



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Compilação Estruturada de Dados sobre Elementos Construtivos Portantes em Vidro Estrutural

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Sara Filipa Marques Gouveia

Orientadora

Prof. Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2016

“Success is going from failure to failure without losing enthusiasm”
Winston Churchill

À minha mãe

AGRADECIMENTOS

Esta página é dedicada aos agradecimentos a todos aqueles com quem me cruzei em todo o percurso académico, essencialmente aos que contribuíram de maneira direta ou indireta à realização desta dissertação de mestrado. A todos quero aqui deixar uma palavra de gratidão.

À Professora Doutora Sandra Jordão pela constante disponibilidade e incansável apoio, não só em reflexões sobre o tema em desenvolvimento assim como ao longo do curso, é e sempre foi um exemplo de esforço, dedicação, determinação e empenho a seguir.

À minha mãe, o maior e mais especial agradecimento de todos, por tudo o que me proporcionou e todo o esforço realizado para que eu pudesse seguir o sonho de ser engenheira civil.

À minha família, que sempre me apoiou, um especial agradecimento à vovó Idalina, à madrinha Ana e à tia Bela, que sempre me mostraram ser sempre possível dar a volta e ser-se alguém melhor, mais determinado e com mais força. Quero ainda agradecer aos tios Lino e Eduardo ao padrinho Jorge e ao avô João pelo exemplo de vida que representam assim como pelas reflexões de engenharia que partilhámos ao longo do tempo e por fim um agradecimento especial à madrinha Odília, à Clara, à Anjos e ao Camacho pelo apoio de todas as ocasiões.

Aos primos que sempre me mostraram o quão grande eu poderia ser. Obrigada Catarina Jardim, Carla Jardim, Gonçalo Pereira, Melanie Henke, Nuno Jardim e Paulo Jardim.

Aos amigos, que desde o início, estiveram sempre presentes. Ana Gonçalves, Ana Paula Forno, Diogo Maurício, João Pinto da Costa, Joana Querido, Joana Marques, Marlene Quintal, Micaela Oliveira, Raquel Mota, Raquel Torra, Safira Monteiro, Sara Alves e Tiago Vieira Gonçalves, obrigada pelo carinho, pela transmissão de confiança e por todos os momentos partilhados.

Aos colegas do perfil de Mecânica Estrutural, Bruno Pedrosa, Gonçalo Vigário e Laura Seco, pela amizade, pelas trocas de conhecimento, pela companhia no dia a dia e pelos bons momentos partilhados.

E, para finalizar, um agradecimento muito especial ao meu Pai que não estando presente acredito que sempre me guiou em direção ao melhor caminho e nunca me deixou sozinha mesmo nos momentos menos bons. O grau de mestre em engenharia civil que pretendo obter com esta dissertação, é dedicado a ti.

RESUMO

O vidro estrutural apresenta-se como um material inovador, com extraordinárias vantagens estéticas e arquitetônicas e potencial para melhorar a eficiência energética dos edifícios. Nos últimos anos, os avanços tecnológicos nesta área têm permitido um aumento significativo da capacidade portante, modo de rotura mais previsível e mais seguro e inclusivamente alguma ductilidade estrutural. Por estes motivos, o vidro estrutural, granjeou a preferência de arquitetos e projetistas. No entanto, há ainda muitos aspetos que continuam em aberto na regulamentação, o que prejudica a sua ampla aplicação.

No sentido de colmatar essa lacuna, e de contribuir para o melhoramento do conhecimento do comportamento de elementos portantes em vidro, tem vindo a ser realizado, nas últimas décadas, extenso trabalho de investigação. Nessa sequência, está disponível uma quantidade significativa de informação relativa a várias problemáticas na área do vidro estrutural. A referida informação, terá grande valia para a caracterização do comportamento deste tipo de estruturas, calibração de modelos numéricos e analíticos e validação dos mesmos e de formulações de dimensionamento. No entanto, o volume significativo de informação existente só será utilizável se se encontrar completa, compilada e estruturada, o que não corresponde ao status quo atual.

Neste enquadramento, torna-se clara a vantagem em estabelecer plataformas estruturadas de dados que compilem a informação disponível nas temáticas fundamentais relativas às tipologias mais comuns de vidro estrutural. Além das vantagens referidas em termos de validação de formulações de dimensionamento, a compilação facilita a análise comparativa de informação num determinado domínio, a caracterização do estado do conhecimento, e facilita o reconhecimento dos sectores por caracterizar. No tempo atual, em que se prepara o novo Eurocódigo relativo ao vidro estrutural, esta ferramenta será necessária e pertinente.

O presente trabalho de dissertação de mestrado enquadra-se nesta problemática, tendo como objetivo principal o estabelecimento de uma plataforma estruturada, para compilação de informação relativa ao comportamento estrutural de uma tipologia de vidro estrutural.

ABSTRACT

Structural glass is an innovator material with amazing aesthetic and architectural advantages and great potential to improve buildings energy efficiency. In the last years, technological developments have increased the structural capacity, more predictable and safety failure mode and have given some structural ductility. For these reasons structural glass is now a material of preference of architects and structural engineers. However, there are many aspects that continue to be unsolved such as specific international standards which affect its wide application.

In order to overcome those aspects and to improve the knowledge about the behavior of structural glass elements extensive investigation work it has been done in the last decades. Thus an amount of information its available relative to some problematics in structural glass area. The referred information will have great value to the calibration models to the study of glass structural elements.

In this framework becomes clear the advantage of establishing structured data platforms that compile all the available information in the fundamental thematic relative to the most common glass structural typologies. Among the referred advantages in calibration model terms and formulation validation this gathering facilitates the comparative analysis in a specific domain, the characterization of the state of knowledge and also facilitates the recognition of the sectors still to characterize. At a present time, in which the new Eurocode relative to structural glass is being done this tool will be extremely needed.

This master dissertation fits in this problematic with the main objective to established a structured database to compile information relative to structural behavior in a specific structural glass typology.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
ABREVIATURAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Objetivos	1
1.2 Estrutura e Conteúdos da Dissertação	3
2 O VIDRO ESTRUTURAL	4
2.1 Resenha Histórica	4
2.2 Propriedades do Material.....	10
2.3 A Produção Industrial.....	12
2.4 A Fratura.....	12
2.4.1 Introdução	12
2.4.2 Mecânica da Fratura.....	13
2.4.3 Fadiga a Tensão Constante	14
2.5 Técnicas de Reforço	16
2.5.1 Tratamento Térmico	16
2.5.2 Laminação.....	18
2.5.3 Têmpera química	21
3 ESTADO DO CONHECIMENTO SOBRE VIGAS DE VIDRO ESTRUTURAL	22
3.1 Introdução.....	22
3.2 Tipologias de Vigas	22
3.2.1 Vigas Simples	23
3.2.2 Vigas Reforçadas	24
3.2.3 Vigas Pré-Esforçadas.....	26
3.2.4 Vigas Híbridas	28
3.3 Enquadramento Regulamentar	29
3.3.1 Introdução	29
3.3.1.1 Normas de Ensaio	30
3.3.1.1.1 EN 1288	30

3.3.1.1.2 EN 356	30
3.3.1.2. Normas de Apoio ao Dimensionamento	30
3.3.1.2.1 prEN 13474 ⁹	31
3.3.1.2.2 Guia Europeu de Dimensionamento Estrutural em Elementos de Vidro.....	32
3.3.1.2.3 ASTM E 1300.....	33
3.3.2 Conclusão	34
3.4 Contribuição Experimental.....	34
3.4.1 Introdução	34
3.4.1.1 Vigas mistas vidro-madeira	35
3.4.1.2 Vigas mistas vidro-betão armado.....	40
3.4.1.3 Vigas mistas vidro-GFRP	42
3.4.1.4 Vigas mistas vidro-aço.....	48
3.4.1.5 Vigas mistas vidro-plástico.....	57
3.4.2. Conclusão	58
4 BASE DE DADOS SOBRE VIGAS DE VIDRO ESTRUTURAL.....	60
4.1 Introdução.....	60
4.2 Arquitetura da base de dados.....	60
5 COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS POSTERIORES.....	64
6 CRÉDITOS DE IMAGEM.....	65
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
8 ANEXO.....	69

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
a.C.	Antes de Cristo
BSG	Vidros de boro-silicatos, “Boro Silicate Glass”
CEN	Comité Europeu de Normalização
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
d.C.	Depois de Cristo
EN	Norma Europeia
ESG	Vidro Temperado
GB	GlasBond; GB 368; Adesivo Acrílico
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
ISO	International Organization for Standardization
PE	Pré-Esforço
prEN	Rascunho de Norma Europeia
PVB	Polivinil de Butiral
SG	SentryGlass
SLSG	Vidro de silicatos, “Soda Lime Silicate Glass”
TVG	Vidro termo-endurecido
UV	Radiação Ultravioleta
3PB	Ensaio à flexão em 3 pontos, “Three Point Bending”
4PB	Ensaio à flexão em 4 pontos, “Four Point Bending”
5PB	Ensaio à flexão em 5 pontos, “Five Point Bending”

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Objetivos

O vidro como elemento portante apresenta-se como um material inovador com extraordinárias vantagens estéticas e arquitetónicas e potencial para melhorar a eficiência energética dos edifícios (Figura 1.1). Com o aumento do conhecimento científico e tecnológico deste material, nos últimos anos, é agora permitido um aumento significativo da capacidade portante cujo modo de rotura é mais previsível e mais seguro apresentando inclusivamente alguma ductilidade e redundância estrutural. Por estes motivos, o vidro estrutural torna-se assim um elemento de preferência dos arquitetos e projetistas.

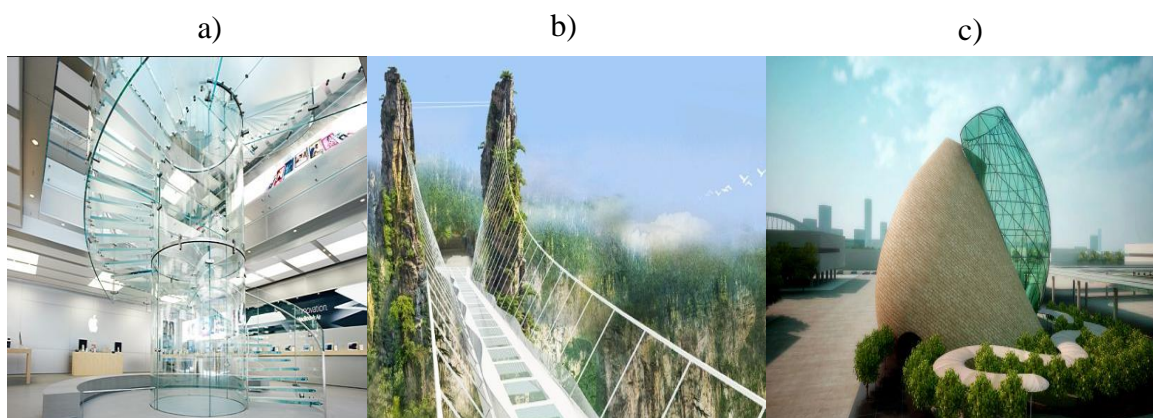


Figura 1.1. Exemplos do vidro como elemento estrutural: a) Loja Apple, 5ª Avenida, Nova Iorque (Imagem 1); b) Ponte Pedonal, Parque Natural de Zhangjiajie, China (Imagem 2); c) Pavilhão de Israel, Expo 2010, Shanghai, China (Imagem 3).

O vidro destaca-se na arquitetura moderna permitindo uma vasta aplicação que ambiciona satisfazer pela elegância e requinte, assim como, pelo grande impacto estético que as estruturas podem adquirir. Exemplos disso são: a loja da Apple em Nova Iorque, na 5ª Avenida, a Ponte Pedonal no parque natural de Zhangjiajie, na China, cujo tabuleiro tem 6 metros de largura e 430 metros de comprimento, encontrando-se a 300 metros do solo e o Pavilhão de Israel construído para a Expo 2010 em Shanghai, na China.

No entanto existem ainda alguns aspetos que continuam em aberto na regulamentação prejudicando a sua aplicação. De modo a colmatar essa lacuna, e de contribuir para o melhor conhecimento do comportamento de elementos portantes em vidro, tem vindo a ser realizado, nas últimas décadas um extenso trabalho de investigação o que disponibiliza assim uma quantidade significativa de informação relativa a várias problemáticas na área do vidro estrutural. A referida informação devidamente compilada e estruturada, terá uma grande valia para o comportamento deste tipo de estruturas, calibração e validação de modelos numéricos e formulações de dimensionamento.

Neste enquadramento, torna-se clara a vantagem em estabelecer plataformas estruturadas de dados, que compilem a informação disponível nas temáticas fundamentais relativa às tipologias mais comuns de vidro estrutural. Além das referidas vantagens em termos de calibração de modelos e de validação de formulações, a compilação facilita a análise comparativa de informação num determinado domínio, a caracterização do estado do conhecimento, e facilita o reconhecimento dos sectores por caracterizar.

O Eurocódigo 10 precisa de formulações novas e estas têm que ser desenvolvidas e validadas pelo que é necessária toda a informação para esse fim. Devido à grande contribuição experimental na área do vidro estrutural, é de todo o interesse desenvolver uma plataforma estruturada de dados sobre elementos que compile toda a informação disponível até então.

A presente dissertação tem como objetivo principal o estabelecimento de uma plataforma estruturada, para compilação de informação relativa ao comportamento estrutural de uma tipologia específica de vidro estrutural.

Essa tipologia focar-se-á em vigas de vidro, uma vez que nos dias de hoje, estas ocupam um espaço muito importante e bastante significativo nos elementos mais usados na construção com vidro estrutural. Desde as vigas simples às vigas reforçadas, passando pelas vigas híbridas e pré-esforçadas, apresentar-se-á o seu conceito com respetiva ilustração e apresentar-se-á o estudo desenvolvido assim como as conclusões obtidas, por vários autores, em vigas cuja constituição é mais predominante atualmente.

1.2 Estrutura e Conteúdos da Dissertação

O desenvolvimento do trabalho encontra-se de acordo com o seguinte:

No Capítulo 1 é apresentado um enquadramento face ao estudo do conhecimento, objetivos e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 descreve-se o vidro como elemento estrutural. Após uma breve resenha histórica apresentam-se as suas propriedades e explica-se de forma sucinta a sua produção industrial referindo ainda como se comporta o elemento quando sujeito à fratura e quais as suas técnicas de reforço.

No Capítulo 3 expõe-se o estado do conhecimento sobre as vigas de vidro estrutural onde após uma nota introdutória se apresenta algumas tipologias do referido material e se realiza um enquadramento regulamentar referindo ainda as contribuições experimentais, analíticas e numéricas, desenvolvidas até então.

No Capítulo 4 apresenta-se a base de dados desenvolvida sobre vigas de vidro estrutural, efetuando uma breve introdução ao objetivo da mesma, ao seu funcionamento e à sua posterior aplicação.

No Capítulo 5 apresenta-se alguns comentários relativamente ao trabalho desenvolvido apresentando propostas de interesse para possíveis trabalhos futuros.

2 O VIDRO ESTRUTURAL

2.1 Resenha Histórica

O vidro é um dos materiais mais antigos conhecido na história da humanidade (Zarzycki). Este surge na natureza, através de erupções vulcânicas, descargas elétricas (trovoadas) e impacto dos meteoritos dando origem a obsidianas (Figura 2.2 a)), fulgurites e tectites (Kantu, 1998).

A sua descoberta surgiu no Egito há cerca de 3500 anos a.C., no entanto o seu fabrico data de 1500 a.C. na Mesopotâmica. Em 650 a.C. surgiu a técnica de sopro revolucionando a manufatura do vidro. 600 anos mais tarde, os fenícios e os romanos adquirem especial importância no desenvolvimento de novas técnicas expandindo assim a implantação. A Figura 2.1, apresenta uma “*timeline*” da evolução geoestratégica do vidro.

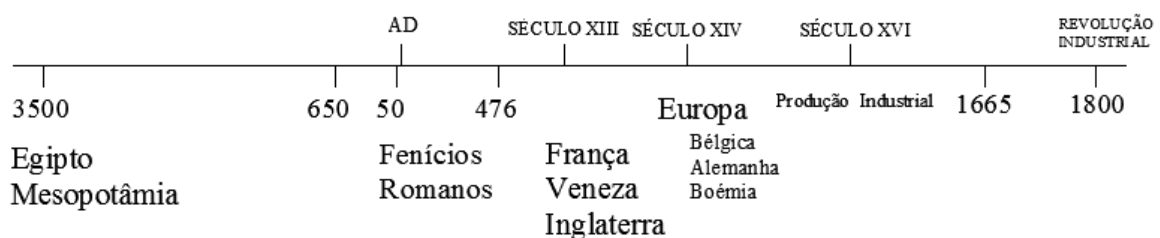


Figura 2.1. “*timeline*” da evolução geoestratégica do vidro.

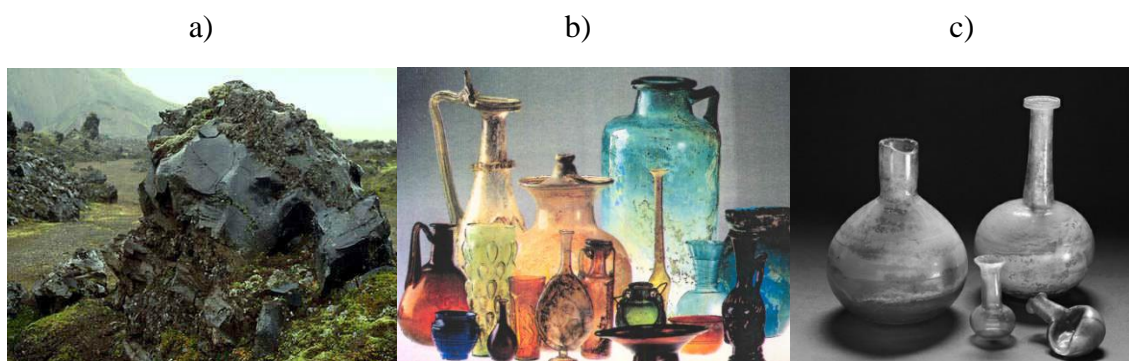


Figura 2.2. Aplicabilidade do vidro nos primórdios: a) Obsidiana, vidro natural (Imagem 4); b) Vasos egípcios, 1500 a.C. (Imagem 5); c) Vasos romanos, Século I e II, d.C. (Imagem 6).

100 d.C., os romanos aperfeiçoaram as técnicas conhecidas até então e revolucionaram a produção do vidro com novas técnicas de produção de vidro plano em largas dimensões. Com a queda do império, em 476 d.C., algumas das técnicas perderam-se e o vidro passou apenas a ser utilizado pela elite.

No século XIII, em 1271, Veneza torna-se uma referência mundial na produção de vidro aperfeiçoando a técnica do vidro fundido, introduzindo também o vidro decorativo (Murano) e o espelho, produzido com folhas de mercúrio. Já no século XIV, em 1330, França desenvolve os métodos italianos da produção de vidro.

As primeiras lentes de telescópio foram desenhadas em 1590 na Itália e na Holanda (os telescópios de Galileo e Kepler que datam de 1609 e 1610, respectivamente). Até final do século XIX, os vidros óticos foram tratados como subprodutos da indústria do vidro sendo o uso do vidro para este fim de pouca qualidade. No entanto, Guinand na Suíça, introduziu uma melhoria significativa no final do século XVIII por ter introduzido uma melhor homogeneização do material.

Em 1665, Colbert criou a indústria centralizada do vidro plano para a produção de espelhos para o Palácio de Versailles. Em 1765, fundaram-se as fábricas Baccarat (produção de vidro de cristal) e mais tarde a fábrica Saint-Gobain, criada por iniciativa de Colbert para combater o monopólio veneziano que em 1763 tornou-se a “*Manufacture Royale des Glaces de France*”, ultrapassando assim Veneza como exportador de espelhos (Zarzycki).

Com a revolução industrial, os processos de manufatura do vidro progrediram quimicamente o que permitiu uma elevada qualidade de transparência no material assim como resistência térmica e mecânica. Como exemplo de aplicação da sua importância num mundo que viria a ser o atual, destaca-se a lâmpada de Edison.

A partir da primeira Guerra Mundial, Parra-Mantois em França, Chance Brothers na Grã-Bretanha e Bausch e Lomb nos Estados Unidos desenvolveram competitividade industrial.

Em meados do século XIX, a aplicação do vidro em monumentos torna-se evidente, destacando-se, a Cúpula de Vidro, Bretton Hall em Yorkshire, o Jardim Botânico Nacional em Dublin e o Palácio de Cristal de Paxton em Londres (Figura 2.3).

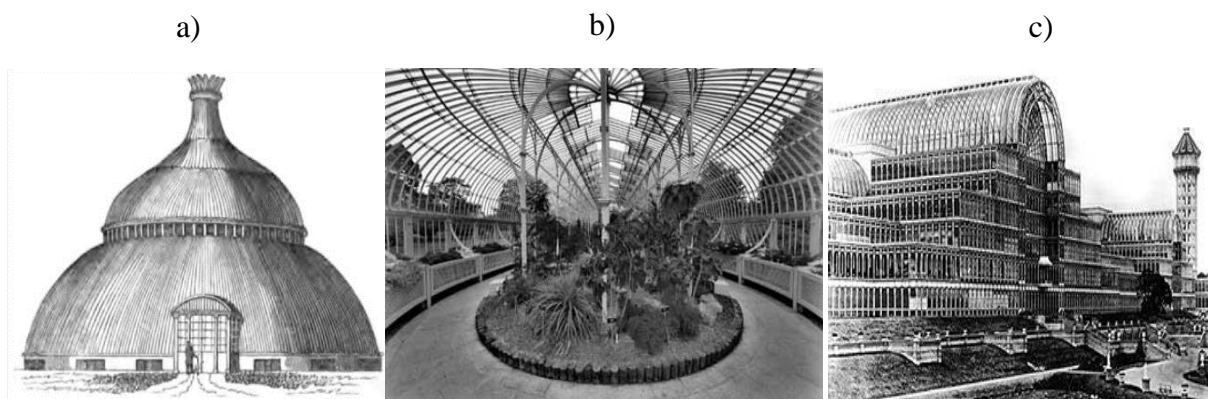


Figura 2.3. Exemplos de aplicação século XIX: a) Cúpula de Vidro, Bretton Hall, Yorkshire, 1827; b) Jardim Botânico Nacional, Dublin, 1848; c) Palácio de Cristal de Paxton, Londres, 1851 (O'Regan et al, 2014).

As medições sistemáticas das propriedades físicas de vários tipos de vidros começaram por volta de 1920 na Grã-Bretanha sob a direção de Turner do Departamento de Tecnologia do vidro na Universidade de Sheffield. Como resultado, uma lenta, mas estável generalização do conceito do vidro tomou lugar e o termo vidro começou a ser aplicado para definir um sólido não cristalino em geral. Estudos de Tammann em 1930 confirmaram este ponto de vista redirecionando a pesquisa para um entendimento de “*vitreous state*” como um estado de agregação da matéria. As abordagens que inicialmente eram de natureza meramente fenomenológica foram então lentamente redirecionadas para estudos estruturais (Zarzycki).

Segundo (O'Regan et al, 2014), o processo utilizado para a produção de vidro plano era o “*crown process*” (Figura 2.4a), desenvolvido no século XIV, este consistia no sopro de uma larga bolha de vidro que logo em seguida era girada rapidamente enquanto o vidro ainda se apresentava maleável criando um disco que seria arrefecido, lentamente. Um marco importante no desenvolvimento do vidro corresponde à produção de vidro plano, o que possibilita a sua utilização em vãos exteriores nas edificações. Foi a variação de espessura dos painéis de vidro plano realizados por este método que introduzira o mito do vidro “fluido” mesmo quando arrefecido. Através deste método produziram-se painéis até 0.5 x 0.75 metros (O'Regan et al, 2014).

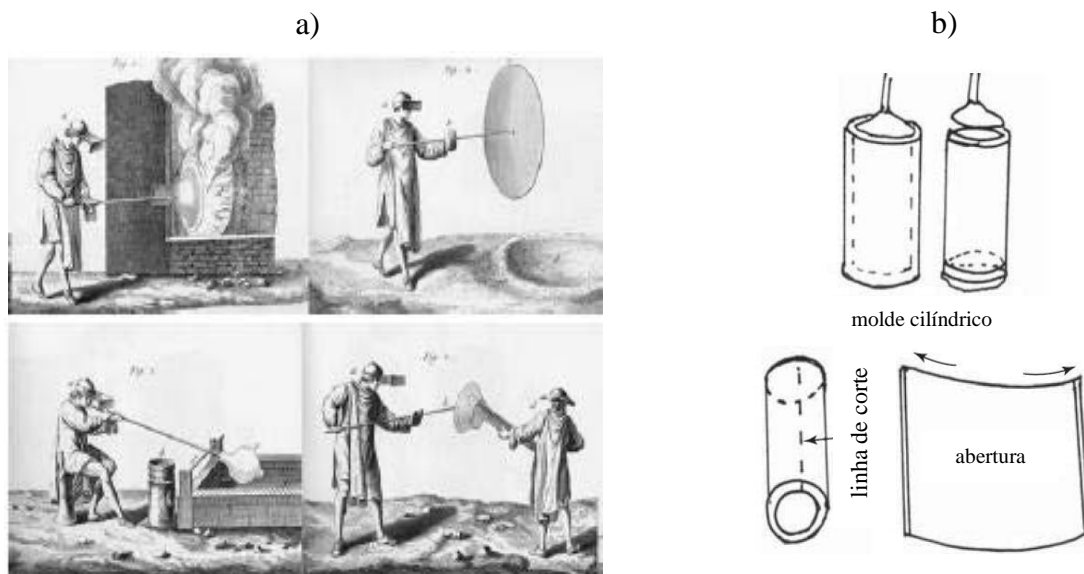


Figura 2.4. Processos de fabricação do vidro: a) “*crown process*” (Lopes, 2016); b) processo cilíndrico (adaptado, O’Regan et al, 2014).

No final do século XIX introduziram-se os processos mecânicos sendo o processo cilíndrico (Figura 2.4 b)) o de referência. Este processo permitiu ao vidro uma espessura mais uniforme e com dimensões até 1.0 x 1.3 metros, a sua produção consistia em soprar uma bolha de vidro e depois oscilá-la em uma forma cilíndrica. As extremidades eram cortadas realizando também uma fenda na longitudinal que seriam reaquecidas e abertas em uma folha de vidro plano.

O “*Rolling process*” (Figura 2.5 b)), inicialmente produzido por Chance Brothers em 1870, seria utilizado para a fabricação da modelação plana e do vidro reforçado. Uma corrente contínua de vidro fundido é derramada em cilindros refrigerados. A modelação plana do vidro é realizada através de uma passagem pelos cilindros enquanto que o vidro reforçado necessitava de duas passagens. Este processo era pouco económico e possuía um desperdício de 20%. O processo de Bicheroux para fundição, moagem, afiação e polimento das placas de vidro apareceu em 1918 (O’Regan, 2014).

Em 1872, William Pilkington inventou a máquina que automatizou a produção do vidro plano utilizando o processo cilíndrico, no entanto, no início do século XX desenvolveram-se novos processos, mais precisamente o “*Belgian Fourcault e American Colburn process*” (Figura 2.5 a)) cujo vidro fundido era remetido para um forno numa corrente de estanho que depois era aplanado e arrefecido em rolos de amianto. Os painéis tinham até 1.9 metros de largura (O’Regan et al, 2014).

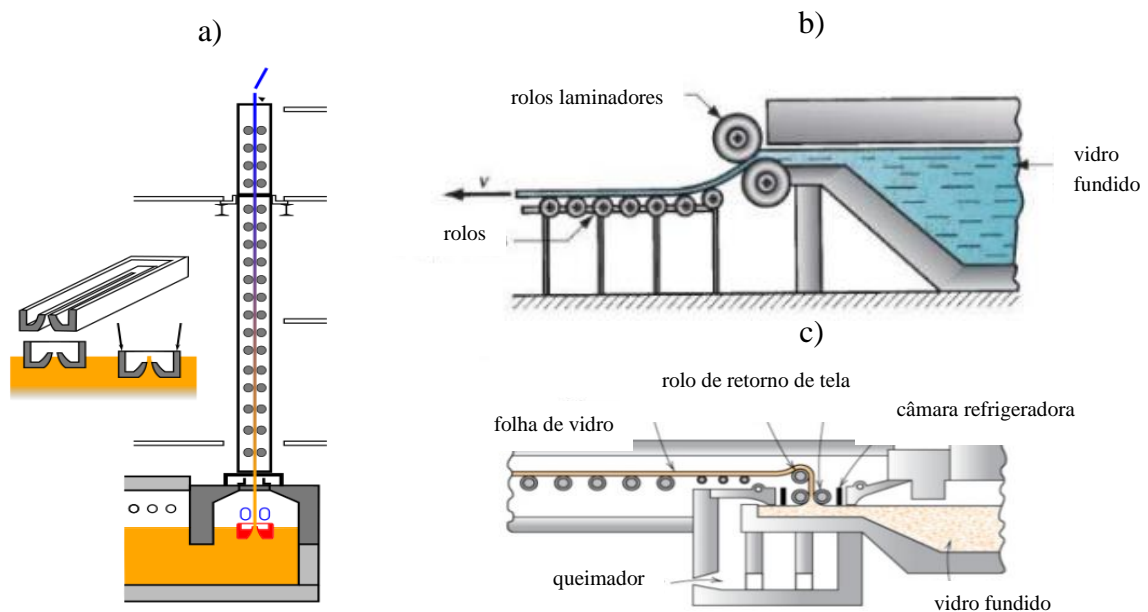


Figura 2.5. Processos mecânicos de manufatura do vidro: a) “*Belgian Fourcault e American Colburn process*” (Imagem 7); b) “*Rolling process*” (Imagem 8); c) “*Drawing process*” (Imagem 9).

Em 1888, com o objetivo de reforçar o vidro introduzindo alguma capacidade resistente, aparece o tratamento térmico, primeiramente desenvolvido em França, aumentando a capacidade resistente do vidro em 400%. Em 1900, a patente do vidro temperado foi adquirida pelo químico austríaco Rudolph A. Seiden. Esta patente descreve o processo de arrefecimento da superfície do vidro recozido num ritmo mais rápido e só depois o centro, criando um material mais forte que o vidro básico. (O'Regan, 2014).

A Figura 2.6 apresenta uma evolução temporal dos processos de manufatura do vidro, passando de um processo a outro mais avançado melhorando as suas propriedades resistentes assim como o seu meio de manufatura.

Em 1903, seguindo a técnica de reforço, surge o vidro laminado, técnica esta descoberta pelo químico francês Edouard Benedictus. O objetivo da sua criação foi introduzir várias camadas de vidro que exibissem um melhor comportamento de pós-rotura que uma única camada. Na época havia problemas de durabilidade no material. Uma década mais tarde, na Bélgica e no Reino Unido, é desenvolvido o processo mecânico “*Drawing process*” (Figura 2.5 c)).

Em 1950 desenvolve-se o primeiro centro de investigação dedicado ao material criado pela empresa “Ford”. Em 1959, desenvolvido por Alistair Pilkington, a técnica do “float process”, permitiu a produção de um vidro com alta qualidade e espessura constante.

Este processo não necessita de polimentos e também por isso tornou o vidro plano mais acessível. Este método representa 90% da produção mundial de vidro plano e será explorado ainda neste capítulo, na secção 2.3.

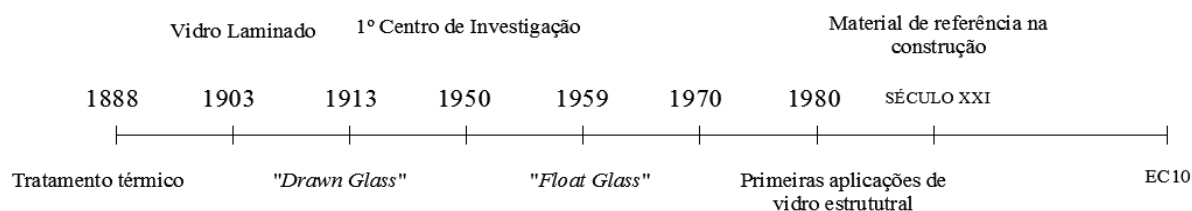


Figura 2.6. Evolução temporal dos processos de manufatura do vidro.

Em 1970, a crise energética, levou à procura de soluções mais eficientes como as caixas de ar, vidros múltiplos, capas e o uso do vidro para intercalar células fotovoltaicas.

Em 1980 aparecem as primeiras aplicações em vidro estrutural pelo nome dos engenheiros estruturais Peter Rice, Rob Nijse e Tim Macfarlane, tornando-se duas décadas mais tarde, o material de referência na área da construção. Nos tempos que decorrem, com todo o conhecimento adquirido ao longo das décadas sobre o vidro, desenvolve-se agora o Eurocódigo 10 que visa à semelhança dos outros Eurocódigos estruturais, permitir a aplicabilidade do material a nível estrutural (Figura 2.7) e aumentar a sua importância estratégica.

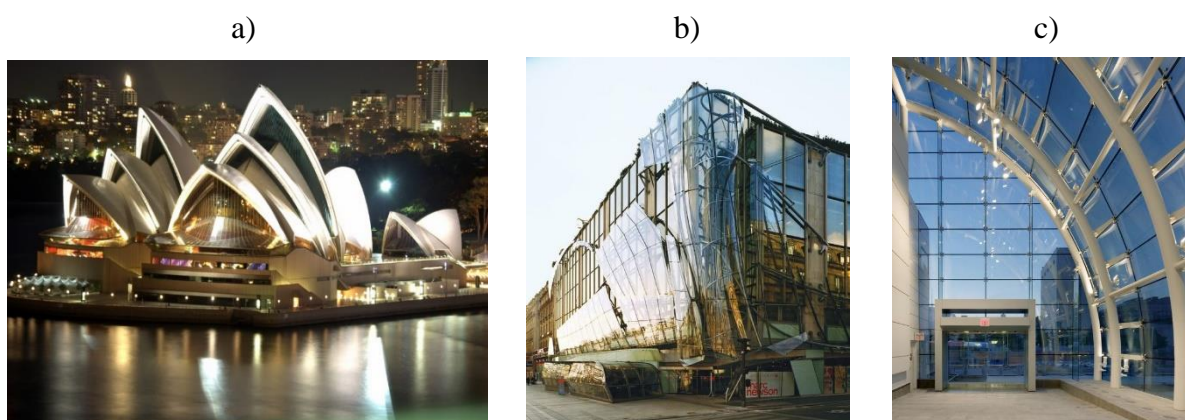


Figura 2.7. Aplicações de vidro estrutural: a) Ópera de Sydney, Austrália (Imagem 10); b) “Drugstore Publicis”, Paris (Imagem 11); c) “West Midtown Ferry Terminal”, Nova Iorque (Imagem 12).

2.2 Propriedades do Material

Para que se conheça o material como elemento portante é necessário conhecer as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

O vidro é um material homogêneo, sólido e inorgânico sujeito a um arrefecimento que impede a completa cristalização. Este processo corresponde à passagem do estado líquido ao estado sólido formando uma estrutura amorfa, cuja estrutura atômica é irregular (Figura 2.8), pelo que não há planos de deslocamento internos, fazendo com que não haja dissipação de concentração de tensões. O vidro caracteriza-se, desta maneira, como um material frágil.

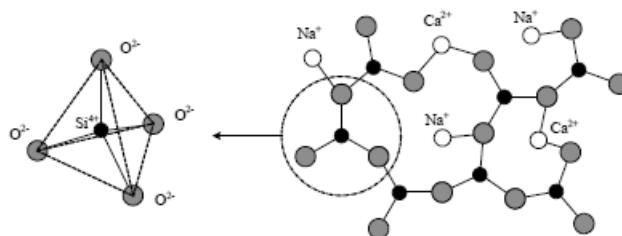


Figura 2.8 - Estrutura atômica das moléculas do vidro de sílica soda-cálcio (SLSG) (Louter, 2011).

A Figura 2.9, relaciona os valores de resistência típicos para diferentes profundidades da fenda. A resistência teórica à tração (baseada em forças moleculares) é de 32 Gpa, no entanto, a resistência real, é muito mais baixa pois depende largamente das falhas mecânicas à superfície, que não são necessariamente visíveis a olho nu.

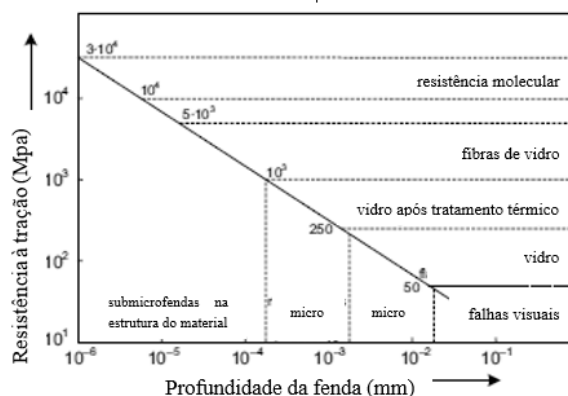


Figura 2.9. Relação entre a resistência à tração e a profundidade da fenda (adaptado Haldimann et al, 2008).

Existem dois grandes grupos de vidros, os vidros de sílica soda-cálcio (SLSG) e os de boro-silicatos (BSG) sendo o primeiro, o mais utilizado na indústria da construção e o último em situações específicas, como proteção ao fogo, uma vez que oferece elevada resistência às variações de temperatura (Haldimann et al, 2008).

O vidro de sílica soda-cálcio é composto por dióxido de silício (sílica), óxido de cálcio (cal), carbonato de sódio, magnésio e alumina, propriedades estas quantificadas pormenorizadamente no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Composição química dos vidros de sílica soda-cálcio e boro-silicatos, respetivamente (adaptado, Haldimann et al, 2008).

		Vidro sílica soda-cálcio	Vidros boro-silicatos
Sílica	SiO ₂	69-74%	70-87%
Cal	CaO	5-14%	-
Soda	Na ₂ O	10-16%	0-8%
Óxido de Boro	B ₂ O ₃	-	7-15%
Óxido de Potássio	K ₂ O	-	0-8%
Magnésio	MgO	0-6%	-
Alumina	Al ₂ O ₃	0-3%	0-8%
Outros		0-5%	0-8%

No Quadro 2.2 apresenta-se alguma das propriedades mecânicas mais relevantes do material.

Quadro 2.2 – Propriedades mecânicas do vidro de sílica soda-cálcio (adaptado, Louter, 2011).

Propriedades	Simbologia	Unidade	Valores
Densidade	ρ	kg/m ³	2500
Dureza	HK _{0,1/20}	Gpa	6
Módulo de Elasticidade	E	Gpa	70
Coefficiente de Poisson	ν	-	0,2
Módulo de Distorção	Υ	Gpa	28
Capacidade térmica específica	c_p	J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹	720
Coefficiente de expansão térmica	α	K ⁻¹	9x10 ⁻⁶
Condutividade térmica	λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	1
Resistência à tração em flexão	σ	Mpa	45

2.3 A Produção Industrial

A produção industrial (Figura 2.11) do vidro float é iniciada através da matéria prima extraída da natureza sendo fundida num forno a 1550°C. O vidro é passado posteriormente para um banho de estanho fundido a 1000°C, cuja oxidação é impedida por uma atmosfera inerte constituída por hidrogénio e azoto. Uma vez que o peso específico do estanho fundido é superior ao do vidro, este permite que o último flutue, espalhando-se e formando assim uma superfície lisa e plana com uma espessura uniforme a uma velocidade controlada por uma correia contínua de

rolos dentados. A chapa de vidro sai da zona de flutuação a cerca de 600°C e entra em seguida para um forno de recozimento. É no forno de recozimento que o vidro é, lentamente, arrefecido até 100°C de modo a evitar tensões residuais no material.

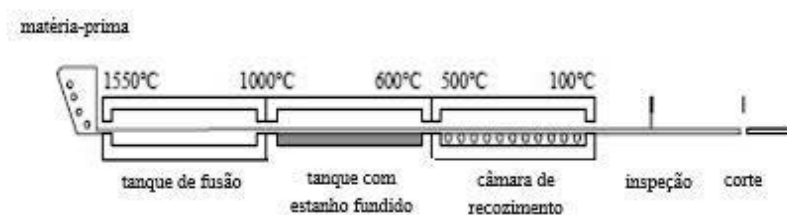


Figura 2.11. Processo industrial do vidro por flutuação (adaptado, Louter 2011).

O vidro é inspecionado de modo a identificar algum defeito visual através de um processo automatizado passando numa fase final por um processo de corte cujas placas têm uma dimensão padrão de 6 x 3.21 metros (Haldimann et al, 2008).

Este processo, permite obter placas de vidro de alta qualidade, ou seja, espessuras constantes, faces paralelas e planas aumentando a qualidade ótica do vidro, aliado a um baixo custo quando realizado a larga escala.

Os vidros devem cumprir determinados parâmetros de qualidade uma vez que as normas internacionais, requerem um grau de qualidade no processo de fabrico.

2.4 A Fratura

2.4.1 Introdução

O vidro é um material que exhibe fendas microscópicas à superfície que se podem propagar e tornarem-se macroscópicas. Estas dependem do tamanho que eventualmente podem adquirir

assim como da sua forma sendo que as fendas mais próximas podem interagir e desenvolverem-se. A evolução das fendas depende não só das tensões instaladas e da distribuição de tensões assim como da interação química e física com o ambiente e ainda da geometria das mesmas. Quando carregadas, as fendas exibem um comportamento dependente do tempo sendo que este crescimento lento da fenda, ou crescimento da fenda crítica, origina-se no fenómeno de fadiga a tensão constante, “*Stress Corrosion*”.

2.4.2 Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura integra-se dentro da temática da Teoria da Fratura Frágil, estudada por Griffith, que estabeleceu uma relação entre a tensão da fratura e o tamanho da fenda. Esta relação é conhecida como o Balanço da Energia de Griffith e refere-se como ponto de partida para o estudo do desenvolvimento da mecânica da fratura. Griffith menciona ainda que a pouca resistência dos materiais frágeis se deve ao facto de existirem defeitos submicroscópicos, defeitos esses muito pequenos para serem detetados a olho nu e funcionam como concentradores de tensões nas microfendas internas do material.

A teoria do Balanço da Energia refere que “Uma fenda propagar-se-á quando a diminuição de energia elástica de deformação for pelo menos igual à energia necessária para criar a nova superfície da fenda”, pelo que quando uma fenda evolui, produz um aumento de área superficial associado às superfícies da fenda, causando um aumento de energia. A sua origem encontra-se na energia elástica de deformação que se produz quando a fenda se propaga (Ruchert, 2014).

Griffith considera que a resistência à fratura é determinada por 2 parâmetros: energia de superfície da fratura (propriedade do material sem defeito) e do tamanho do defeito crítico c , que é uma característica microestrutural do material.

De modo a explicar os mecanismos de rotura dos materiais frágeis distingue-se os três modos de rotura da fratura mecânica elástica linear (LEFM), cujo colapso se dá maioritariamente devido à evolução das microfendas. O Modo 1 (Figura 2.12.a)) corresponde à separação normal da fenda sob ação da tensão de tração, o Modo 2 (Figura 2.12.b)) corresponde ao corte longitudinal da fenda na direção normal à frente da fenda e o Modo 3 (Figura 2.12.c)), corresponde ao corte lateral paralelo à frente da fenda (Louter, 2011).

As equações (1) e (2) abaixo descritas são referentes ao primeiro modo de rotura pelo que o comportamento do vidro até à rotura, é então descrito pela teoria elástica linear.

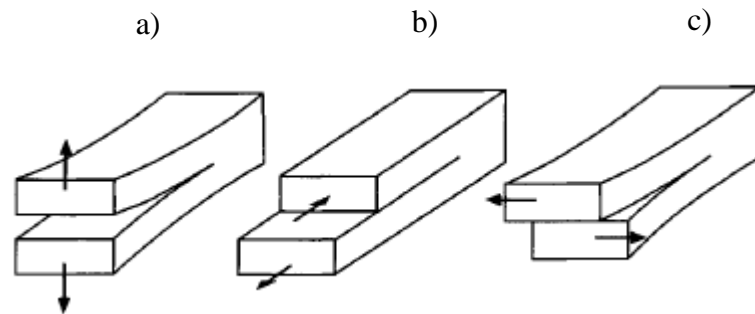


Figura 2.12. Modos de rotura da fratura mecânica elástica linear a) Modo 1; b) Modo 2, c) Modo 3. (Lawn, 1993).

2.4.3 Fadiga a Tensão Constante

Este fenómeno, consiste na rotura das ligações químicas da molécula de oxigénio-silício do vidro na presença de moléculas de água (Figura 2.13) e é determinado por algumas questões físicas e químicas que ocorrem a uma micro/nano escala sendo a composição química do material e a presença da água/vapor de água na atmosfera, a temperatura ambiente e o pH, os fatores determinantes (Ronchetti et al, 2013).

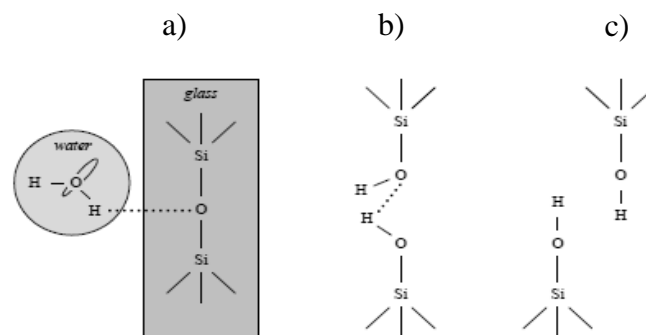


Figura 2.13. Esquema do fenómeno de “*Stress Corrosion*” (a) Absorção da água; (b) Reação química; (c) Formação de grupos hidroxilo (Louter, 2011).

Esta reação química tanto aguça como alonga a extremidade da fenda o que reflete num aumento de tensão na sua vizinhança (Louter, 2011).

A análise do crescimento da fenda está associada ao conceito de intensidade “elástica” da tensão, K_I , ou fratura mecânica (Tavares, 2015). Este parâmetro quantifica a severidade da situação da fenda que depende da combinação do comprimento da fenda, do carregamento e da geometria sendo dado pela seguinte expressão:

$$K_I = Y\sigma_n\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

sendo que a é o comprimento da fenda, σ_n a tensão de tração nominal normal e Y um parâmetro geométrico.

O rápido crescimento da fenda e conseqüentemente rotura do vidro, ocorre quando K_I atinge ou excede a intensidade de tensão crítica, K_{IC} . Este critério é conhecido como o critério de fratura de Irwin e é dado pela seguinte expressão (Louter, 2011):

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2)$$

sendo K_{IC} , como acima referido, fator de intensidade de tensão crítica.

O fenómeno de fadiga a tensão constante, demonstra a relação entre a velocidade de propagação da fenda no vidro v e um fator de medida da intensidade da tensão aplicada K_I (Figura 2.14).

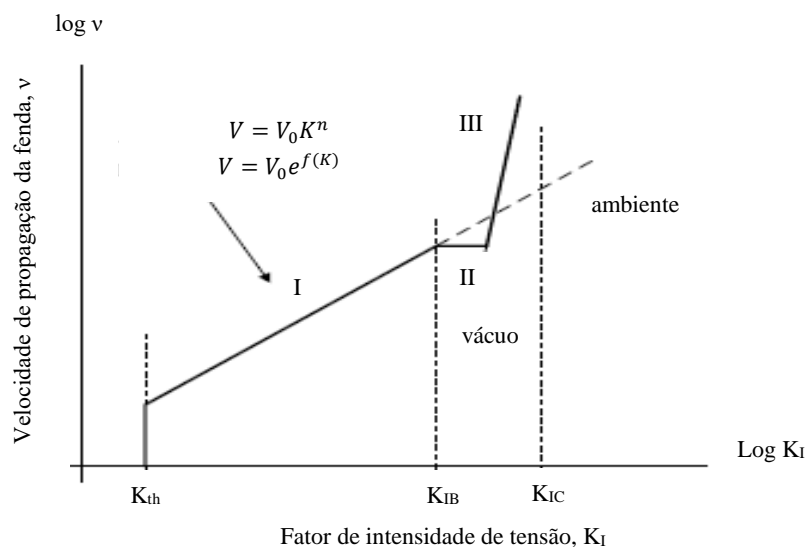


Figura 2.14. Representação esquemática da relação v e K_I (adaptado Haldimann et al, 2008).

No regime I, a propagação da fenda depende não só dos esforços de tração como também da humidade ambiente, uma vez que o fenómeno de fadiga a tensão constante provoca o aumento de fendas no interior do elemento. Para valores inferiores a K_{th} , não ocorre propagação da fenda.

No regime II, a velocidade de propagação da fenda é independente da intensidade de tensão K_I . Nesta região, a velocidade da reação química depende da taxa de água adquirida pelo meio ambiente.

É no último regime, regime III, que o fator de intensidade de tensão, K_I , se aproxima da intensidade de tensão crítica, K_{IC} , e a velocidade de propagação da fenda, v , é independente do ambiente. É nesta fase que surgem fendas críticas que reduzem a resistência estrutural e que podem eventualmente levar à fratura (Louter, 2011).

Nenhuma teoria permite a completa descrição de todos os fenômenos de fadiga estática incluindo a dependência requerida do ambiente e das condições à superfície. Pelo que se desenvolveram um número de equações que caracterizam a velocidade da fenda:

$$V = V_0 K^n \quad (3)$$

$$V = V_0 e^{f(K)} \quad (4)$$

Observou-se que o crescimento da fenda em vácuo representa um fator importante e que deve ser tido em conta na análise da fadiga estática. O que implica que processos intrínsecos ao vidro são importantes em adição aos fatores externos e sugerem que as teorias do fenômeno de fadiga a tensão constante, “*Stress Corrosion*”, por si só são insuficientes para descrever o fenômeno em questão (R. Adams, 1977).

2.5 Técnicas de Reforço

As técnicas de reforço são utilizadas com o intuito de aumentar a capacidade resistente do material estrutural e tornar a sua rotura mais segura e mais previsível. Uma vez que este apresenta uma característica de rotura frágil torna-se assim necessário a introdução de processos de reforço entre os quais aqui retratados, a laminação e o tratamento térmico.

2.5.1 Tratamento Térmico

O processo de tratamento térmico, ou têmpera, é produzido através de vidro recozido aquecido a 620°C-675°C sendo rapidamente arrefecido, de forma controlada, por jatos de ar refrigerado (Figura 2.15). Este último arrefece e solidifica a superfície mais rapidamente em relação ao seu interior criando um campo de tensões de compressão à superfície e de tração no interior. Este processo é facilitado pelo baixo coeficiente de transmissão térmica do vidro.

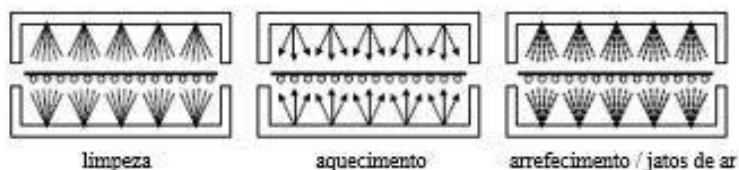


Figura 2.15. Esquema do processo de tratamento térmico (adaptado, Louter, 2011).

A Figura 2.16, representa o princípio do processo de tratamento térmico. O objetivo é que se reforce o material de modo a que não ocorra abertura de fendas. Esta resistência acrescida deve-se à tensão residual instalada e à elevada resistência à compressão, reduzindo os esforços de tração não atingindo a rotura. Pelo contrário, o vidro recozido simples, atinge a rotura quando solicitado nas mesmas condições.

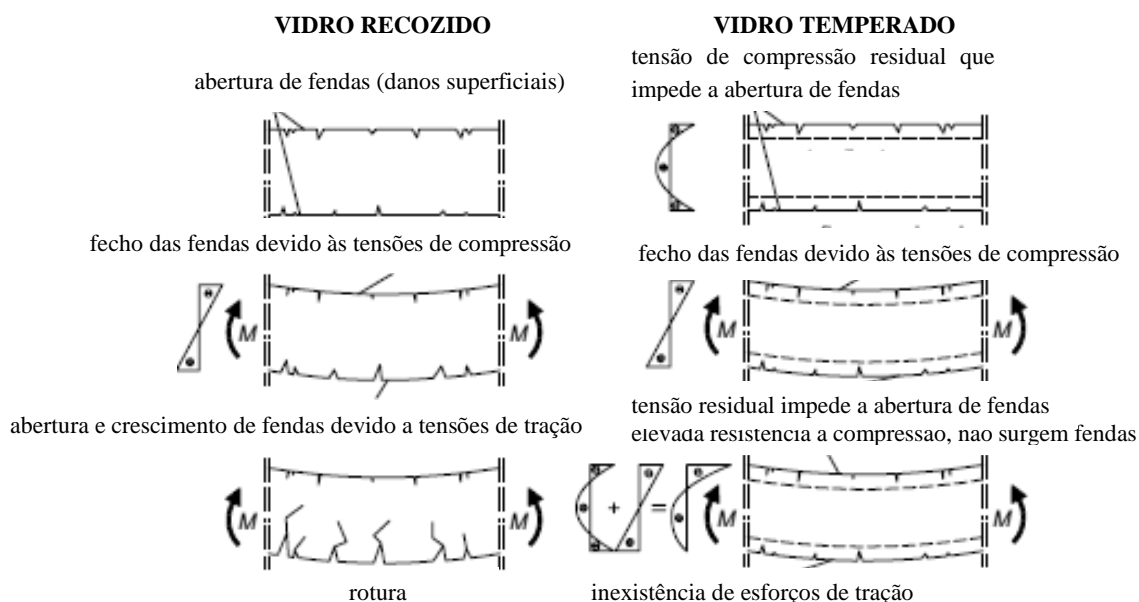


Figura 2.16. Princípio do tratamento térmico do vidro (adaptado Haldimann et al, 2008).

Nos primeiros segundos, o campo de tensões é inverso (Figura 2.17), mas uma vez que o vidro apresenta alguma viscosidade a estas temperaturas, as trações dissipam-se. A distribuição de tensões final, no interior do vidro, ocorre para temperaturas inferiores a 525°C. A figura abaixo pretende ilustrar o desenvolvimento do campo de tensões ao longo do processo de têmpera (Valarinho, 2010).



Figura 2.17. Campo de tensões ao longo do processo de têmpera (adaptado, Haldimann, 2008).

Através deste método e dependendo da velocidade de arrefecimento do vidro, produzem-se dois tipos de vidro. O vidro temperado e o vidro termo-endurecido, onde o primeiro apresenta um campo de tensões residuais superior ao segundo, 250 e 110 Mpa, respetivamente.

O padrão de fratura do vidro depende das tensões residuais resultantes da têmpera e é através do tratamento térmico aplicado que se define o tipo de fratura. O vidro temperado (Figura 2.18. c)) fratura em fragmentos mais pequenos relativamente ao vidro termo-endurecido (Figura 2.18. b)), e este por sua vez fratura em fragmentos ainda menores que o vidro recozido (Figura 2.18.a)). Por esta razão se considera o vidro temperado, um vidro seguro.

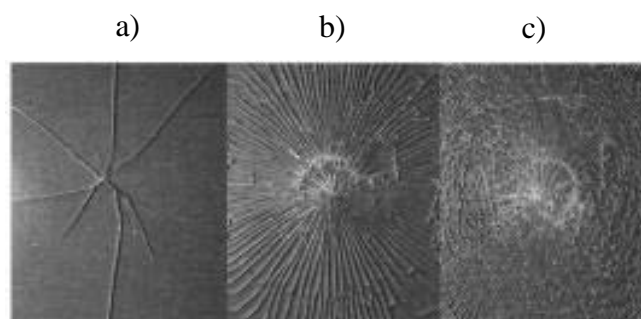


Figura 2.18. Padrão de fratura do: (a) vidro recozido; (b) vidro termo-endurecido (c) vidro temperado (Haldimann et al, 2008).

Em relação à sua utilização, o vidro temperado apresenta uma desvantagem pelo facto de não se poder cortar ou perfurar depois de fabricado sendo que existe ainda o risco de o vidro sofrer uma quebra espontânea passado algum tempo do seu fabrico. Esta quebra está relacionada com a inclusão de partículas de sulfato de níquel (NiS), que são impossíveis de evitar durante o processo de têmpera (Valarinho 2010).

O risco que pode ser minimizado através da técnica de “*Heat-Soak Test*”, HST, que basicamente é um teste de calor que consiste em aquecer o vidro temperado a 290°C durante 8 horas. Caso exista inclusão devido às partículas de sulfato de níquel, é provável que o material atinja o colapso durante a imersão de calor (Klaasimeistere@2016).

2.5.2 Laminação

A laminação é um método que engloba uma ou mais peças de vidro monolítico que se interligam através de um material viscoelástico, cujo objetivo é melhorar a capacidade de pós-rotura do material tornando a rotura mais previsível e segura.

Enquanto elemento estrutural, o comportamento do vidro laminado (Figura 2.20 a)), depende da qualidade do vidro utilizado assim como das propriedades das películas (*interlayers*) apresentando um comportamento melhorado em caso de rotura uma vez que os fragmentos de vidro subsistem conexos ao material viscoelástico evitando a sua projeção. Desta maneira, não só apresenta vantagens em termos de segurança para as pessoas como também em termos de capacidade estrutural remanescente (efeito de arco).

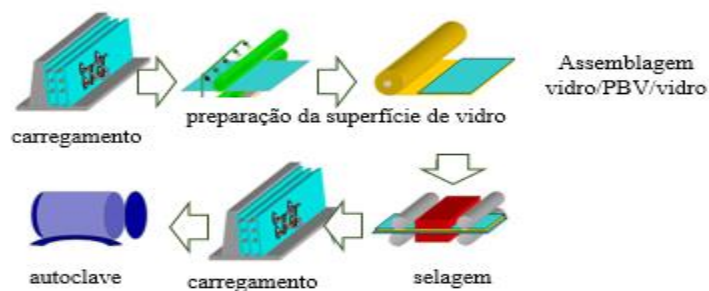


Figura 2.19. Esquema do processo de laminação (Imagem 13).

A sua produção (Figura 2.19) é realizada num forno a 70°C, passando por um mecanismo que expulsa o excesso de ar existente devido à ligação inicial seguindo para um autoclave onde é novamente aquecido a 140°C, em vácuo, a uma pressão igual a 800 kN/m².

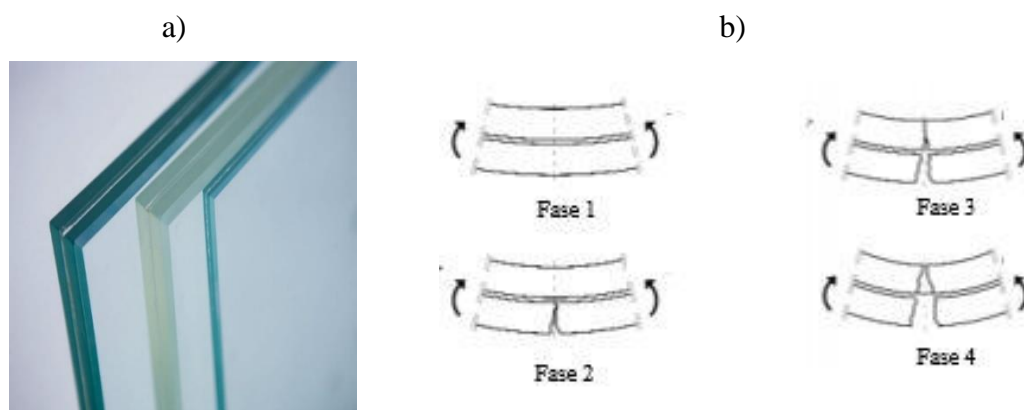


Figura 2.20. (a) Exemplo de vidro laminado; (b) Mecanismo de rotura do vidro laminado (adaptado Overende et al, 2009).

O mecanismo de rotura do vidro laminado (Figura 2.20. b)), de acordo com (Overende et al, 2009), poderá ser descrito em 4 fases.

- Fase 1 – Ainda não existem fendas e a resistência do conjunto é função da tensão de tração resistente do painel inferior, da duração da carga e do módulo de resistência ao corte da película;

- Fase 2 – O painel inferior está fissurado pelo que a tensão resistente depende da tensão de tração do painel superior e da duração da carga;
- Fase 3 – Os fragmentos do painel inferior estão comprimidos, e do seu contacto resulta um acréscimo de resistência. A tensão resistente é função do tamanho do fragmento, do módulo de elasticidade e da tensão resistente da película assim como da duração do carregamento;
- Fase 4 – Nesta fase, não há contacto entre os fragmentos, sendo apenas a capacidade resistente da película e a duração do carregamento os únicos parâmetros a ter em conta na resistência do sistema.

O comportamento mecânico do vidro laminado é assim dependente da capacidade de transmissão de carga da película que une os diversos painéis de vidro. Os adesivos mais conhecidos são os compostos de PVB e os ionoplásticos (SentryGlasPlus[®]), cujo desempenho é distinto conforme as condições de aplicação (Sanches, 2013).

Na Figura 2.21, Haldimann relaciona diretamente o desempenho, resistência e capacidade estrutural, nos três tipos de vidro acima descritos. O vidro recozido, o vidro termo-endurecido e o vidro temperado, pelo que se utiliza vidro temperado quando se pretende um maior desempenho estrutural e resistência ao impacto e pelo contrário utiliza-se um vidro termo-endurecido quando o mais condicionante é a capacidade estrutural após a rotura (Haldimann et al, 2008).

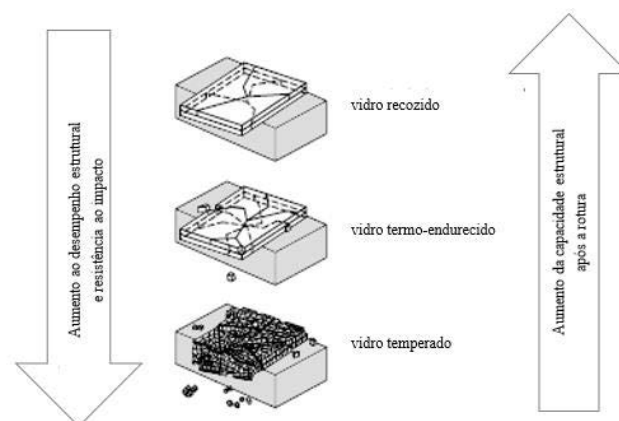


Figura 2.21. Comportamento de pós-rotura do vidro laminado por diferentes tipos de vidros (adaptado Haldimann et al, 2008).

A Figura 2.22, ilustra a relação da tensão devido ao carregamento térmico com a capacidade de carga após a primeira fenda para vigas de vidro temperado. Apesar da resistência de tração do vidro recozido ser inferior à do termo-endurecido ou do vidro temperado, a sua aplicação é mais vantajosa, devido à reduzida presença de tensões residuais no vidro, fissurando em fragmentos

com maiores dimensões sendo expectável que esses mesmos fragmentos proporcionem uma capacidade de carga superior e evitem a desagregação da viga uma vez atingida a rotura (Louter, 2011).

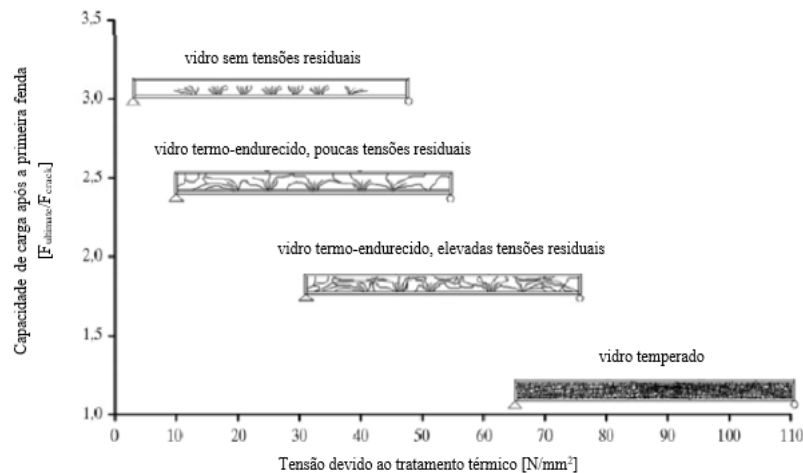


Figura 2.22. Relação da tensão residual devido ao tratamento térmico e capacidade de carga após a primeira fenda (adaptado Louter, 2011).

2.5.3 Têmpera química

A têmpera química é um processo alternativo que não envolve qualquer efeito térmico, produzindo uma tensão residual diferente (Haldimann, 2008). Este processo consiste na substituição à superfície do vidro, de iões de sódio por iões de potássio, que são cerca de 30% maiores.

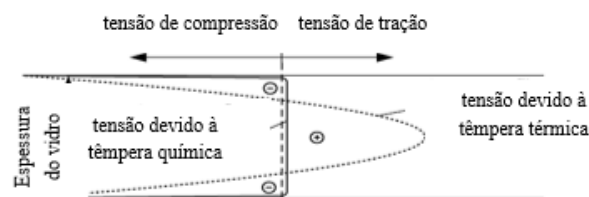


Figura 2.9. Comparação da tensão por tratamento térmico e por tratamento químico (adaptado Haldimann, 2008).

A vantagem deste processo é que permite o corte, ou possível perfuração, o que faz com que seja utilizado quando requerido geometrias especiais e espessuras pequenas, que não podem ser sujeitas à têmpera aplicada por calor. A desvantagem reside no facto de ser um processo relativamente dispendioso, e de o campo de tensões residuais de compressão ser muito pouco profundo.

3 ESTADO DO CONHECIMENTO SOBRE VIGAS DE VIDRO ESTRUTURAL

3.1 Introdução

O vidro na sua ampla aplicação pode ser utilizado como fachada, cobertura, pavimentos, vigas, colunas, pontes pedonais, escadas, barreiras de proteção, entre outros. Neste capítulo explora-se a sua aplicação enquanto viga estrutural apresentando sucintamente as suas tipologias, efetuando um enquadramento regulamentar e respetivas contribuições experimentais, analíticas e numéricas.

As vigas são dos elementos estruturais mais utilizadas, pelo que a caracterização do seu comportamento se revela de grande importância.

3.2 Tipologias de Vigas

No presente subcapítulo, apresenta-se uma gama de vigas de vidro estrutural. Para o mesmo conceito de viga de vidro estrutural existem diferentes tipologias entre as quais se destacam: as vigas simples, as vigas reforçadas, as vigas pré-esforçadas e ainda as vigas híbridas.

Distingue-se ainda três tipos de aplicações de vigas (Figura 3.1). A viga de vidro contínua (Figura 3.1 a)), viga de vidro segmentada (Figura 3.1 b)) e viga de vidro laminado com emendas (Figura 3.a c)). A viga de vidro contínua consiste numa única (e contínua) peça de vidro laminado. A viga de vidro segmentada é utilizada sempre que necessário um vão maior recorrendo-se a vários segmentos que se unem através de ligações estruturais. A viga de vidro laminado com emendas também tem por objetivo vencer grandes vãos, apresentando, no entanto, uma configuração diferente da primeira.

a)



Museu Broadfield, Kingswinford, Inglaterra.

b)



Terraço do átrio da industria Handelskammer, Munique, Alemanha.

c)



Cubo de vidro da loja Apple, Nova Iorque, EUA.

Figura 3.1. Aplicação das diferentes tipologias: a) Viga de vidro contínua, b) Viga de vidro segmentada e c) Viga de vidro laminado com emendas (Louter, 2011).

3.2.1 Vigas Simples

As vigas de vidro simples, são vigas de espessura reduzida constituída por vidro laminado ligado através de polímeros. Estas vigas permitem uma aplicação mais vasta pois quando acopladas ultrapassam a limitação da extensão máxima dos painéis produzidos.

3.2.2 Vigas Reforçadas

Estas vigas, são vigas reforçadas internamente por um segundo material e que têm como objetivo aumentar a resistência residual (Figura 3.3). Este aumento de resistência residual é conseguido através da secção reforçada, sendo essa secção localizada na zona tracionada da viga. Em caso de fratura, o reforço age como uma “ponte” e transfere a força de tração através da fratura, impedindo assim o crescimento da fenda no vidro, pelo que a força de tração juntamente com a de compressão gera um mecanismo interno que permite com que a viga continue apta a receber carga.

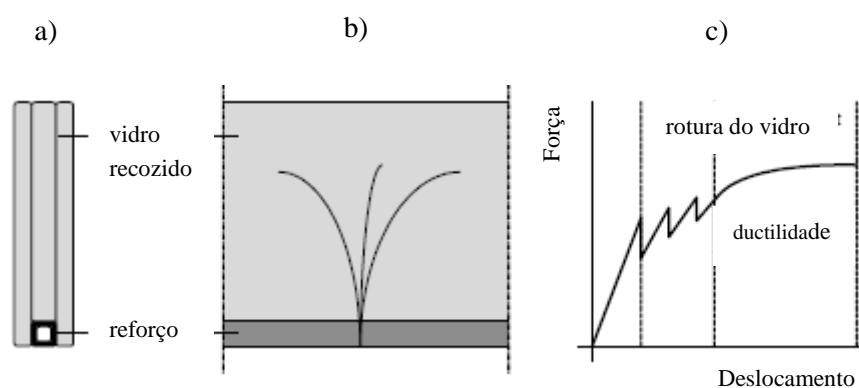


Figura 3.3. (a) Esquema da seção transversal da viga de vidro reforçada; (b) Alçado lateral de uma viga de vidro fissurada; (c) Gráfico Força-Deslocamento nos ensaios à flexão de vigas de vidro (adaptado Louter, 2011).

Entre os vários estudos realizados, destaca-se as vigas de vidro laminado e, um caso particular, uma secção retangular oca “*box-section beams*”, pelo que se apresenta também, sucintamente, outros casos de estudo.

- **Vigas de vidro laminado**

Em 2003, Veer, desenvolveu vigas de vidro laminado com folhas de policarbonato (Figura 3.4) constituídas por um reforço adicional na zona tracionada. As vigas consistiam em folhas contínuas de policarbonato, segmentos de vidro recozido e aço inoxidável para a secção de reforço, que se liga à viga através de um adesivo.

O vidro laminado com folhas de policarbonato havia sido desenvolvido em pesquisas anteriores em procura da elevada transparência em vigas de vidro cujo comportamento de rotura fosse seguro. Este comportamento é gerado pela camada de policarbonato que fornece à viga resistência residual e ductilidade de pós-rotura.

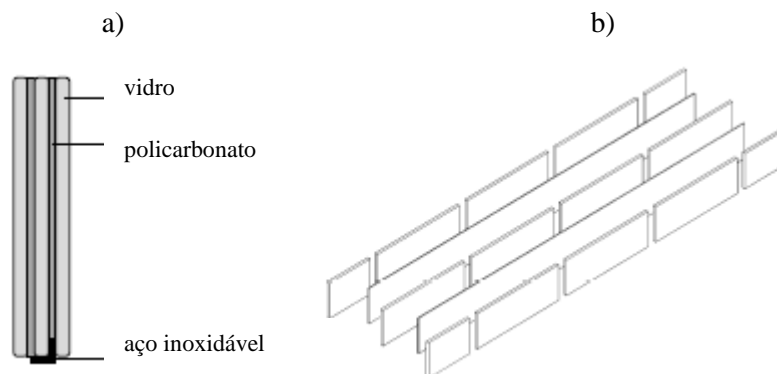


Figura 3.4. (a) Esquema da seção transversal da viga de vidro laminado. (b) Representação esquemática dos segmentos de vidro recozido aplicado (adaptado Louter, 2011).

O reforço de aço inoxidável na zona tracionada da viga foi adicionado posteriormente pelo que a sua introdução tem como objetivo aumentar o nível de resistência residual e evitar a rotura pelas folhas de policarbonato.

Dos resultados dos testes de flexão realizados, Veer observou e concluiu que a presença do reforço melhora significativamente o comportamento de pós-rotura (Louter, 2011).

- **Outros casos**

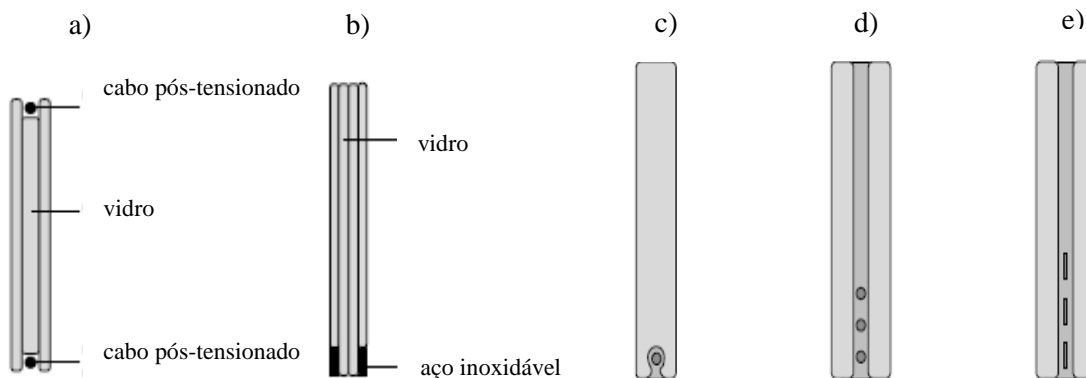


Figura 3.6. (a) Viga de vidro pós-tensionada; (b) Viga de vidro reforçada; (c) Viga de vidro reforçada com tirante de fibra; (d) Viga de vidro com tirantes redondos de fibra de vidro embebidos na camada SG; (e) Viga de vidro com tirantes achatados de fibra de vidro embebidos na camada SG. (adaptado Louter, 2011).

3.2.3 Vigas Pré-Esforçadas

As vigas pré-esforçadas visam melhorar o comportamento estrutural reforçando um material frágil. As vigas de vidro quando fletidas estão sujeitas a esforços de tração numa das fibras extremas que ao atingir a tensão limite, rompem uma vez que a resistência à compressão é muito superior. Estes elementos podem introduzir tensões de tração e aumentar as compressões, que são suportadas pelo vidro. Estes aplicam-se a vigas híbridas vidro-aço inoxidável, vigas híbridas vidro-betão armado, vigas de vidro laminado reforçadas externamente com cabos de Pré-Esforço, entre outros (Firmo, 2015).

- **Viga pré-esforçada vidro-betão armado**

Freytag, em 2004, desenvolveu o conceito de sistema misto vidro-betão armado tendo ensaiado para além do provete normal, um provete pré-esforçado. Neste último, os resultados obtidos à flexão foram ainda melhores quando comparados com a viga simplesmente reforçada, tendo atingido uma carga última de 275 kN (Firmo, 2015)

- **Viga de vidro laminado reforçadas externamente com cabos de Pré-Esforço**

Vigas de vidro laminado reforçadas externamente com cabos de Pré-Esforço foram estudadas por Jordão na Universidade de Coimbra em 2013.

Realizaram-se modelos numéricos e analíticos que permitiram o traçado otimizado do cabo de Pré-Esforço, concretizando posteriormente, ensaios à escala real.

As duas vigas demonstraram comportamento semelhantes, a primeira fenda surgiu para uma carga de 26,225 e 29,821 kN e colapsaram para uma carga de 45,982 e 46,942 kN, apresentando uma resistência residual de 157% e 175%, respetivamente. O sistema de pré-esforço introduziu resistência, ductilidade e redundância (cerca de 330%) (Jordão et al, 2014)

- **Viga pré-esforçada vidro-aço inoxidável**

Com o conhecimento do comportamento da secção acima apresentada, Louter construiu um novo protótipo, desta vez uma viga de vidro cuja secção transversal seria em T, a viga foi tanto reforçada como pós-tensionada (Figura 3.7). No dimensionamento da viga, Louter evitou problemas de imprecisões dimensionais e tentou aumentar a sua resistência em comparação com a viga anterior.

A ligação da viga de vidro efetuou-se através de um adesivo pelo que a viga é constituída por vidro recozido tanto na alma como no banzo. Tanto a viga como a alma eram segmentadas e ligavam-se em sobreposição. As fronteiras livres, terminam em curva parabólica. Introduziu-se um cabo de aço inoxidável curvo na alma da viga, o que, proporcionou uma elevada resistência e assim tensionou as fronteiras da viga.

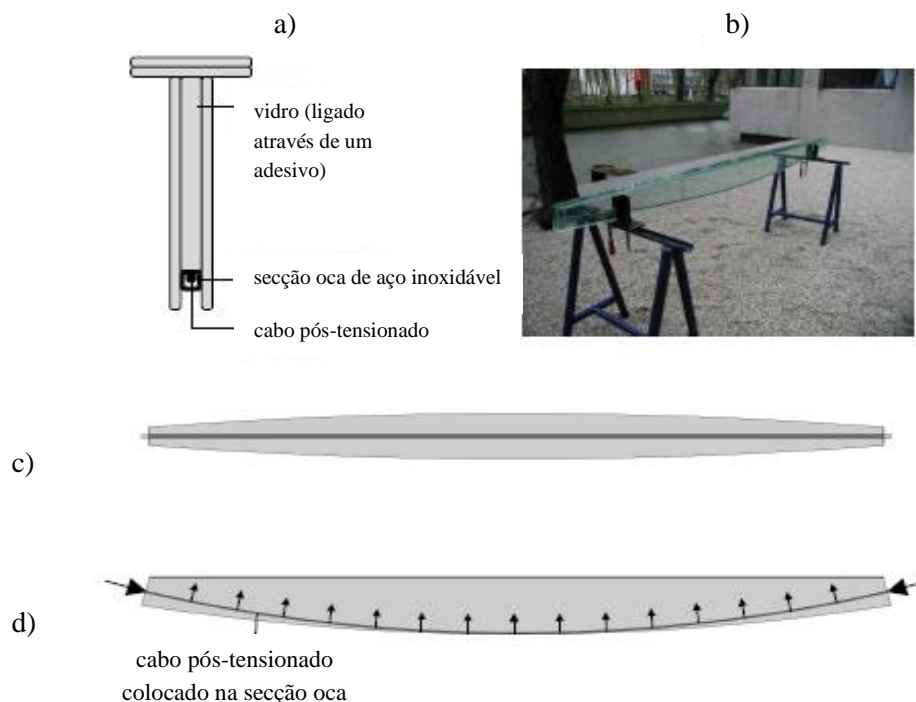


Figura 3.7. (a) Secção transversal da viga de vidro em T; (b) Imagem do protótipo da viga; (c) Vista em planta; (d) Alçado lateral. (adaptado Louter, 2011).

Realizou-se um ensaio à flexão em 4 pontos, no protótipo com 3 metros de comprimento. Em comparação com a viga apresentada no subcapítulo anterior, esta apresentou um aumento da resistência inicial assim como da resistência de pós-rotura. Demonstrou também um comportamento de rotura gradual, no entanto, devido à força de pós-tensão, a viga rompeu subitamente na zona comprimida do vidro, colapsando (Louter, 2011).

3.2.4 Vigas Híbridas

As vigas híbridas, ou sistemas mistos, são vigas que consistem na combinação do vidro (alma da secção) e de um segundo material (banzo da secção) cuja ligação é efetuada através de uma ligação estrutural. Esse segundo material pode ser madeira, betão armado, fibras de carbono, aço e plástico (Martens et al, 2015). Desta maneira, os sistemas híbridos adquirem uma maior capacidade de pós-rotura e ductilidade aumentando a segurança do material.

As vigas mistas vidro-aço (Figura 3.8 a)), como referido anteriormente, são constituídas por vidro na alma e aço nos banzos e ligam-se através de um adesivo. A ligação pode, no entanto, nutrir alguns tipos de configurações (Figura 3.8 b)). Neste sistema, o aço confere estabilidade lateral à viga aumentando a resistência de flexão assim como o comportamento de pós-rotura.

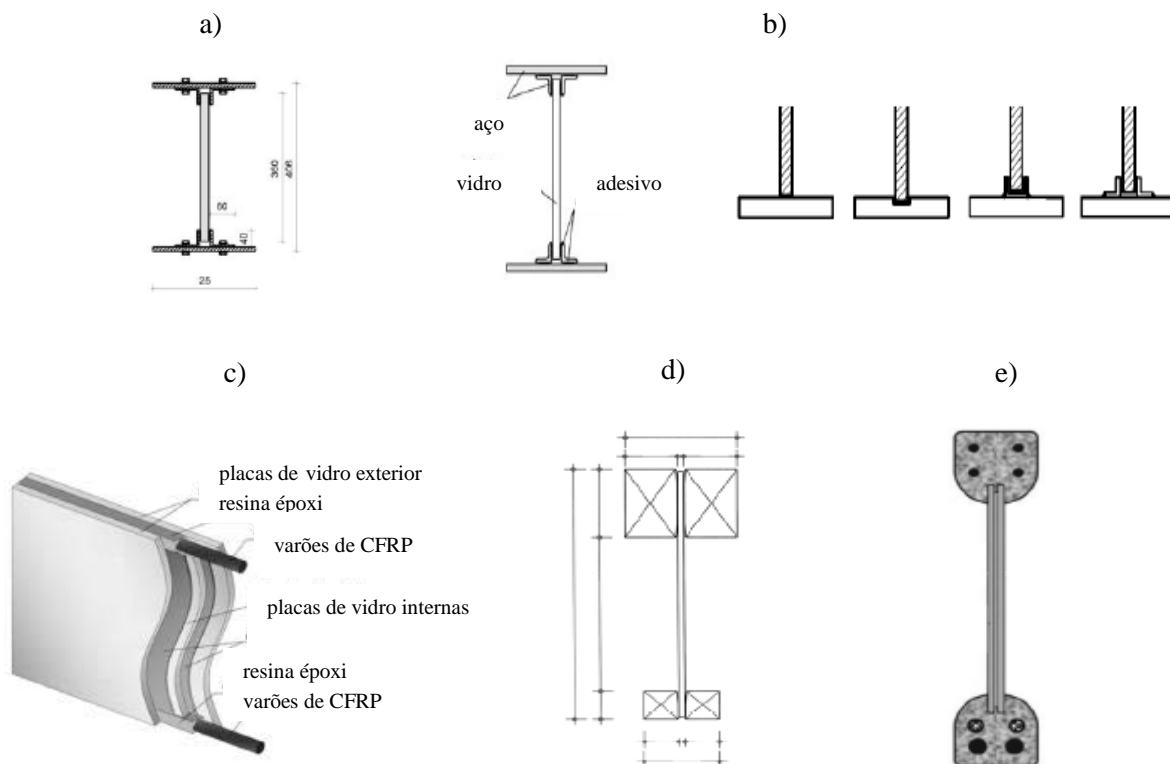


Figura 3.8. (a) Secção transversal da viga mista vidro-aço; (b) Secção transversal da viga mista vidro-aço com diferentes juntas; (c) Viga mista vidro-CFRP; (d) Secção transversal viga mista vidro-madeira; (e) Secção transversal Viga mista vidro-betão-armado (adaptado Louter, 2011).

O conceito de sistema misto de vigas vidro-CFRP (Figura 3.8 c)), foi introduzido por Palumbo em 2005 e consiste em vidro recozido laminado com uma secção de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) que se interligam através de um adesivo na zona tracionada.

Hamm, introduziu o conceito de viga mista vidro-madeira (Figura 3.8 d)) cuja configuração consiste numa única camada de vidro termo-endurecido ou temperado na alma e banzos em madeira que se ligam através de um adesivo tanto no topo como na base da extremidade da viga (Louter, 2011).

3.3 Enquadramento Regulamentar

3.3.1 Introdução

Para aplicação do vidro enquanto elemento estrutural não existe nenhum Eurocódigo como para os restantes elementos estruturais conhecidos da engenharia civil. Por ser um material de aplicação estrutural relativamente recente, existe, apenas um conjunto de regras práticas, guias de utilização ou normas, que, apresentam um conjunto de recomendações para a sua utilização. No entanto, enquanto enquadramento regulamentar estão disponíveis normas internacionais para dimensionamento do vidro estrutural e até então, apesar da quantidade de conhecimento científico sobre o seu comportamento estrutural estes apenas se referem a aplicações secundárias e muito raramente a funções estruturais (Feldmann, 2014).

As normas dividem-se essencialmente em 3 partes:

- normas de certificação do produto - todas as normas que tenham como objetivo garantir a uniformização e qualidade de produtos de vidro, desde os mais simples (vidro recozido de sílica ou de boro-silicatos), aos mais elaborados com ou sem tratamentos (vidro laminado ou vidro temperado). As normas pretendem essencialmente garantir que os produtos estejam dentro dos parâmetros mínimos exigidos;
- normas de ensaio e caracterização do material - disponibilizam informação sobre métodos de ensaio que, por sua vez, permitem a caracterização das principais propriedades mecânicas do vidro, como resistência à flexão, resistência ao fogo, entre outras;
- normas para dimensionamento simplificado de elementos de vidro.

Apresenta-se as principais normas a nível europeu e americano, referindo os principais conceitos relacionados com o dimensionamento de estruturas de vidro. É de referir que existem ainda as normas canadianas e as australianas.

3.3.1.1 Normas de Ensaio

3.3.1.1.1 EN 1288

A norma apresenta-se como: “*EN 1288: 2000 – Glass in building – Determination of bending strength of glass – Part 1: Fundamentals of testing glass, Part 2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas; Parte 3: Test with specimen at two points (four-point bending), Part 4: Testing of channel shaped glass, Part 5: Coaxial double ring test on flat specimens with small test surface areas*”. O documento está dividido em 5 partes, onde em cada parte é descrito o tipo de ensaio disponível para o cálculo. Na parte 1 da norma é realizada uma breve descrição sobre todos os ensaios, incluindo justificações sucintas para cada um deles assim como as limitações da EN 1288-2, 1288-3, 1288-4 e 1288-5, estão ainda incluídas as calibrações dos testes mecânicos e recomendações para o uso seguro dos equipamentos.

O procedimento do ensaio explicado na Parte 2, é o procedimento mais utilizado para determinar a resistência do vidro.

3.3.1.1.2 EN 356

A norma europeia, “*EN 356: Glass in building – Security glazing – Testing and classification of resistance against manual attack*”, apresenta dois tipos de métodos de ensaio que permitem a avaliação de produtos envidraçados, determinados para resistir a ações de força.

- Ensaio de queda – a determinada altura deixa-se cair uma esfera metálica; para essa mesma altura determina-se as categorias de resistência; uma placa de vidro pertence a uma determinada categoria, caso impeça a penetração da esfera em três impactos sucessivos;
- Ensaio de martelo – é lançado um martelo contra um vidro; esse lançamento deve ser efetuado mecanicamente, de modo a que seja possível avaliar a sua velocidade. Para um determinado tipo de cabeça de martelo e uma dada velocidade, as categorias são avaliadas através do número de pancadas para penetrar o vidro.

3.3.1.2. Normas de Apoio ao Dimensionamento

Para o dimensionamento enquanto elemento estrutural, devem ser usadas metodologias e modelos precisos relativamente ao cálculo da tensão de rotura do vidro. Não existindo a nível nacional documentos normativos dentro desta problemática, refere-se que a nível internacional, existem algumas normas, entre as principais estão: Alemanha DIN 18008-1,-3,-4,-5 e-6, Áustria ÖNORM B 3716-1,-2,-3,-4, e-5, República Checa ČSN 74 3305 Ochranná zbradlí, Holanda NEN 2608; NEN 3569, Inglaterra EN 12600 – *EN Glass Product Standards*; BS 6262 – *Vertical Glazing Glass&Thermal Safety (Pilkington)*; BS 6262-4 – *Safety Glass Usage*; BS 5516 –

Sloping Glazing; BS 6180 - *Barriers*; CWCT TN66, TN67, TN92, França NF DTU 39 P3 – Thermal Fracture, NF DTU 39 P5 – Security; NF DTU 39 P4- *Mechanical resistance*/ Cahier CSTB 3488 *Structural Glazing Kits*/ Cahier CSTB 3574 *Points*, Fiche Technique 47 – *Impact resistance equivalence* with EN 14019 /Cahier CSTB 3448 *Glass Floors and Stairs* / Cahier CSTB 3034 *Glass Balustrades* e Itália UNI 7143; UNI/TR 11463; CNR-DT 210; UNI 7697 (Feldmann, 2014). Nos Estados Unidos da América, aplica-se a norma ASTM E 1300, no entanto, esta tem sido alvo de consecutivas revisões.

Pretende-se apresentar neste subcapítulo, a norma europeia prEN 13474⁹ e a norma americana ASTM E 1300. Ambas as normas apresentam diferenças significativas ao nível do seu método de dimensionamento, com resultados condicionantes uma vez que são baseadas em modelos de cálculo diferentes (Almeida, 2013).

3.3.1.2.1 prEN 13474⁹

A prEN 13474⁹, é uma norma europeia que tem como título “*Glass in building – Design of glass panes*”, pelo que esta norma tem como objetivo dar apoio ao dimensionamento de placas de vidro.

A referida norma está dividida em 5 partes:

- Parte 1 – Conceitos gerais de dimensionamento;
- Parte 2 – Placas sujeitas a cargas uniformemente distribuídas;
- Parte 3 – Placas sujeitas a cargas lineares;
- Parte 4 – Placas sujeitas a cargas concentradas;
- Parte 5 – Placas sujeitas a cargas sobrepostas.

A norma prEN 13474⁹ utiliza um método de dimensionamento que visa avaliar a resistência do elemento do vidro através de um cálculo equivalente de carga e de um valor equivalente de resistência, recorrendo á utilização de coeficientes parciais de segurança, pelo que a sua verificação deverá ser calculada tendo em conta o cálculo da tensão efetiva atuante (σ_{eff}) e o valor da tensão efetiva permitida ($f_{g,d}$):

$$\sigma_{eff} \leq f_{g,d} \quad (5)$$

Neste caso, a tensão efetiva será calculada para a combinação de ações mais desfavorável de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{eff} = \left[\frac{1}{A} \int \{\sigma_1(x, y)\}^\beta dx dy \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

sendo que,

- A é a área total de vidro sobre o qual atua a ação;
- $\sigma_1(x, y)$ é a tensão principal que atua no ponto (x, y) , para a respetiva ação atuante;
- B é um parâmetro de forma da tensão de rotura, retirado da distribuição estatística de Weibull.

A norma disponibiliza o valor máximo de tensão assim como o resultado do cálculo da equação (6), para condições de apoio e geometrias mais frequentes (prEN 13474⁹-1, 1999)).

A tensão efetiva permitida deve ser calculada de acordo com:

$$f_{g:d} = \left(k_{mod} \frac{f_{g,k}}{Y_M k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{Y_V} \right) Y_n \quad (7)$$

sendo que,

- $f_{g,k}$ é o valor característico de rotura a 5% que depende da composição química do vidro e que para o vidro recozido atinge o valor de 45 Mpa;
- $f_{b,k}$ é o valor característico de rotura a 5% para vidros temperados; para o vidro recozido

$f_{b,k} = f_{g,k}$; para vidros com diferentes condições de têmpera, a norma disponibiliza uma tabela com os respetivos valores característicos de resistência;

- Y_V é o coeficiente parcial que tem em conta a tensão residual devido à têmpera;
- Y_M é o coeficiente parcial que tem em conta a resistência do vidro;
- Y_n é o coeficiente parcial de segurança para cada país;
- k_A é o coeficiente parcial que tem em conta a área de vidro em causa;
- k_{mod} é o coeficiente parcial que tem em conta a duração do carregamento, a combinação de cargas e as condições ambientais (prEN 13474⁹-3, 2009).

O cálculo relativo a todos os coeficientes de segurança parciais encontra-se detalhado na norma abordada.

3.3.1.2.2 Guia Europeu de Dimensionamento Estrutural em Elementos de Vidro

O documento tem como título original “*Guidance for European Structural Design of Glass Components*”, foi publicado em 2014 e é uma pré-norma desenvolvida pelo grupo da CEN/TC250 (WG) 3, cujo propósito do trabalho é desenvolver regras de dimensionamento em

componentes de vidro estrutural através de um procedimento gradual que se finalize em um novo Eurocódigo. O trabalho técnico e científico é baseado numa revisão completa das normas internacionais até então existentes assim como no desenvolvimento científico mais recente. O guia é constituído, essencialmente por 8 capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução;
- Capítulo 2 - Propriedades dos Materiais;
- Capítulo 3 - Produtos;
- Capítulo 4 - Princípios e Regras Básicas de Dimensionamento para Elementos de Vidro e Abordagem relativa à Segurança;
- Capítulo 5 - Bases Mecânicas e Verificação da Abordagem para Vidro Monolítico, Placas de Vidro Laminado e Vigas;
- Capítulo 6 - Dimensionamento de Elementos de Vidro Estrutural Secundários;
- Capítulo 7 - Dimensionamentos de Elementos de Vidro Estrutural;
- Capítulo 8 - Juntas e Ligações.

3.3.1.2.3 ASTM E 1300

A norma norte-americana, utilizada para o dimensionamento de elementos de vidro, designada por “*Standard of Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*”.

A sua aplicação é válida apenas quando o envidraçado é vertical ou inclinado, sujeito a cargas laterais uniformes e constituído por vidro monolítico, laminado ou vidros duplos. O elemento a dimensionar deverá apresentar uma geometria retangular com apoio lateral contínuo em pelo menos um dos lados. Ações como o vento, a neve ou o peso próprio, definidas na norma, quando combinadas não devem ultrapassar um valor igual a 10 Kpa.

O objetivo da norma é permitir o cálculo da tensão resistente do vidro e conseqüentemente determinar a espessura da placa de vidro. A norma possibilita ainda, contabilizar uma série de fatores que podem influenciar a referida espessura, como por exemplo, as ações de temperatura ou as deformações excessivas.

A verificação da segurança dá-se pela seguinte equação:

$$q \leq LR = NFL \cdot GTF \quad (8)$$

sendo que,

- q é o valor da carga de dimensionamento para a respetiva placa de vidro;
- LR é o valor da carga resistente (do inglês “*load resistance*”);

- NFL é o valor característico da carga resistente, para uma carga a atuar durante 3 segundos e com uma probabilidade de rotura de 0.008;
- GTF é um coeficiente que tem em conta o tipo de vidro em utilização e a duração de aplicação da carga atuante.

Esta norma distingue-se da norma europeia uma vez que utiliza um conceito de cargas e não de tensões. A norma não se baseia em coeficientes parciais, mas na consulta de gráficos (no caso do coeficiente NFL) que estão associados a condições específicas de geometria, apoio e espessura de vidro (válido para vidros monolíticos ou laminados) e de tabelas (no caso do coeficiente GTF).

3.3.2 Conclusão

É de concluir que como material estrutural, o vidro, tem cada vez mais importância sendo de todo o interesse um documento de apoio ao dimensionamento estrutural do mesmo. Embora existam normas europeias e normas norte-americanas, seria importante a existência de um Eurocódigo que ultrapassasse todas as limitações e que uniformizasse a aplicação do elemento pelo que o Eurocódigo 10 é aguardado com expectativa para o completo desenvolvimento do sector do vidro estrutural na construção.

3.4 Contribuição Experimental

3.4.1 Introdução

A investigação na área do vidro estrutural é vasta e variada pelo que neste subcapítulo pretende-se apresentar sucintamente algumas das contribuições experimentais. Apresenta-se uma gama de autores que pretendem caracterizar o comportamento de várias tipologias com grande implantação nas estruturas de vidro. O foco será essencialmente nas estruturas mistas ou híbridas por se considerar que são das mais interessantes, uma vez que permitem um melhor aproveitamento do material, maior capacidade resistente, rotura mais previsível e mais segura, sendo por estes motivos são as mais investigadas. Os sistemas mistos, apresentados abaixo são sistemas compostos por dois materiais cujo objetivo passa por garantir maior capacidade estrutural.

Existem, essencialmente, duas formas de determinar uma rotura dúctil numa viga:

- utilizando um material que, no seu comportamento seja dúctil;
- garantir que o comportamento da viga incluirá duas fases:

- i. Numa primeira fase, a viga deve exibir um nível de rigidez adequado à situação dimensionada – esta fase é caracterizada por apresentar deformações elásticas;
- ii. Na segunda fase, a viga deve exibir um nível de rigidez inferior à da primeira fase, permitindo deformações significativamente superiores às ocorridas anteriormente. A fendilhação elevada é acompanhada de deformações plásticas.

Nas estruturas mistas, após a ocorrência da primeira fenda no vidro, a parte da secção sujeita a tensões de compressão (zona não fendilhada) e o perfil de reforço, formam um par de esforços que mantém a viga com capacidade resistente (Louter, 2007).

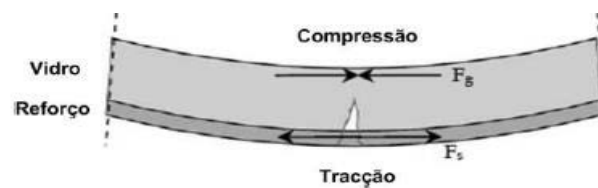


Figura 3.9. Representação esquemática da distribuição de esforços após a fendilhação do vidro (adaptado Louter, 2007)

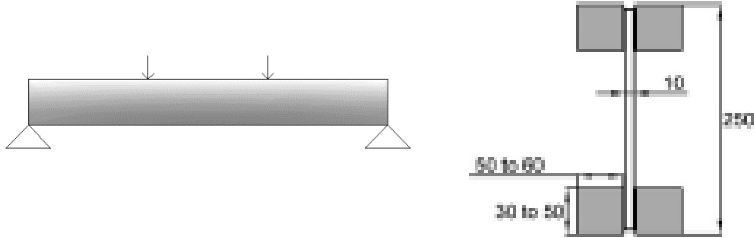
Os quadros abaixo apresentam informação relativa ao *layout*, objetivos, variação paramétrica e conclusões de cada contribuição experimental.

3.4.1.1 Vigas mistas vidro-madeira

Este sistema misto é constituído, na grande maioria dos casos aqui apresentados, por vidro na alma e madeira nos banzos.

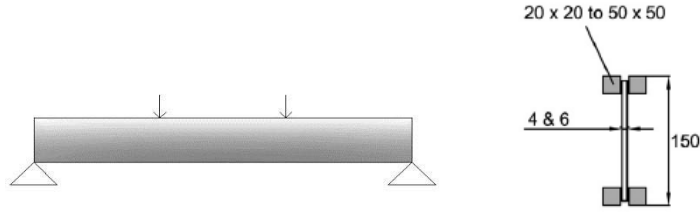
Quadro 3.4.1. a) – Vigas mistas vidro-madeira (Hamm *apud* Martens et al, 2015).

Hamm, 2000.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4000 mm
	Altura	250 mm
	Largura	110 a 130 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Vidro recozido com 10 mm de espessura para a alma e diferentes secções para os banzos.	
Conclusões	Ligação	Poliuretano
	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento de pós-rotura. 	

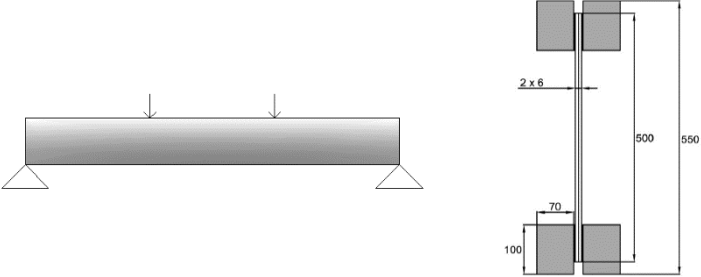
Quadro 3.4.1. b) – Vigas mistas vidro-madeira (Kreher *apud* Martens et al, 2015).

Kreher, 2004.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	2000 mm
	Altura	150 mm
	Largura	106 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Variação do tipo de vidro, espessura e secção dos banzos.	
Conclusões	Ligação	Adesivo de poliuretano
	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamento dúctil na rotura cuja resistência residual aumentou 300%. 	

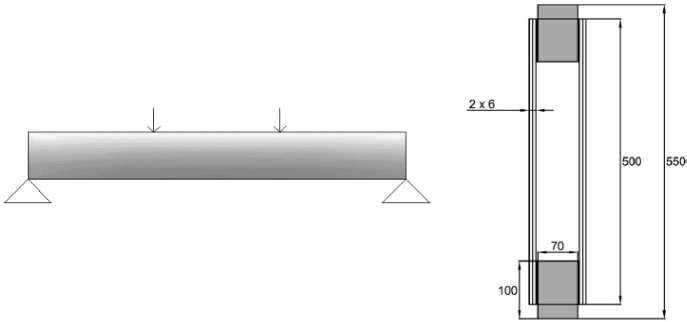
Quadro 3.4.1. c) – Vigas mistas vidro-madeira (Cruz *apud* Martens et al, 2015).

Cruz & Pequeno, 2008.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	650 e 3200 mm
	Altura	550 mm
	Largura	152 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Vidro recozido laminado com painéis de 6 mm.	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • 185% de resistência de rotura inicial; • Elevada ductilidade. 	

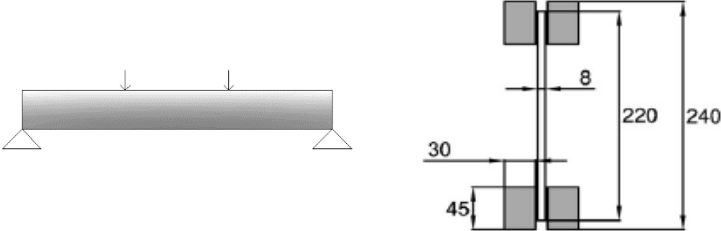
Quadro 3.4.1 d) – Vigas mistas vidro-madeira (Cruz *apud* Martens et al, 2015).

Cruz & Pequeno, 2008.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	3200 mm
	Altura	550 mm
	Largura	94 mm
	Secção Transversal	Secção retangular
	Vidro recozido laminado com os banzos de madeira entre painéis de 6 mm.	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • 130% de resistência de rotura inicial; • elevada ductilidade. 	

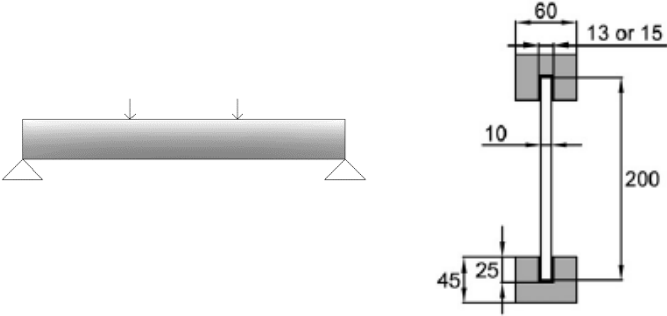
Quadro 3.4.1. e) – Vigas mistas vidro-madeira (Premov *apud* Martens et al, 2015).

Premov, 2014.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4800 mm
	Altura	240 mm
	Largura	68 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Ligação	Vidro recozido com painéis de 8 mm.
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência de rotura inicial; • Elevada ductilidade. 	

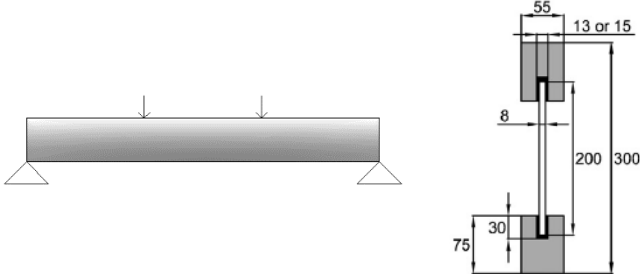
Quadro 3.4.1 f) – Vigas mistas vidro-madeira (Blyberg *apud* Martens et al, 2015).

Blyberg, 2011.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	3500 mm
	Altura	240 mm
	Largura	60 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Ligação	Vidro recozido com 10 mm de espessura e dois tipos de banzos (Laminated Veneer Lumber, LVL) que diferenciavam na altura.
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento à rotura. 	

Quadro 3.4.1. g) – Vigas mistas vidro-madeira (Hulimka *apud* Martens et al, 2015).

Hulimka & Kozlowski, 2012.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	1800 mm
	Altura	300 mm
	Largura	65 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Vidro recozido com painéis de 8 mm.	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento de pós-rotura. 	

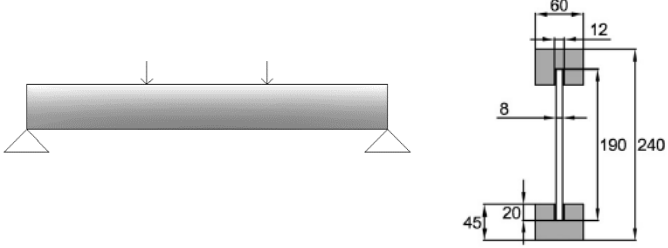
De um modo geral, concluiu-se que vigas constituídas por vidro recozido são recomendadas no sistema híbrido vidro-madeira sendo que as vigas com adesivos mais rígidos apresentam melhor comportamento enquanto que as vigas constituídas por silicones mais flexíveis apresentam uma rigidez 25% inferior. O conceito apresenta um comportamento de rotura seguro.

O banzo de madeira na zona tracionada da viga atua como reforço e quando se desenvolve uma fenda, a madeira forma uma ponte de fendilhação que transfere a tensão de tração, fazendo com que a viga continue apta a receber carga.

Este conceito poderá eventualmente acarretar com alguns problemas uma vez que existe uma grande variedade de casos de humidade devido à sua natureza higroscópica. Uma possível solução seria o tratamento de humidade no material, no entanto esta ainda não foi testada (Martens, 2015).

Quadro 3.4.1. h) – Vigas mistas vidro-madeira (Kozlowski *apud* Martens et al, 2015).

Kozlowski, 2014.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-madeira.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4320 mm
	Altura	240 mm
	Largura	60 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Diferentes tipos de vidro, assim como, diferentes tipos de adesivos. A alma consistia em vidro recozido (ANG) ou termo-endurecido (HSG) com 8 mm. Utilizou-se um silicone (Sikasil SG-500; S), um acrílico (SikaFast 5221; A) e uma épxi (3M DP490; E) para as diferentes aplicações.	
Conclusões	Ligação	Silicone
	<ul style="list-style-type: none"> • A viga de vidro termo-endurecido possui uma capacidade de carga inicial muito maior que a viga constituída por vidro recozido, no entanto ambas apresentam uma rotura frágil (sem resistência de pós-rotura). 	

3.4.1.2 Vigas mistas vidro-betão armado

Freytag estudou o sistema misto vidro-betão armado, este é constituído por vidro na alma e betão armado nos banzos, sendo que uma das vigas estudadas é pré-esforçada. A alma foi colocada num molde com betão armado para realizar a ligação dos dois elementos e para que houvesse uma melhor ligação possível, o vidro foi tratado de modo a deter uma superfície de contacto rugosa.

O teste consistiu em duas fases, inicialmente aplicou-se um determinado valor de pré-esforço defletindo a viga (deflexão negativa) sendo seguidamente carregada em quatro pontos de flexão (aplicando uma força de 75 kN para retomar à posição inicial, ou seja, deslocamento igual a zero).

Quadro 3.4.2 – Vigas mistas vidro-betão armado (Freytag *apud* Martens et al, 2015).

Freytag, 2004.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-betão armado.	
Variação Paramétrica	Comprimento	7800 mm
	Altura	560 mm
	Largura	120 mm
	Secção Transversal	Viga em I
Conclusões	Vidro temperado laminado com 8 mm de espessura e diferentes tipos de banzos em betão armado.	
	<ul style="list-style-type: none"> • Betão Armado simples; • Betão Armado pré-esforçado. 	

Muitas das fendas direcionaram-se para a zona onde o vidro e o betão estão em contato e como consequência o sistema estático para a transmissão de forças de corte entre as componentes mudam de um painel de corte rígido (vidro não fissurado) para uma série de vidros pequenos e devido a este sistema, a tensão de ligação na superfície de contato aumenta, no entanto não se observou nenhuma rotura.

O processo de manufatura é complicado e a superfície de vidro requer um tratamento especial uma vez que o vidro temperado não tem rigidez de pós rotura em relação ao vidro recozido.

Quando o vidro atinge a rotura perto dos apoios, as forças de corte apenas conseguem ser transmitidas para os apoios através do banzo de betão inferior, no entanto, uma vez que este não foi dimensionado com esse objetivo, a viga atinge a rotura.

A qualidade do vidro e das camadas intermédias podem eventualmente deteriorar com o tempo devido aos efeitos corrosivos das características alcalinas do betão (Martens, 2015).

3.4.1.3 Vigas mistas vidro-GFRP

Este sistema consiste na combinação do elemento vidro com polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP).

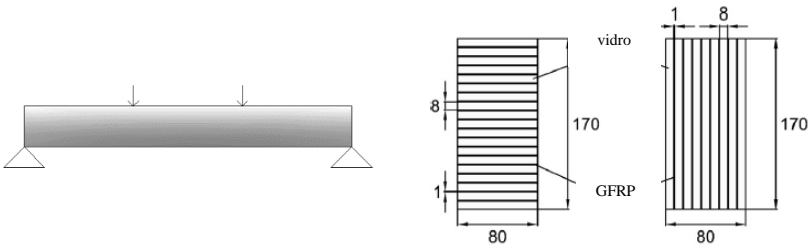
Quadro 3.4.3 a) – Vigas mistas vidro-GFRP (Speranzini *apud* Martens et al, 2015).

Speranzini, 2011.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-GFRP.		
Variação Paramétrica	Comprimento	2500 mm	
	Altura	170 mm	
	Largura	80 mm	
	Secção Transversal	Viga retangular	
	Ligação	Resina Époxi	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento de pós-rotura; • Deformação final muito maior que a deformação inicial; • Comportamento dúctil; • Capacidade de carga última superior à carga da fenda inicial. 		

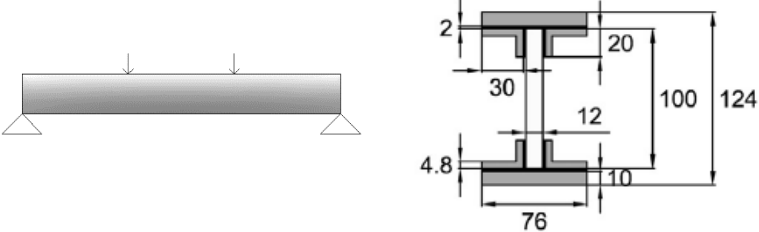
Quadro 3.4.3 b) – Vigas mistas vidro-GFRP (Speranzini *apud* Martens et al, 2015).

Speranzini, 2011.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro- GFRP.		
Variação Paramétrica	Comprimento	2500 mm	
	Altura	170 mm	
	Largura	80 mm	
	Secção Transversal	Viga retangular Viga constituída por alternância de vidro recozido com folhas de GFRP dispostas na vertical.	
	Ligação	Resina Époxi	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento de pós-rotura; • Deformação final é muito maior que a deformação inicial; • Comportamento dúctil; • Capacidade da viga assegurada pela resistência de tração providenciada pelas folhas de GFRP. 		

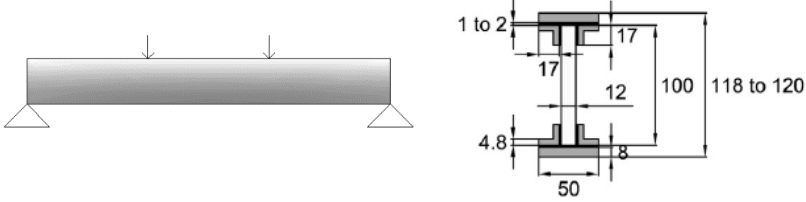
Quadro 3.4.3 c) – Vigas mistas vidro-GFRP (Correia *apud* Martens et al, 2015).

Correia, 2011.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro- GFRP.		
Variação Paramétrica	Comprimento	1800 mm	
	Altura	124 mm	
	Largura	76 mm	
	Secção Transversal	Viga em I Viga constituída por vidro recozido com 12 mm de espessura na alma e GFRP nos banzos.	
	Ligação	Poliuretano ou Resina Époxi com 2 mm	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Bom comportamento em relação à resistência de pós-fendilhação; • Boa ductilidade; • Elevada importância na escolha do adesivo para a capacidade de carga; • Poliuretano possui uma rigidez mais baixa com um desempenho de pós-rotura de 153%; • Resina Époxi possui uma rigidez mais elevada cujo desempenho de pós-rotura atinge os 200%. 		

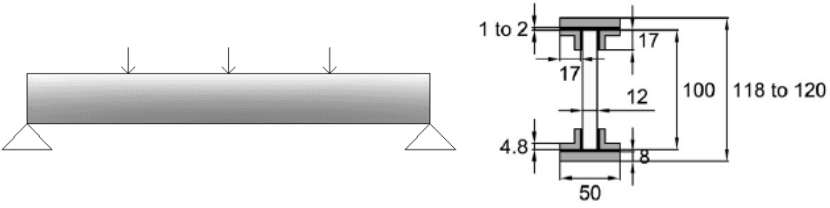
Quadro 3.4.3 d) – Vigas mistas vidro-GFRP (Valarinho *apud* Martens et al, 2015).

Valarinho, 2013.

Layout		
Objetivos	Estudo da viabilidade de aplicação em viga mista vidro- GFRP estaticamente indeterminadas.	
Variação Paramétrica	Comprimento	1400 mm
	Altura	118 a 120 mm
	Largura	50 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Viga constituída por vidro recozido com 12 mm de espessura na alma e GFRP nos banzos.	
Conclusões	Ligação	Poliuretanos (Sikaflex e Sikaforce) e Resina Époxi (Sikadur).
	<ul style="list-style-type: none"> • Maior capacidade de redistribuição de esforços quando utilizado um adesivo com rigidez mais baixa. 	

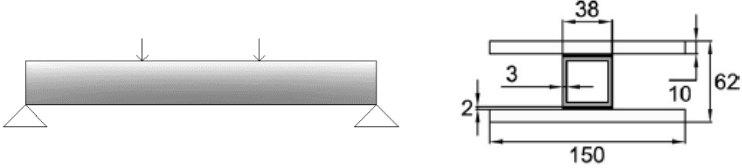
Quadro 3.4.3 e) – Vigas mistas vidro-GFRP (Valarinho *apud* Martens et al, 2015).

Valarinho, 2013.

Layout			
Objetivos	Estudo da viabilidade de aplicação em vigas mistas vidro-GFRP estaticamente indeterminadas.		
Variação Paramétrica	Comprimento	3000 mm	
	Altura	118 a 120 mm	
	Largura	50 mm	
	Secção Transversal	Viga em I	
	Ligação	Viga constituída por vidro recozido com 12 mm de espessura na alma e GFRP nos banzos. 2 Poliuretanos (Sikaflex e Sikaforce) e 1 Époxi (Sikadur).	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Observa-se o mesmo comportamento que as vigas estaticamente determinadas; Comportamento de ductilidade diferente em ambos os vãos; • Diferente desempenho na pós-rotura uma vez que a viga constituída com o adesivo de poliuretano atingiu um valor de 202%; • Desempenho da viga com poliuretano atingiu os 130%; • Desempenho da viga com resina époxi atingiu um valor de 180%. 		

Quadro 3.4.3 f) – Vigas mistas vidro-GFRP (Overende *apud* Martens et al, 2015).

Glass & Façade Technology Research Group, 2003.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro- GFRP.		
Variação Paramétrica	Comprimento	500 mm	
	Altura	62 mm	
	Largura	150 mm	
	Secção Transversal	Viga em I	
	Alma da secção é constituída por uma secção retangular ôca de GFRP e os banzos constituídos por vidro monolítico temperado com 10 mm de espessura.		
	Ligação	Resina Époxi ou Adesivo Acrílico ou Tetrafluoretileno (PTFE)	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • O comportamento da capacidade de carga foi encaminhado para a secção de GFRP; • Ambos adesivos mostraram melhor resistência e rigidez de flexão em relação às placas de PTFE; • A viga constituída pela resina épxi apresentou melhor desempenho; • O vidro colapsou para um elevado nível de robustez devido à presença da secção de GFRP. 		

As vigas demonstraram elevada resistência e rigidez após ambos os panos de vidro atingirem a rotura, devido às secções de GFRP, indicando um elevado nível de robustez. O conceito apresenta um comportamento à rotura seguro uma vez que apresenta ductilidade estrutural e resistência de pós-rotura. A ductilidade estrutural adquirida neste caso deve-se ao mecanismo de transferência de cargas que ativam o papel das componentes dos polímeros reforçados por fibras de vidro e não devido ao próprio material uma vez que a sua natureza é de rotura frágil.

É de concluir que este conceito nutre um comportamento de pós-rotura semi-dúctil, caracterizado pela deterioração das componentes de GFRP aumentando a fenda do vidro na alma, o que resulta em deslocamentos mais elevados.

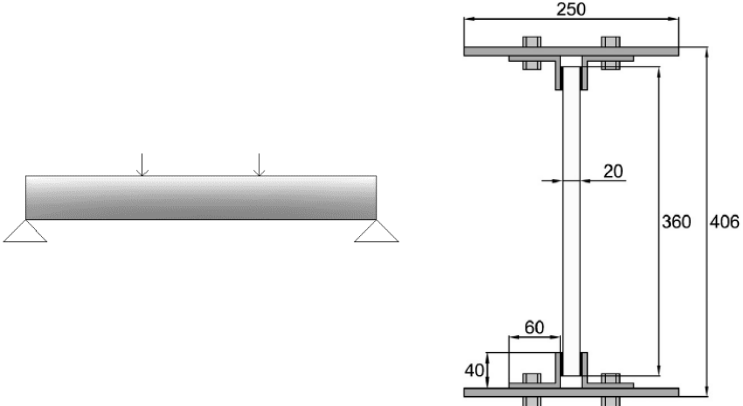
Como desvantagem este sistema não só apresenta um elevado custo quando comparado com outros como exhibe um comportamento dependente no tempo (Martens et al, 2015).

3.4.1.4 Vigas mistas vidro-aço

Este sistema apresenta em sua constituição dois elementos, o vidro e o aço.


Quadro 3.4.4 a) – Vigas mista vidro-aço (adaptado, Martens et al 2015).

Wellershoff, 2003.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	3600 mm
	Altura	406 mm
	Largura	250 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	A viga é constituída por vidro temperado com 20 mm de espessura na alma e ligada aos banzos através de cantoneiras.	
	Ligação	Poliuretano
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • A resistência última da viga (correspondente ao colapso) foi de 375 kN a 425 kN. 	

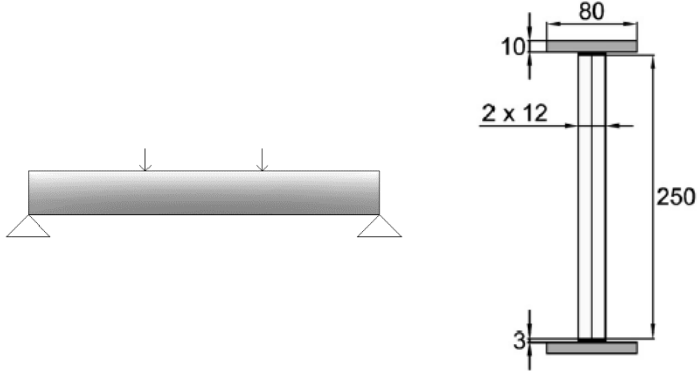
Quadro 3.4.4 b) – Vigas mista vidro-aço (Martens et al, 2015).

Bucak, 2009.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.		
Variação Paramétrica	Comprimento	6000 a 11000 mm	
	Altura	-	
	Largura	-	
	Secção Transversal	Viga em I	
	Ligação do vidro termo-endurecido diretamente no aço por intermédio de adesivos.		
Conclusões	Ligação	Acrílico, Poliuretano ou Silicone	
<ul style="list-style-type: none"> • A distribuição de tensões assim como a capacidade de carga depende da rigidez do adesivo. 			

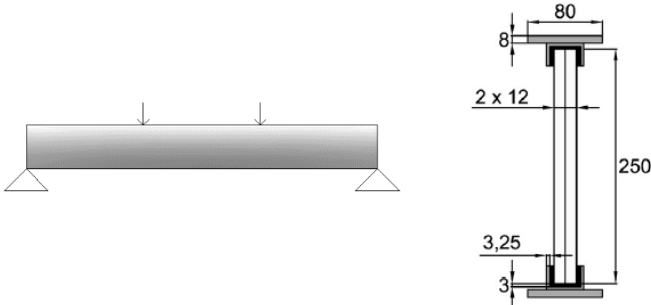
Quadro 3.4.4 c) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - TU Dortmund, 2010.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4000 mm
	Altura	250 mm
	Largura	80 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	A viga é constituída por dois painéis de vidro laminado na alma e aço nos banzos ligados através de diferentes adesivos com 3 mm de espessura.	
Conclusões	Ligação	Poliuretano, Resina Épxi mais flexível, Resina Épxi mais rígida e Silicone

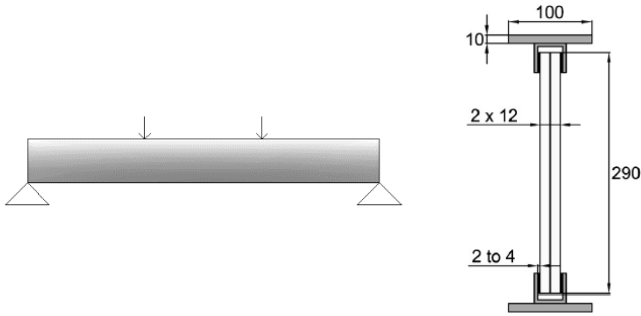
Quadro 3.4.4 d) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - TU Dortmund, 2010.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4000 mm
	Altura	250 mm
	Largura	80 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	<p>A viga é constituída por dois painéis de vidro laminado na alma e aço nos banzos. A alma foi embebida em perfis U que se soldaram aos banzos. A ligação do vidro ao perfil em U realizou-se por intermédio de adesivos com espessura de 3 mm.</p>	
	Ligação	Poliuretano, Resina Épxoi mais flexível, Resina Épxoi mais rígida e Silicone
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta uma rigidez superior à ligação anterior; • É expectável uma capacidade de carga superior; • O perfil em U juntamente com o adesivo épxoi de alta resistência obtiveram o melhor desempenho. 	

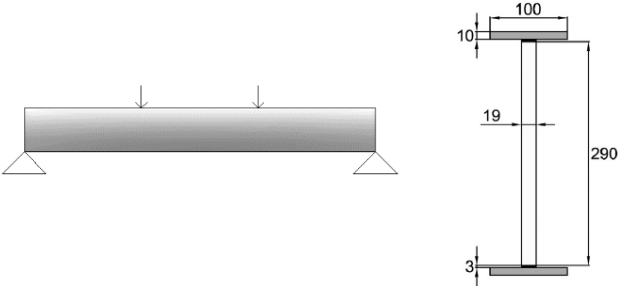
Quadro 3.4.4 e) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - Czech Technical University, 2010.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4000 mm
	Altura	290 mm
	Largura	100 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	<p>Viga constituída por duas camadas de vidro temperado com 12 mm, de espessura embebido em ambos os lados num perfil em U que conecta aos banzos. O contacto horizontal entre o vidro e o aço realiza-se através de uma camada poliamida e o contacto vertical realiza-se através de um adesivo.</p>	
	Ligação	Poliuretano, Acrílico e Poliuretano reforçado
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de carga maior (dependente do adesivo utilizado); • O tipo de adesivo deve ser escolhido em função da temperatura e do alongamento requerido, assim como, do carregamento real da estrutura; • Capacidade de carga residual superior; • Estabilidade em ambos os painéis na rotura. 	

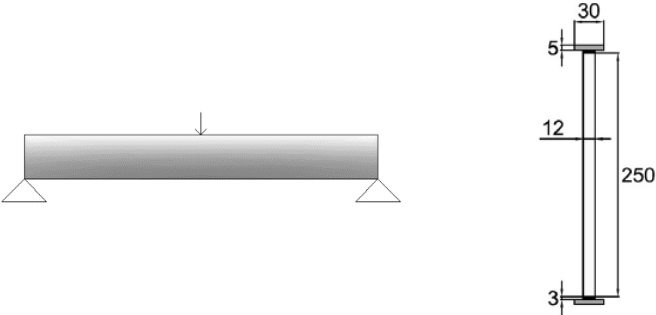
Quadro 3.4.4 f) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - Czech Technical University, 2010.

Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4000 mm
	Altura	290 mm
	Largura	100 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Viga constituída por vidro temperado com espessura de 19 mm diretamente ligado aos banzos através de um adesivo de 3 mm.	
Conclusões	Ligação	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade dependente do tipo de adesivo; • Quanto mais rígido o adesivo maior capacidade de carga.

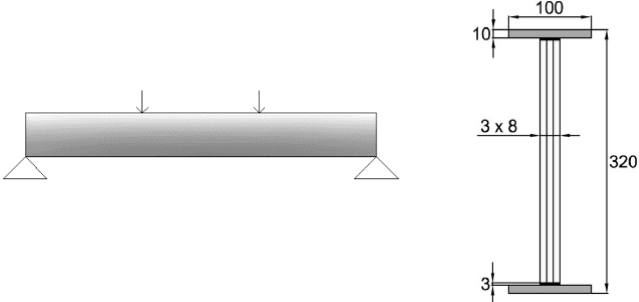
Quadro 3.4.4 g) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - Czech Technical University, 2010.

Layout			
Objetivos	Estudo da flexão e deformação torsional lateral da viga mista vidro-aço.		
Variação Paramétrica	Comprimento	1000 mm	
	Altura	250 mm	
	Largura	30 mm	
	Secção Transversal	Viga em I	
	Viga constituída por vidro temperado com espessura de 12 mm diretamente ligado aos banzos através de um adesivo. A viga foi dimensionada de modo a que a deformação ocorresse segundo o eixo de menor inércia.		
Ligação	Poliuretano (rigidez média) e Resina Époxi (de alta resistência)		
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • As vigas com poliuretano deformaram abruptamente e em simultâneo; • As vigas com resina épxi deformaram gradualmente, os banzos deformaram primeiro seguido dos painéis de vidro; • Deformação (quase) plástica da secção; • Elevada capacidade de carga residual; • Comportamento dúctil de pós-rotura; • Nada se concluiu relativamente à deformação lateral torsional; • As vigas com resina épxi mostraram estabilidade na rotura; • As vigas com poliuretano demonstraram rotura no adesivo com elevadas rotações dos banzos. 		

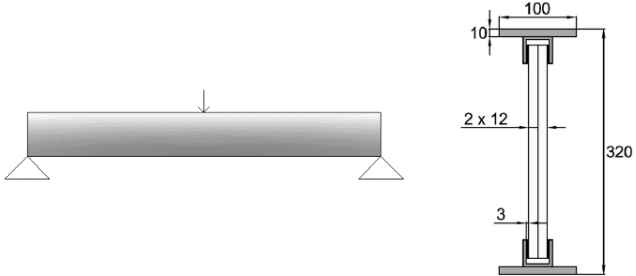
Quadro 3.4.4 h) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Innoglast project - Czech Technical University, 2010.

Layout		
Objetivos	Estudo da robustez da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	4250 mm
	Altura	320 mm
	Largura	100 mm
	Secção Transversal	Viga em I
	Viga constituída por 5 camadas de vidro laminado (HSG) na direção longitudinal, utilizando dois tipos de juntas para o contacto dos painéis de vidro. Junta limite, junta sobreposta.	
Conclusões	Ligação	Acrílico e Poliuretano
<ul style="list-style-type: none"> • Poliuretano muito flexível para transferir forças de corte entre o vidro e o aço; • As vigas com perfis em U mostraram melhores resultados, no entanto insuficientes não verificando robustez para este adesivo; • Vigas híbridas cumprem os requisitos de robustez desde que o adesivo possua um módulo de deformabilidade de 40 a 50 Mpa; • Juntas sobrepostas entre panos longitudinais de vidro são recomendadas; • Elevada capacidade residual. 		

Quadro 3.4.4 i) – Vigas mista vidro-aço (Abeln *apud* Martens et al, 2015).

Belis, 2009.

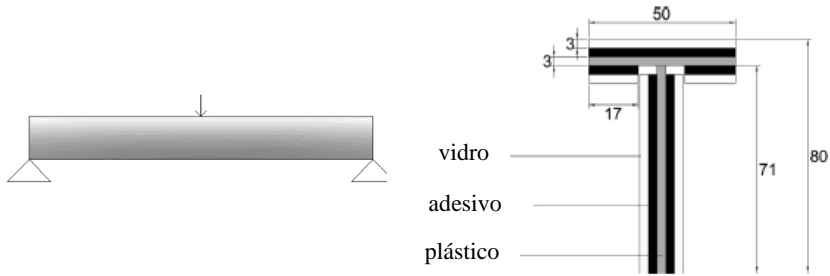
Layout		
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-aço.	
Variação Paramétrica	Comprimento	
	Secção Transversal	Viga em I
	Vidro embebido numa "moldura" de aço com painéis de vidro laminado (HSG) 2x4 mm	
	Ligação	
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamento linear; • Painéis de vidro próximos dos apoios atingiram a rotura devido à deformação por flexão (para uma carga última de 135 kN); • Pode atingir-se grandes vãos se se aparafusar as molduras dos painéis de vidro. 	

3.4.1.5 Vigas mistas vidro-plástico

Os sistemas mistos vidro-plástico são constituídos por vidro e camadas intermédias de plástico cuja ligação se realiza através de um acrílico UV-Endurecido.

Quadro 3.4.5 – Vigas mista vidro-plástico (Hildebrand *apud* Martens et al, 2015).

Hildebrand & Werner, 2006.

Layout			
Objetivos	Estudo do comportamento da viga mista vidro-plástico.		
Variação Paramétrica	Comprimento	1000 mm	
	Altura	80 mm	
	Largura	50 mm	
	Secção Transversal	secção em T	
	A viga é constituída por vidro recozido e plástico de policarbonato UV-Estabilizado (Capacidade de resistir a elevadas temperaturas, -100°C e +120°C).		
Conclusões	Ligação	Acrílico UV-Endurecido	
	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade residual do plástico evitou o colapso total da viga; • Efeitos amplificam-se com os diferentes coeficientes de expansão térmica do vidro e do plástico; • O adesivo influencia o desempenho de pós-rotura da viga. 		

Devido ao baixo módulo de elasticidade, as folhas de plástico são capazes de transmitir esforços normais e de corte quando devidamente dimensionadas. A secção transversal deveria aumentar as forças normais e a capacidade de momento resistente enquanto que a ligação do elemento não tem uma rotura frágil uma vez que se trata de um material plástico.

A transmissão de esforços de corte entre a alma e o banzo ocorre apenas através do plástico. Posteriormente, os autores testaram uma amostra a 25 ciclos de temperatura de acordo com a norma DIN EN ISO 9142 Aging Cycle D3. Uma fissura no centro do banzo desenvolveu-se e cresceu na direção longitudinal. Os efeitos amplificavam-se com os diferentes coeficientes de expansão térmica do vidro e do plástico.

O tratamento térmico, a laminação e a espessura são os principais parâmetros de interesse, sendo recomendado para este tipo de sistemas mistos o uso de vidro recozido (ANG) devido à sua rigidez residual e devido ao mecanismo de transferência de carga num estado de pós-rotura. Após a rotura da alma, os pedaços de vidro resultantes seguram-se através da camada intermédia e assim continuam aptos a transferir esforços de corte e compressão. Se se utilizar vidro com tratamento térmico (HSG e FTG), este desintegrar-se-á em pedaços de vidro muito pequenos fazendo com que a viga não continue apta a receber carga.

3.4.2. Conclusão

É como nota final que se conclui que o adesivo influencia o desempenho de pós-rotura da viga. Adesivos mais rígidos oferecem melhor qualidade de desempenho (resinas époxi e acrílicos) no entanto se o mais importante for a resistência de pós-rotura, o uso de adesivos menos rígidos é o mais indicado (como por exemplo, poliuretanos e silicones).

Quando ocorre a primeira falha, a viga tem que estar apta a transferir esforços de tração para o outro material, o que acontece em todos os conceitos apresentados anteriormente. Isto deve-se ao facto dos esforços de corte se transferirem da alma ao banzo pelo que a ligação deve conseguir permitir essa passagem. Caso contrário o sistema será limitado e falhará prematuramente.

As vigas mais estudadas são as vigas em I, não só por nutrirem uma elevada capacidade à flexão como também minimizarem a quantidade de material a usar (uma vez que o vidro é um material pouco económico).

Relativamente à capacidade de carga, conclui-se que diferentes materiais utilizados para a produção de sistemas mistos são igualmente importantes. No caso do sistema misto vidro-aço, a fase de pós-rotura é caracterizada por um aumento de carga significativo até que o aço atinja a rotura, aqui a resistência de pós-rotura é determinada pela resistência última do aço e sua ductilidade.

A madeira e o GFRP não são classificados como materiais dúcteis, em vez disso, uma vez atingida a resistência máxima, a rotura será frágil. O sistema misto vidro-betão armado deveria apresentar um comportamento idêntico ao referido anteriormente, no entanto isto não se verificou por falta de rigidez residual no vidro temperado pelo que a viga ilustra um comportamento pouco seguro. O plástico (poli-carbonatos) tem um baixo módulo de elasticidade exibindo grandes deformações quando carregado e como consequência disso as

vigas constituídas por este material caracterizam-se na fase de pós-rotura pelos deslocamentos verticais.

Conclui-se ainda que os conceitos desenvolvidos utilizaram diferentes tipos de materiais que ilustram resistências de pós-rotura significantes assim como alguma ductilidade quando sujeitas a flexão o que as torna aptas a aplicação estrutural, pelo que a escolha da combinação dos materiais reflete no comportamento da capacidade de carga das vigas.

As vigas vidro-aço adquirem a sua ductilidade pelo aço enquanto que as vigas constituídas com madeira, GFRP (apresentando, no entanto, elevada capacidade de deformação) e plástico exibem um comportamento semi-dúctil caracterizado pelo aumento do dano e pelo colapso frágil. O sistema misto de vidro-betão armado deve apresentar um comportamento intermédio. Nesta fase não é possível delinear qualquer conclusão relativamente ao sistema misto de vidro-plástico (Martens, 2015).

4 BASE DE DADOS SOBRE VIGAS DE VIDRO ESTRUTURAL

4.1 Introdução

Uma formulação de dimensionamento só pode ser desenvolvida após conceber formulações analíticas, no entanto, estas formulações têm de ser validadas com resultados experimentais. Deste modo, é de todo o interesse e devido à grande contribuição experimental existente, desenvolver uma plataforma estruturada de dados sobre vigas de vidro estrutural. Além das vantagens em termos de calibração de modelos e de validação de formulações, a compilação facilita a análise comparativa de informação.

De modo a sintetizar toda essa informação e a facilitar a consulta ao utilizador, apresenta-se neste capítulo a base de dados desenvolvida numa ferramenta de trabalho, conhecida do público em geral e de fácil utilização que é o “*MS Excel*”. A interface é intuitiva, pelo que se considera não só de fácil leitura como também de fácil utilização.

4.2 Arquitetura da base de dados

A base de dados (Figura 4.1), como referido anteriormente, foi desenvolvida em “*MS Excel*” e é constituída por 3 zonas, Zona A, Zona B e Zona C. Apresenta-se a título de exemplo a informação analisada de uma atividade experimental realizada em 2016 pelos autores K. Martens, R. Caspeele e J. Belis, na Universidade de Gant, na Bélgica sobre vigas de vidro reforçadas estaticamente indeterminadas.

Na Zona A são introduzidos os aspetos gerais da atividade experimental, na Zona B, informação relativa à secção transversal e respetiva configuração e na Zona C, os resultados obtidos.

A Zona A (Figura 4.2) refere-se aos aspetos gerais da experiência, o tipo de layout se é 3PB, 4PB ou 5PB, os objetivos a que se destina a atividade, a caracterização específica dos materiais relativamente à alma aos banzos e ao tipo de ligação estrutural. Sugere-se também a introdução de um esquema da atividade também.

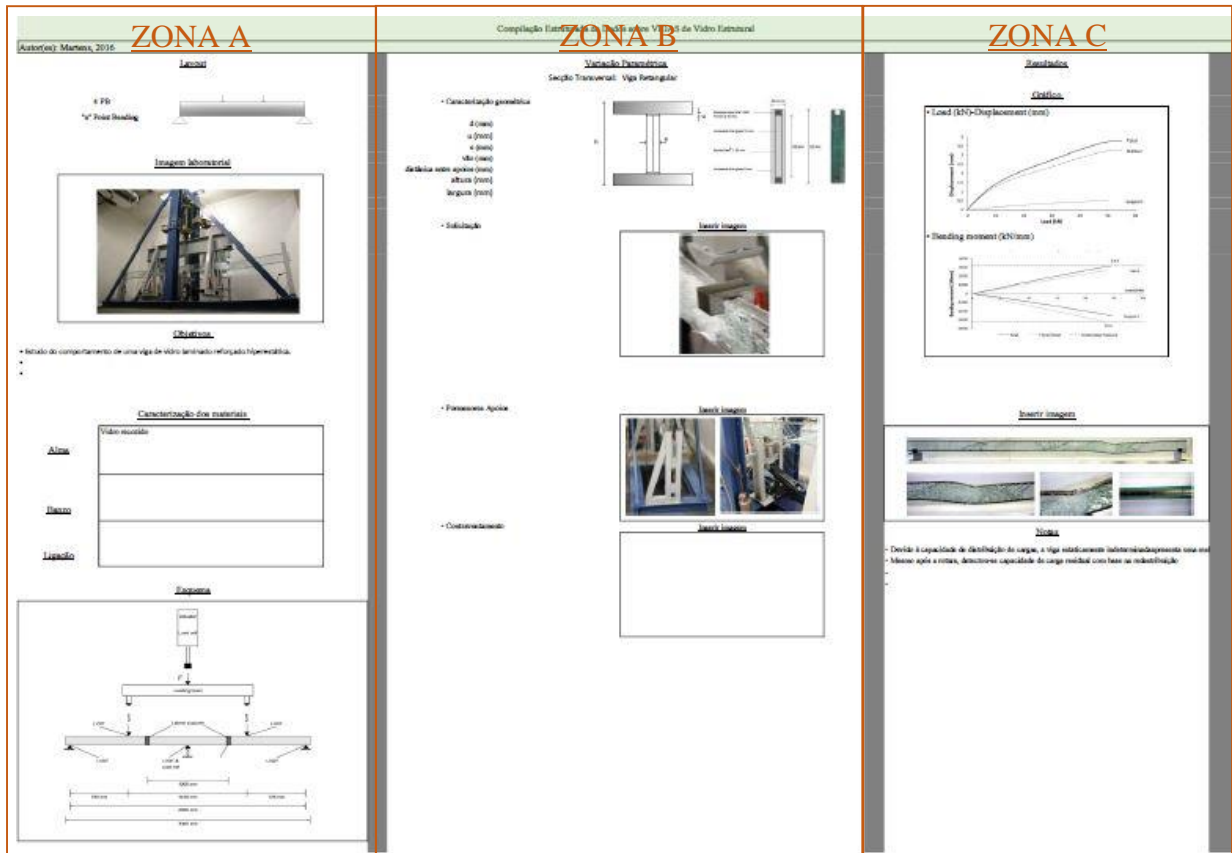


Figura 4.1. Interface da base de dados desenvolvida em “MS Excel”.

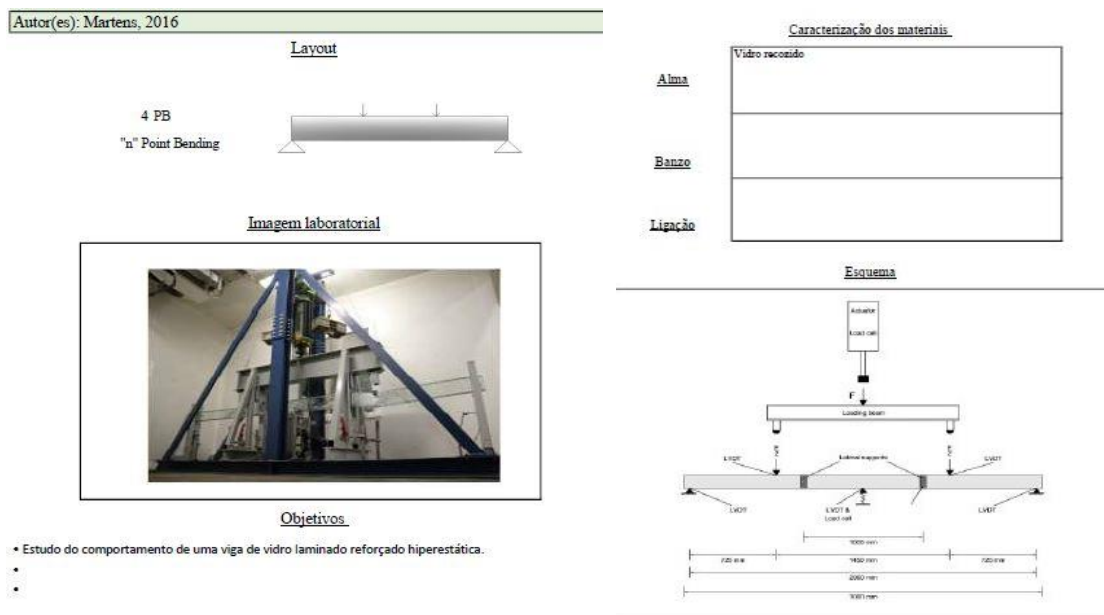


Figura 4.2. Zona A da interface da base de dados, aspetos gerais.

A Zona B (Figura 4.3) refere-se à variação paramétrica utilizada para a realização do ensaio, detalhando o tipo de secção transversal, ou seja, viga em I, viga em T ou viga retangular, o comprimento do vão, a distância entre os apoios assim como a altura e a largura da viga. Também de destaca a dimensão da ligação estrutural e a sua espessura.

O tipo de solicitação, os pormenores dos apoios, se com rolete, borracha ou alumínio e o contraventamento. Em qualquer uma das mencionadas anteriormente, é possível, se disponível, inserir uma ilustração de apoio à informação.

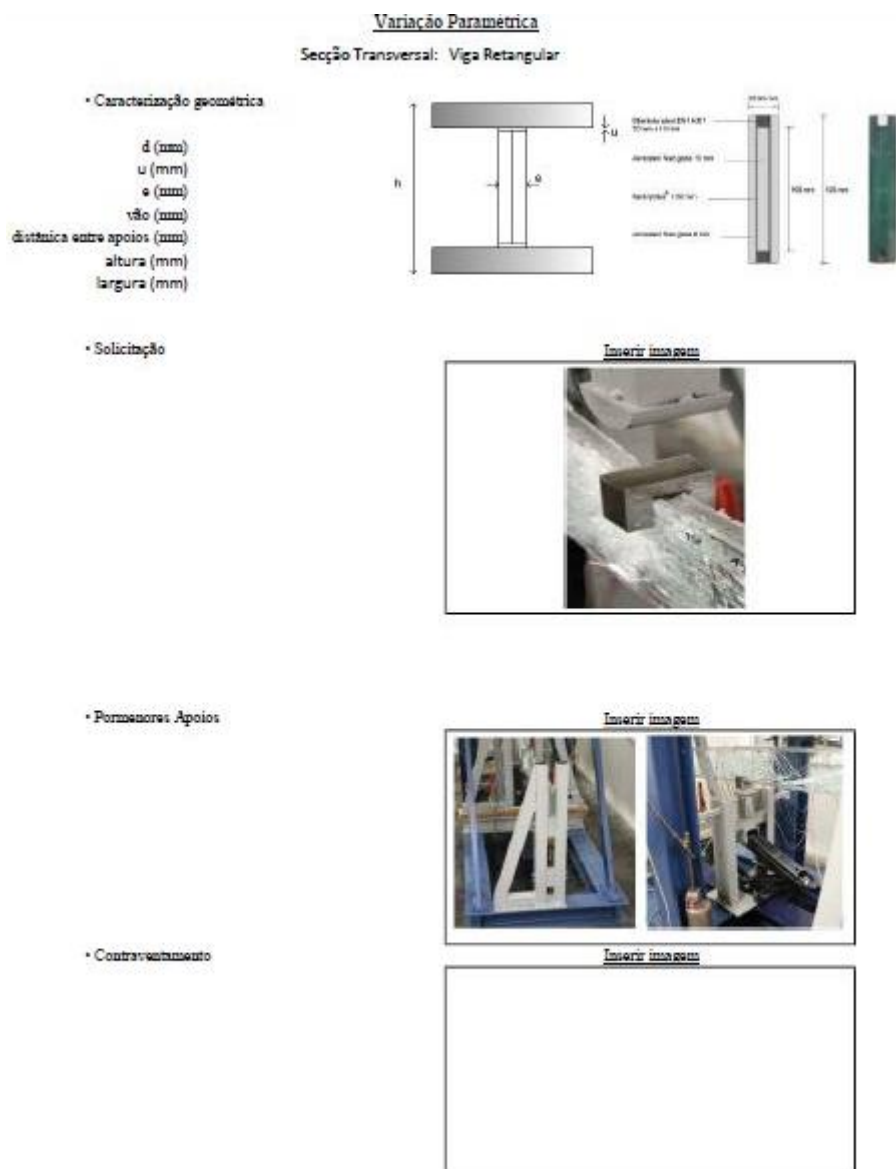


Figura 4.3. Zona C da interface da base de dados, informação relativa à secção transversal e respetiva configuração.

A Zona C (Figura 4.4) destina-se aos resultados e disponibiliza três tipos de secções, a primeira secção refere-se ao(s) gráfico(s) determinado(s) com os resultados obtidos experimentalmente quer a ensaios Força (kN)-Deslocamento (mm) quer a ensaios de Flexão (kN.mm). A segunda secção possibilita a introdução de imagens das vigas após rotura e a terceira secção destina-se às conclusões da atividade.

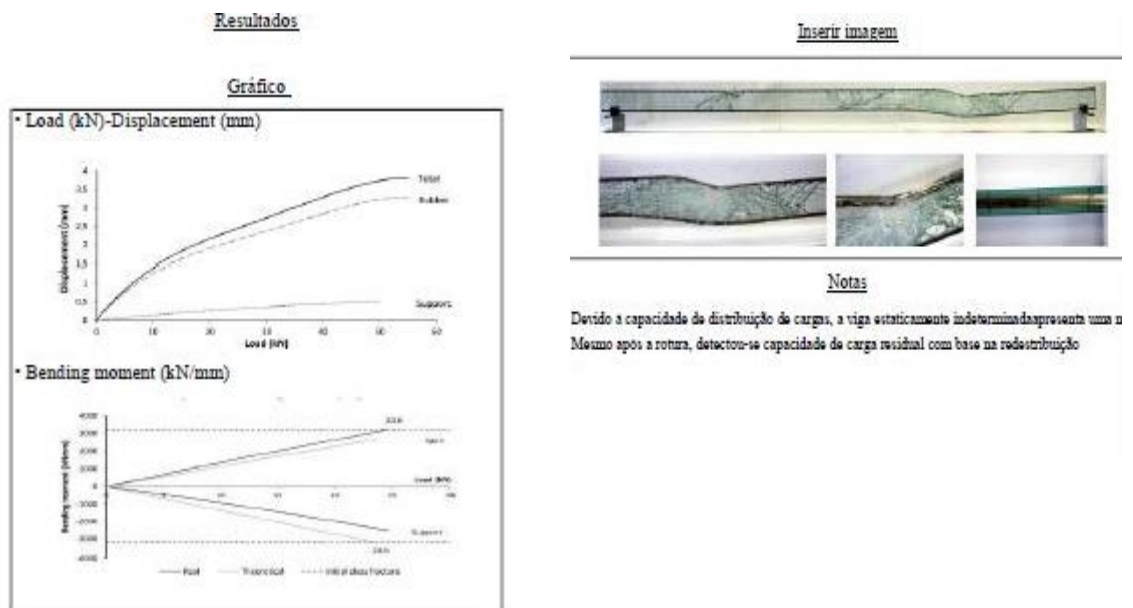


Figura 4.4. Zona C da interface da base de dados, resultados.

O exemplo apresentado da base de dados desenvolvida pode ser consultado em anexo.

5 COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS POSTERIORES

Para desenvolver uma formulação de dimensionamento é necessário antes conceber formulações analíticas. Estas formulações têm de ser validadas com resultados experimentais.

É com base nesta sequência que é de todo o interesse a criação estruturada desta plataforma, que irá permitir ao utilizador não só consultar como adicionar informação. A base de dados aqui apresentada, apenas engloba as contribuições experimentais em sistemas misto de madeira, betão armado, GFRP, aço e plástico em vidro estrutural. A criação de uma plataforma com as contribuições analíticas e numéricas seria uma mais-valia para esta área e uma ferramenta de grande ajuda ao desenvolvimento do Eurocódigo 10.

Como propostas para desenvolvimentos posteriores sugere-se uma atualização desta versão da base de dados, nomeadamente no que se refere à interface. Colocá-la “*online*” para que o utilizador tanto possa consultar como adicionar informação e ao adicionar esta informação toda ela fique disponível à comunidade científica.

6 CRÉDITOS DE IMAGEM

Imagem	Referência	Data
Imagem 1	www.cultofmac.com	11/04/2016
Imagem 2	www.engenhariacivil.com	11/04/2016
Imagem 3	www.haimdotan.com	21/07/2016
Imagem 4	www.mariposadeobsidiana.com	15/04/2016
Imagem 5	www.prof2000.pt	15/04/2016
Imagem 6	www.adautogmjuniior.blogspot.pt/	15/04/2016
Imagem 7	www.en.wikipedia.org	21/07/2016
Imagem 8	www.slideshare.net	21/07/2016
Imagem 9	www.slideshare.net	21/07/2016
Imagem 10	www.roadfortwo.com	21/07/2016
Imagem 11	www.pt.pinterest.com	22/07/2016
Imagem 12	www.pt.pinterest.com	22/07/2016
Imagem 13	www.glazette.com	22/07/2016

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. Rui S. (2013). "Design of glass panes for uniformly distributed loads", pp 1-9.

Ronchetti C., M. L. (2013). "Stress-corrosion failure mechanisms in soda-lime silica glass". *Engineering Failure Analysis Journal*; Vol 35; pp 427-438; DOI 10.1016/j.engfailanal.2013.03.0.28.

Dowling, N. E. (2013). "Mechanical Behavior of Material - Engineering methods for deformation, fracture and fatigue.". ISBN 10: 0-273-76455-1, England.

Draft European Standard (1999). "prEN 13474-1: Glass in building - Design of glass panes Part 1: General bases of design", CEN, Brussels, Belgium.

Draft European Standard (2000). "prEN 13474-2: Glass in building - Design of glass panes Part 2: Design for uniformly distributed loads ", CEN, Brussels, Belgium.

Draft European Standard (2009). "prEN 13474-3: Glass in building - Design of glass panes Part 2: General methods of calculation and determination of strength of glass by testing", CEN, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization (2000). "EN 1288:2000 Glass in Building - determination of the bending strength of glass - Part 1: Fundamentals of testing glass; Part 2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas; Part 3: test with specimen supported at two points (four-point bending)", CEN, Brussels, Belgium.

Feldmann, M. (2014). "Guidance For European Structural Design of Glass Components". ISBN 978-92-79-35094-8, DOI 10.278815523, Italy.

Firno, F. A. (2015). "Análise experimental/FEM de vigas híbridas vidro-aço". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Jordão S., Pinho M., Neves L.C., Martins J.P., Santiago A. (2014) "Behaviour of laminated glass beams reinforced with pre-stressed cables" pp 204-207 DOI: 10.1002/stco.201410027.

Kantu. (1998). "2nd Internacional Conference on Natural Glasses". Prague 1987 Charles University Prague .

Klaasimeisteree@2016, www.klaasimeister.ee, Professional Glass Solutions data da consulta:23/07/2016.

Lawn, B. (1993). "Fracture of Brittle Solids". ISBN 0 521 40972 1, Cambridge.

Lopes, C. F. (2016). "Caracterização do Comportamento de Vigas de Vidro Estrutural Sujeitas a Solicitação Térmica". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Louter, C. (2007). "Adhesively bonded reinforced glass beams". Heron, Vol 52, pp 31-58.

Louter, P. C. (2011). "Fragile yet Ductile" Structural Aspects of Reinforced Glass Beams". Tese de Doutorado, Technische Universiteit Delft, Delft.

Martens, K., Caspeepe, K., Belis, J. (2015). "Development of composite glass beams - A review". Engineering Structures Journal, Vol 101, pp 1-15.

Martens, K., Caspeepe, K., Belis, J. (2016). "Experimental investigations of statically indeterminate reinforced glass beams". Construction on building materials, Vol 119, pp 296-307, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.151.

Matthias Haldimann, A. L. (2008). "Structural Use of Glass". IABSE-AIPCIVBH, Zurique, Switzerland. ISBN: 978-3-85748-119-2.

O'Regan, C. (2014). "Structural use of glass in buildings (Second edition). London ISBN 978-1-906335-25-0.

Overend, M. (2010). "Recent developments in design methods for glass structures". Vol 88.

R. Adams, P. M. (1977). "Static fatigue in glass". Journal of Materials Science, Vol 12, pp 643-657.

Ruchert, C. (2014) "Introdução aos Ensaio Mecânicos dos Materiais". Departamento de Engenharia dos Materiais. Escola de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, edição 2014.

Sanches, J. (2013). "Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Tavares, A. C. (2015). Caracterização o comportamento de vigas de vidro estrutural sujeitas a solicitação cíclica. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Valarinho, L. G. (2010). "Construção em vidro estrutural: Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Zarzycki, J. (1991). "Glasses and the vitreous state". University of Cambridge, ISBN 0-521-35582-6.

8 ANEXO

Autor(es): Martens, 2016

Layout

4 PB
"n" Point Bending



Imagem laboratorial



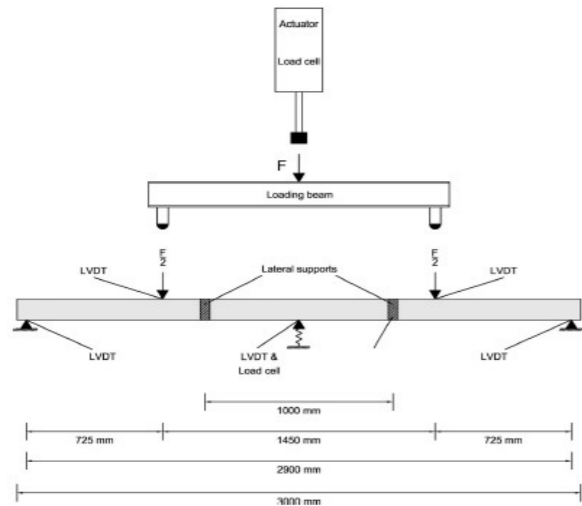
Objetivos

- Estudo do comportamento de uma viga de vidro laminado reforçado hiperestática.
-
-

Caracterização dos materiais

<u>Alma</u>	Vidro recozido
<u>Banzo</u>	
<u>Ligação</u>	SentryGlass

Esquema

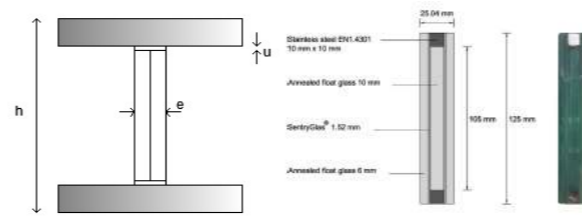


Variação Paramétrica

Secção Transversal: Viga Retangular

• Caracterização geométrica

- d (mm) 1,5
- u (mm)
- e (mm)
- vão (mm) 3000
- distância entre apoios (mm) 2900
- altura (mm) 125
- largura (mm) 25,04



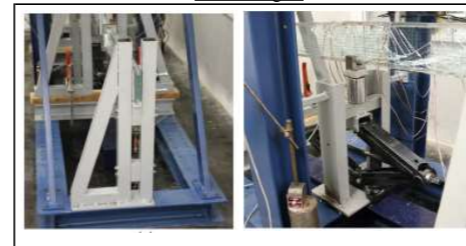
• Solicitação

Inserir imagem



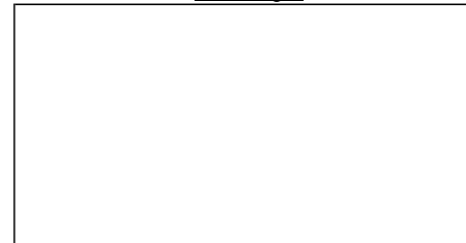
• Pormenores Apoios

Inserir imagem



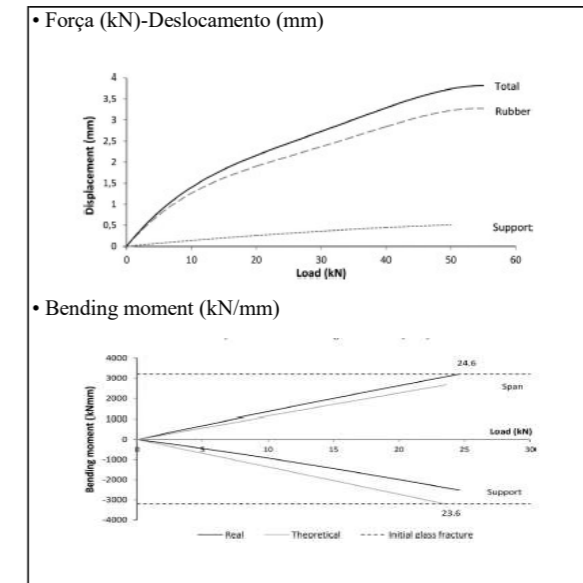
• Contraventamento

Inserir imagem



Resultados

Gráfico



Inserir imagem



Notas

- Devido à capacidade de distribuição de cargas, a viga estaticamente indeterminada apresenta uma mel
- Mesmo após a rotura, detectou-se capacidade de carga residual com base na redistribuição
-
-