

5.2 Folha de cálculo

5.2.1 Pisos, Coberturas e Fachadas

Relativamente aos elementos estruturais referentes aos pavimentos, coberturas e fachadas, optou-se por um estudo em termos das verificações de segurança, no que respeita à tensão e deformação, de acordo com a norma EN 16612. Para a obtenção dos resultados da tensão máxima e deformação máxima dos painéis retangulares apoiado em todas as bordas foi seguido o método proposto no anexo B do regulamento EN 16612, já apresentado na Subsecção 4.3.1.

No que concerne à verificação corresponde à deformação, visto que o regulamento em estudo não contempla um valor limite, optou-se por seguir limitações apresentadas na bibliografia consultada. Para a limitação da deformação máxima do painel aplicado em pisos e coberturas, considerou-se uma deformação inferior a $L/300$, limitação normalmente utilizada (Dufvenberg & Jönsson, 2014). Quanto às fachadas, a deformação deve ser inferior a $L/250$ (Pereira, 2012).

Com base na norma mencionada anteriormente e limitação da deformação, foi gerada uma folha de cálculo que contempla os passos a percorrer para a obtenção dos resultados. Na Figura 5.1 é possível

aferrir a folha de cálculo gerada, sendo que os campos a cinza correspondem aos valores a imputar, os restantes encontram-se já formatados com as equações correspondentes.

CARATERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro		ft,k		N/mm ²	n	0,2	
		fc,k	500	N/mm ²	α _T	9,00E-06	K ⁻¹
		E	70000	N/mm ²	ρ	2500	kg/m ³
Película intermédia	PVB	G	11	N/mm ²	ρ	1,07	g/cm ³
		f _y	28,1	N/mm ²	α _T	0,000412	K ⁻¹
		ε	275	%			
Secção	laminada 3 painéis	Dimensões do painel			Espessuras		
		a (menor)		mm	h _i		mm
		b		mm	n _i		
					h _v		mm
Tipo de estrutura							

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)		VARIÁVEIS (Qk)	
Peso próprio			kN/m ²
Peso extra			kN/m ²
		Vento	
			kN/m ²

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

<u>ELU</u> : F _d		kN/m ²
<u>ELS</u> : F _k		kN/m ²

VERIFICAÇÕES PANOS APOIADOS EM TODAS AS BORDAS (Anexo B EN 16612)

Determinação da espessura efetiva

h1		mm	h2		mm	h3		mm
hm,1		mm	hm,2		mm	hm,3		mm
ω								

Figura 5.1: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pisos e cobertura) e elementos de preenchimento (fachadas)

Espessura efetiva p/ Resistência		Espessura efetiva Deformação	
$h_{ef,\sigma,1}$	mm	$h_{ef,w}$	mm
$h_{ef,\sigma,2}$	mm		
$h_{ef,\sigma,3}$	mm		
λ		p^*	
Tensão máxima à flexão		Deformação máxima	
$z2$		$z1$	
$z3$			
$z4$			
$k1$		$k4$	
$s \max$	N/mm ²	$wmax$	mm
fg,d	N/mm ²	wd	mm
<u>VERDADEIRO/ FALSO</u>		<u>VERDADEIRO/ FALSO</u>	

Figura 5.1 (continuação): Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pisos e cobertura) e elementos de preenchimento (fachadas)

5.2.2 Vigas

Quanto aos elementos estruturais referente às vigas, optou-se por um estudo em termos das verificações de segurança, no que respeita à resistência à encurvadura lateral e deformação, de acordo com o documento técnico CNR-DT 210, apresentado na Subsecção 4.3.2.

No que diz respeito à verificação corresponde à deformação, visto que o regulamento em estudo não contempla um valor limite, optou-se por seguir limitações apresentadas na bibliografia consultada. Para a limitação da deformação das vigas, considerou-se uma deformação inferior a $L/300$, limitação normalmente utilizada (Dufvenberg & Jönsson, 2014).

Com base no documento mencionado anteriormente e limitação da deformação, foi gerada uma folha de cálculo que contempla os passos a percorrer para a obtenção dos resultados. Na Figura 5.2 é possível aferir a folha de cálculo gerada, sendo que os campos a cinza correspondem aos valores a imputar, os restantes encontram-se já formatados com as equações correspondentes.

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro		ft,k		N/mm ²	G	28000	N/mm ²
		fc,k	500	N/mm ²	α _T	9,00E-06	K ⁻¹
		E	70000	N/mm ²	ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB	G	11	N/mm ²	ρ	1,07	g/cm ³
		f _y	28,1	N/mm ²	α _T	0,000412	K ⁻¹
		ε	275	%			

Secção	laminada 3 painéis	Dimensões da viga			Espessuras		
		L		mm	h _i		mm
		h		mm	n _i		
		L _{inf}		mm	h _{int}		mm
		I		mm ⁴	h _{int,tot}		mm

Tipo de estrutura	Primária
-------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (G_k)

Peso próprio		kN/m
Peso extra		kN/m

VARIÁVEIS (Q_k)

		kN/m ²
--	--	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

	Base SC	
ELU: F _d		kN/m
ELS: F _k		kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

M _{sd}		kNm	V _{sd}		kN
-----------------	--	-----	-----------------	--	----

VERIFICAÇÃO FLECHA (EN 1993-1-1)

w _{ed}		mm	w _{lim}		mm
-----------------	--	----	------------------	--	----

VERDADEIRO/ FALSO

Figura 5.2: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (vigas)

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1		mm	h2		mm	h3		mm
d1		mm	d2		mm	d3		mm
Is		mm ³	d		mm	β e ζ	1	
Γb			A*		mm ²	λ		
h_{ef,w}		mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st		N/mm ²	fg;d		N/mm ²			
kmod			ked	1		ksf		
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv			RM	1		RM,v	1	
Wx		mm ³						
Mcr		Nmm	C1	1				
Je_q		mm ⁴	J_{t,tot}		mm ⁴			
J_{t,1}		mm ⁴	J_{t,2}		mm ⁴	J_{t,int}		mm ⁴
λ norm LT								
ØLT			σ_{imp}	0,26		σ₀	0,2	
xLT,cal			xLT					
Mr		Nmm						
M_{b,Rd}		Nmm			kNm			

VERDADEIRO/ FALSO

Figura 5.2 (continuação): Folha de cálculo para elementos estruturais primários (vigas)

5.2.3 Pilares

Relativamente aos pilares, elementos estruturais primários, optou-se por um estudo em termos das verificações de segurança, no que respeita à resistência à encurvadura por flexão-torção, de acordo com o documento técnico CNR-DT 210, apresentado na Subsecção 4.3.2. Note-se que este elemento funciona à compressão simples

Com base no documento mencionado anteriormente, foi gerada uma folha de cálculo que contempla os passos a percorrer para a obtenção dos resultados. Na Figura 5.3 é possível aferir a folha de cálculo gerada, sendo que os campos a cinza correspondem aos valores a imputar.

CARATERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO									
Vidro									
		ft,k		N/mm ²	G	28000	N/mm ²		
		fc,k	500	N/mm ²	α _T	9,00E-06	K ⁻¹		
		E	70000	N/mm ²	ρ	2500	kg/m ³		
Película intermédia	PVB	G	11	N/mm ²	ρ	1,07	g/cm ³		
		f _y	28,1	N/mm ²	α _T	0,000412	K ⁻¹		
		ε	275	%					
Secção	laminada 3 painéis	Dimensões da viga				Espessuras			
		L		mm	h _i		mm		
		h		mm	n _i		mm		
		A		mm ²	h _{int}		mm		
		I		mm ⁴	h _{int,tot}		mm		
		L _{inf x}		mm					
Tipo de estrutura	Primária	L _{inf y}		mm					
CARGAS E AÇÕES									
PERMANENTES (G_k)					VARIÁVEIS (Q_k)				
		Peso próprio		kN/m				kN/m ²	
		Peso extra		kN/m				kN/m ²	
AÇÕES CÁLCULO (psd)									
		Base SC							
<u>ELU</u> : F_d				kN/m					
<u>ELS</u> : F_k				kN/m					

Figura 5.3: Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pilares)

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Nsd kN

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	<input type="text"/>	mm	h2	<input type="text"/>	mm	h3	<input type="text"/>	mm
d1	<input type="text"/>	mm	d2	<input type="text"/>	mm	d3	<input type="text"/>	mm
Is	<input type="text"/>	mm ³	d	<input type="text"/>	mm	β e ζ	<input type="text"/>	1
Γb	<input type="text"/>		A*	<input type="text"/>	mm ²	λ	<input type="text"/>	
h_{ef,w}	<input type="text"/>	mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st	<input type="text"/>	N/mm ²	fg;d	<input type="text"/>	N/mm ²			
kmod	<input type="text"/>		ked	<input type="text"/>	1	ksf	<input type="text"/>	
λgA	<input type="text"/>	1	λgl	<input type="text"/>	1	k'ed	<input type="text"/>	1
kv	<input type="text"/>		RM	<input type="text"/>	1	RM,v	<input type="text"/>	1
Wx	<input type="text"/>	mm ³						
Ncr	<input type="text"/>	N	C1	<input type="text"/>	1	L0	<input type="text"/>	mm
λ	<input type="text"/>							
∅	<input type="text"/>		a_{imp}	<input type="text"/>	0,71	a0	<input type="text"/>	0,6
ξ_{cal}	<input type="text"/>		ξ	<input type="text"/>				
Nb,Rd	<input type="text"/>	N		<input type="text"/>	kN			

VERDADEIRO/ FALSO

Figura 5.3 (continuação): Folha de cálculo para elementos estruturais primários (pilares)

5.2.4 Glass fins

No que diz respeito aos *glass fins*, são elementos estruturais primários ou secundários, dependendo da sua função estrutural, que trabalham como elemento viga-coluna, uma vez que são sujeitos simultaneamente à compressão e à flexão. Deste modo tem-se um estudo em termos das verificações de segurança, no que respeita à resistência à encurvadura por flexão-torção e resistência à encurvadura lateral, de acordo com o documento técnico CNR-DT 210, apresentado na Subsecção 4.3.2.

Ainda, aplica-se o princípio da sobreposição de efeitos, para combinar as tensões normais resultantes do esforço axial e momento fletor, de onde resulta a seguinte equação:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq f_{g;d} \tag{5.1}$$

Com base no documento mencionado anteriormente, foi gerada uma folha de cálculo que contempla os passos a percorrer para a obtenção dos resultados. Na Figura 5.4 é possível aferir a folha de cálculo gerada, sendo que os campos a cinza correspondem aos valores a imputar, os restantes encontram-se já formatados com as equações correspondentes.

Note-se que para a limitação da deformação máxima optou-se por uma deformação inferior a L/250, tal como foi adotado para as fachadas.

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO																			
Vidro		ft,k		N/mm ²	G	28000	N/mm ²	fc,k	500	N/mm ²	α _T	9,00E-06	K ⁻¹	E	70000	N/mm ²	ρ	2500	kg/m ³
Película intermédia	PVB	G	11	N/mm ²	ρ	1,07	g/cm ³	fy	28,1	N/mm ²	α _T	0,000412	K ⁻¹	ε	275	%			
Secção	laminada 3 painéis	Dimensões da viga				Espessuras													
Tipo de estrutura		L		mm	hi		mm	h		mm	ni		mm	A		mm ²	hint		mm
		I		mm ⁴	hint,tot		mm	Linf x		mm				Linf y		mm			

Figura 5.4: Folha de cálculo para elementos estruturais secundários (*glass fins*)

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio		kN
Peso extra		kN

VARIÁVEIS (Qk)

Pavimento		kN
Cob. não acessível		kN
Vento		kN/m ²

AÇÕES CÁLCULO (psd)

	Axial		Lateral	
ELU: Fd		kN		kN/m
ELS: Fk		kN		kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Nsd		kN	Msd		kNm	Vsd		kN
-----	--	----	-----	--	-----	-----	--	----

ESPESSURA EFETIVA (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1		mm	h2		mm	h3		mm
d1		mm	d2		mm	d3		mm
Is		mm ³	d		mm	β e ζ		1
Γb			A*		mm ²	λ		
h _{ef,w}		mm						

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st		N/mm ²	fg;d		N/mm ²			
kmod			ked		1	ksf		
λgA			λgl		1	k'ed		1
kv			RM		1	RM,v		1
Wx		mm ³						
Ncr		N	C1		1	L0		mm

Figura 5.4 (continuação): Folha de cálculo para elementos estruturais secundários (glass fins)

λ			
ϕ		a_{imp}	0,71
		a₀	0,6
ξ_{cal}		ξ	
N_{b,Rd}			VERDADEIRO/ FALSO

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st		N/mm ²	fg;d		N/mm ²
k_{mod}			k_{ed}	1	k_{sf}
λ_{gA}	1		λ_{gl}	1	k'ed
k_v			RM	1	RM,v
W_x		mm ³			
M_{cr}		Nmm	C1	1	
J_{eq}		mm ⁴	J_{t,tot}		mm ⁴
J_{t,1}		mm ⁴	J_{t,2}		mm ⁴
			J_{t,int}		mm ⁴
λ norm LT					
φ_{LT}			a_{imp}	0,26	a₀
					0,2
ξ_{LT,cal}			ξ_{LT}	0	
M_r		Nmm			
M_{b,Rd}		Nmm			VERDADEIRO/ FALSO

VERIFICAÇÃO FLEXÃO-COMPRESSÃO

S_{max}		N/mm ²	fg;d		N/mm ²	VERDADEIRO/ FALSO
------------------------	--	-------------------	-------------	--	-------------------	--------------------------

VERIFICAÇÃO FLECHA

δ_{ed}		mm	δ_{max}		mm	VERDADEIRO/ FALSO
-----------------------	--	----	------------------------	--	----	--------------------------

Figura 5.4 (continuação): Folha de cálculo para elementos estruturais secundários (*glass fins*)

5.3 Tabelas e Gráficos de Pré-dimensionamento

5.3.1 Pavimento e Cobertura

Relativamente aos elementos estruturais referentes aos pavimentos e coberturas, optou-se por um estudo em termos das verificações de segurança, no que respeita à tensão e deformação, de acordo com a norma EN 16612. A obtenção dos resultados da tensão máxima e deformação máxima dos painéis retangulares apoiado em todas as bordas, foi seguido o método proposto no anexo B do regulamento EN 16612, já apresentado na Subsecção 4.3.1. Quanto à limitação da deformação máxima do painel, considerou-se uma deformação inferior a $L/300$, tal como já mencionado anteriormente.

Deste modo, para tornar um pré-dimensionamento mais expedito, foram geradas tabelas que contemplam os valores de cargas limite, em kN/m^2 , para painéis retangulares de vidro laminado, constituídos por três camadas dos mesmos tipos de vidro e espessuras. Estas cargas correspondem às ações adicionais, à exceção do peso próprio do vidro, tais como: revestimentos, paredes divisórias e outras. É de salientar que os valores presentes são majorados, sendo utilizada a combinação presente na equação 4.1.

Quanto às dimensões adotadas para os painéis, fixou-se a largura com 3,21 m e o comprimento variável, desde 1 m a 6 m. Em seguida são apresentadas as tabelas resultantes para a aplicação em pavimentos e coberturas.

Tabela 5.1: Cargas limite (F_d) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro recozido, presentes em pavimentos ou coberturas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro recozido) com largura de 3,21m						
Espessuras do vidro						
Comprimento	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	3,6	6,1	9,0	14,6	23,9	42,2
1,5	-	-	3,9	6,5	11,1	20,0
2	-	-	2,3	3,9	6,9	12,8
2,5	-	-	-	<u>2,6</u>	5,2	10,0
3	-	-	-	<u>1,5</u>	<u>3,5</u>	<u>8,8</u>
3,5	-	-	-	-	<u>2,5</u>	<u>6,6</u>
4	-	-	-	-	<u>2,1</u>	5,2
4,5	-	-	-	-	1,9	4,2
5	-	-	-	-	-	3,5
5,5	-	-	-	-	-	3,1
6	-	-	-	-	-	2,7

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m^2) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

Tabela 5.2: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro termo-endurecido, presentes em pavimentos ou coberturas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro termo-endurecido) com largura de 3,21m						
Espessuras do vidro						
Comprimento	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	9,0	14,7	21,6	-	-	-
1,5	<u>3,2</u>	<u>5,4</u>	<u>8,7</u>	-	-	-
2	-	-	<u>2,8</u>	-	-	-
2,5	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m²) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

Tabela 5.3: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro temperado, presentes em pavimentos ou coberturas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro temperado) com largura de 3,21m						
Espessuras do vidro						
Comprimento	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	<u>11,6</u>	<u>21,7</u>	<u>37</u>	<u>71,5</u>	118	205,1
1,5	<u>3,2</u>	<u>5,4</u>	<u>8,7</u>	<u>16,2</u>	<u>32,5</u>	<u>74,1</u>
2	-	-	<u>2,8</u>	<u>5,5</u>	<u>11,7</u>	<u>27,4</u>
2,5	-	-	-	<u>2,6</u>	<u>5,7</u>	<u>13,9</u>
3	-	-	-	<u>1,5</u>	<u>3,5</u>	<u>8,8</u>
3,5	-	-	-	-	<u>2,5</u>	<u>6,6</u>
4	-	-	-	-	<u>2,1</u>	<u>5,8</u>
4,5	-	-	-	-	<u>2,0</u>	<u>5,4</u>
5	-	-	-	-	<u>1,9</u>	<u>5,2</u>
5,5	-	-	-	-	<u>1,9</u>	<u>5,4</u>
6	-	-	-	-	<u>1,9</u>	<u>5,4</u>

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m²) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

5.3.2 Vigas

Tal como referido anteriormente, optou-se pela análise dos elementos estruturais com vidro laminado, composto por três camadas. Deste modo, para o elemento estrutural viga, sendo este elemento do tipo primário, fez-se uma análise de vidros com espessuras variáveis e diversos tipos de vidro, com altura de viga variável, de acordo com o documento técnico CNR-DT 210, apresentado na Subsecção 4.3.2, determinou-se os momentos resistentes.

Note-se, que para a limitação da deformação máxima das vigas optou-se por uma deformação inferior a $L/300$, limitação normalmente utilizada (Dufvenberg & Jönsson, 2014).

Em seguida, serão apresentadas tabelas com os momentos resistentes de vigas com diferentes alturas, 300mm, 400mm e 500mm, e espessuras variáveis.

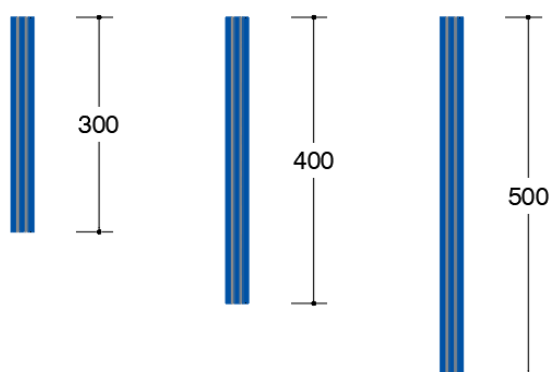


Figura 5.5: Secções das vigas em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm)

Tabela 5.4: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 300mm

Mrd (kNm) de viga com 300mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	2,1	2,7	3,2	4,0	5,1	6,7
Temperado	11,7	14,7	17,6	22,0	27,9	36,7
Termo-endurecido	5,3	6,7	8,0	-	-	-

Tabela 5.5: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 400mm

Mrd (kNm) de viga com 400mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	3,8	4,7	5,7	7,1	9,0	11,9
Temperado	20,9	26,1	31,3	39,2	49,6	65,3
Termo-endurecido	9,5	11,9	14,3	-	-	-

Tabela 5.6: Momento resistente de vigas em vidro laminado de 3 camadas com altura de 500mm

Mrd (kNm) de viga com 500mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	5,9	7,4	8,9	11,2	14,2	18,6
Temperado	32,6	40,8	49,0	61,2	77,6	102,1
Termo-endurecido	14,8	18,5	22,3	-	-	-

5.3.3 Pilares

Relativamente aos pilares, segundo a bibliografia, já foram alvo de estudos diversos tipos de secções, neste caso adotou-se uma secção em cruz, tal como é possível aferir na Figura 5.6. Optou-se

por apresentar o esforço axial resistente para pilares com a secção variável em altura ou largura e espessuras de vidro. Relativamente à altura dos mesmos, fixou-se a mesma em 3,21 m.

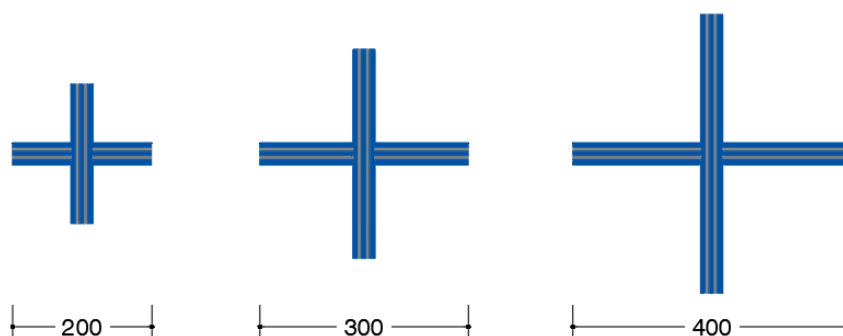


Figura 5.6: Secções dos pilares em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm)

Note-se que os esforços axiais resistentes foram obtidos com base na verificação de resistência à encurvadura por flexão-torção, apresentada no documento técnico CNR-DT 210 (ver Subsecção 4.3.2).

Em seguida serão apresentadas tabelas com os esforços axiais resistentes resultantes de pilares com as secções previamente apresentadas.

Tabela 5.7: Esforço axial resistente de pilares com altura de 200mm

Nrd (kN) de pilar com 200mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	1,2	2,3	3,9	7,3	14,2	29,9
Temperado	2,1	4,0	6,8	12,9	25,5	55,6
Termo-endurecido	1,7	3,3	5,6	-	-	-

Tabela 5.8: Esforço axial resistente de pilares com altura de 300mm

Nrd (kN) de pilar com 300mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	1,8	3,5	5,9	11,0	21,3	44,8
Temperado	3,1	6,0	10,2	19,4	38,3	83,4
Termo-endurecido	2,6	5,0	8,4	-	-	-

Tabela 5.9: Esforço axial resistente de pilares com altura de 400mm

Nrd (kN) de pilar com 400mm						
Tipo de vidro	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
Recozido	2,4	4,6	7,8	14,7	28,4	59,8
Temperado	4,2	8,0	13,6	25,9	51,0	111,3
Termo-endurecido	3,5	6,7	11,3	-	-	-

5.3.4 Glass fins

Relativamente aos *glass fins*, considerou-se um elemento estrutural primário, de modo que trabalhe em conjunto com toda a estrutura principal. Optou-se por gerar gráficos de pré-dimensionamento que contemplam os esforços resistentes dos mesmos, esforço axial resistente e momento fletor resistente. A secção adotada foi uma secção retangular, tal como é possível aferir na Figura 5.7, sendo variável em altura e largura. Quanto à altura do elemento em estudo, fixou-se a mesma em 3,21 m.

Note-se que os esforços resistentes foram obtidos com base na verificação de resistência à encurvadura por flexão-torção e resistência à encurvadura lateral, apresentada no documento técnico CNR-DT 210 (ver Subsecção 4.3.2).

De modo a ter em conta o princípio da sobreposição de efeitos, para combinar as tensões normais resultantes do esforço normal e momento fletor, foram então gerados gráficos que contemplam a evolução dos esforços resistentes para as secções em estudo.

Em seguida, serão apresentados gráficos que contemplam a evolução dos esforços resistentes para secções com diferentes alturas, 300mm, 400mm e 500mm (ver Figura 5.7). Os mesmos têm em conta o princípio da sobreposição de efeitos, para combinar as tensões normais resultantes do esforço axial e momento fletor.

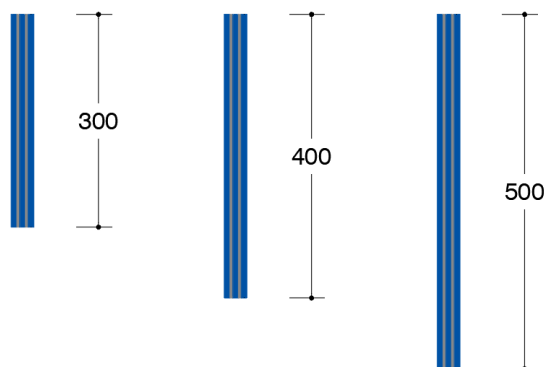


Figura 5.7: Secções dos *glass fins* em vidro laminado adotadas e espessuras de vidros variáveis (dimensões em mm)

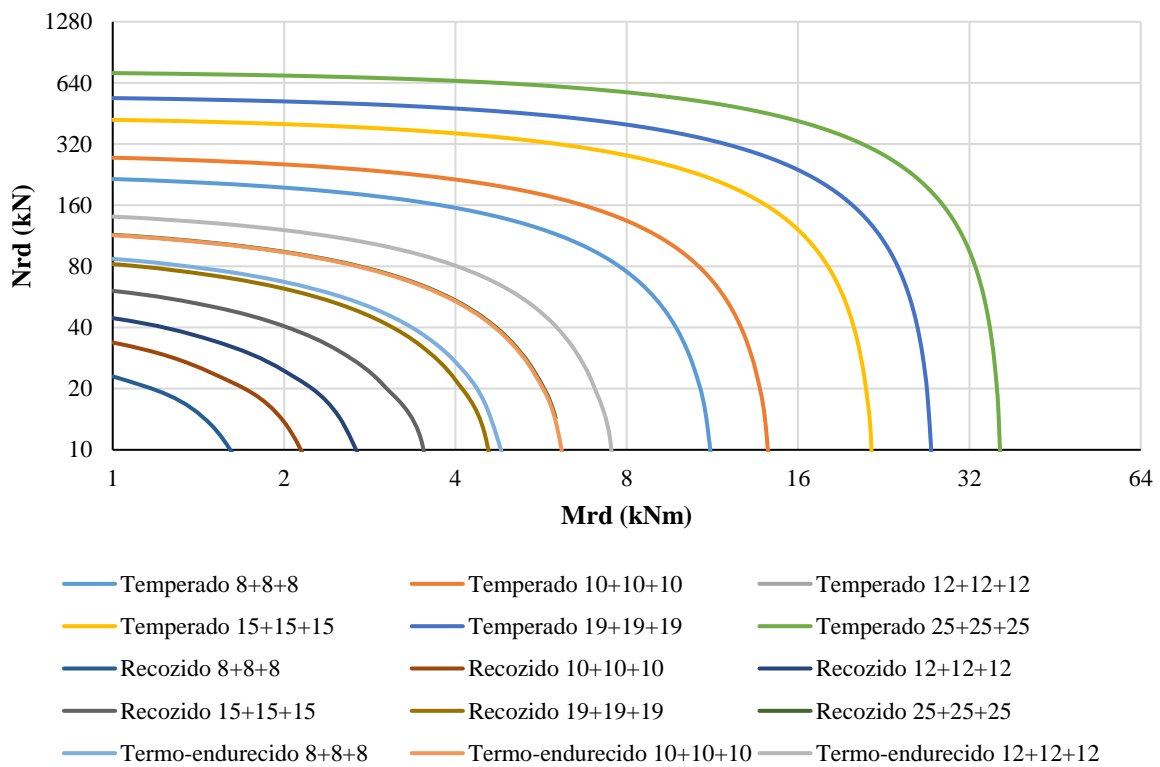


Figura 5.8: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos *glass fins*, com 300mm de altura em vidro laminado

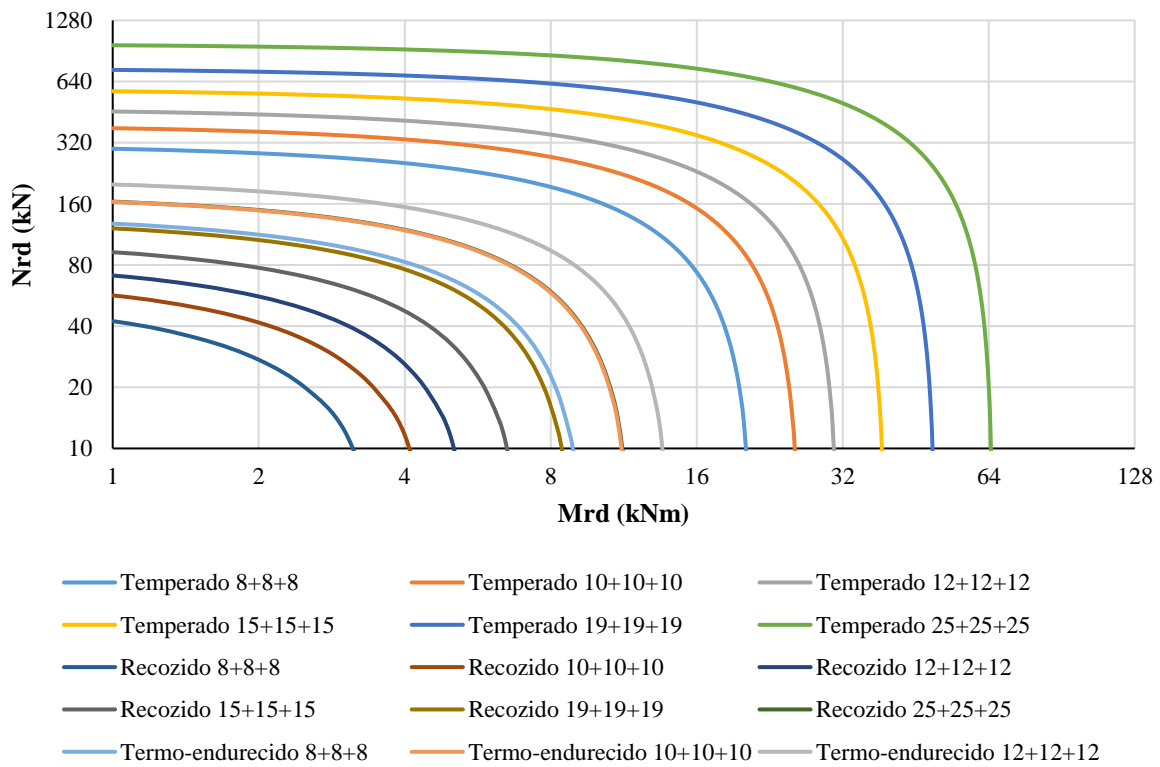


Figura 5.9: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos *glass fins*, com 400mm de altura em vidro laminado

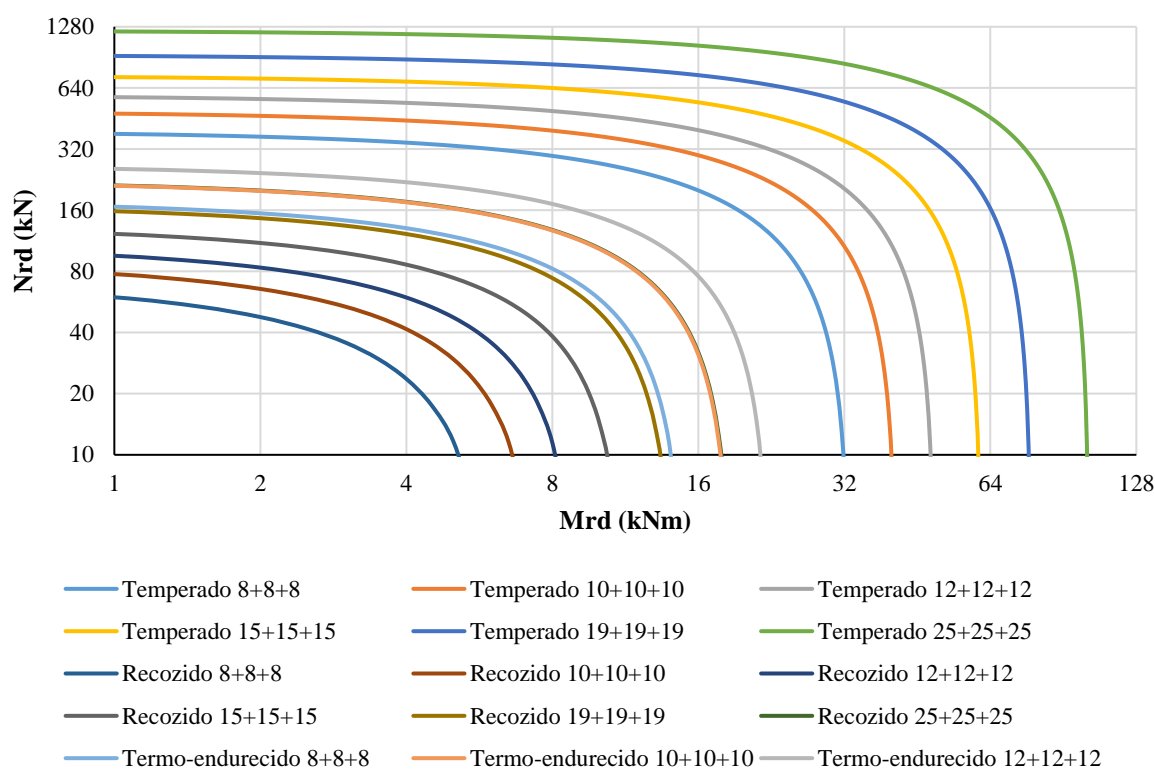


Figura 5.10: Gráfico dos esforços resistentes dos elementos glass fins, com 500mm de altura em vidro laminado

5.3.5 Fachadas

Quanto às fachadas em vidro, os painéis adotados para esta aplicação tomam o tipo de estrutura de preenchimento. Tal como para os pavimentos e coberturas, optou-se por um estudo em termos das verificações de segurança, referentes à tensão e deformação, resultando assim das cargas limite, já majoradas.

Relativamente à obtenção dos resultados da tensão máxima e deformação máxima dos painéis retangulares apoiado em todas as bordas, foi seguido o método proposto no anexo B do regulamento EN 16612, já apresentado na Subsecção 4.3.1. Note-se que para a limitação da deformação máxima do painel optou-se por uma deformação inferior a $L/250$, tal como mencionado na Subsecção 5.2.1.

Em seguida, é possível aferir nas tabelas os valores de cargas limite, em kN/m^2 , para painéis retangulares de vidro laminado, constituídos por três camadas dos mesmos tipos de vidro e espessuras. Estas cargas correspondem às ações adicionais, à exceção do peso próprio do vidro, tais como: o vento e outras. É de salientar que os valores presentes são majorados, sendo utilizada a combinação presente na equação 4.1. Quanto às dimensões adotadas para os painéis, fixou-se a largura com 3,21 m e o comprimento variável, desde 1 m a 6 m. Em seguida são apresentadas as tabelas resultantes.

Tabela 5.10: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro recozido, presentes em fachadas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro recozido) com largura de 3,21m

Comprimento	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	4,2	6,8	10,0	16,0	26,1	46,0
1,5	1,8	3,0	4,5	7,4	12,3	22,2
2	-	-	-	4,6	7,9	14,4
2,5	-	-	-	<u>2,5</u>	6,1	11,2
3	-	-	-	<u>1,2</u>	<u>3,6</u>	<u>9,9</u>
3,5	-	-	-	-	<u>2,4</u>	<u>7,4</u>
4	-	-	-	-	<u>1,9</u>	6,3
4,5	-	-	-	-	<u>1,8</u>	5,1
5	-	-	-	-	<u>1,6</u>	4,4
5,5	-	-	-	-	<u>1,6</u>	3,9
6	-	-	-	-	<u>1,6</u>	3,6

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m²) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

Tabela 5.11: Cargas limite (Fd) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro temperado, presentes em fachadas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro temperado) com largura de 3,21m

Comprimento	Espessuras do vidro					
	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	<u>12,0</u>	<u>24,0</u>	<u>42,1</u>	74,6	120,2	208,8
1,5	<u>2,0</u>	<u>4,6</u>	<u>8,2</u>	<u>17,6</u>	<u>37,0</u>	<u>86,5</u>
2	-	-	-	<u>6,0</u>	<u>13,3</u>	<u>32,1</u>
2,5	-	-	-	<u>2,5</u>	<u>6,2</u>	<u>16,0</u>
3	-	-	-	<u>1,2</u>	<u>3,6</u>	<u>9,9</u>
3,5	-	-	-	-	<u>2,4</u>	<u>7,4</u>
4	-	-	-	-	<u>1,9</u>	<u>6,3</u>
4,5	-	-	-	-	<u>1,8</u>	<u>6,0</u>
5	-	-	-	-	<u>1,6</u>	<u>5,8</u>
5,5	-	-	-	-	<u>1,6</u>	<u>5,8</u>
6	-	-	-	-	<u>1,6</u>	<u>5,8</u>

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m²) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

Tabela 5.12: Cargas limite (F_d) a aplicar em painéis de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro termo-endurecido, presentes em fachadas

Painel de vidro laminado (3 painéis vidro termo-endurecido) com largura de 3,21m						
Espessuras do vidro						
Comprimento	8+8+8	10+10+10	12+12+12	15+15+15	19+19+19	25+25+25
1	9,7	15,4	22,5	-	-	-
1,5	<u>2,0</u>	<u>4,6</u>	<u>8,6</u>	-	-	-
2	-	<u>1,2</u>	<u>2,6</u>	-	-	-
2,5	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-	-	-

Nota: Os valores das cargas limite representadas (em kN/m^2) indicam o fator condicionante do dimensionamento. Ou seja, os valores que não estão sublinhados indicam que a tensão máxima à flexão foi o fator condicionante, os sublinhados o fator de condicionamento foi a deformação.

6 CASO DE ESTUDO

Uma vez efetuado um estudo acerca de algumas normas existentes para a aplicação no dimensionamento de determinados elementos estruturais em vidro e geradas tabelas e gráficos de pré-dimensionamento, de acordo com as normas apresentadas anteriormente nesta dissertação, optou-se por aplicar tais conhecimentos e tabelas/ gráficos num exemplo de uma estrutura criada para efeito. Deste modo, em seguida será apresentado um dimensionamento de uma estrutura gerada pelo autor para a aplicação das normas apresentadas na Secção 4.3 e elementos de pré-dimensionamento apresentadas no Capítulo 5.

6.1 Generalidades

Para o desenvolvimento do caso de estudo optou-se por projetar uma estrutura regular (ver anexo III), apresentada em seguida. A mesma contempla dois pisos, sendo os pavimentos dos mesmos em vidro, apoiados em vigas e pilares igualmente em vidro, bem como *glass fins*. Note-se que é previsto ainda toda uma fachada em torno da estrutura em vidro (ver Figura 6.1). Efetuou-se uma análise em termos de tensões e deformações.

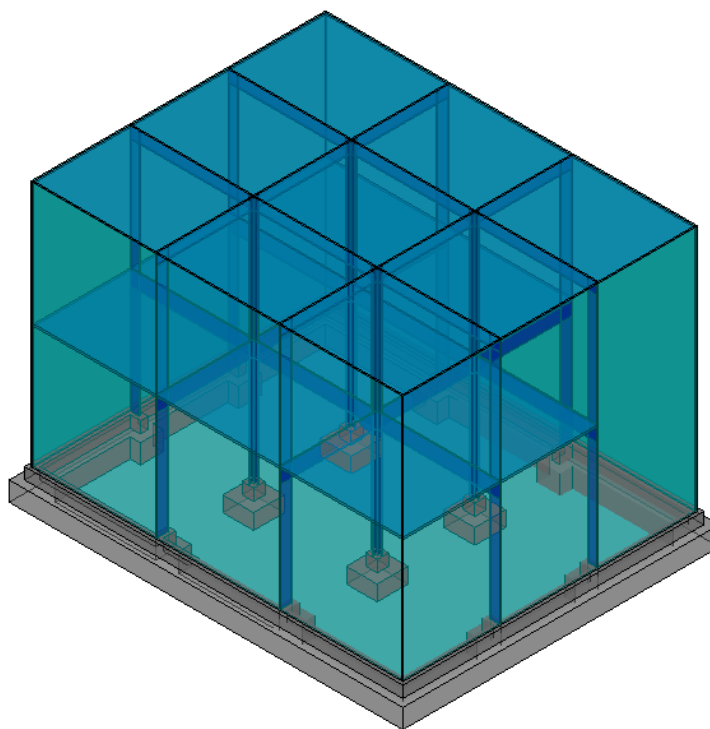


Figura 6.1: Perspetiva da estrutura projetada para o caso de estudo

No que concerne à estrutura propriamente dita, o tipo de vidro a utilizar acaba por ser à escolha do projetista, uma vez que essa informação não é estipulada nos regulamentos, apenas tem-se algumas

recomendações. A escolha do tipo de vidro deve ser bem ponderada tendo em conta as aplicações, de modo que o elemento possua um bom comportamento em termos de resistência mecânica e pós-rotura.

Assim sendo, optou-se por uma solução combinada de vidros dispostos de forma intercalada por uma película de PVB, ou seja, vidros laminados, constituídos por vidros temperados, visto que possuem uma melhor resistência, termo-endurecidos, por possuírem um melhor comportamento após a rotura, e, também, recozidos. Salienta-se que não é comum adotar uma solução de vidro laminado composto exclusivamente por vidro temperado.

No caso de haver rotura de alguns dos painéis de vidro constituintes do vidro laminado, a restante estrutura deve permanecer em segurança até à reparação ou substituição do mesmo, sendo então fundamental ter isto em conta no dimensionamento da estrutura. Há empresas, como a *SaintGobain*, que recomendam que seja acrescido de um painel de vidro na constituição do laminado com a mesma espessura para garantir uma maior segurança (Sanches, 2013).

Quando se trata de um vidro suscetível à circulação de pessoas, deve ser adotado um revestimento antiderrapante visto que é um material que possui um coeficiente de atrito muito reduzido (Sanches, 2013).

6.2 Ações

Para a análise da estrutura utilizou-se as ações permanentes e variáveis que se encontram de acordo com a EN1991, apresentadas em seguida. Salienta-se que para este dimensionamento não se considerou a ação sísmica.

6.2.1 Cargas permanentes

No que diz respeito às cargas permanentes, utilizou-se as seguintes:

- Peso volúmico do vidro: 25 kN/m^3
- Peso extra no pavimento: $1,25 \text{ kN/m}^2$

6.2.2 Cargas Variáveis

Em relação às cargas variáveis, teve-se em conta as sobrecargas e o vento, como se pode verificar em seguida.

6.2.2.1 Sobrecargas

- Cobertura não acessível: 1 kN/m^2
- Pavimento: 2 kN/m^2

6.2.2.2 Vento

De acordo com a EN1991-1-4, obteve-se para a ação do vento uma pressão de 1,18 kN/m², tal como é possível aferir no anexo III.

6.3 Combinações

A verificação de segurança em relação aos estados limites últimos consiste em verificar se os esforços atuantes são inferiores aos resistentes. Os valores de cálculo dos esforços atuantes para esta verificação de segurança são obtidos através de uma equação já apresentada anteriormente, na Subsecção 4.3.1 (ver equação 4.1). Para a verificação do estado limites de utilização, aplicou-se a expressão também já apresentada na Subsecção 4.3.1 (ver equação 4.2).

6.4 Regulamentos e Normas

Para a elaboração deste projeto, utilizaram-se os seguintes regulamentos e normas:

- NP EN 1990 – Eurocódigo: Bases para o projecto de estruturas;
- NP EN 1991 – Eurocódigo 1: Ações em estruturas;
- EN 16612 – “*Glass in building - Determination of the load resistance of glass*”;
- CNR-DT 210 – “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*”.

6.5 Verificação de segurança

6.5.1 Pavimento

Quanto aos pavimentos, destinado à circulação de pessoas, uma vez que os painéis retangulares se encontram apoiados em todas as bordas, é utilizado o método presente na norma EN 16612, sendo que o mesmo foi explicado com detalhe na Subsecção 4.3.1. Em relação às dimensões dos panos presentes no projeto proposto, os mesmos possuem as seguintes dimensões: 2,54 m e 3,21 m.

Feita uma análise das tabelas de pré-dimensionamento apresentadas na Subsecção 5.3.1, visto que a carga a adotar para a seleção da mesma deve ser majorada, retirando o peso próprio, obteve-se o seguinte resultado,

$$F_d = 1,35 \times 1,25 + 1,5 \times 2 = 4,7 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (6.1)$$

Assim sendo, tendo em conta as dimensões do painel retangular e a carga resultante, chega-se à conclusão que para este caso não é possível adotar uma solução de vidro laminado, constituído por 3 painéis de vidro termo-endurecido. No caso de o vidro laminado ser composto por três painéis de vidro

recozido, é possível adotar uma solução de vidros com espessura de 19 mm cada. No caso de os mesmos serem temperados, passa igualmente por uma solução de vidros com 19 mm de espessura cada.

Assim sendo, adotou-se então uma solução de vidro laminado constituído três painéis de vidros recozidos com 19 mm de espessura cada. Em seguida serão apresentados os resultados das verificações da tensão e deformação resultantes, mas é possível aferir no anexo IV, com maior detalhe, os valores obtidos para este elemento estrutural com recurso à folha de cálculo apresentada na Subsecção 5.2.1.

No que concerne à verificação da tensão máxima à flexão, obteve-se os seguintes resultados,

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \rightarrow 15,91 \leq 22,25 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.2)$$

Quanto à verificação relativa à deformação máxima, foram obtidos os resultados seguintes,

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 8,01 \leq 10,70 \text{ (mm)} \quad (6.3)$$

6.5.2 Cobertura

Tal como os painéis aplicados nos pavimentos, os painéis aplicados na cobertura possuem as dimensões: 2,54 m e 3,21 m.

No que concerne à carga a utilizar nas tabelas de pré-dimensionamento apresentadas na Subsecção 5.3.1, a mesma deve ser majorada, retirando o peso próprio. Assim sendo, obteve-se o seguinte resultado,

$$F_d = 1,5 \times 1 = 1,5 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (6.4)$$

Tendo em conta as tabelas apresentadas na Subsecção 5.3.1, para a dimensão do painel, verifica-se que é possível adotar um vidro laminado, composto por três vidros recozidos ou temperados de 15 mm. Assim sendo, optou-se pela solução do vidro recozido.

No que concerne aos resultados das verificações mais detalhadas, é possível observar-se no anexo V. Resumidamente, em seguida são apresentados os resultados obtidos na verificação da tensão máxima à flexão e da verificação relativa à deformação, respetivamente,

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \rightarrow 11,66 \leq 17,25 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.5)$$

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 4,98 \leq 10,70 \text{ (mm)} \quad (6.6)$$

6.5.3 Vigas

Com base no projeto proposto, tal como é possível aferir, os maiores vãos que se podem encontrar, tanto para as vigas no pavimento, como para a cobertura, são de 3,21m. De modo a ser mais coerente,

optou-se por dimensionar as vigas mais condicionantes, por piso, igualando assim em termos de espessura e altura para as restantes.

Desta forma, determinadas as ações de cálculo, com base nas combinações já mencionadas na Subsecção 4.3.1, e as vigas tendo um comportamento simplesmente apoiado, obteve-se um momento de cálculo de 16,33 kNm numa viga aplicada no pavimento e 7,32 kNm na cobertura.

Com base nos esforços obtidos fez-se uma análise das tabelas de pré-dimensionamento apresentadas na Subsecção 5.2.2.

Assim sendo, para as vigas de pavimento chega-se à conclusão que as soluções possíveis passam por: viga com altura de 300 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado com 12 mm de espessura cada; viga com altura de 400 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado com espessuras de 8 mm; viga com altura de 500 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro recozido com 25 mm de espessura cada; viga com altura de 500 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado com 8 mm de espessura cada; e, viga com altura de 500 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro termo-endurecido com 10 mm de espessura cada.

Em relação as vigas de cobertura, de acordo com o momento fletor obtido, as soluções possíveis passam por: viga com altura de 300 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado com 8 mm de espessura cada; viga com altura de 300 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro termo-endurecido com 12 mm de espessura cada; viga com altura de 400 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro recozido com 19 mm de espessura cada; viga com altura de 400 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado ou termo-endurecido com 8 mm de espessura cada; viga com altura de 500 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro recozido com 10 mm de espessura cada; e, viga com altura de 500 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado ou termo-endurecido com 8 mm de espessura cada.

Tal como já mencionado anteriormente, não é muito comum a escolha de uma solução de vidro laminado constituída exclusivamente por vidro temperado, deste modo adotou-se a solução da viga com altura de 500 mm com vidro laminado, composto por três painéis de vidro termo-endurecido com 10 mm de espessura cada, para as vigas do pavimento. Quanto às vigas de cobertura, optou-se pela solução de viga com altura de 400 mm, com vidro laminado composto por três painéis de vidro termo-endurecido com 8 mm de espessura cada.

Note-se que para além da escolha expedita, foi ainda efetuada uma verificação mais detalhada para os elementos em estudo. É possível aferir no anexo VI e VII, os resultados obtidos com mais detalhe para as verificações de segurança.

Relativamente à verificação da resistência à encurvadura lateral, os resultados obtidos foram os seguintes:

- Para o pavimento,

$$M_{sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 16,33 \leq 18,60 \text{ (kNm)} \quad (6.7)$$

- Para a cobertura,

$$M_{sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 7,32 \leq 9,52 \text{ (kNm)} \quad (6.8)$$

A deformação máxima calculada, w_{max} , não deve ser superior à deformação de cálculo, w_d , na condição mais desfavorável. Deste modo, efetuados os cálculos foram obtidos os seguintes resultados:

- Para o pavimento,

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 1,07 \leq 10,70 \text{ (mm)} \quad (6.9)$$

- Para a cobertura,

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 0,99 \leq 10,70 \text{ (mm)} \quad (6.10)$$

6.5.4 Pilares

Quanto aos pilares, do mesmo modo que as vigas, optou-se por dimensionar o pilar mais condicionante de cada piso. Deste modo resultou de um esforço axial de cálculo de 86,48 kN para o pilar do primeiro piso, e 27,39 kN para o pilar do segundo piso.

De acordo com as tabelas apresentadas na Subsecção 5.3.3, chegou-se à conclusão que para o pilar do primeiro piso era possível uma única solução, de acordo com as dimensões apresentadas. A solução para o pilar do primeiro piso passa por uma secção em cruz, de dimensões laterais de 400 mm, em vidro laminado composto por três painéis de vidro temperado com 25 mm de espessura cada.

No que concerne ao pilar do segundo piso, após a análise das tabelas de pré-dimensionamento, chegou-se à conclusão de que as opções são algumas. Sendo assim, é possível ter-se pilares com secção em cruz, em vidro laminado, com: laterais com 200 mm e vidro laminado constituído por três painéis de vidro recozido ou temperado de 25 mm de espessura cada; laterais com 300 mm e vidro laminado constituído por três painéis de vidro recozido de 25 mm de espessura cada; laterais com 300 mm e vidro laminado constituído por três painéis de vidro temperado de 19 mm de espessura cada; e, laterais com 400 mm e vidro laminado constituído por três painéis de vidro recozido ou temperado de 19 mm de espessura cada. Com base nas opções possíveis, optou-se pelo pilar com 400 mm de dimensões laterais, em vidro laminado, constituído por três painéis de vidro recozido de 19 mm de espessura cada.

Em relação às verificações de resistência à encurvadura por flexão-torção efetuadas aos pilares, é possível aferir nos anexos VIII e IX com maior detalhe. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos pela verificação, para ambos os pilares:

- Pilar do primeiro piso,

$$N_{sd} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 86,48 \leq 117,42 \text{ (kN)} \quad (6.11)$$

- Pilar do segundo piso,

$$N_{sd} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 27,39 \leq 30,54 \text{ (kN)} \quad (6.12)$$

6.5.5 Glass fins

Os elementos *glass fins* foram igualmente verificados do mesmo modo que os elementos estruturais anteriores, vigas e pilares. Note-se que estes elementos estruturais estão sujeitos a ações resultantes do pavimento e cobertura, e ainda a ações laterais resultantes do vento. Uma vez determinadas as ações, para ambos os pisos, determinou-se os esforços axiais e momentos fletores. Deste modo, para o *glass fin* mais condicionante do primeiro piso, o esfoço axial obtido foi de 43,32 kN, e o momento resultou em 74,50 kNm. Enquanto o *glass fin* do segundo piso resultou de um esforço axial de 13,61 kN e momento fletor de 23,20 kNm.

De acordo com os gráficos de pré-dimensionamento presentes na Subsecção 5.3.4, observou-se a possibilidade da seguinte solução, para o caso do *glass fin* do primeiro piso: altura de 500 mm em vidro laminado constituído por três painéis de vidro temperado com espessura de 25 mm cada. Quanto aos *glass fins* do segundo piso, as possibilidades passam por: altura de 300 mm em vidro laminado constituído por três painéis de vidro temperado com espessura de 19 mm cada; altura de 400 mm em vidro laminado constituído por três painéis de vidro temperado com espessura de 10 mm cada; e, altura de 500 mm em vidro laminado constituído por três painéis de vidro temperado com espessura de 8 mm cada.

Sendo assim, tem-se para o primeiro piso *glass fins* cuja secção em vidro laminado tem 500 mm de altura e é constituído por três painéis de vidro temperado com espessuras de 25 mm cada, e, para o segundo piso *glass fins* com altura de 500 mm e painéis constituintes do vidro laminado em vidro temperado com 8 mm de espessura.

Através dos esforços de cálculo obtidos e a dimensão conseguida com recurso às tabelas, foram efetuadas as verificações de segurança para este elemento, tal como é possível aferir no anexo X e XI de forma mais detalhada. No entanto, de forma resumida, apresentam-se os seguintes resultados:

- *Glass fin* do primeiro piso,

$$N_{sd} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 43,32 \leq 1225,47 \text{ (kN)} \quad (6.13)$$

$$M_{sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 74,50 \leq 103,48 \text{ (kN)} \quad (6.14)$$

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d} \rightarrow 52,70 \leq 67,98 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.15)$$

– *Glass fin* do segundo piso,

$$N_{sd} \leq N_{b,Rd} \rightarrow 13,616 \leq 392,15 \text{ (kN)} \quad (6.16)$$

$$M_{sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow 23,20 \leq 33,11 \text{ (kNm)} \quad (6.17)$$

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d} \rightarrow 61,30 \leq 67,98 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.18)$$

6.5.6 Fachadas

Relativamente aos elementos nas fachadas, que são considerados elementos de preenchimento, é possível aferir no projeto que existem dois tipos de painéis com diferentes dimensões. Tem-se então painéis com 2,54 x 3,21 m e 3,21 x 3,21 m.

Feita uma análise das tabelas de pré-dimensionamento apresentadas na Subsecção 5.3.5, visto que a carga a adotar para a seleção da mesma deve ser majorada, retirando o peso próprio, obteve-se o seguinte resultado,

$$F_d = 1,2 \times 1,18 = 1,42 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (6.19)$$

Assim sendo, tendo em conta a carga resultante, chega-se à conclusão que são possíveis a painéis retangulares, 2,54 x 3,21 m, em vidro laminado, composto por três painéis: em vidro recozido com espessura de 19 mm cada; e, em vidro temperado com espessura de 19 mm cada. Relativamente aos painéis retangulares com 3,21 x 3,21 m, são possíveis em vidro laminado, composto por três painéis: em vidro recozido com 19 mm de espessura cada; e, em vidro temperado com espessura de 19 mm cada. De acordo com as soluções possíveis, adotou-se as que contemplam vidros recozidos.

Note-se que além da escolha através das tabelas de pré-dimensionamento, foram efetuadas as verificações de segurança de forma mais detalhada, tal como é possível aferir nos anexos XII e XIII. De forma resumida, foram obtidos os seguintes resultados, para ambos os painéis:

– Painel com 2,54x3,21m:

○ Tensão máxima à flexão,

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \rightarrow 7,17 \leq 18,50 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.20)$$

- Deformação máxima,

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 5,41 \leq 12,84 \text{ (mm)} \quad (6.21)$$

- Painel com 3,21x3,21m:

- Tensão máxima à flexão,

$$\sigma_{ef} \leq f_{g,d} \rightarrow 7,60 \leq 18,50 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.22)$$

- Deformação máxima,

$$w_{max} \leq w_d \rightarrow 8,56 \leq 12,84 \text{ (mm)} \quad (6.23)$$

6.6 Ligações

No que concerne aos elementos de ligação dos elementos estruturais, optou-se por apresentar apenas alguns exemplos de ligações possíveis para os mesmos, sem entrar pelas verificações de segurança dos mesmos.

Começa-se pela fixação dos painéis de fachada ao solo, bem como dos *glass fins*, sugere-se uma solução de fixação contínua, (ver Subsecção 2.5.1.1) onde o vidro é suportado por um caixilho em alumínio (ver Figura 6.2 a)).

Para a ligação entre os *glass fins* e fachadas, tal como das vigas com os painéis aplicados nos pavimentos e coberturas, sugere-se a utilização de uma solução com recurso a fixações adesivas elásticas (ver Subsecção 2.5.2.1) com recurso a um silicone estrutural, tal como é possível aferir na Figura 6.2 b)).

Quanto à ligação entre os elementos *glass fins* e vigas, e ainda entre vigas, sugere-se uma ligação tal como a apresentada na Figura 6.3. É possível aferir-se que há o recurso a uma ligação tipo aparafusada entre os *glass fins* e vigas, e no caso de ser entre vigas é recorrida a uma peça em alumínio e utilizado silicone estrutural entre a mesma e o vidro.

Em relação aos pilares, sugere-se uma ligação do género da que foi adotada no Centro Cívico de Saint-Germain, na França, e na sede Danfoss Domicil, na Dinamarca, tal como já foi apresentado anteriormente (ver Figura 6.4). Esta mesma solução foi aplicada, tanto na base, como no topo, e é constituída por uma chapa metálica em torno do vidro, combinada com silicone estrutural. A mesma deve ser chumbada a um elemento em betão, na base, enquanto de no topo, sugere-se um prolongamento da chapa metálica de modo a fixar nas vigas.

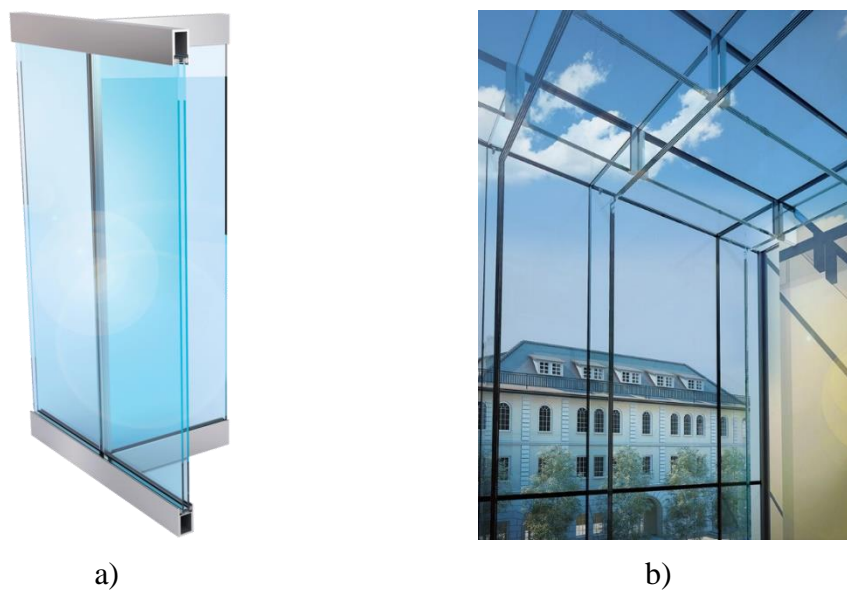


Figura 6.2: a) Sistema de fixação das fachadas (Oldcastle BuildingEnvelope, s.d.); b) Sistema de ligação entre painéis de fachada e *glass fins* e painéis de pavimento/ cobertura e vigas (GLASSCON GmbH, s.d.)

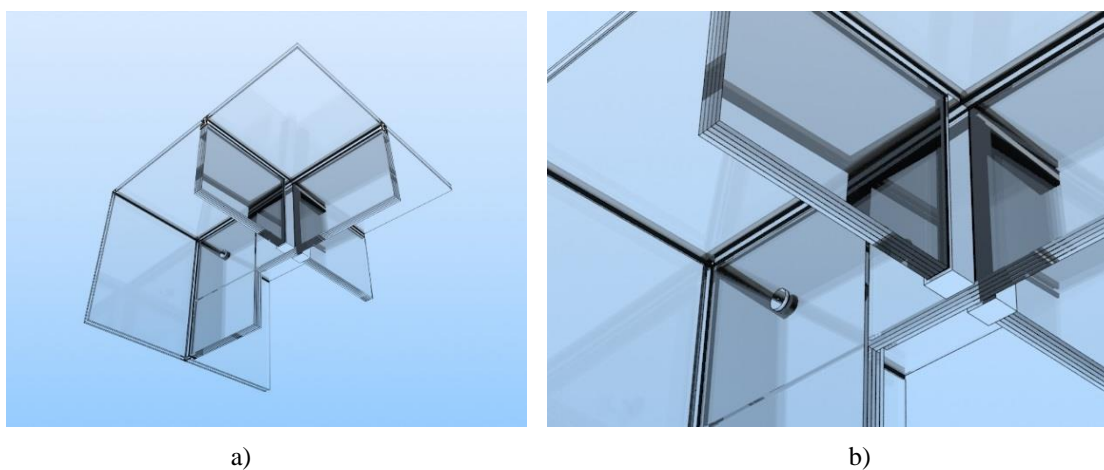


Figura 6.3: Sistema de ligação entre vigas e entre vigas e *glass fins* (GLASSCON GmbH, s.d.)



Figura 6.4: Sistema de ligação dos pilares na sede Danfoss, Dinamarca (Heugten, 2013)

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Quando se fala em vidro estrutural, chega-se à conclusão que ainda é um conceito relativamente novo, com informação ainda um pouco reduzida, comparativamente aos materiais de construção aplicados a nível estrutural a que estamos habituados. Deste modo, careceu de uma grande pesquisa para a compreensão do conceito.

Contudo, é possível encontrar-se na indústria vidreira diferentes tipos de vidro para diversas aplicações, inclusive as aplicações em que tomam uma função estrutural. Tem-se alguns vidros na indústria sujeitos a tratamentos térmicos que melhoram a sua resistência.

Este material é isotrópico, possui um comportamento elástico, é resistente quando se encontra no estado sólido, mas é extremamente frágil. Pode ser transparente, translúcido ou brilhante, depende das quantidades dos seus constituintes básicos.

Os sistemas de fixação para o vidro são fundamentais na medida em que evitam o contato direto entre o vidro e outros materiais mais duros. É essencial ter um cuidado especial com as ligações, dado que o vidro é um material frágil e, portanto, apresenta uma enorme sensibilidade a picos de tensão. Normalmente são utilizados materiais intermédios, mais precisamente entre a ligação propriamente dita e o vidro, que têm uma rigidez menor ou igual à do vidro.

Com a pesquisa efetuada foi possível aferir que tem sido alvo de estudos e já se encontra em desenvolvimento um Eurocódigo para a aplicação em elementos estruturais em vidro. No entanto, há ainda uma escassez de normas nacionais referentes a este material. Existem alguns regulamentos, referentes ao material propriamente dito e tipos de vidro, e ao dimensionamento de alguns elementos, mas que acabam por não se aplicar em todos os casos práticos. Deste modo, para efetuar algumas verificações de segurança acaba por ser necessário adaptar os conceitos básicos da engenharia em conjunto com os regulamentos de forma a chegar a alguns resultados.

Nesta dissertação foram aprofundadas duas normas distintas, a EN 16612 e a CNR-DT 210. A norma EN 16612 é a mais utilizada, mas centra-se na determinação da resistência à flexão de painéis apoiados linearmente, daí ser um pouco limitativa. Em relação ao documento técnico CNR-DT 210, já engloba verificações para diversos elementos estruturais, sendo que grande parte dos parâmetros a ter em conta são equivalentes à EN 16612, mas é um documento mais abrangente em termos de casos de aplicação.

No que diz respeito à ação sísmica, considera-se importante a sua consideração quando a estrutura se encontra num local de alguma sismicidade. Quanto à norma europeia EN 16612 não tem em consideração esta ação. Já o documento italiano, refere que alguns elementos estruturais de vidro podem

ser considerados elementos secundários, ou seja, a rigidez e a resistência desses elementos não afetam significativamente o comportamento global da estrutura. E dado que os elementos em vidro contemplam uma folga nas ligações, são capazes de isolar os elementos do comportamento da estrutura principal, podendo deformar-se sem esforço. Mas tem-se casos em que os elementos em vidro não podem ser considerados secundários, uma vez são responsáveis pela rigidez e resistência da estrutura sob o efeito da ação sísmica, deste modo, são necessários estudos específicos, inclusive experimentais, para que a estrutura se encontre em segurança. Na necessidade de isolar a estrutura sismicamente, o suporte do elemento deve garantir que os painéis em vidro possam mover-se rigidamente, tanto no seu plano como fora dele.

De modo a tornar o dimensionamento mais expedito de alguns elementos estruturais de uma estrutura em vidro, optou-se por gerar tabelas, com cargas limite para aplicação em pavimentos, coberturas e fachadas. Foram ainda realizados tabelas e gráficos de esforços resistentes para vigas, pilares e *glass fins*, com determinadas secções. Note-se que para as tabelas geradas foi adotado o vidro laminado composto por três camadas, com espessuras idênticas. Assim sendo, de forma a facilitar a obtenção dos resultados anteriormente mencionados, foi gerada uma folha de cálculo com base na norma EN 16612 e na norma CNR-DT 210 para os vários tipos de elementos estruturais em estudo.

Salienta-se ainda que apesar da reduzida informação disponível do tema em estudo, e alguma limitação em termos de regulamentação é possível fazer-se um dimensionamento em vidro estrutural, tal como foi demonstrado nesta dissertação.

7.2 Propostas para trabalhos futuros

Para que a aplicação do vidro estrutural seja efetuada com total segurança no ramo da construção, torna-se relevante o seu crescente interesse e estudo. Tendo em conta as verificações de segurança de elementos estruturais realizadas nesta dissertação, sugere-se, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de verificações para os elementos de ligações dos elementos estruturais, visto que são essenciais devido à fragilidade do material. Uma vez que se centrou apenas em duas normas nesta dissertação, a aplicação de outras normas e comparação de resultados seja igualmente relevante. É também interessante a realização de alguns testes laboratoriais dos elementos estruturais, de modo a verificar a resistência dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAMA. (14 de junho de 2012). *Glass Design*. Obtido em julho de 2015, de American Architectural Manufactures Association: <http://www.aamanet.org/NEWS/2/10/0/ALL/782/GLASS-DESIGN-BIBLE-ASTM-E1300-RECEIVES-UPDATES>
- Abravidro. (julho de 2008). A excelência da lapidação. *O Vidroplano*, pp. 30-37.
- Agência PH. (s.d.). *Edifício EDP Porto*. Obtido em junho de 2015, de PH Produção de Imagem: <http://www.agenciaph.pt/?portfolio=edificio-edp-porto-2#>
- Aiello, S., Campione, G., Minafò, G., & Scibilia, N. (2011). *Compressive behaviour of laminated structural glass members*. Università di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Aerospaziale DICAA, Italy.
- Aiello, S., Campione, G., Minafò, G., & Scibilia, N. (15 de August de 2011). Compressive behaviour of laminated structural glass members. *Engineering Structures*.
- Akerman, M. (2000). *Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro*. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro.
- Almeida, M. (2013). *Dimensionamento de vidros de edifícios face a uma pressão uniformemente distribuída*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Amadio, C., & Bedon, C. (2010). *Buckling of laminated glass elements in out-of-plane bending*. University of Trieste, Department of Civil Engineering, Italy.
- Amadio, C., & Bedon, C. (2010). Buckling of laminated glass elements in out-of-plane bending. *Engineering Structures*.
- Andrade, R. (2017). *Análise comparativa de tipologias para pontes pedonais em vidro estrutural*. Coimbra.
- APEL. (s.d.). *Projetos - Sede EDP*. (R. Batista, Editor) Obtido em julho de 2015, de APEL: <http://www.apel-arquitectura.pt/>
- ArchDaily. (1 de agosto de 2009). *Civic center in St Germain en Laye / Atelier 9 portes + Philippe Harden*. Obtido em maio de 2015, de <http://www.archdaily.com/29755/civic-center-in-st-germain-philippe-harden/>
- Archiproducts. (s.d.). *DecorGem Color - Vidro float*. Obtido em abril de 2015, de https://www.archiproducts.com/pt/produtos/omnidecor/fachada-estrutural-envidracada-de-vidro-colorido-decorgem_171681
- Archiproducts. (s.d.). *Glass Project - Vidraça de fixação pontual*. Obtido em abril de 2015, de <http://www.archiproducts.com/pt/produtos/32104/glass-project-vidraca-de-fixacao-pontual-glass-project-vidraca-de-fixacao-pontual-vevtraria-pescini.html>

- Archiproducts. (s.d.). *SunGuard HP Royal Blue 41/29*. Obtido em abril de 2015, de <http://www.archiproducts.com/pt/produtos/122794/sunguard-high-performance-vidro-de-controle-solar-de-baixa-emissividade-sunguard-hp-royal-blue-41-29-guardian.html>
- Archiproducts. (s.d.). *Vetrissimo N*. Obtido em abril de 2015, de <http://www.archiproducts.com/pt/produtos/89485/vetrissimo-vidraca-de-fixacao-pontual-vetrissimo-n-faraone.html>
- Architectour. (s.d.). Obtido em junho de 2015, de Danfoss Domicil: http://www.architectour.net/opere/opera.php?id_opera=6473&nome_opera=Danfoss%20Domicil&architetto=Schmidt%20Hammer%20Lassen
- ASTM E1300. (2009). *Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*. West Conshohocken: ASTM International.
- Bauer, L. A. (1994). *Materiais de Construção* (Vol. 2). Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Bdonline.co.uk. (1 de outubro de 1999). *Walking on air*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.bdonline.co.uk/walking-on-air/1202.article>
- Bellapart. (s.d.). *Glass Bridge, Champalimaud Foundation*. Obtido em julho de 2015, de Bellapart: <http://www.bellapart.com/en/projects/structural-glass/180-glass-bridge-champalimaud-foundation>
- Bellapart Group. (s.d.). *BP Solar head officies*. Obtido em maio de 2015, de <http://www.bellapart.com/en/projects/structural-glass/98-pb-solar-head-officies>
- Biolzi, L., Cattaneo, S., & Rosati, G. (2009). *Progressive damage and fracture of laminated glass beams*. Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering, Milano, Italy.
- Biolzi, L., Cattaneo, S., & Rosati, G. (2009). Progressive damage and fracture of laminated glass beams. *Construction and Building Materials*.
- Bogas, J. (2011). *Fachadas de vidro : explorar os limites da utilização do vidro na construção*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho, Braga.
- Bracarae. (24 de julho de 2012). *Edifício Dynamic - Comércio e Serviços (c/ loja Supercor)*. Obtido em junho de 2015, de <http://forum.bracarae.com/viewtopic.php?f=5&t=1174&start=360>
- Bruna, Camila, Carolina, Denise, Diogo, Guilherme, . . . Samuel. (13 de junho de 2011). *Histórico*. Obtido em março de 2015, de Arquitetura em Vidro: <https://www.sites.google.com/site/arquiteturaemvidro/historico>
- Camacho, P. A. (1 de novembro de 2012). *Miradouro do Cabo Girão: Com o mar debaixo dos pés*. Obtido em julho de 2015, de Madeira travel news: <http://madeiratravelnews.com/?p=7136>
- Chaunac, M., & Serruys, F. (1997). *Glass as Structural Element*.
- CNR-DT 210. (Dicembre de 2013). *Guide for the Design, Construction and Control of Buildings with Structural Glass Elements*.

- Costa, S., Miranda, M., Varum, H., & Dias, F. (novembro de 2005). As Potencialidades do Vidro como Material Estrutural. *Engenharia e Vida*, 18, pp. 36-42.
- Cunha, J. (2012). *Comportamento à flexão de vigas vidro-madeira*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga. Obtido em setembro de 2015
- Desingrini, G. (2019). *Vidro como elemento estrutural: Análise e dimensionamento de Glass Fin*. Passo Fundo.
- Detail. (s.d.). *Discussion: Taking a Second Look – Glass Pavilion at Broadfield House in Kingswinford*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.detail-online.com/inspiration/discussion-taking-a-second-look-%E2%80%93-glass-pavilion-at-broadfield-house-in-kingswinford-103477.html>
- Detail. (s.d.). *Footbridge in Rotterdam*. Obtido em junho de 2015, de Detail: <http://www.detail-online.com/inspiration/footbridge-in-rotterdam-109564.html>
- Dufvenberg, P., & Jönsson, F. (2014). *Design of a glass floor structure*. Lund University, Lund.
- Dufvenberg, P., & Jonsson, F. (2014). *Design of glass floor structure*.
- Eckersley O’Callaghan. (s.d.). *Apple 5th Avenue Mark 2*. Obtido em maio de 2015, de <http://www.eocengineers.com/project/apple-5th-avenue-mark-2-100>
- Eckersley O’Callaghan. (s.d.). *Apple Wangfujing*. Obtido em julho de 2015, de Eckersley O’Callaghan: <http://www.eocengineers.com/project/apple-wangfujing--105>
- Eckersley O’Callaghan . (s.d.). *Dilworth Park*. Obtido em julho de 2015, de Eckersley O’Callaghan : <http://www.eocengineers.com/project/dilworth-park-185>
- Eliášová, M. (s.d.). *Advanced Design of Glass Structures*. Czech Technical University, Prague.
- EN 16612. (October de 2019). *Glass in building - Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*.
- EN 1863-1. (2011). *Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description*.
- EN 572-2. (2012). *Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass*.
- Enclos. (s.d.). *Glass Fin*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.enclos.com/service-and-technology/technology/structural-glass-facades/facade-structures/glass-fin>
- Feldmann, M., & Kasper, R. (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Firman Glass Projects. (s.d.). Obtido em junho de 2015, de Olivers Wharf: <http://www.firmanglassprojects.com/olivers-wharf/nggallery/page/2>
- Firman Glass Projects. (s.d.). *Cheapside*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.firmanglassprojects.com/cheapside/>
- Firman Glass Projects. (s.d.). *Keble College Oxford*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.firmanglassprojects.com/keble-college-oxford/>
- Firman Glass Projects. (s.d.). *Tokyo International Forum*. Obtido em junho de 2015, de <http://www.firmanglassprojects.com/tokyo-international-forum/>

- Garanito, V. (2018). *O Vidro na Indústria da Construção*. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Madeira, FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Funchal.
- Garg, N. K. (2007). *Guidelines for Use of Glass in Buildings*. New Age International Publishers.
- Giacomini, E. (2005). *Material - O Vidro*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Secção de Construções Cívicas, Porto.
- GLASSCON GmbH. (s.d.). Obtido em Julho de 2021, de Structural Glass Atrium: <https://fr.glasscon.com/projets/structural-glass-atrrium?fbclid=IwAR311RF9EBkNWEoRTJW59NJ08nf70ZxB-FkoufIMMxcmAypvGcFEsRey1Ks>
- Gonçalves, M. C., & Margarido, F. (2012). *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*. IST Press.
- Guardian Industries Corp. (2010). *Manual Técnico*.
- Haber, J. (29 de abril de 2015). *Glass Fin Walls in Focus*. Obtido em agosto de 2015, de W&W Glass Facades Blog: <http://wwglass.com/blog/post/glass-fin-walls>
- Haldimann, M. (2006). *Fracture Strength of Structural Glass Elements: Analytical and Numerical Modelling, Testing and Design*. École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausana.
- Haldimann, M., Luble, A., & Overend, M. (2007). *Structural use of Glass*. Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Heugten, R. (2013). *Load-bearing glass columns: The stacked column*. Eindhoven.
- Hunter, C. (1 de outubro de 2010). *Modern Views: Larry's Latest Limerick*. Obtido em março de 2015, de The Glass House Blog: <https://philipjohnsonglasshouse.wordpress.com/2010/10/01/modern-views-larrys-latest-limerick/>
- Leitch, K. K. (2005). *Structure glass technology : systems and applications*. Requirements for the Degree of Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Libos, I. (2017). *Análise estrutural e de viabilidade de fachada em vidro estrutural*. Monografia para obtenção do Título em Engenharia Civil., Fortaleza.
- Lindqvist, M. (2013). *Structural Glass Strength Prediction Based on Edge Flaw*. Thesis for the Degree Doctor of Science, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.
- LNEC. (s.d.). Obtido em Abril de 2019, de Laboratório Nacional de Engenharia Civil: <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/normalizacao/ct-115-eurocodigos-estruturais/>
- LNEC. (s.d.). *Normalização e Regulamentação*. Obtido em outubro de 2015, de <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/normalizacao/>
- Louter, C. (2011). *Fragile yet ductile: Structural aspects of reinforced glass beams*. Technical University of Delft.

- Macfarlane, T., & MacFarlane, D. (s.d.). *Cantilevered glass canopy, Tokyo*. Obtido em junho de 2015, de LUSAS: <http://www.lusas.com/case/civil/cantilevered.html>
- Martens, K., Caspeele, R., & Belis, J. (2015). *Development of composite glass beams – A review*. Ghent University, Department of Structural Engineering, Ghent, Belgium.
- Martifer. (s.d.). *Portefólio - Centro Champalimaud*. Obtido em julho de 2015, de Martifer Group: <http://www.martifer.pt/pt/portfolio/detalhes.php?sec=3&tipo=2&id=70>
- Martifer. (s.d.). *Portefólio - Dolce Vita Funchal*. Obtido em julho de 2015, de Martifer Group: <http://www.martifer.pt/pt/portfolio/detalhes.php?sec=3&tipo=2&id=16>
- Martins, J. G., & Pinto, E. L. (2004). *Materiais de Construção I - O Vidro* (1ª ed.). Materiais.
- Mascarenhas, J. (2009). *Sistemas de Construção* (Vol. V). Lisboa: Livros Horizonte.
- Navarra. (s.d.). *Sistemas de fachadas*. Obtido em abril de 2015, de <http://www.navarraaluminio.com/pt/produtos/sistemas-de-fachadas/fachada-cortina.html>
- NP EN 12150-1. (2015). *Vidro na construção - Vidro de segurança sílico-sodo-cálcico temperado termicamente - Parte 1: Definição e descrição*.
- NP EN 572-1. (2012). *Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties*.
- Oldcastle BuildingEnvelope. (s.d.). *Architectural Glass - Finwall*. Obtido em Agosto de 2021, de <https://obe.com/products/finwall/>
- Ouwerkerk, E. (2011). *Glass columns*. Thesis for the Degree Master of Science, Delft University of Technology, Delft. Obtido em setembro de 2015
- Patterson, M. (2008). *Structural glass facades: A unique building technology*. Thesis for the Degree Master of Building Science, University of Southern California, California.
- Pereira, S. M. (2012). *Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Pinto, A. (2008). *Componentes de Edifícios. Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro*. Lisboa: LNEC.
- PKO. (Janeiro de 2021). *Como dimensionar estruturas para projetos com vidro*. Obtido de https://pkodobrasil.com.br/blog/como-dimensionar-estruturas-para-projetos-com-vidro/?fbclid=IwAR1q4jWZoEpG1GQ0aYAMv_fdDrYn7wlSvW1P_IGnzA0uP0BIJSX1Uz3toZ
- prEN 16612. (2013). *Glass in building - Determination of the load resistance of glass*.
- Projetoal. (s.d.). *Fitglass*. Obtido em abril de 2015, de <http://www.projetoal.com.br/fotos/fitglass.html>
- Punmia, B., Jain, A. K., & Jain, A. K. (2003). *Basic Civil Engineering*. Firewall Media.
- Romão, P. (2014). *Controlo Estrutural de uma Fachada de Vidro Suspensa, Sujeita à Acção da Explosão*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

- Saint-Gobain Glass. (dezembro de 2011). *Notícias Saint-Gobain Glass n.º 93 | Dezembro de 2011*.
Obtido em julho de 2015, de Saint-Gobain:
http://transparencias.info/2011_files_pt/dez2011_PT_11.html
- Saint-Gobain Glass. (s.d.). *Dolce Vita - Funchal*. Obtido em julho de 2015, de Saint-Gobain Glass:
http://glassfacade.saint-gobain-glass.com/en/project_detail/323
- Saint-Gobain Glass. (s.d.). *Technische Universität*. Obtido em julho de 2015, de Saint-Gobain Glass:
http://glassfacade.saint-gobain-glass.com/en/project_detail/351
- Saint-Gobain Glass. (s.d.). *Weststadthallen (Folkwang Musikschule)*. Obtido em julho de 2015, de Saint-Gobain Glass: http://glassfacade.saint-gobain-glass.com/en/project_detail/348
- Sanches, J. (2013). *Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- SantambrogioMilano. (5 de outubro de 2018). Obtido de <https://www.santambrogioMilano.com/the-glass-house>
- Santos Silva, J. (2017). *Vidro estrutural: Caracterização do material e estudo caso*. Trabalho para obtenção do Grau Bachelier em Engenharia Civil, Paraíba.
- Schimmrich, S. (28 de junho de 2012). *Obsidian - Part I*. Obtido em março de 2015, de Hudson Valley Geologist: <http://hudsonvalleygeologist.blogspot.pt/2012/06/obsidian-part-i.html>
- Schittich, C. (1999). *Glass Construction Manual*. Birkhäuser.
- Serafinavicius, T., Kvedaras, A. K., & Sauciuvenas, G. (2013). Bending behaviour of structural glass laminated with different interlayers. *Mechanics of Composite Materials*.
- Silva, J. (2017). *Vidro Estrutural: Caracterização do material e estudo de caso*. Brasil: Universidade Federal da Paraíba.
- Silva, L., Alves, F., & Marques, A. (2013). *Materiais de construção*. Publindústria.
- Socimateus. (s.d.). Obtido em abril de 2015, de <http://www.socimateus.pt/ficha-tecnica4.html>
- Sousa, J. (2014). *Vidro estrutural em condições extremas: aplicações em ambiente submerso*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga.
- Tavares, A. (2015). *Caraterização do comportamento de vigas de vidro estrutural sujeitas a solicitação cíclica*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Coimbra.
- Top-Informática. (s.d.). *Gerador de preços para construção civil*. Obtido em outubro de 2015, de CYPE Software para Engenharia e Construção: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Fachadas/Vidros.html
- Valarinho, L. (2010). *Construção em vidro estrutural: comportamento mecânico de vigas mistas vidro-GFRP*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ventura Vidros. (15 de setembro de 2009). *História Pré-Industrial do Vidro no Brasil*. Obtido em março de 2015, de Ventura Vidros: <http://venturavidros.blogspot.pt/>

- Vidrio para la edificación. Productos básicos de vidrio de silicato sodocálcico. Parte 2: Vidrio plano, UNE-EN 572-2 (2012).
- View. (s.d.). *Broadfield house glass museum*. Obtido em maio de 2015, de <http://www.viewpictures.co.uk/Details.aspx?ID=49453&TypeID=1>
- VSA Madeira. (s.d.). Obtido em junho de 2015, de <http://prod.sivaonline.pt/volkswagen/vsamadeira>
- Wellershoff, F., Sendelbach, M., & Schmitt, F. (2011). *Einsatz von tragenden Glaselementen in Glasbrücken und Glaspavillions*. Würzburg.
- White, R. L. (2007). *Glass as a Structural Material*. Report for the degree Master of Science, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Wikipédia. (s.d.). *Catedral de Notre-Dame de Reims*. Obtido em abril de 2015, de http://pt.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Notre-Dame_de_Reims
- Wikipédia. (s.d.). *Reais Jardins Botânicos de Kew*. Obtido em março de 2015, de http://pt.wikipedia.org/wiki/Reais_Jardins_Bot%C3%A2nicos_de_Kew
- Wurm, J. (2007). *Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins*. Birkhäuser Verlag.

ANEXOS

I. Algumas normas de conceção e utilização do vidro

Norma	Especificação da norma	
Vidros de base (vidros float, vidros impressos...)		
EN 572:2012	<i>Glass in building. Basic soda lime silicate glass products.</i>	<i>Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties.</i>
		<i>Part 2: Float glass.</i>
		<i>Part 3: Polished wire glass-</i>
		<i>Part 4: Drawn sheet glass.</i>
		<i>Part 5: Patterned glass.</i>
		<i>Part 6: Wired patterned glass.</i>
		<i>Part 7: Wired or unwired channel shaped glass.</i>
		<i>Part 8: Supplied and final cut sizes.</i>
NP EN 572-9:2010	Vidro na construção. Vidro sílico-sodo-cálcico de base.	Parte 9: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
NP EN 1288:2007	Vidro na construção. Determinação da resistência do vidro à flexão.	Parte 1: Princípios fundamentais dos ensaios do vidro.
		Parte 2: Ensaio de duplo anel coaxial em provetes planos com grandes superfícies de ensaio.
		Parte 3: Ensaio com provetes apoiados em dois pontos (flexão em quatro pontos).
		Parte 4: Ensaios de vidro perfilado em canal.
		Parte 5: Ensaios com anéis duplos concêntricos em provetes planos, com pequenas áreas de ensaio.
Vidros revestidos e vidros isolantes		
NP EN 1096-1:2000	Vidro na construção. Vidro revestido.	Parte 1: Definições e classificação.
EN 1096:2001	<i>Glass in building. Coated glass.</i>	<i>Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings.</i>
		<i>Part 3: Requirements and test methods for class C and D coatings.</i>
NP EN 1096-4:2010	Vidro na construção. Vidro revestido.	Parte 4: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
NP EN 1279-1:2006	Vidro na construção. Envidraçados isolantes prefabricados selados.	Parte 1: Generalidades, tolerâncias dimensionais e regras para descrição do sistema.
NP EN 1279-2:2004		Parte 2: Método de ensaio de longa duração e requisitos relativos à penetração da humidade.
NP EN 1279-3:2004		Parte 3: Método de ensaio de longa duração e requisitos relativos à taxa de fuga de gás e às tolerâncias de concentração do gás.
NP EN 1279-4:2006		Parte 4: Métodos de ensaio das propriedades físicas dos produtos de selagem.
NP EN 1279-5:2005 +A1:2010		Parte 5: Avaliação da conformidade.

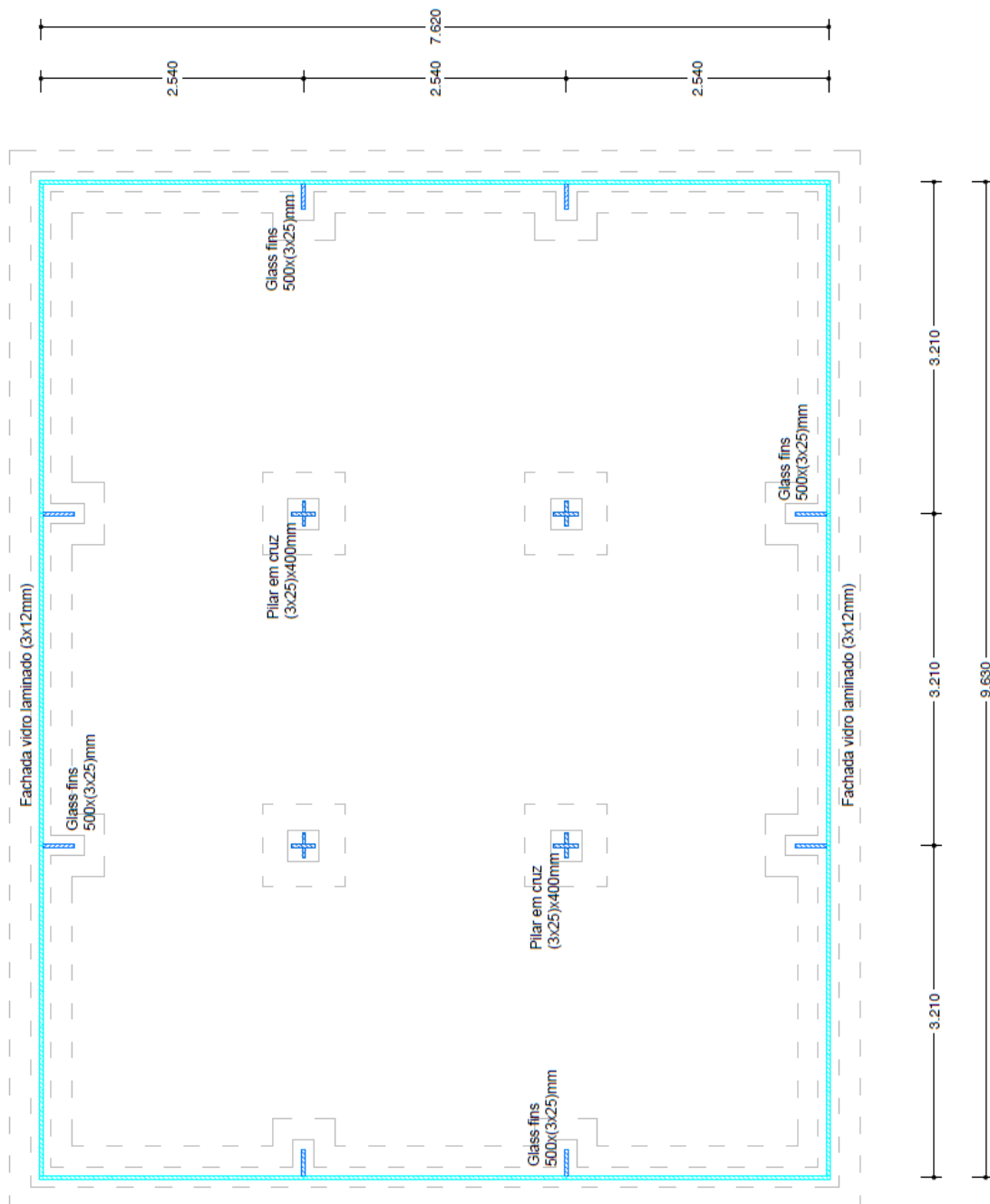
NP EN 1279-6:2006		Parte 6: Controlo da produção da fábrica e ensaios periódicos.
EN 1279-5:2005+A2:2010	<i>Glass in building. Insulating glass units.</i>	<i>Part 5: Evaluation of conformity.</i>
EN 12758:2011	<i>Glass in building. Glazing and airborne sound insulation.</i>	<i>Product descriptions and determination of properties.</i>
Vidros de segurança, vidros resistentes ao fogo, vidros temperados, vidros curvos, vidros laminados e vidros termoendurecido.		
EN 356:1999	<i>Glass in building. Security glazing.</i>	<i>Testing and classification of resistance against manual attack.</i>
EN 357:2004	<i>Glass in building. Fire resistant glazed elements with transparent or translucent glass products.</i>	<i>Classification of fire resistance.</i>
EN 1627:2011	<i>Pedestrian doorsets, windows, curtain walling, grilles and shutters. Burglar resistance.</i>	<i>Requirements and classification.</i>
EN 1863-1:2000	<i>Glass in building. Heat strengthened soda lime silicate glass.</i>	<i>Part 1: Definition and description.</i>
NP EN 1863-2:2010	Vidro na construção. Vidro de silicato soda cálcico endurecido termicamente.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
EN 12150-1:2000	<i>Glass in building. Thermally toughened soda lime silicate safety glass.</i>	<i>Part 1: Definition and description.</i>
NP EN 12150-2:2010	Vidro na construção. Vidro de segurança sílico-sodo-cálcico temperado termicamente.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
EN 12337-1:2000	<i>Glass in building. Chemically strengthened soda lime silicate glass.</i>	<i>Part 1: Definition and description.</i>
NP EN 12337-2:2010	Vidro na construção. Vidro de silicato soda cálcico endurecido quimicamente.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
ISO/DIS 11485:2011	Glass in building - Curved glass	Part 1: Terminology and definitions
		Part 2: Quality requirements
		Part 3: Requirements for curved tempered and curved laminated safety glass

NP EN ISSO 12543:2000	Vidro na construção. Vidro laminado e vidro laminado de segurança.	Parte 1: Definições e descrição dos componentes (ISSO 12543-1:1998).
		Parte 2: Vidro laminado de segurança (ISO 12543-2:1998).
		Parte 3: Vidro laminado (ISO 12543-3:1998).
		Parte 4: Métodos de ensaio para a durabilidade (ISSO 12543-4:1998).
EN ISSO 12543:1998	<i>Glass in building. Laminated glass and laminated safety glass.</i>	<i>Part 5: Dimensions and edge finishing (ISO 12543-5:1998).</i>
		<i>Part 6: Appearance (ISO 12543-6:1998).</i>
NP EN 14179:2008	Vidro na construção. Vidro de segurança de silicato sodo cálcico temperado termicamente e tratado <i>heat soak</i> .	Parte 1: Definição e descrição.
		Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
NP EN 14449:2008	Vidro na construção. Vidro laminado e vidro laminado de segurança.	Avaliação da conformidade/Norma de produto.
Normas de cálculo para propriedades luminosas, solares, térmicas, ...		
EN 410:2011	<i>Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing.</i>	
EN 673:2011	<i>Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value).</i>	<i>Calculation method.</i>
NP EN 674:2000	Vidro na construção. Determinação do coeficiente de transmissão térmica, U.	Método da placa quente protegida.
NP EN 675:2000	Vidro na construção. Determinação do coeficiente de transmissão térmica, U.	Método do fluxímetro.
EN 12898:2001	<i>Glass in building. Determination of the emissivity.</i>	
EN 13363-1:2003+A1:2007	<i>Solar protection devices combined with glazing. Calculation of solar and light transmittance.</i>	<i>Part 1: Simplified method.</i>
EN 13363-2:2005	<i>Solar protection devices combined with glazing. Calculation of total solar energy transmittance and light transmittance.</i>	<i>Part 2: Detailed calculation method.</i>
EN ISO 14438:2002	<i>Glass in building. Determination of energy balance value - Calculation method (ISO14438:2002).</i>	

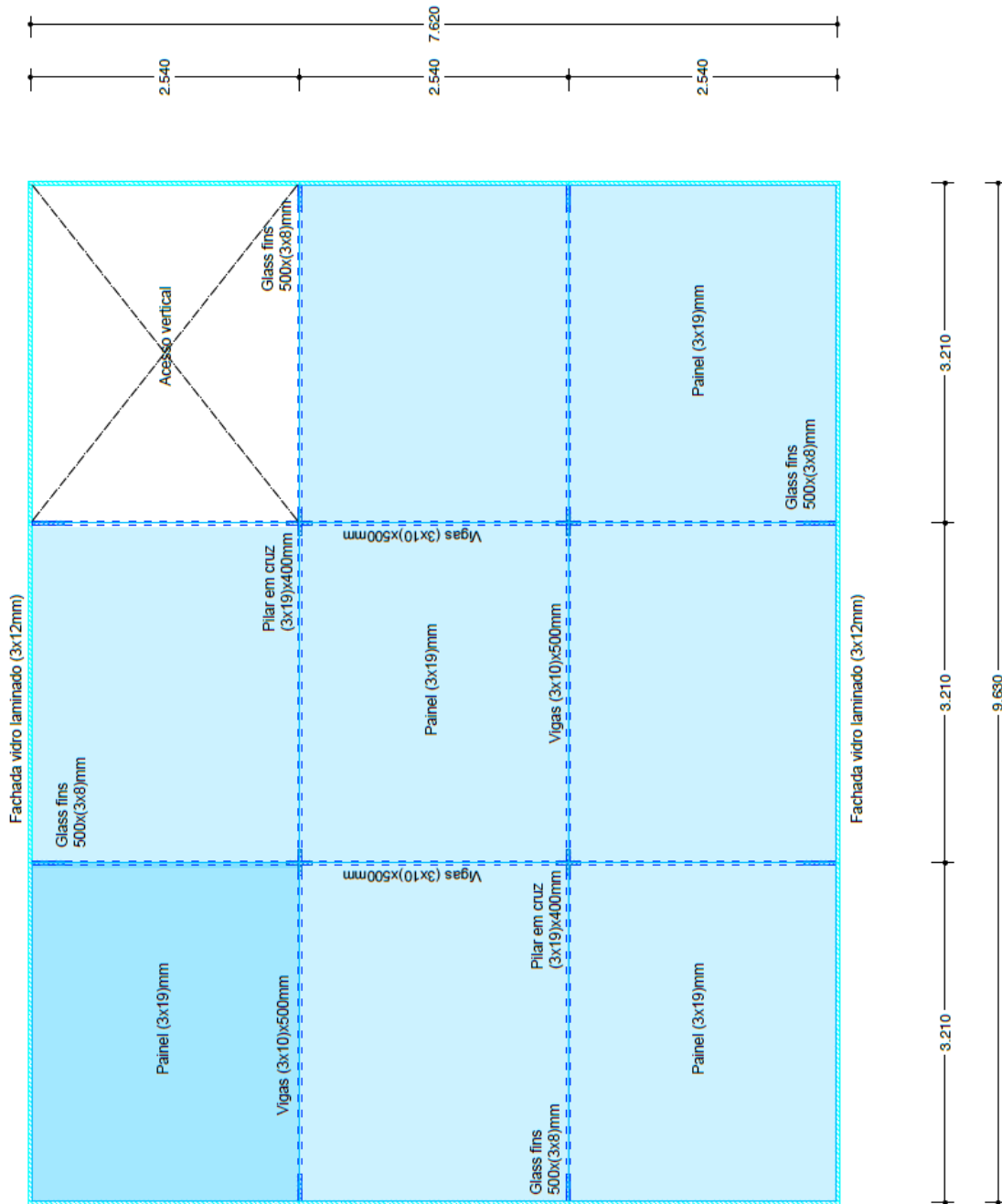
Produtos de base especiais		
EN 1748-1-1:2004	<i>Special basic products - Borosilicate glasses</i>	<i>Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties</i>
NP EN 1748-1-2:2010	Vidro na construção. Produtos básicos especiais – Vidros borossilicatados.	Parte 1-2: Avaliação da conformidade/Norma de produto
EN 1748-2-1:2004	<i>Special basic products - Glass ceramics</i>	<i>Definitions and general physical and mechanical properties</i>
NP EN 1748-2-2:2010	Vidro na construção. Produtos básicos especiais – Vitrocerâmicos.	Parte 2-2: Avaliação da conformidade/Norma de produto
EN 13024-1:2002	<i>Glass in building. Thermally toughened borosilicate safety glass.</i>	<i>Part 1: Definition and description.</i>
NP EN 13024-2:2010	Vidro na construção. Vidro borossilicatado de segurança temperado termicamente.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
EN 14178-1:2004	<i>Glass in building. Basic alkaline earth silicate glass products.</i>	<i>Part 1: Float glass.</i>
NP EN 14178-2:2010	Vidro na construção. Produtos básicos de vidro de silicatos alcalino terroso.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
EN 15682-2:2013	<i>Glass in building — Heat soaked thermally toughened alkaline earth silicate safety glass</i>	<i>Part 2: Evaluation of conformity/Product standard</i>
EN 14321-1:2005	Glass in building. Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass.	Part 1: Definition and description.
NP EN 14321-2:2008	Vidro na construção. Vidro de segurança de silicato alcalino terroso temperado termicamente.	Parte 2: Avaliação da conformidade/Norma de produto.
EN 1096-1: 1998	<i>Coated glass</i>	<i>Part 1: Definition and classification</i>
EN 1096-2: 2001		<i>Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings</i>
EN 1096-3: 2001		<i>3: Requirements and test methods for class C and D coatings</i>
NP EN 1096-4: 2010	Vidro na construção. Vidro revestido,	Parte 4: Avaliação da conformidade/Norma de produto

II. Plantas do projeto proposto

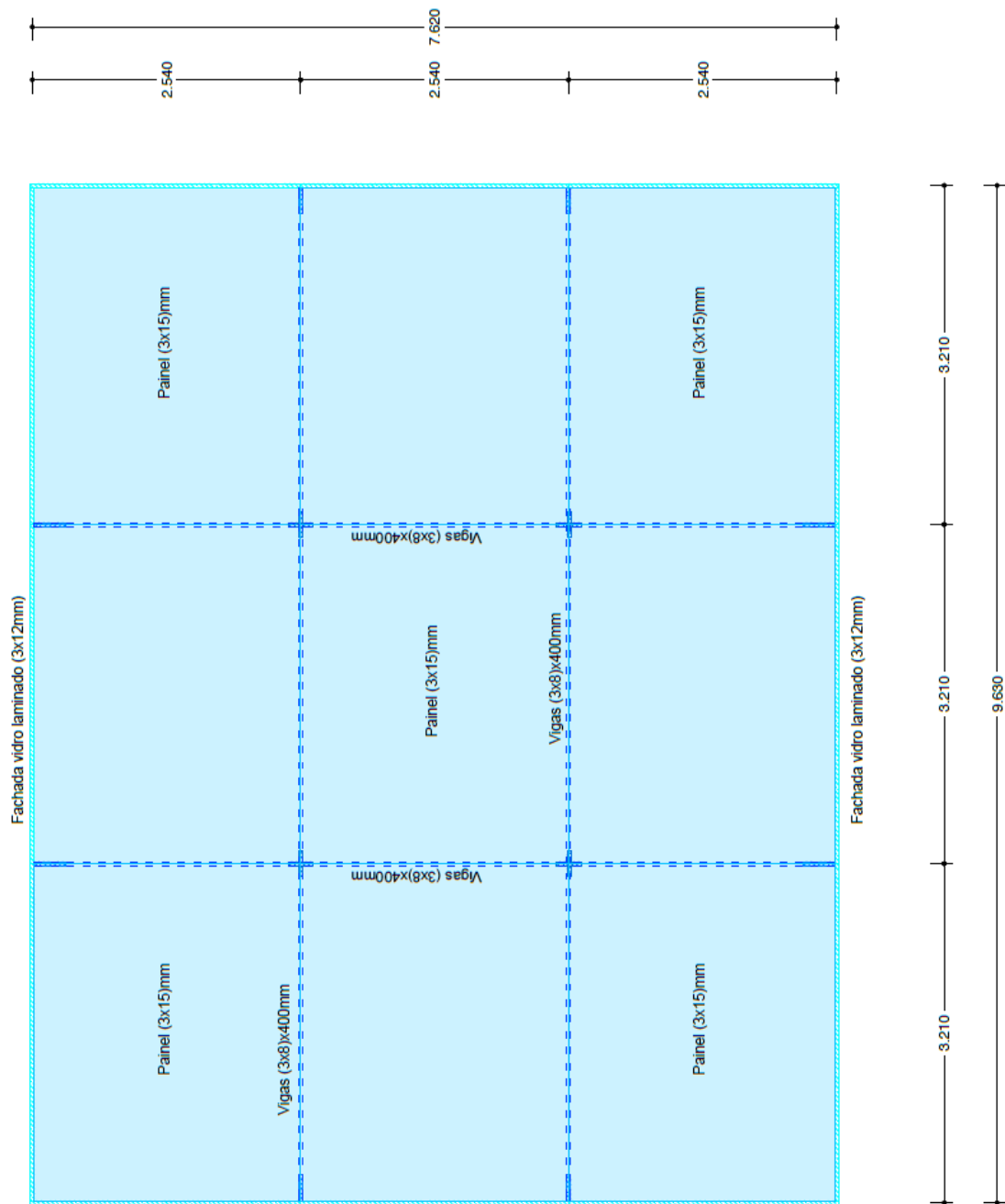
a) Planta do piso 0 (sem escala) (cotas em m)



b) Planta do piso 1 (sem escala) (cotas em m)



c) Planta de cobertura (sem escala) (cotas em m)



III. Cálculo da ação do vento segundo a norma EN1991

Determinação da pressão dinâmica do vento

Altura do Edifício (z)	6	m
Categoria do Terreno	I	(considerou-se ser numa zona costeira)
Coefficiente de Rugosidade	1,15	
Zonamento	B	(considerou-se ser no Arquipélago da Madeira)
Velocidade de ref. do Vento (v_b)	30	m/s
Coefficiente de orografia (c_o)	1	
Velocidade média do Vento (v_m)	34,50	m/s
Intensidade da Turbulência ($I_v(z)$)	0,14	
Massa volúmica do ar	1,25	kg/m ³
Pressão dinâmica de referência (q_b)	0,56	kN/m ²
Pressão dinâmica de pico ($q_p(z)$)	1,47	kN/m ²

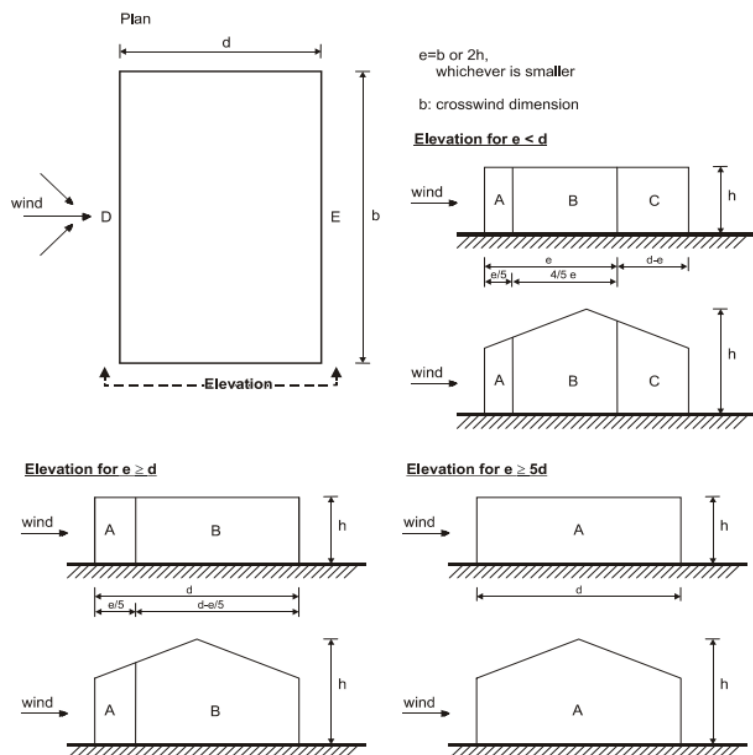
Determinação das pressões exercidas pelo vento

Dados da geometria do edifício

h	6,42	m	d	7,62	m	b	9,63	m
α	0	°						

Para paredes verticais de edificios de planta retangular

e	9,63	m	h/d	0,84
---	------	---	-----	------



Quadro 7.1 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edificios de planta rectangular

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,7	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,5	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,7	+1,0	-0,3	-0,3

NOTA 2: Para edificios com $h/d > 5$, o carregamento total devido ao vento poderá basear-se no disposto em 7.6 a 7.8 e em 7.9.2.

Para a fachada mais condicionante:

Pressão exterior exercida pelo vento (w_e)	1,18	kN/m ²
--	------	-------------------

IV. Cálculo para o elemento estrutural primário – painéis em pavimentos

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	recozido	ft,k	70	N/mm ²	n	0,2	
		fc,k	500	N/mm ²	α_T	9,00E-06	K ⁻¹
		E	70000	N/mm ²	ρ	2500	kg/m ³
Película intermédia	PVB	G	11	N/mm ²	ρ	1,07	g/cm ³
		fy	28,1	N/mm ²	α_T	0,000412	K ⁻¹
		ϵ	275	%			
Secção	laminado	a	2540	mm	hi	19	mm
		b	3210	mm	n	3	
					hv	0,76	mm
Tipo de estrutura	Primária						

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	1,43	kN/m ²
Peso extra	1,25	kN/m ²

VARIÁVEIS (Qk)

Pavimento	2	kN/m ²
-----------	---	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

	Base SC	
ELU: Fd	6,61	kN/m ²
ELS: Fk	3,68	kN/m ²

VERIFICAÇÕES PANOS APOIADOS EM TODAS AS BORDAS (Anexo B EN 16612)

Determinação da espessura efetiva

h1	19	mm
-----------	----	----

h2	19	mm
-----------	----	----

h3	19	mm
-----------	----	----

hm,1	19	mm
-------------	----	----

hm,2	0	mm
-------------	---	----

hm,3	19	mm
-------------	----	----

ω	0
----------	---

Espessura efetiva p/ cálculo da Resistência

h_{ef,σ,1}	32,91	mm
---------------------------	-------	----

h_{ef,σ,2}	32,91	mm
---------------------------	-------	----

h_{ef,σ,3}	32,91	mm
---------------------------	-------	----

Espessura efetiva p/ cálculo da Deformação

h_{ef,w}	27,40	mm
-------------------------	-------	----

λ	0,79
----------	------

p*	0,0002
-----------	--------

Tensão máxima à flexão

z2	1,28
-----------	------

z3	4,81
-----------	------

z4	0,57
-----------	------

k1	0,32
-----------	------

s max	15,91	N/mm ²
--------------	-------	-------------------

fg,d	25,03	N/mm ²
-------------	-------	-------------------

Deformação máxima

z1	0,76
-----------	------

k4	0,05
-----------	------

wmax	8,01	mm
-------------	------	----

wd	10,70	mm
-----------	-------	----

VERDADEIRO

VERDADEIRO

V. Cálculo para o elemento estrutural primário – painéis em coberturas

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	recozido
--------------	----------

ft,k	45	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

n	0,2	
α _T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
f _y	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α _T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

a	2540	mm
b	3210	mm

h _i	15	mm
n	3	
h _v	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (G_k)

Peso próprio	1,13	kN/m ²

VARIÁVEIS (Q_k)

Cob. não acessível	1	kN/m ²
--------------------	---	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

<u>ELU</u> : F _d	3,02	kN/m ²
<u>ELS</u> : F _k	1,63	kN/m ²

VERIFICAÇÕES PANOS APOIADOS EM TODAS AS BORDAS (Anexo B EN 16612)

Determinação da espessura efetiva

h1	15	mm
-----------	----	----

h2	15	mm
-----------	----	----

h3	15	mm
-----------	----	----

hm,1	15	mm
-------------	----	----

hm,2	0	mm
-------------	---	----

hm,3	15	mm
-------------	----	----

ω	0
----------	---

Espessura efetiva p/ cálculo da Resistência

h_{ef,σ,1}	25,98	mm
---------------------------	-------	----

h_{ef,σ,2}	25,98	mm
---------------------------	-------	----

h_{ef,σ,3}	25,98	mm
---------------------------	-------	----

Espessura efetiva p/ cálculo da Deformação

h_{ef,w}	21,63	mm
-------------------------	-------	----

λ	0,79
----------	------

p*	0,0001
-----------	--------

Tensão máxima à flexão

z2	1,28
-----------	------

z3	4,81
-----------	------

z4	0,57
-----------	------

k1	0,32
-----------	------

s max	11,66	N/mm ²
--------------	-------	-------------------

fg,d	17,25	N/mm ²
-------------	-------	-------------------

Deformação máxima

z1	0,76
-----------	------

k4	0,05
-----------	------

wmax	4,98	mm
-------------	------	----

wd	10,70	mm
-----------	-------	----

VERDADEIRO

VERDADEIRO

VI. Cálculo para o elemento estrutural primário - vigas aplicadas em pavimentos

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	termo-endurecido
--------------	------------------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ϵ	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

L	3210	mm
h	500	mm
Linf	2540	mm
I	150234816	mm ⁴

hi	10	mm
ni	3	
hint	0,38	mm
hint,tot	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio viga	0,38	kN/m
Peso próprio da laje	3,62	kN/m
Peso extra	3,18	

VARIÁVEIS (Qk)

Pavimento	2	kN/m ²
-----------	---	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

ELU: Fd	12,68	kN/m
ELS: Fk	8,17	kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Msd	16,33	kNm
-----	-------	-----

Vsd	20,35	kN
-----	-------	----

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	10	mm	h2	10	mm	h3	10	mm
d1	10	mm	d2	0	mm	d3	10	mm
Is	1000	mm ³	d	10,76	mm	β e ζ	1	
Γb	2,426E-06		A*	2500	mm ²	λ	0,010	
h_{ef,w}	14	mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st	56,050	N/mm ²	fg;d	30,940	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	600939	mm ³						
Mcr	21685765603	Nmm	C1	1				
Jeq	150234816	mm ⁴	Jt,tot	1667374583	mm ⁴			
Jt,1	416666667	mm ⁴	Jt,2	416666667	mm ⁴	Jt,int	707916	mm ⁴
λ norm LT	0,04							
ØLT	0,48		αimp	0,26		α0	0,2	
xLT,cal	1,04		xLT	1				
Mr	18593053	Nmm						
Mb,Rd	18593053	Nmm	18,593	kNm	VERDADEIRO			

VERIFICAÇÃO FLECHA

wed	1,07	mm	wlim	10,7	mm	VERDADEIRO
------------	------	----	-------------	------	----	-------------------

VII. Cálculo para o elemento estrutural primário - vigas aplicadas em coberturas

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	termo-endurecido
--------------	------------------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ϵ	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

L	3210	mm
h	400	mm
Linf	2540	mm
I	61536239	mm ⁴

hi	8	mm
ni	3	
hint	0,38	mm
hint,tot	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio viga	0,24	kN/m
Peso próprio da laje	2,86	kN/m

VARIÁVEIS (Qk)

Cob. não acessível	1	kN/m ²
--------------------	---	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

<u>ELU</u> : Fd	5,68	kN/m
<u>ELS</u> : Fk	3,10	kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Msd	7,32	kNm
-----	------	-----

Vsd	9,12	kN
-----	------	----

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	8	mm	h2	8	mm	h3	8	mm
d1	8	mm	d2	0	mm	d3	8	mm
Is	512	mm ³	d	8,76	mm	β e ζ	1	
Γb	3,140E-06		A*	1600	mm ²	λ	0,011	
h_{ef,w}	12	mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st	56,050	N/mm ²	fg;d	30,940	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	307681	mm ³						
Mcr	8882426688	Nmm	C1	1				
Jeq	61536239	mm ⁴	Jt,tot	682946305,7	mm ⁴			
Jt,1	170666667	mm ⁴	Jt,2	170666667	mm ⁴	Jt,int	279639	mm ⁴
λ norm LT	0,04							
ØLT	0,48		αimp	0,26		α0	0,2	
xLT,cal	1,04		xLT	1				
Mr	9519656	Nmm						
Mb,Rd	9519656	Nmm	9,520	kNm	VERDADEIRO			

VERIFICAÇÃO FLECHA

wed	0,99	mm	wlim	10,7	mm	VERDADEIRO
------------	------	----	-------------	------	----	-------------------

VIII. Cálculo para o elemento estrutural primário – pilar primeiro piso

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	temperado
--------------	-----------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

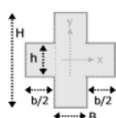
n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------



L	3210	mm
h	400,00	mm
A	28845	mm ²
I	1563707	mm ⁴
Linf x	3510	mm
Linf y	2540	mm

hi	25	mm
ni	3	
hint	0,38	mm
hint,tot	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	0,23	kN
Peso extra	11,14	kN
Peso próprio da laje	22,73	kN

VARIÁVEIS (Qk)

Pavimento	17,83	kN
Cob. não acessível	8,92	kN

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

ELU: Fd	86,48	kN
ELS: Fk	43,26	kN

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Nsd	86,48	kN
-----	-------	----

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	25	mm	h2	25	mm	h3	25	mm
d1	25	mm	d2	0	mm	d3	25	mm
Is	15625	mm ³	d	25,76	mm	β e ζ	1	
Γb	8,897E-07		A*	5000	mm ²	λ	0,006	
hef,w	36	mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st	106,050	N/mm ²	fg;d	67,976	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	961501	mm ³						
Ncr	213967	N	C1	1		L0	2247	mm
l	3,781							
Ø	8,778		αimp	0,71		α0	0,6	
xcal	0,060		x	0,060				
Nb,Rd	117417	N	117,417		kN			

VERDADEIRO

IX. Cálculo para o elemento estrutural primário – pilar segundo piso

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	recozido
--------------	----------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

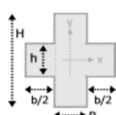
n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------



L	3210	mm
h	400,00	mm
A	21922	mm ²
I	686817	mm ⁴
Linf x	3510	mm
Linf y	2540	mm

hi	19	mm
ni	3	
hint	0,38	mm
hint,tot	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	0,18	kN
Peso próprio da laje	10,03	kN

VARIÁVEIS (Qk)

Cob. não acessível	8,92	kN
--------------------	------	----

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

ELU: Fd	27,39	kN
ELS: Fk	14,84	kN

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Nsd	27,39	kN
-----	-------	----

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	19	mm	h2	19	mm	h3	19	mm
d1	19	mm	d2	0	mm	d3	19	mm
Is	6859	mm ³	d	19,76	mm	β e ζ	1	
Γb	1,193E-06		A*	3800	mm ²	λ	0,007	
hef,w	27	mm						

Determinação do esforço resistente

fg;k;st	31,050	N/mm ²	fg;d	12,420	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	730741	mm ³						
Ncr	93979	N	C1	1		L0	2247	mm
I	2,691							
Ø	4,864		αimp	0,71		α0	0,6	
xcal	0,112		x	0,112				
Nb,Rd	30540	N	30,540		kN			

VERDADEIRO

X. Cálculo para o elemento estrutural primário – glass fins primeiro piso

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	temperado
--------------	-----------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

G	28000	N/mm ²
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
f _y	28,1	N/mm ²
ϵ	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

L	3210	mm
h	500	mm
A	18028	mm ²
I	375586245	mm ⁴
Linf x	3210	mm
Linf y	1270	mm

h _i	25	mm
n _i	3	
h _{int}	0,38	mm
h _{int,tot}	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (G_k)

Peso próprio	3,01	kN
Peso extra	5,10	kN
Peso próprio da laje	10,40	kN

VARIÁVEIS (Q_k)

Pavimento	8,15	kN
Cob. não acessível	4,08	kN

Vento	1,18	kN/m ²
-------	------	-------------------

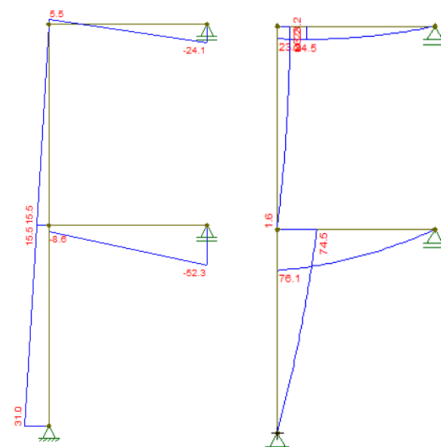
AÇÕES CÁLCULO (p_{sd})

	Axial		Lateral	
ELU: F _d	43,32	kN	6,36	kN/m
ELS: F _k	22,58	kN	3,20	kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

N _{sd}	43,32	kN
-----------------	-------	----

M _{sd}	74,50	kNm
-----------------	-------	-----



ESPESSURA EFETIVA (de acordo com CNR-DT 210)

Determinação da espessura efetiva

h1	25	mm	h2	25	mm	h3	25	mm
d1	25	mm	d2	0	mm	d3	25	mm
Is	15625	mm ³	d	25	mm	β e ζ	1	
Γb	8,380E-07		A*	40125	mm ²	λ	0,006	
hef,w	36	mm						

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st	106,050	N/mm ²	fg;d	67,976	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
lgA	1		λgl	1		k'ed	1	
<b b="" kv<="">	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	1502345	mm ³						
Ncr	160879246	N	C1	1		L0	1270	mm
λ	0,109							
∅	0,332		αimp	0,71		α0	0,6	
xcal	1,551		ξ	1,000				
Nb,Rd	1225473	N	1225,473	kN				

VERDADEIRO

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st	108,300	N/mm ²	fg;d	68,876	N/mm ²		
kmod	0,74		ked	1		ksf	1
λgA	1		λgl	1		k'ed	1
<b(kv)< b=""></b(kv)<>	1		RM	1		RM,v	1
Wx	1502345	mm ³					
Mc_r	54480082466	Nmm	C1	1			
J_{eq}	375586245	mm ⁴	J_{t,tot}	4209398883	mm ⁴		
J_{t,1}	1041666667	mm ⁴	J_{t,2}	1041666667	mm ⁴	J_{t,int}	42732217 mm ⁴
I_{norm LT}	0,054648744						
ØLT	0,482597579		α_{imp}	0,26		α₀	0,2
x_{LT,cal}	1,03940272		x_{LT}	1			
Mr	103474845	Nmm					
Mb,Rd	103474845	Nmm	103,475	kNm			

VERDADEIRO

VERIFICAÇÃO FLEXÃO-COMPRESSÃO

s_{max}	51,99	N/mm ²	fg;d	67,976	N/mm ²	VERDADEIRO
------------------------	-------	-------------------	-------------	--------	-------------------	-------------------

VERIFICAÇÃO FLECHA

δ_{ed}	2,188	mm	δ_{max}	12,840	mm
-----------------------	-------	----	------------------------	--------	----

Verificação **VERDADEIRO**

XI. Cálculo para o elemento estrutural primários – glass fins segundo piso

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	temperado
--------------	-----------

ft,k	70	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

G	28000	N/mm ²
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

L	3210	mm
h	500	mm
A	5769	mm ²
I	120187884	mm ⁴
Linf x	3210	mm
Linf y	1270	mm

hi	8	mm
ni	3	
hint	0,38	mm
hint,tot	0,76	mm

Tipo de estrutura	Primária
--------------------------	----------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	0,96	kN
Peso extra		kN
Peso próprio da laje	4,59	kN

VARIÁVEIS (Qk)

Cob. não acessível	4,08	kN
Vento	1,18	kN/m ²

AÇÕES CÁLCULO (psd)

	Axial		Lateral	
ELU: Fd	13,61	kN	5,50	kN/m
ELS: Fk	7,59	kN	2,56	kN/m

ESFORÇOS DE CÁLCULO

Nsd	11,96	kN
-----	-------	----

Msd	23,20	kNm
-----	-------	-----

ESPESSURA EFETIVA (de acordo com CNR-DT 210)**Determinação da espessura efetiva**

h1	8	mm	h2	8	mm	h3	8	mm
d1	8	mm	d2	0	mm	d3	8	mm
Is	512	mm ³	d	8	mm	β e ζ	1	
Γb	2,619E-06		A*	12840	mm ²	λ	0,011	
hef,w	12	mm						

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA POR FLEXÃO-TORÇÃO (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st	106,050	N/mm ²	fg;d	67,976	N/mm ²			
kmod	0,69		ked	1		ksf	1	
λgA	1		λgl	1		k'ed	1	
kv	1		RM	1		RM,v	1	
Wx	480752	mm ³						
Ncr	51481481	N	C1	1		L0	1270	mm
λ	0,109							
ø	0,332		αimp	0,71		α0	0,6	
xcal	1,551		ξ	1,000				
Nb,Rd	392152	N	392,152	kN				

VERDADEIRO

VERIFICAÇÃO RESISTÊNCIA ENCURVADURA LATERAL (de acordo com CNR-DT 210)

fg;k;st	108,300	N/mm ²	fg;d	68,876	N/mm ²		
kmod	0,74		ked	1		ksf	1
λgA	1		λgl	1		k'ed	1
<b(kv)< b=""></b(kv)<>	1		RM	1		RM,v	1
Wx	480752	mm ³					
Mcr	17358833998	Nmm	C1	1			
Jeq	120187884	mm ⁴	Jt,tot	1335471608	mm ⁴		
Jt,1	333333333,3	mm ⁴	Jt,2	333333333,3	mm ⁴	Jt,int	2138275 mm ⁴
l norm LT	0,054766413						
ØLT	0,482619314		αimp	0,26		α0	0,2
xLT,cal	1,039370111		xLT	1			
Mr	33112029	Nmm					
Mb,Rd	33112029	Nmm	33,112	kNm			

VERDADEIRO

VERIFICAÇÃO FLEXÃO-COMPRESSÃO

s max	50,62	N/mm ²	fg;d	67,98	N/mm ²	VERDADEIRO
--------------	-------	-------------------	-------------	-------	-------------------	-------------------

VERIFICAÇÃO FLECHA

δed	5,831	mm	δmax	12,840	mm
------------	-------	----	-------------	--------	----

Verificação **VERDADEIRO**

XII. Cálculo para o elemento de preenchimento – painel em fachadas com 2,54x3,21m

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	recozido
--------------	----------

ft,k	45	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

a	2540	mm
b	3210	mm

hi	19	mm
ni	3	
hv	0,76	mm

Tipo de estrutura	De preenchimento
--------------------------	------------------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	1,43	kN/m ²

VARIÁVEIS (Qk)

Vento	1,18	kN/m ²
-------	------	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

	Base SC	
<u>ELU: Fd</u>	2,98	kN/m ²
<u>ELS: Fk</u>	2,48	kN/m ²

VERIFICAÇÕES PANOS APOIADOS EM TODAS AS BORDAS (Anexo B prEN 16612)

Determinação da espessura efetiva

h1	19	mm	h2	19	mm	h3	19	mm
-----------	----	----	-----------	----	----	-----------	----	----

hm,1	19	mm	hm,2	0	mm	hm,3	19	mm
-------------	----	----	-------------	---	----	-------------	----	----

ω	0
----------	---

Espessura efetiva p/ cálculo da Resistência Espessura efetiva p/ cálculo da Deformação

hef,σ,1	32,91	mm	hef,w	27,40	mm
----------------	-------	----	--------------	-------	----

hef,σ,2	32,91	mm
----------------	-------	----

hef,σ,3	32,91	mm
----------------	-------	----

λ	0,79
----------	------

p*	0,0001
-----------	--------

Tensão máxima à flexão

Deformação máxima

z2	1,28
z3	4,81
z4	0,57

z1	0,76
-----------	------

k1	0,32
-----------	------

k4	0,05
-----------	------

s max	7,17	N/mm ²
--------------	------	-------------------

wmax	5,41	mm
-------------	------	----

fg,d	18,50	N/mm ²
-------------	-------	-------------------

wd	12,84	mm
-----------	-------	----

VERDADEIRO

VERDADEIRO

XIII. Cálculo para o elemento de preenchimento – painel em fachadas com 3,21x3,21m

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DA SECÇÃO

Vidro	recozido
--------------	----------

ft,k	45	N/mm ²
fc,k	500	N/mm ²
E	70000	N/mm ²

n	0,2	
α_T	9,00E-06	K ⁻¹
ρ	2500	kg/m ³

Película intermédia	PVB
----------------------------	-----

G	11	N/mm ²
fy	28,1	N/mm ²
ε	275	%

ρ	1,07	g/cm ³
α_T	0,000412	K ⁻¹

Secção	laminado
---------------	----------

a	3210	mm
b	3210	mm

hi	19	mm
ni	3	
hv	0,76	mm

Tipo de estrutura	De preenchimento
--------------------------	------------------

CARGAS E AÇÕES

PERMANENTES (Gk)

Peso próprio	1,43	kN/m ²

VARIÁVEIS (Qk)

Vento	1,18	kN/m ²
-------	------	-------------------

AÇÕES CÁLCULO (psd)

Base SC

ELU: Fd	2,98	kN/m ²
ELS: Fk	2,48	kN/m ²

VERIFICAÇÕES PANOS APOIADOS EM TODAS AS BORDAS (Anexo B EN 16612)

Determinação da espessura efetiva

h1	19	mm	h2	19	mm	h3	19	mm
hm,1	19	mm	hm,2	0	mm	hm,3	19	mm
ω	0							

Espessura efetiva p/ cálculo da Resistência Espessura efetiva p/ cálculo da Deformação

hef,σ,1	32,91	mm	hef,w	27,40	mm
hef,σ,2	32,91	mm			
hef,σ,3	32,91	mm			
λ	1,00		p*	0,0001	

Tensão máxima à flexão

z2	1,07
z3	4,50
z4	0,59

k1	0,2682
-----------	--------

S max	7,60	N/mm ²
--------------	------	-------------------

fg,d	18,50	N/mm ²
-------------	-------	-------------------

Deformação máxima

z1	0,75
-----------	------

k4	0,05
-----------	------

wmax	8,56	mm
-------------	------	----

wd	12,84	mm
-----------	-------	----

VERDADEIRO

VERDADEIRO