

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Tiago Maia Sousa

**Vidro estrutural em condições extremas:
aplicações em ambiente submerso**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Eduardo Nuno Borges Pereira

novembro de 2014

DECLARAÇÃO

Nome:

João Tiago Maia Sousa

Endereço eletrónico: joaotiagomsousa@gmail.com

Telefone: 913493209

Número do Cartão de Cidadão: 13913580

Título da dissertação:

Vidro estrutural em condições extremas: aplicações em ambiente submerso

Orientador:

Professor Doutor Eduardo Nuno Borges Pereira

Ano de conclusão: 2014

Designação do mestrado:

Estruturas e Geotecnia

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 17/12/2014

Assinatura:_____

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é o culminar de vários meses de trabalho e dedicação e foi uma etapa que contribuiu substancialmente para pôr em prática diversos conhecimentos e aprofundar temáticas abordadas ao longo do percurso académico. É surpreendente constatar a infinidade de conteúdos e saberes que esta área de estudo comporta. Este foi um percurso que me incutiu o gosto pela exploração de conteúdos e me permitiu testar a minha capacidade de autonomia, gestão de tempo e espírito autodidata. Foi um trabalho árduo e que exigiu bastante de mim em todos os sentidos, a necessidade de me concentrar obrigou-me a prescindir de muitos momentos de lazer e tempo de dedicação aos que me são mais próximos, tive necessariamente que explorar a solidão que é inerente a um trabalho com esta dimensão e responsabilidade. Mas ninguém é capaz de dar o melhor de si sem o apoio e suporte daqueles que dispensam do seu tempo e nos oferecem um pouco de si próprios. Nesse sentido, este trabalho seria impensável sem uma vasta rede de pessoas às quais não poderia deixar o meu profundo agradecimento.

Esta dissertação foi realizada sob a orientação do professor doutor Eduardo Pereira, ao qual todas as palavras de agradecimento serão insuficientes para retribuir a sua dedicação ao longo de todo este percurso. Mais do que um professor, foi uma das pedras basilares no desenrolar do trabalho, pela sua prontidão no esclarecimento de dúvidas e ao ceder diverso material que foi absolutamente essencial. Agradeço toda a disponibilidade prestada ao longo deste moroso trabalho, teve em muitos momentos a humildade para largar o papel de docente e fazer chegar a mim palavras e gestos de motivação, entusiasmo e coragem para cumprir os objetivos pretendidos.

Deixo também um agradecimento sincero aos técnicos do laboratório de estruturas da Universidade do Minho, nomeadamente ao Sr. António Matos e ao engenheiro Marco Jorge, por todo o apoio prestado para que a concretização dos ensaios experimentais fosse possível com os recursos disponíveis. Os vários anos de experiência tornaram-nos detentores de um vasto conhecimento sobre inúmeras matérias que se prontificaram a partilhar comigo.

Aos colegas de curso que trabalharam no laboratório durante a realização dos ensaios e que prestaram apoio e possibilitaram a criação de inúmeras discussões saudáveis e troca de conhecimentos que enriqueceram o trabalho.

Ao engenheiro João Almeida pela ajuda na realização dos ensaios experimentais e pelo empréstimo de material de apoio.

À empresa VITROPOR, na pessoa do Dr. Pedro Aguiar, pelo fornecimento dos provetes de vidro que foram utilizados nos ensaios experimentais.

À vidraria Machado & Abreu, Lda., pelo corte dos provetes de vidro.

À minha família, em particular ao meu pai e à minha mãe, um eterno agradecimento, sem os quais teria sido impossível realizar o meu percurso académico, pela influência positiva que me

transmitiram para a construção da pessoa que sou e por terem garantido as melhores condições possíveis ao longo dos 5 anos de curso e me impulsionaram sempre, incondicionalmente, até à sua conclusão.

Aos meus amigos e colegas de curso, Carlos, José, Nuno e Ricardo, pelo companheirismo e espírito de entreaajuda, pela forma que compreendiam e sentiam também o peso da responsabilidade que tínhamos em mãos.

Um especial agradecimento à Mariana, que me acompanhou atentamente ao longo do curso. As suas palavras de conforto e entusiasmo tornam qualquer obstáculo perfeitamente transponível. É com muito carinho que guardo todas as lembranças da sua dedicação e apoio.

A todos os colegas de curso e a todos os amigos que me são impossíveis numerar, que me acompanharam neste percurso, e que de uma forma ou outra contribuíram para atingir esta meta. Preencheram muitos dos momentos de convívio dando ânimo e coragem que foram fulcrais para o meu equilíbrio interior.

Por fim agradeço aos meus professores, que me transmitiram muito do seu conhecimento ao longo do curso, são eles que conferem excelência e que tornam a Universidade do Minho, instituição que me acolheu durante 5 anos, um estabelecimento de ensino pautado pela qualidade e pela formação de graduados competentes.

RESUMO

O vidro é um material milenar. No entanto, a sua utilização na construção tem apenas alguns séculos. Depois de uma constante evolução no processo de fabrico de vidro, nos dias de hoje é possível criar painéis de vidro liso com elevadas resistências, que além de serem usados como elementos decorativos, cada vez mais são utilizados como elementos estruturais.

Nesta dissertação foi feito um estudo da aplicação do vidro como elemento estrutural num caso muito específico, a sua utilização em ambiente submerso, nomeadamente a sua utilização em piscinas e aquários. Este tipo de estruturas, devido aos seus requisitos funcionais, requer elevados cuidados no processo de estudo e dimensionamento.

Ao longo deste trabalho foram estudadas soluções estruturais de vidro laminado tendo em consideração os fatores que influenciam a aplicação deste tipo de material em ambiente submerso. Neste contexto, o estudo compreendeu uma componente de trabalho experimental e posteriormente uma avaliação com recurso a modelos numéricos do comportamento estrutural dos elementos de vidro estudados.

Numa primeira fase procedeu-se ao ensaio experimental do vidro em flexão simples tendo por base a norma EN 1288-3, com vista à caracterização do comportamento mecânico do vidro e posteriormente proceder à calibração dos modelos numéricos. Numa segunda fase procedeu-se ao ensaio experimental de vidro em consola, com o objetivo de estudar o comportamento do apoio em termos de rigidez e manutenção das propriedades geométricas e mecânicas. Os parâmetros estudados foram o comprimento de entrega do vidro, a espessura dos elementos de ligação e o nível de pré-compressão aplicada nesse material que faz a transmissão de esforços, entre o vidro e a estrutura de suporte. Para complementar o estudo experimental realizaram-se modelos numéricos para permitir simular o comportamento dos materiais e dos sistemas de apoio que foram alvo do estudo experimental, e desta forma validar a utilização dos modelos numéricos.

Por fim, dada a impossibilidade de realizar um modelo experimental que representasse a aplicação específica de painéis de vidro laminado sujeito a cargas hidrostáticas, que na maior parte dos casos consiste no problema de dimensionamento real, procedeu-se à modelação numérica de dois casos de estudo, com o objetivo de estudar o comportamento geral dos painéis de vidro quando sujeitos a este tipo de cargas e para as condições de apoio estudadas. De forma complementar à modelação dos casos de estudo, procedeu-se à calibração dos modelos numéricos recorrendo à pré-norma de dimensionamento prEN 16612, com o objetivo de validar os resultados numéricos.

Palavras-chave: vidro estrutural, vidro laminado, vidro submerso, modelos experimentais, modelos numéricos.

ABSTRACT

Glass is an ancient material. However it has been only used for construction purpose for a few centuries. After a constant evolution in the production process of glass, today is possible to create smooth glass panels with high resistances, which are increasingly being used as structural elements in addition to its decorative function.

A study of the application of glass as a structural element in a very specific case, their use in underwater environment, including its use in swimming pools and aquariums was conducted as part of this dissertation. This type of structure due to its functional requirements, requires a strong attention to details during the study and design process.

Throughout this work, structural laminated glass solutions were studied and it was taken into account the factors that influenced the application of this type of material in submerged environment. In this context, the study comprised a component of experimental work and then an evaluation using numerical models of structural behavior of the glass elements studied.

In a first phase it was carried out an experimental test which consisted of bending glass attending to the standard EN 1288-3, for the characterization of the mechanical behavior of the glass and then the calibration of numerical models was realized. In a second phase it was carried out to test a cantilever glass panel, with the aim of studying the behavior of the support in terms of rigidity and maintenance of the geometrical and mechanical properties. The parameters studied were the length of fix of the glass, the thickness of the connecting elements and the level of pre-compression which is applied to the material that is responsible for the transmission of efforts between the glass and the support structure. To complement the experimental studies numerical models were made to allow the simulation of the behavior of the materials and support systems that were targeted in the experimental study, and thus validate the use of numerical models.

Finally, given the impossibility of performing an experimental model that represented the specific application of laminated glass panels subjected to hydrostatic loads, which in most cases consists of real sizing problem, we proceeded to the numerical modeling study of two cases with the aim of studying the general behavior of glass panels when subjected to such loads and support conditions. Apart of the modeling case study form, the calibration of numerical models were proceeded using the standard prEN 16612, with the aim of validating the numerical results.

Keywords: structural glass, laminated glass, underwater glass, experimental models, numerical models.

SIMBOLOGIA

a.C.	Antes de cristo
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSG	Borosilicate glass
CAN/CGSB	National Standard of Canada
CEN/TC	Technical Committee - European Committee for Standardization
CIP	Cast-in-place resin
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
d.C.	Depois de cristo
DIC	Digital Image Correlation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Norma europeia
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
EVA	Ethylene vinylacetate
LVDT	Linear variable differential transformer
NBN	Bureau for Standardisation
NEN	Een Veelzijdige Organisatie
NiS	Sulfato de Níquel
prEN	Rascunho de norma europeia
PVB	Polivinil butiral
SGP	SentryGlas Plus
SLSG	Soda lime silica glass

B	Largura do provete de vidro
d	Distância vertical
E	Módulo de elasticidade

$F_{\max}$	Força máxima
g	Aceleração devido à gravidade
h	Espessura do provete
k	Fator adimensional
L_b	Distância entre cargas
L_s	Distância entre apoios
y	Flecha máxima do provete em relação aos apoios
δ	Deslocamento
ΔM	Variação de momento
$\delta_{\max}$	Deformação máxima
ΔP	Variação de carga
θ	Rotação
ρ	Densidade do provete
$\sigma^+_{\max}$	Tensão máxima de tração
σ_{bB}	Resistência à flexão
σ_{bG}	Resistência à flexão imposta pelo peso-próprio do provete
$\sigma^-_{\max}$	Tensão máxima de compressão

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
SIMBOLOGIA	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objetivos e metodologia	1
1.3. Organização da dissertação	3
2. TECNOLOGIA DO VIDRO	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Propriedades do vidro	8
2.2.1. Propriedades químicas	8
2.2.2. Propriedades físicas.....	9
2.3. Processo de fabrico	10
2.4. Tipos de vidro	11
2.4.1. Vidro temperado	11
2.4.2. Vidro termo-endurecido.....	13
2.4.3. Vidro laminado	15
2.4.4. Vidro com revestimento superficial.....	18
2.4.5. Unidades de isolamento – vidro duplo/triplo.....	19
2.5. Mecanismo de rotura e fratura	19
3. VIDRO ESTRUTURAL	21
3.1. Introdução.....	21
3.2. Ligações	21
3.2.1. Ligações mecânicas	22
3.2.2. Ligações por colagem	24
3.3. Normas de ensaio.....	26

3.4. Normas de dimensionamento	26
3.4.1. Regras práticas com base na experiência	27
3.4.2. Verificação das tensões admissíveis	27
3.4.3. Normas de dimensionamento europeias e americanas	28
3.5. Vidro estrutural submerso	29
3.5.1. Soluções existentes (acrílico vs. vidro)	29
3.5.2. Vidro laminado em aplicações submersas.....	31
3.5.3. Peculiaridades da <i>interlayer</i>	32
3.5.4. Método simplificado.....	35
3.5.5. Tipos de ações	36
3.5.6. Condições de apoio e proposta para sistema de fixação	40
3.5.7. Dimensionamento através da pré-norma prEN 16612	44
4. ESTUDO EXPERIMENTAL	49
4.1. Contexto	49
4.2. Modelo de flexão em quatro pontos.....	49
4.2.1. Propósito	49
4.2.2. Provets para ensaio	50
4.2.3. Equipamento utilizado e preparação dos ensaios	51
4.2.4. Procedimento experimental.....	53
4.2.5. Resultados experimentais	55
4.3. Modelo em consola	61
4.3.1. Propósito	61
4.3.2. Provets para ensaio	62
4.3.3. Equipamento utilizado e preparação dos ensaios	62
4.3.4. Procedimento experimental.....	66
4.3.5. Resultados experimentais	70
4.3.6. Análise da deformação do sistema de fixação por intermédio da correlação digital de imagem (DIC).....	79
4.3.7. Comparação de resultados obtidos através da correlação digital de imagem (DIC) com resultados obtidos através dos LVDT.	85
5. ESTUDO NUMÉRICO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	87
5.1. Modelação numérica.....	87
5.1.1. Método dos elementos finitos	87
5.1.2. <i>Software</i> – ABAQUS.....	87
5.1.3. Propósito	87
5.2. Modelo do ensaio de flexão em quatro pontos	88

5.2.1. Geometria	88
5.2.2. Materiais	89
5.2.3. Modelação.....	90
5.2.4. Cargas e condições de apoio	90
5.2.5. Resultados	91
5.3. Modelo em consola	93
5.3.1. Geometria	93
5.3.2. Materiais	93
5.3.3. Modelação.....	94
5.3.4. Cargas e condições de apoio	96
5.3.5. Resultados	96
6. ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS DE ESTUDO	101
6.1. Definição do modelo geral	101
6.1.1. Geometria	101
6.1.2. Materiais	101
6.1.3. Modelação.....	102
6.1.4. Cargas e condições de apoio	103
6.1.5. Resultados	104
6.2. Caso de estudo 1 – Pannel de vidro apoiado em 3 lados com bordo superior livre	107
6.2.1. Geometria	108
6.2.2. Materiais	108
6.2.3. Modelação.....	109
6.2.4. Cargas e condições de apoio	109
6.2.5. Resultados	110
6.3. Caso de estudo 2 – Pannel de vidro apoiado em 4 lados (janela).....	117
6.3.1. Comparação das tensões e deformações máximas com as obtidas no caso de estudo 1....	118
6.3.2. Valor máximo do carregamento	120
6.3.3. Comparação com pannel em acrílico.....	121
7. CONCLUSÕES	123
7.1. Estado da arte relativo à tecnologia do vidro e ao vidro estrutural	123
7.2. Vidro estrutural submerso.....	124
7.3. Estudo experimental	125
7.4. Estudo numérico dos ensaios experimentais	127
7.5. Estudo numérico dos casos de estudo	127
7.6. Considerações finais e perspectivas de desenvolvimento futuro.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	i

ANEXOS.....	v
ANEXO 1.....	vii
Padrão de fendilhação após rotura dos provetes de vidro ensaiados simplesmente apoiados	vii
Vidro termo-endurecido de 6 mm.....	viii
Vidro termo-endurecido de 8 mm.....	ix
Vidro recozido de 12 mm	x
Vidro recozido de 15 mm	xi
ANEXO 2.....	xiii
Padrão de fendilhação após rotura dos provetes de vidro ensaiados em consola	xiii
Vidro recozido de 12 mm	xiv
Vidro recozido de 15 mm	xv
Vidro termo-endurecido de 8 mm.....	xvi
Vidro termo-endurecido de 6 mm.....	xvii
ANEXO 3.....	xix
Resultados gráficos da modelação numérica do caso de estudo 1	xix
Variação da espessura de neoprene.....	xx
Variação da pré-compressão	xxiii
Variação do comprimento de entrega.....	xxv
ANEXO 4.....	xxvii
Resultados gráficos da modelação numérica do caso de estudo 2	xxvii
Comparação do efeito das tensões e deformações máximas com o caso de estudo 1	xxviii
Utilização de painel em acrílico	xxxi

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema com a estrutura global da dissertação.....	5
Figura 2 – Relação tensão-extensão para o aço e para o vidro (adaptada de [3]).	10
Figura 3 - Processo "float" (adaptada de [2]).	11
Figura 4 – Princípio do vidro temperado (adaptada de [5]).	12
Figura 5 - Diagramas de tensões normais para a secção transversal de diferentes tipos de vidro (adaptada de [3])......	14
Figura 6 - Padrão de rotura do vidro recozido, vidro termo-endurecido e vidro temperado (adaptada de [2])......	14
Figura 7 - Comportamento pós-rotura do vidro laminado constituído por diferentes tipos de vidro (adaptada de [2]).	16
Figura 8 - Processo de fabrico do vidro laminado (adaptada de [7]).	17
Figura 9 - Comparação do módulo de elasticidade da película em PVB e em Ionoplast (adaptada de [2]).	18
Figura 10 – Suporte linear com junta em EPDM e batente (adaptada de [2], [10]).	22
Figura 11 – Estrutura fixada através de fixações por aperto (adaptada de [2], [10]).	23
Figura 12 – Estrutura fixada através de parafusos (adaptada de [2], [7])......	24
Figura 13 – Projeto de estrutura em vidro recorrendo a ligações por colagem na Universidade de Estugarda, Alemanha [10].	25
Figura 14 – Resistência à tração do acrílico para diferentes temperaturas ao longo do tempo (adaptada de [12])......	30
Figura 15 – Tensões de flexão a meio vão de um laminado constituído por dois painéis de vidro e uma película de PVB a diferentes temperaturas para um carregamento de 1 hora (adaptada de [14]).	33
Figura 16 – Deformação a meio vão para um laminado constituído por dois painéis de vidro e uma película de PVB a diferentes temperaturas (adaptada de [14])......	33
Figura 17 – Módulo de elasticidade para o SentryGlas Plus da Dupont (adaptada de [8])......	34
Figura 18 – Coeficiente de Poisson para o SentryGlas Plus da Dupont (adaptada de [8]).	34
Figura 19 – Exemplo das dimensões de um vidro laminado (adaptada de [15])......	36

Figura 20 – Pressão hidrostática que atua nos painéis de vidro em diferentes situações.	38
Figura 21 – Sistema de suporte linear utilizado na fixação de painéis de acrílico (adaptada de [16]).	41
Figura 22 – Sistema base proposto para a fixação dos painéis de vidro.	41
Figura 23 - Esquema de fixação dos painéis de vidro à estrutura envolvente.	43
Figura 24 – Esquema da estrutura de suporte.	43
Figura 25 - Campo de tensões no vidro termo-endurecido, observado através de filtro polarizador.	50
Figura 26 - Esquema de ensaio do modelo simplesmente apoiado.	52
Figura 27 - Esquema de montagem do modelo simplesmente apoiado.	52
Figura 28 - Esquema de montagem a meio vão.	53
Figura 29 - Esquema de montagem na zona do apoio.	53
Figura 30 - Ensaio de flexão a decorrer.	54
Figura 31 – Padrão de rotura de um provete de vidro termo-endurecido.	55
Figura 32 – Padrão de rotura de um provete de vidro recozido.	56
Figura 33 – Esquema do deslocamento medido através dos LVDT e do deslocamento medido através do atuador.	56
Figura 34 – Respostas força-deslocamento obtidas através do atuador para o vidro termo-endurecido, com as espessuras de 6 mm para os provetes P1, P2 e P3 e 8 mm para os provetes P4, P5 e P6.	57
Figura 35 – Respostas força-deslocamento obtidas através do atuador para o vidro recozido, com as espessuras de 12 mm para os provetes P7, P8 e P9 e 15 mm para os provetes P10, P11 e P12.	57
Figura 36 – Esquema de montagem do ensaio em consola.	63
Figura 37 – Esquema de ensaio em consola.	64
Figura 38 - Equipamento fotográfico para análise da deformação ao nível do sistema de fixação.	65
Figura 39 – Interface do <i>software</i> NCORR.	65
Figura 40 – Interface do <i>software</i> de pós processamento NCORR_POST.	66
Figura 41 – Esquema da zona de fixação e identificação dos parâmetros que influenciam o comportamento do apoio.	67
Figura 42 – Rotação excessiva do provete sem ocorrer rotura.	68
Figura 43 – Rotação excessiva do provete na zona da fixação.	68
Figura 44 – Local de rotura dos provetes no ensaio em consola.	70

Figura 45 – Respostas força-deslocamento para os provetes de 12 mm.	73
Figura 46 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 15 mm.....	75
Figura 47 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 8 mm.....	77
Figura 48 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 6 mm.....	78
Figura 49 – Campo de deslocamentos horizontais e posicionamento dos extensómetros virtuais.	79
Figura 50 – Determinação do centro de rotação do vidro através de DIC.	80
Figura 51 – Respostas momento-rotação ao nível do encastramento (sistema de fixação) obtidas considerando os deslocamentos medidos em 3 pares de pontos em diferentes localizações do sistema de fixação, com base no processamento de imagem digital.	81
Figura 52 – Respostas momento-rotação ao nível do encastramento (sistema de fixação) obtidas para os provetes P1, P2, P3 e P4, com base no processamento de imagem digital.	82
Figura 53 - Respostas momento-rotação obtidas para os provetes P5 e P3.	83
Figura 54 - Respostas momento-rotação obtidas para os provetes P5_2, P6_2 e P1.	84
Figura 55 – Definição do sistema estrutural no Ftool.	85
Figura 56 – Deformada e obtenção do deslocamento no ponto de carregamento, por intermédio do Ftool.....	85
Figura 57 – Modelo numérico do ensaio de flexão em 4 pontos.....	89
Figura 58 – Malha de elementos finitos.	94
Figura 59 – Deslocamento horizontal do elemento metálico verificado através da correlação digital de imagem.	95
Figura 60 – Definição das interações entre materiais e rigidez da mola.	96
Figura 61 – Comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico.....	99
Figura 62 – Sobreposição do modelo numérico à fotografia do ensaio imediatamente antes da rotura e pormenor do descolamento do neoprene.....	99
Figura 63 – Malha de elementos finitos adotada e tipo de elementos utilizados.	103
Figura 64 – Condições de apoio do modelo e tipo de carga.....	103
Figura 65 - Modelo numérico do caso de estudo 1.....	108
Figura 66 – Influência da espessura de neoprene no comportamento do vidro laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.....	111
Figura 67 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 4 mm (imagens ampliadas no anexo 3).	111
Figura 68 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 16 mm (imagens ampliadas no anexo 3). ...	112

Figura 69 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 11 mm (imagens ampliadas no anexo 3). ...	112
Figura 70 - Influência da pré-compressão do neoprene no comportamento do laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.....	113
Figura 71 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para o caso em que não se aplica pré-compressão no sistema de fixação (imagens ampliadas no anexo 3).	114
Figura 72 – Interação do vidro com o apoio em neoprene quando sujeito a carregamento ampliada 4 vezes, para uma pré-compressão de 10% [esquerda] e sem aplicação de pré-compressão [direita].	114
Figura 73 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma pré-compressão do neoprene de 20% (imagens ampliadas no anexo 3).	115
Figura 74 - Influência do comprimento de entrega no comportamento do laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.	116
Figura 75 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para um comprimento de entrega de 20 mm (imagens ampliadas no anexo 3).	116
Figura 76 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para um comprimento de entrega de 60 mm (imagens ampliadas no anexo 3).	117
Figura 77 - Modelo numérico do caso de estudo 2.....	118
Figura 78 – Tensões principais máximas para painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).	119
Figura 79 - Tensões principais mínimas para o painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para o painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).	119
Figura 80 – Deformações máximas para o painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para o painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).	120
Figura 81 – Relação entre a profundidade à qual é colocado o painel de vidro e a tensão máxima de tração instalada.	121
Figura 82 – Deformações máximas [esquerda] e tensões principais máximas [direita] para painel em acrílico apoiado em 4 bordos (imagens ampliadas no anexo 4).	122
Figura 83 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P1.	viii
Figura 84 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P2.	viii

Figura 85 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P3.	viii
Figura 86 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P4.	ix
Figura 87 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P5.	ix
Figura 88 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P6.	ix
Figura 89 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.	x
Figura 90 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.	x
Figura 91 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P9.	x
Figura 92 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P10.	xi
Figura 93 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P11.	xi
Figura 94 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P12.	xi
Figura 95 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P1.	xiv
Figura 96 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P2.	xiv
Figura 97 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P3.	xiv
Figura 98 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P4.	xiv
Figura 99 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P5.	xiv
Figura 100 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P6.	xiv
Figura 101 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.	xv
Figura 102 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.	xv
Figura 103 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.	xv
Figura 104 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.	xv
Figura 105 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P13.	xvi
Figura 106 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P14.	xvi
Figura 107 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P15.	xvi
Figura 108 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P16.	xvii
Figura 109 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P17.	xvii
Figura 110 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 4 mm.	xx
Figura 111 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 4 mm.	xx
Figura 112 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 16 mm.	xxi
Figura 113 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 16 mm.	xxi

Figura 114 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 11 mm.....	xxii
Figura 115 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 11 mm.	xxii
Figura 116 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para a não aplicação de pré-compressão no neoprene.	xxiii
Figura 117 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para a não aplicação de pré-compressão do neoprene.....	xxiii
Figura 118 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma pré-compressão do neoprene de 20%.....	xxiv
Figura 119 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma pré-compressão do neoprene de 20%.	xxiv
Figura 120 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para um comprimento de entrega de 20 mm.....	xxv
Figura 121 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para um comprimento de entrega de 20 mm.	xxv
Figura 122 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para um comprimento de entrega de 60 mm.....	xxvi
Figura 123 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para um comprimento de entrega de 60 mm.	xxvi
Figura 124 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 3 bordos.	xxviii
Figura 125 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 4 bordos.	xxviii
Figura 126 - Tensões principais mínimas para painel apoiado em 3 bordos.....	xxix
Figura 127 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 4 bordos.	xxix
Figura 128 - Deformações na direção perpendicular ao painel para o painel apoiado em 3 bordos.	xxx
Figura 129 - Deformações na direção perpendicular ao painel para o painel apoiado em 4 bordos.	xxx
Figura 130 - Deformações na direção perpendicular ao plano do painel para o painel em acrílico apoiado em 4 bordos.....	xxxi
Figura 131 - Tensões principais máximas para painel em acrílico apoiado em 4 bordos.	xxxi

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do vidro silico-soda-cálcico (SLSG) - (adaptado de [1]).	8
Tabela 2 - Propriedades físicas do vidro SLSG (adaptado de [2]).	9
Tabela 3 – Valores característicos da resistência à flexão do vidro sujeito a tratamento.	46
Tabela 4 – Fatores parciais de carga.	47
Tabela 5 – Provetes do ensaio de flexão em quatro pontos.	51
Tabela 6 – Parâmetros do ensaio de flexão em quatro pontos.	54
Tabela 7 – Resultados do ensaio de flexão.	58
Tabela 8 – Tensão de rotura e módulo de elasticidade para o vidro termo-endurecido.	59
Tabela 9 - Tensão de rotura e módulo de elasticidade para o vidro recozido.	60
Tabela 10 - Provetes do ensaio em consola.	62
Tabela 11 – Condições definidas para o apoio em cada provete de vidro recozido.	69
Tabela 12 - Condições definidas para o apoio em cada provete de vidro termo-endurecido.	70
Tabela 13 – Resultados do ensaio em consola.	71
Tabela 14 – Comparação entre a deformação obtida no atuador e a obtida através do Ftool.	86
Tabela 15 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelação do modelo simplesmente apoiado.	89
Tabela 16 - Comparação da tensão máxima obtida experimentalmente com a obtida através da análise numérica.	91
Tabela 17 – Comparação do deslocamento a meio vão obtido experimentalmente com o obtido na análise numérica.	92
Tabela 18 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelação do modelo em consola.	93
Tabela 19 - Comparação do deslocamento no ponto de aplicação da carga obtido experimentalmente e numericamente.	97
Tabela 20 - Comparação de tensões máximas de tração obtidas experimentalmente com as obtidas numericamente.	98
Tabela 21 – Parâmetros utilizados na modelação para a calibração de modelos.	102
Tabela 22 – Resultados obtidos no Abaqus para painel duplo com PVB.	104

Tabela 23 – Diferença de resultados entre a pré-norma prEN 16612 e a modelação no Abaqus.	105
Tabela 24 – Resultados obtidos no Abaqus utilizando a espessura equivalente.	105
Tabela 25 – Diferença de resultados obtidos considerando a utilização de painel duplo com PVB e a utilização da espessura equivalente.....	106
Tabela 26 – Diferença de resultados obtidos através de uma análise geométrica linear e de uma análise geométrica não linear.	106
Tabela 27 – Resultados obtidos com a adoção do sistema de fixação com junta em neoprene.	107
Tabela 28 – Diferença de resultados obtidos entre a utilização de apoios simples e de apoios adotando o sistema de fixação com junta em neoprene.....	107
Tabela 29 – Parâmetros dos materiais utilizados no caso de estudo 1.	109
Tabela 30 – Comparação de resultados para painel apoiado em 3 e em 4 bordos.	118

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

O vidro é um material com milhares de anos, no entanto a sua utilização na construção tem apenas 700 anos. Inicialmente o vidro era utilizado como elemento decorativo, mas a evolução no processo de fabrico e tratamento do vidro trouxeram novas possibilidades e o vidro passou a ser utilizado também como elemento estrutural. Atualmente, a utilização do vidro como elemento estrutural assume as mais diversas funções nos edifícios, sendo exemplo disso a aplicação de vidro em fachadas, pavimentos, coberturas, escadas e barreiras de proteção.

A utilização do vidro como elemento estrutural em ambiente submerso é até hoje de reduzida aplicação, facto associado às propriedades mecânicas do vidro que limitam a sua utilização, nomeadamente a sua baixa resistência à tração. No entanto, a evolução nos processos de tratamento do vidro, e o surgimento de novos materiais poliméricos, utilizados como elemento de ligação entre painéis de vidro em soluções de vidro laminado, vieram alargar as possibilidades de utilização do vidro neste tipo de estruturas.

Com a adoção do sistema de vidro laminado a rotura frágil do vidro pode ser evitada. O desenvolvimento de vidro laminado com comportamento de rotura dúctil oferece potencialmente uma maior segurança às estruturas.

Desta forma, ao longo desta dissertação vai-se estudar a aplicação de vidro laminado em estruturas subaquáticas, tendo como objetivo estudar a possibilidade de utilizar soluções de vidro laminado em detrimento de soluções em acrílico, possibilitando uma redução nos custos e garantindo a função estrutural exigida neste tipo de estruturas.

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar a aplicação de vidro em estruturas submersas, nomeadamente o comportamento mecânico de óculos em aquários e piscinas

quando construídos recorrendo a elementos de vidro laminado. Adicionalmente, pretende-se otimizar as características dos painéis de vidro laminado, assim como dos elementos de ligação dos painéis de vidro à estrutura de suporte.

Numa primeira fase é necessário estudar os vários conceitos associados à tecnologia de produção do vidro, em particular quando este é utilizado com funções estruturais, de forma a criar a base de suporte de conceitos que permitirá posteriormente fazer uma análise criteriosa e fundamentada de todos os mecanismos estudados.

Ao longo desta dissertação tentou-se fazer uma abordagem geral do tema, abordando os conteúdos de forma concisa e tratando o tema de forma abrangente e relevante para futuros trabalhos em aspetos mais pormenorizados das estruturas em vidro submersas.

O estudo da utilização do vidro como elemento estrutural, e de forma mais concreta, em utilizações submersas, requer um estudo pormenorizado de aspetos que outros materiais e aplicações não exigem de forma tão peculiar, nomeadamente o estudo do sistema de ligação/apoio. Ao longo desta dissertação esta problemática foi abordada realizando o estudo do sistema de apoio e dos parâmetros que influenciam o comportamento do vidro laminado em termos de tensões e deformações, através da realização de modelos experimentais e de simulações numéricas.

Utilizaram-se ainda técnicas inovadoras de monitorização de deformações sem contacto, baseadas na utilização de fotografia digital. Estas técnicas, no contexto deste trabalho, revelaram-se especialmente úteis porque permitiram a monitorização de deformações com elevada precisão em regiões dos modelos experimentais de difícil acesso e de reduzida dimensão, mas com especial importância para o estudo a realizar.

Em jeito de conclusão, e de forma complementar ao estudo realizado para o sistema de apoio, com vista concretizar o estudo efetuado em aplicações concretas, procedeu-se à realização de modelos numéricos para casos específicos de soluções de vidro laminado submerso, no âmbito de 2 casos de estudo. Estes casos de estudo representam aplicações muito próximas da realidade, e resultam do interesse da indústria, e em particular da empresa que colaborou neste estudo, em desenvolver soluções estruturais otimizadas para aplicações concretas com as características estudadas.

1.3. Organização da dissertação

Além do presente capítulo, a presente dissertação é composta por mais seis capítulos, que estão organizados de acordo com a descrição subsequente.

No segundo capítulo é apresentado um estado da arte sobre o vidro, que se denominou por tecnologia do vidro por abordar os elementos que constituem as bases do vidro como material de utilização geral. Nesse capítulo é feita uma breve abordagem histórica à utilização do vidro, uma descrição das propriedades do vidro, o processo de fabrico do vidro utilizado atualmente sobretudo voltada para as suas implicações nas suas propriedades mecânicas, os tipos de vidro mais utilizados na construção e a mecânica da fratura. Este último tema é particularmente importante no estudo do comportamento mecânico do vidro, já que se trata de um material frágil.

No terceiro capítulo abordou-se o vidro como elemento estrutural. Deste modo, este capítulo reúne a informação relativa às aplicações de vidro laminado em ambiente submerso, que será objeto de estudo nesta dissertação. Numa primeira parte inclui-se uma pequena introdução ao tema do vidro estrutural, referindo-se os tipos de ligações do vidro, as normas de ensaio utilizadas e as normas de dimensionamento. Numa segunda parte aborda-se a temática das aplicações de vidro laminado em ambiente submerso, fazendo-se referência às soluções existentes em acrílico, às peculiaridades da interlayer, ao método simplificado de cálculo, aos tipos de carga, às condições de apoio e proposta para sistema de apoio, e ao dimensionamento através da pré-norma prEN 16612.

O quarto capítulo refere-se ao estudo experimental, englobando os dois tipos de ensaios realizados, nomeadamente o ensaio de flexão em quatro pontos e o ensaio em consola. O ensaio de flexão em quatro pontos teve como objetivo fazer uma caracterização dos parâmetros materiais do vidro, assim como, numa fase posterior, permitir fazer uma validação dos modelos numéricos realizados com o fim de simular o comportamento mecânico dos elementos de vidro. O ensaio em consola teve como objetivo estudar o comportamento mecânico e funcional do sistema de fixação do vidro. Deste modo realizou-se uma avaliação do comportamento geral do painel de vidro, do comprimento de entrega do vidro, do tipo de material utilizado para a transferência de esforços, da sua espessura e do nível de pré-compressão utilizada.

O quinto capítulo é referente à simulação numérica dos ensaios experimentais e surge na sequência do estudo experimental realizado, estando subdividido na modelação numérica do

ensaio de flexão e na modelação numérica do ensaio em consola. Ambos os estudos numéricos referentes aos modelos experimentais têm como finalidade o desenvolvimento das estratégias numéricas que permitem a correta simulação das estruturas e sistemas estudados.

No sexto capítulo, e tomando como referência o trabalho anteriormente desenvolvido, procedeu-se à modelação numérica de dois casos de estudo, que representam a utilização de um sistema de vidro laminado em ambiente submerso em aplicações realistas. No primeiro caso de estudo avaliou-se o comportamento do laminado quando sujeito a uma carga hidrostática constante e, fazendo uma variação dos parâmetros adotados para o apoio, otimizou-se a solução estrutural, para o caso específico de um painel de vidro apoiado em três bordos. No segundo caso de estudo adotou-se a solução ótima definida para o caso de estudo 1 e incluiu-se o apoio do quarto bordo, de forma a avaliar a influência no comportamento geral do laminado.

O sétimo e último capítulo é constituído por uma descrição sumária das principais conclusões retiradas ao longo de toda a dissertação. Aqui se incluem as principais metodologias adotadas no processo de dimensionamento, assim como as conclusões relativas ao estudo experimental realizado e ao estudo numérico dos casos de estudo. Por fim apresenta-se uma sugestão de melhoramentos e trabalhos futuros a realizar nesta área.

De forma a perceber a estrutura global da dissertação e a interligação entre os vários elementos que a constituem, elaborou-se um esquema que incluiu informação sobre os principais temas abordados e que é apresentado na figura 1.

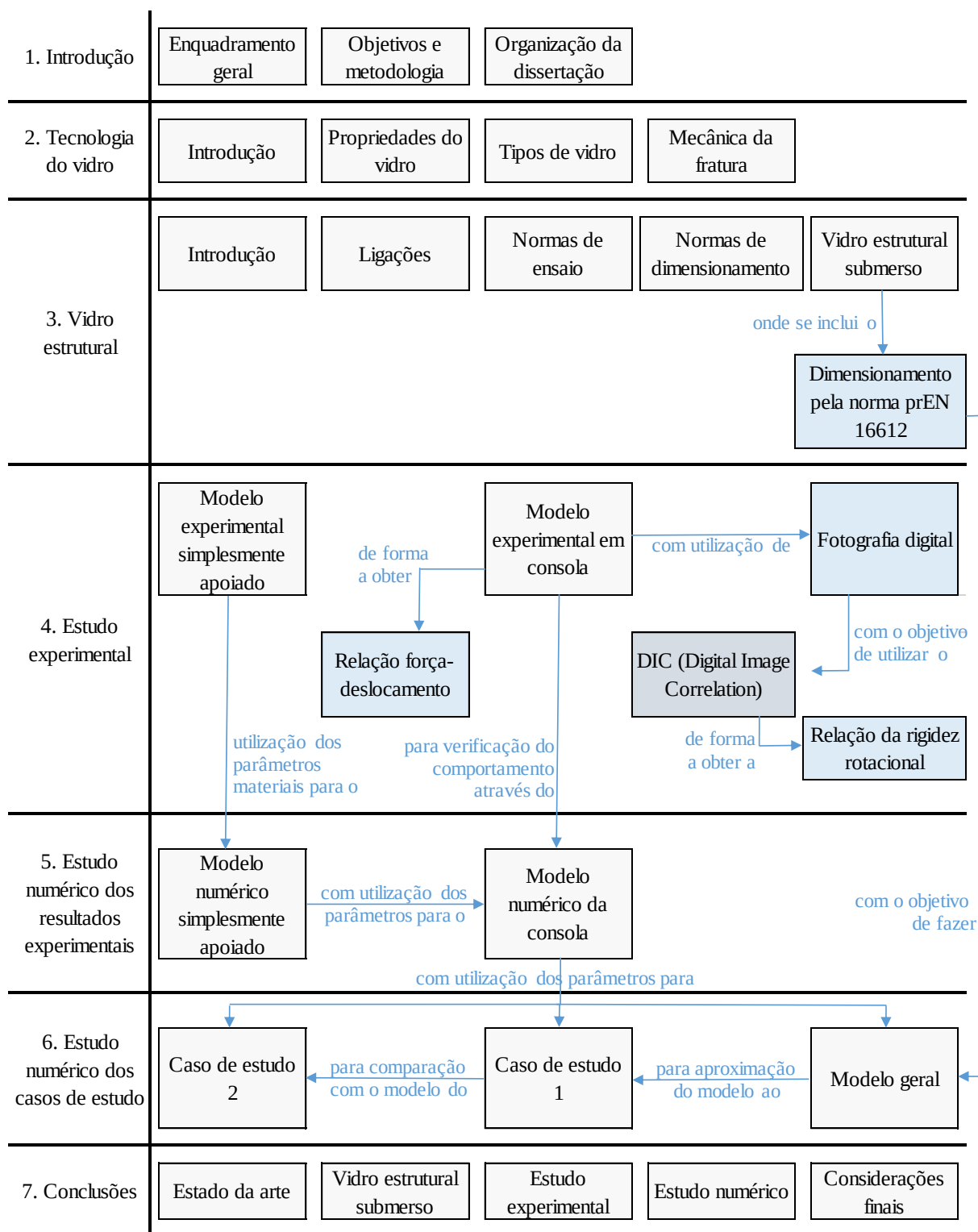


Figura 1 – Esquema com a estrutura global da dissertação.

2. TECNOLOGIA DO VIDRO

2.1. Introdução

O vidro é um material milenar e as suas origens datam o ano de 3500 a.C. em descobertas deste material utilizado em sepulturas. Como material de construção, o vidro surge no ano de 1300 d.C. através do processo de *Crown*, que permitiu a produção de vidro liso ainda que com dimensões reduzidas. Posteriormente, e com o desenvolvimento do método *cylinder blown sheets* foi possível o aumento do tamanho dos painéis de vidro, no entanto a verdadeira revolução na tecnologia do vidro surgiu no século 20, com a revolução industrial e a partir do qual a sua utilização foi largamente incrementada [1].

Atualmente, a produção de vidro liso tem por base o método *float*, desenvolvido por Pilkington em 1959, o maior produtor de vidro em Inglaterra. Este método tem sido melhorado ao longo dos anos, o que permitiu criar painéis de vidro com maiores dimensões e capazes de resistir a tensões mais elevadas [1].

Com os melhoramentos que foram feitos na tecnologia do vidro ao longo dos anos, as possibilidades de utilização do vidro na construção aumentaram. O vidro deixou de ser utilizado unicamente em janelas, para passar a ser utilizado também nos mais diversos elementos na construção. Estas novas possibilidades inspiraram arquitetos que viram no vidro a possibilidade de idealizar estruturas que antes não era possível concretizar. Desta forma, o vidro tornou-se um grande marco na história da arquitetura contemporânea, pois permitiu alterações significativas nos espaços interiores das habitações através da sua característica que mais o distingue, a transparência. Além da utilização do vidro como elemento decorativo, este é utilizado cada vez mais como elemento estrutural devido à evolução nos processos de fabrico e de tratamento do vidro [2].

2.2. Propriedades do vidro

2.2.1. Propriedades químicas

O vidro é um material sólido, homogêneo e inorgânico que resulta do arrefecimento rápido de uma massa em fusão que lhe confere um aspeto entre o totalmente amorfo e o cristalino.

De entre os vários tipos de vidro, os mais utilizados na construção são os vidros de silicatos (SLSG) e os vidros de boro silicatos (BSG), embora estes últimos sejam preteridos dado o seu custo elevado. Em particular, os vidros de BSG apresentam características especiais de resistência ao fogo e elevada resistência térmica, sendo por isso utilizados em situações que requerem este tipo de condições [2].

O principal vidro utilizado na construção é o vidro de silicatos (silico-soda-cálcico) e é neste tipo que se vai concentrar o estudo ao longo deste trabalho. Segundo a norma europeia EN 572-1, este tipo de vidro é constituído quimicamente pelos seguintes materiais e nas seguintes proporções, apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do vidro silico-soda-cálcico (SLSG) - (adaptado de [1]).

Elemento	Percentagem
Dióxido de silício (SiO_2)	69-74%
Óxido de cálcio (CaO)	5-14%
Óxido de sódio (Na_2O)	10-16%
Óxido de magnésio (MgO)	0-6%
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	0-3%
Outros	0-5%

2.2.2. Propriedades físicas

As principais propriedades físicas do vidro de silicatos são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas do vidro SL SG (adaptado de [2]).

Propriedades	SL SG
Densidade	2500 kg/m ³
Dureza Knoop	6 GPa
Módulo de Young	70 GPa
Coeficiente de Poisson	0.23
Coeficiente de expansão térmica	9.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Capacidade térmica	720 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Condutividade térmica	1 W m ⁻¹ K ⁻¹
Índice de refração média dentro do espectro visível	1.52
Emissividade (corrigida)	0.837

A propriedade física mais importante dos vidros de silicatos e boro silicatos é a sua elevada transparência, com um espectro visível para comprimentos de onda entre os 380 e 750 nm. No entanto, o espectro de radiação absorvida e transmitida varia muito do tipo de vidro, e ocorre geralmente para comprimentos de onda fora do espectro visível e perto do infravermelho ($\lambda > 5000$ nm). Isto constitui um problema devido ao chamado efeito de estufa, em que o vidro permite a passagem da luz visível, aquecendo o interior do edifício, e impede que a radiação infravermelha sob a forma de calor escape [2].

O vidro apresenta um comportamento elástico, isotrópico e uma rotura frágil semelhante ao betão. No entanto em estruturas realizadas em vidro não é possível efetuar redistribuição de esforços, como acontece com outros materiais como o aço ou o betão armado. A tensão de rotura teórica do vidro é elevada e pode atingir os 32 GPa, no entanto não é relevante para aplicação estrutural. A razão para tal é o facto de o vidro apresentar falhas microscópicas na superfície, que geralmente não são visíveis a olho nu, e que reduzem o valor da tensão de rotura para valores reais muito inferiores aos teóricos. Assim, a tensão de rotura do vidro não é constante e depende de muitos aspetos como a condição e tamanho da superfície do painel de vidro, intensidade e duração do carregamento, tensões residuais e condições ambientais [2].

Na figura 2 é apresentada uma comparação entre a resposta em termos de tensão-extensão em tração do aço e do vidro, evidenciando o comportamento de rotura frágil do vidro comparativamente ao comportamento de rotura dúctil do aço.

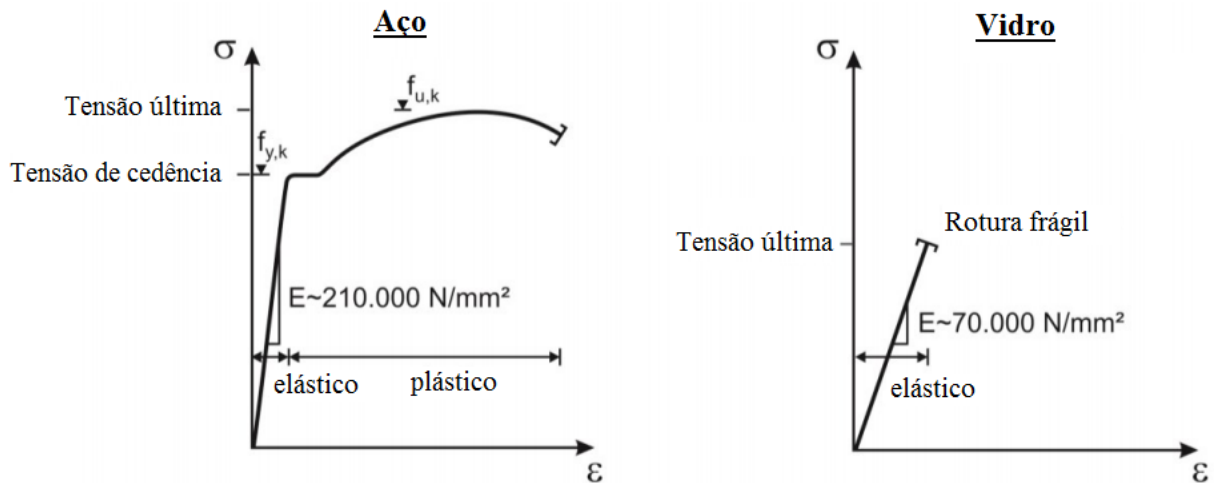


Figura 2 – Relação tensão-extensão para o aço e para o vidro (adaptada de [3]).

2.3. Processo de fabrico

O vidro é um material utilizado em diversas áreas, no entanto no sector da construção o tipo de vidro que é mais utilizado designa-se de vidro liso e o seu processo de fabrico baseia-se no processo de *float glass*¹, criado por Alastair Pilkington em 1959. Atualmente, a maioria das indústrias vidraceiras utilizam este processo por ter um baixo custo de produção, os painéis de vidro terem uma elevada qualidade ótica comparado com outros métodos e por ser possível a criação de painéis de grandes dimensões [2].

O processo consiste na mistura das matérias-primas e a sua introdução num forno no qual se dá a fusão dos materiais, a uma temperatura de cerca de 1550°C. A mistura obtida desta fusão é depositada de forma contínua num tanque que contém estanho fundido, material com uma densidade superior à da mistura, no qual se forma uma superfície contínua que flutua sobre o estanho. É nesta fase que o vidro ganha forma, na qual a mistura é arrefecida gradualmente a temperaturas entre os 1000°C e os 600°C, e durante a qual o vidro adquire uma espessura que pode variar entre 2 e 25 mm. A espessura é controlada através da velocidade de rolos mecânicos, que fazem variar o tempo de permanência do vidro no tanque. Seguidamente, o vidro é sujeito

¹ Processo de *float glass* é denominado como processo de flutuação.

ao processo de recozimento, o qual é arrefecido lentamente para evitar a criação de tensões residuais internas no vidro. Após o arrefecimento do vidro, procede-se a uma inspeção visual e ao corte do vidro nas medidas habituais. O vidro resultante do processo “float” é denominado de vidro recozido e consiste na base do processo de fabrico de outros tipos de vidro [2].

A figura 3 representa o processo de *float*, descrito anteriormente.

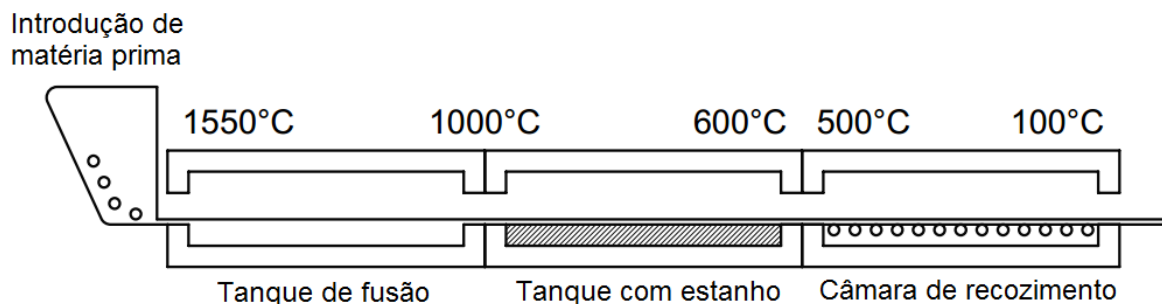


Figura 3 - Processo "float" (adaptada de [2]).

2.4. Tipos de vidro

2.4.1. Vidro temperado

O vidro temperado, tal como o nome sugere, é um vidro que é sujeito a um tratamento de têmpera por calor a partir do vidro recozido, de forma a aumentar a sua resistência mecânica e a alterar a sua fragmentação no momento da rotura. O tratamento térmico consiste em aquecer novamente o vidro a uma temperatura de 600 a 650°C e submete-lo a um arrefecimento rápido com recurso a jatos de ar, fazendo com que a superfície do vidro arrefeça mais rápido que o interior. Este arrefecimento brusco origina tensões de compressão na superfície do vidro de cerca de 90 MPa e tensões de tração na zona interior do vidro. As tensões de compressão na superfície do vidro são responsáveis por aumentar a resistência térmica e mecânica do vidro. Segundo a norma EN 12150, a tensão de rotura de tração característica para o vidro temperado é de 120 MPa, enquanto que para o vidro recozido a tensão de rotura característica é de 45 MPa. Devido a este incremento da resistência mecânica, o vidro temperado termicamente pode resistir até diferenças de temperatura da ordem dos 200°C, enquanto que para o vidro recozido a rotura pode ocorrer para diferenças de temperaturas de cerca de 30°C [4].

A resistência do vidro temperado é significativamente maior que a do vidro recozido, e esta característica faz dele uma boa solução para locais onde a ação de impacto no vidro tenha elevada probabilidade de ocorrência.

Na figura 4 é possível perceber o comportamento do vidro recozido e do vidro temperado quando sujeitos a esforços de flexão, sendo perceptível o efeito de contenção da propagação de micro-defeitos superficiais devido às tensões de compressão superficiais, que resultam num aumento de resistência no caso do vidro temperado.

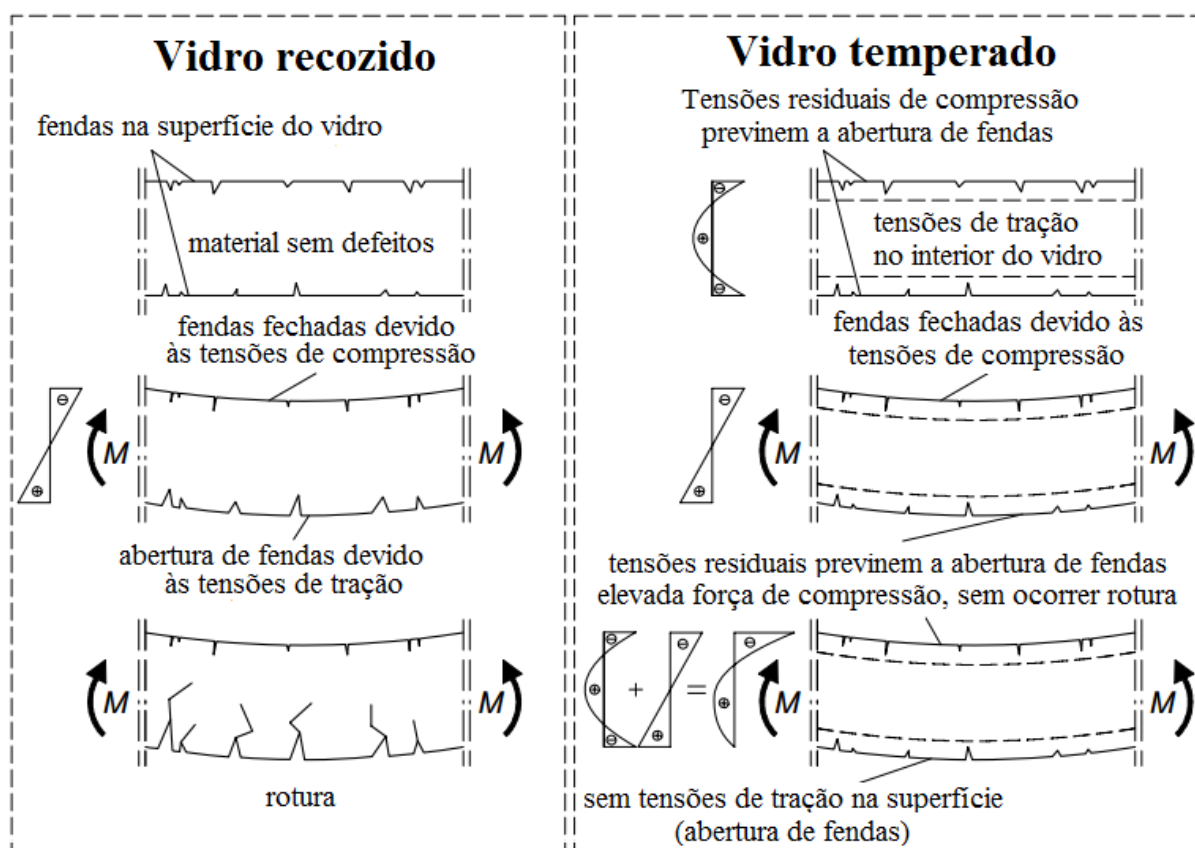


Figura 4 – Princípio do vidro temperado (adaptada de [5]).

Uma outra característica do vidro temperado, e que justifica a sua frequente designação como “vidro de segurança”, é o facto de que, quando ocorre a rotura, a fragmentação do vidro origina pedaços de reduzida dimensão e pouco afiados, o que minimiza os riscos de causar ferimentos em pessoas.

Por outro lado, o vidro temperado apresenta desvantagens relativamente ao vidro recozido, e uma dessas desvantagens é a fragmentação do vidro que origina fragmentos de reduzida dimensão, o que reduz a sua estabilidade podendo mais facilmente cair da sua posição correta. Uma outra desvantagem do vidro temperado é a impossibilidade de se efetuar cortes ou

perfurações depois de fabricado, sendo necessário efetuar esses processos sempre antes da têmpera. O vidro temperado apresenta ainda a desvantagem de sofrer, durante o processo da têmpera, alterações na sua geometria, resultando num vidro menos liso que o vidro recozido, podendo ainda sofrer alterações na sua transparência e alterações de cor [2].

Um outro problema associado à utilização do vidro temperado consiste no risco de ocorrer rotura espontânea, associada ao facto de a mistura de vidro conter impurezas, nomeadamente sulfuretos de níquel (NiS). Devido à presença de NiS na massa de vidro e ao arrefecimento brusco do vidro durante a fase de têmpera, os cristais de NiS podem não ter tempo de fazer a transição entre fases resultando em expansões dos cristais de NiS, provocando a rotura espontânea do vidro [4].

Uma alternativa ao tratamento térmico do vidro temperado é o tratamento químico, no qual se procede à substituição dos iões de sódio à superfície por iões de potássio. Este processo apresenta a vantagem de, após o seu fabrico, ser possível o corte ou perfuração do vidro, mas em contra partida apresenta a desvantagem de o tratamento afetar apenas uma espessura do vidro muito reduzida junto à superfície. Este processo tem custos mais elevados que a têmpera por calor, sendo utilizado apenas quando a têmpera por calor não é possível, e por esse motivo tem uma aplicação reduzida na construção.

2.4.2. Vidro termo-endurecido

O vidro termo-endurecido é obtido por um processo semelhante ao do vidro temperado, mas com um arrefecimento mais lento, sendo que as tensões de compressão instaladas na superfície do vidro são da ordem dos 30 a 60 MPa. Em comparação com o vidro temperado e com o vidro recozido, pode-se dizer que o vidro termo-endurecido é um tipo de vidro intermédio entre os dois, e que por isso apresenta resistência mecânica superior à do vidro recozido e inferior à do vidro temperado.

Na figura 5 é possível perceber a influência dos diferentes tipos de tratamento ao nível dos diagramas de tensões normais finais na secção transversal dos elementos de vidro.

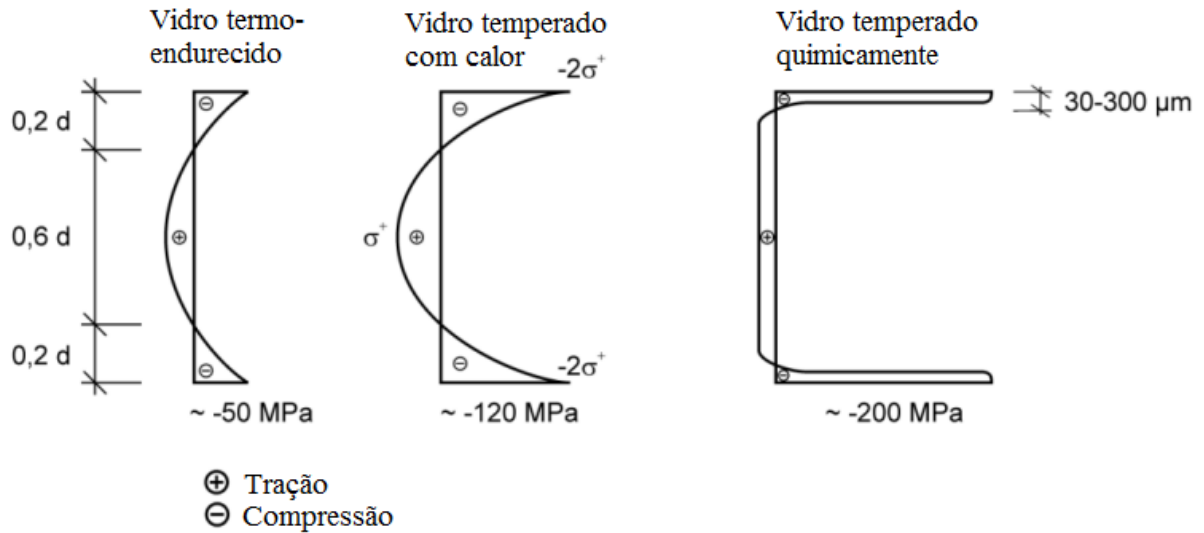


Figura 5 - Diagramas de tensões normais para a secção transversal de diferentes tipos de vidro (adaptada de [3]).

A resistência a diferenças de temperaturas é de cerca de 100°C. A fragmentação do vidro termo-endurecido também ocorre durante a rotura, de modo intermédio entre os dois vidros referidos anteriormente, originando pedaços de dimensões intermédias [4].

Na figura 6 apresenta-se o padrão de rotura para os vários tipos de vidro, sendo perceptível a diferença no tamanho e geometria do padrão de fendilhação nos diferentes tipos de vidro.

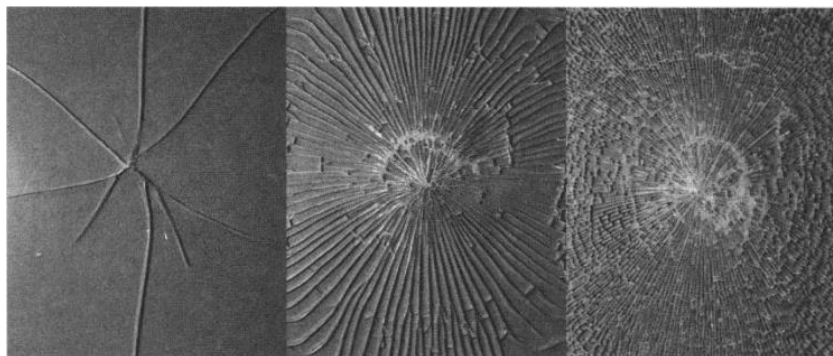


Figura 6 - Padrão de rotura do vidro recozido, vidro termo-endurecido e vidro temperado (adaptada de [2]).

Uma vantagem em relação ao vidro temperado é devido ao processo de arrefecimento mais lento do vidro termo-endurecido, o efeito expansivo de inclusões de NiS é minimizado, o que diminui a hipótese de ocorrer rotura espontânea do vidro.

Tal como o vidro temperado, este tipo de vidro também não pode ser cortado ou perfurado após o seu fabrico, sendo que a geometria final do vidro deve ser realizada antes do tratamento de termo-endurecimento. A transparência do vidro, à semelhança do que ocorre com o vidro

temperado, também é afetada durante o processo de termo-endurecimento devido às tensões de compressão que se instalam na superfície do vidro.

2.4.3. Vidro laminado

Uma outra solução, e na qual se vai focar ao longo deste trabalho, é o vidro laminado. Este tipo de vidro foi inventado em 1909 sob o nome de triplex por um químico francês chamado Edouard Benedictus [6]. Inicialmente este tipo de vidro foi desenvolvido para a indústria automóvel, de forma a evitar ferimentos em caso de acidente. O vidro laminado é composto por duas ou mais folhas de vidro que podem ser do mesmo tipo ou de tipos diferentes, coladas entre si, através de uma película de um material sintético transparente.

O material mais utilizado como película para colagem das folhas de vidro é o PVB (polivinil butiral). A película, além de elemento ligante, garante uma maior segurança à estrutura, pelo facto de que quando ocorre a rotura de uma das folhas de vidro, esta pode não afetar as outras folhas, garantindo assim a estabilidade e funcionamento do vidro. Em caso de rotura, a película permite também que os estilhaços das folhas afetadas se mantenham no sítio, evitando a sua queda e possíveis ferimentos em pessoas. Por esta razão, este vidro é considerado um vidro de segurança.

Comparativamente com outros tipos de vidro, o vidro laminado composto por painéis de vidro temperado garante uma elevada resistência mecânica e segurança que um vidro simples não garante. A utilização de diferentes folhas de vidro, assim como da película, possibilita um enorme leque de utilizações. Dependendo da resistência estrutural e do comportamento pós rotura requeridos, é possível conceber um painel de vidro com características específicas. A figura 7 relaciona a resistência estrutural com o comportamento pós rotura para os diferentes tipos de vidro.

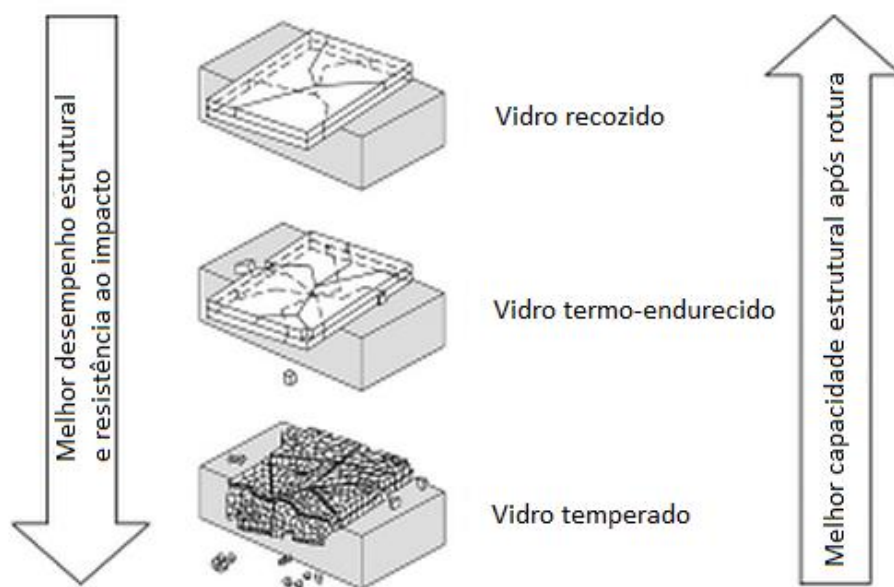


Figura 7 - Comportamento pós-rotura do vidro laminado constituído por diferentes tipos de vidro (adaptada de [2]).

O processo de fabrico do vidro laminado com PVB, demonstrado na figura 8, compreende, numa primeira fase, a lavagem e secagem rápida das folhas de vidro individuais para evitar qualquer impureza. Sobre a face do vidro é colocada a película de PVB, sendo posteriormente colocada sobre esta outra folha de vidro. Esta “sanduiche” de vidro passa seguidamente numa calandra, a temperaturas por volta dos 100°C, onde se funde a película de PVB e se elimina o ar existente entre o PVB e os dois vidros. Após este processo, e de forma a obter uma aderência total entre as diferentes chapas de vidro, o vidro laminado passa por uma autoclave² onde permanece durante 2 a 3 horas a uma temperatura por volta dos 100°C. Numa última fase é feita a limpeza do vidro e uma inspeção visual de forma a verificar a não existência de defeitos [7].

Os painéis de vidro laminado são normalmente fabricados até uma dimensão máxima de 6 x 3,21 metros, no entanto é possível encontrar, em situações especiais, fabricantes que produzem vidro laminado até um comprimento de 12 metros [7].

² Câmara pressurizada formada por um cilindro metálico resistente, vertical ou horizontal e com uma tampa que permite fechar hermeticamente o autoclave.

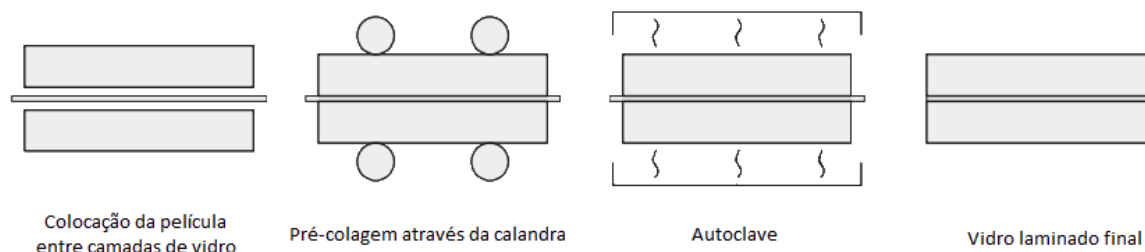


Figura 8 - Processo de fabrico do vidro laminado (adaptada de [7]).

Alternativamente à película em PVB, surgiram nos últimos anos outros materiais poliméricos como resinas (CIP), lâminas de etil, vinil e acetato (EVA) e SentryGlas Plus (SGP), que além de serem materiais inovadores começam a ser utilizados nos mais diversos sistemas de vidro estrutural. Estes novos materiais vieram quebrar as limitações do PVB, melhorando o comportamento mecânico dos painéis de vidro, permitindo a exposição a maiores variações térmicas e maior tempo de carregamento. Uma das maiores restrições ao uso de PVB resultava de situações em que os painéis estavam apoiados em menos de quatro lados, e que apresentavam grande deflexão, o que constituía um problema em estruturas mais exigentes [8].

As novas películas, como o SentryGlas Plus (Ionoplast) da DuPont são caracterizadas por terem um módulo de elasticidade maior que 100 MPa para temperaturas acima dos 50°C. Comparando este novo material com Butacite (PVB), material do mesmo fabricante, verifica-se um aumento considerável no módulo de elasticidade e melhoria do comportamento visco-elástico [8].

Na figura 9 é apresentada uma comparação entre estes dois materiais, que relaciona a temperatura ambiente com o módulo de elasticidade, medido através de uma análise dinâmico-mecânica. Pela análise do gráfico, pode-se constatar que, para temperaturas entre os 0°C e 80°C, o SGP tem uma vantagem considerável sobre o PVB, o que o torna num material mais permissivo a deformações, tornando-se numa melhor solução para estruturas exigentes.

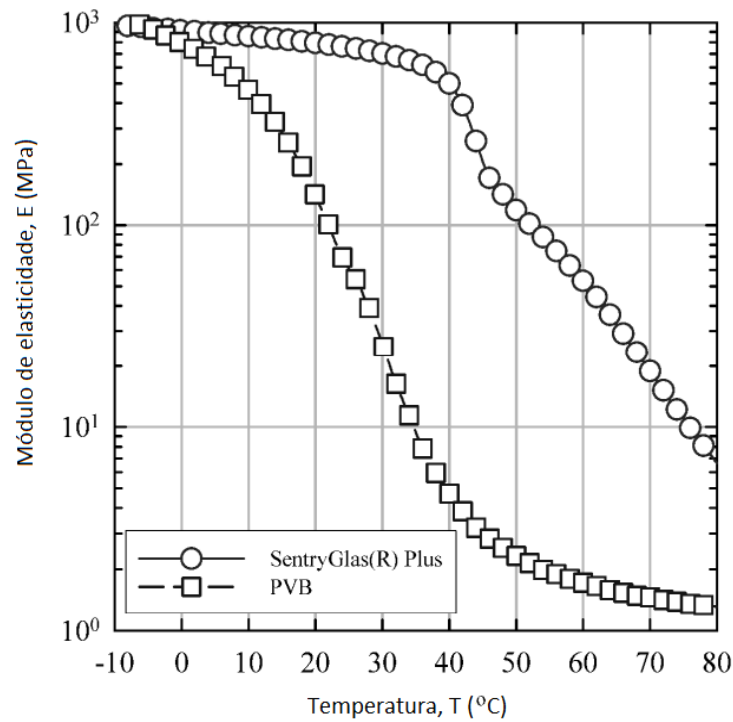


Figura 9 - Comparação do módulo de elasticidade da película em PVB e em Ionoplast (adaptada de [2]).

2.4.4. Vidro com revestimento superficial

Os vidros com revestimento superficial têm como objetivo alterar as propriedades base do vidro no que concerne ao fator solar, transmissão da luz, cor e emitância, e estão normalmente associados a sistemas de vidro duplo, que permitem obter ganhos energéticos nos edifícios.

Estes revestimentos podem ser aplicados durante o processo de fabrico do vidro ou posteriormente, não afetando as propriedades mecânicas do vidro [7].

Segundo [7], existem dois tipos de revestimentos, os *hard coatings* e os *soft coatings*, dependendo da resistência mecânica, térmica e química.

Os *hard coatings* são revestimentos aplicados durante o processo de fabrico do vidro por ser um processo que exige elevadas temperaturas. O revestimento é aplicado por um processo conhecido por pirólise e permite obter uma superfície bastante durável. Não exige cuidados especiais no manuseamento, permitindo que posteriormente possam ser aplicados processos de endurecimento do vidro e possam ser usados em sistemas de vidro simples [9].

Os *soft coatings* consistem na pulverização de metais sobre a superfícies do vidro e por isso são aplicados posteriormente ao processo de fabrico do vidro. Estes revestimentos permitem obter uma elevada transmissão da luz, no entanto requerem alguns cuidados especiais no seu manuseamento durante a sua aplicação, além de que a sua superfície deve ser protegida pois apresenta menor durabilidade que os *hard coatings*. Deste modo, os vidros com *soft coatings* estão normalmente inseridos em sistemas de vidro duplo [9].

2.4.5. Unidades de isolamento – vidro duplo/triplo

O sistema de vidro duplo é constituído por dois ou mais painéis de vidro, em que entre eles se encontra um espaço hermeticamente fechado constituído por ar ou gás. A grande vantagem deste sistema é a função de reduzir as perdas térmicas, que ocorrem entre o meio interior e exterior. Além da vantagem de reduzir as perdas térmicas, este sistema pode também melhorar a transparência pela redução da condensação no lado quente do vidro. Os painéis são espaçados através de espaçadores, que contém um vedante que reduz a infiltração de vapor de água.

Em conjunto com os vidros revestidos, é possível obter coeficientes de transferência de calor de $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ para sistemas de vidro duplo e de $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ para sistemas de vidro triplo, tornando-se num sistema com elevado desempenho em termos energéticos [2].

2.5. Mecanismo de rotura e fratura

Ao contrário do que acontece com outros materiais, o vidro não consiste numa rede geométrica regular de cristais, mas sim numa rede irregular de átomos de silício e oxigénio com partes alcalinas. A estrutura molecular não tem planos de deslizamento ou deslocamento para permitir a plastificação antes da rotura, com a consequência do vidro ser perfeitamente elástico a temperaturas normais e apresentar rotura frágil, ou fratura. Esta impossibilidade do vidro plastificar antes da fratura significa que a força de rotura do vidro é muito sensível à concentração de tensões. Desta forma, para se fazer uma caracterização correta da força de rotura é necessário ter em conta a natureza e comportamento das fendas [2].

3. VIDRO ESTRUTURAL

3.1. Introdução

Em termos estruturais, o vidro tem uma elevada resistência à compressão mas apresenta uma rotura frágil, comportamento em parte semelhante ao betão. No entanto, dado que não existe armadura nem a possibilidade de ocorrência de plastificação, o vidro não possibilita a redistribuição de esforços. Concomitantemente, a sua resistência à tração é muito variável e dependente de vários fatores, tais como as dimensões do painel e o tempo de solicitação. Estas características fazem do vidro um material estrutural de difícil estudo, e a sua utilização deve ser cuidadosamente analisada atendendo aos problemas e aos fatores que resultam numa considerável variabilidade do valor da tensão de rotura e as suas consequências no dimensionamento estrutural.

Como material estrutural, o vidro é utilizado nos mais diversos elementos que constituem os edifícios, nomeadamente fachadas, coberturas, pavimentos, vigas, colunas, barreiras de proteção e escadas [10].

Nesta dissertação pretende-se estudar a aplicação particular do vidro como elemento estrutural em ambientes submersos, nomeadamente a possibilidade de utilização de vidro em piscinas e aquários, onde é sujeito a carregamentos de longo prazo e onde existem particulares preocupações com a estanquicidade da estrutura.

3.2. Ligações

As ligações assumem uma função muito importante nas estruturas em vidro. A dureza dos materiais que suportam os painéis de vidro impede o seu contacto direto com o vidro, dado que as ligações são o elemento de transição entre estes. Nos últimos anos tem-se verificado um aumento na tendência arquitetónica para maximizar a transparência dos painéis de vidro [2]. Esta mudança está associada ao desenvolvimento das ligações que deixaram de ser feitas por suportes lineares, e passaram a ser realizadas por fixações pontuais ou por colagem. Isto

permitiu que a área de suporte fosse substancialmente reduzida e aumentada a transparência dos painéis, assim como do meio de transmissão das cargas do vidro para a estrutura portante. No entanto, estas novas ligações trouxeram problemas de durabilidade e adesão que devem ser consideradas na ligação entre painéis de vidro e ligação destes a outros materiais [2].

É importante referir que existem dois principais tipos de ligações, as ligações mecânicas e as ligações por colagem.

3.2.1. Ligações mecânicas

As ligações mecânicas são as fixações mais utilizadas para fixação de elementos de vidro e dividem-se em três tipos: ligações com suporte linear, suporte pontual por aperto e suporte pontual aparafusado.

Suporte linear

O suporte linear de painéis de vidro é a forma mais antiga e vulgar de fixação, consiste em apoiar em caixilhos os painéis de vidro retangulares ao longo de duas ou quatro arestas. O peso próprio do vidro é transmitido ao caixilho através de apoios em plástico ou neoprene colocados na face inferior do caixilho e a transferência de cargas através de juntas de silicone, EPDM ou neoprene de 6 a 15 mm [2].

Na figura 10 apresenta-se um exemplo de um suporte linear com junta em EPDM e batente.

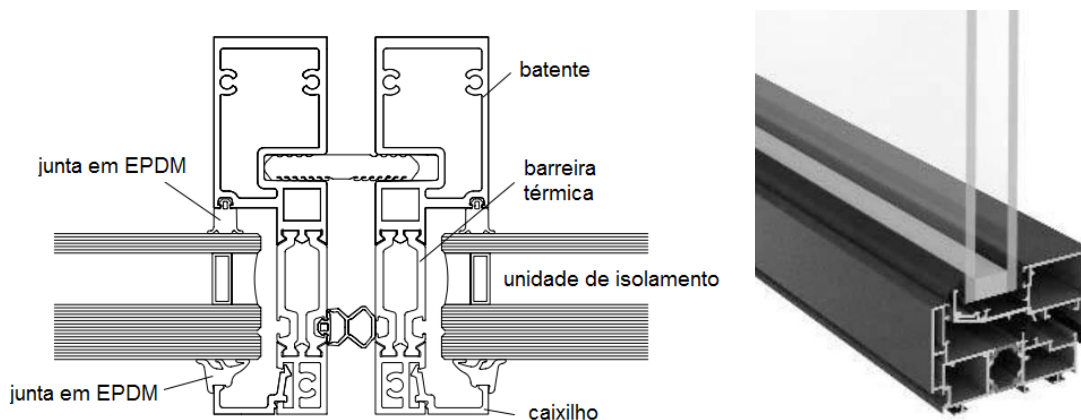


Figura 10 – Suporte linear com junta em EPDM e batente (adaptada de [2], [10]).

Suporte pontual por aperto

As ligações pontuais por aperto foram desenvolvidas com o objetivo de minimizar o impacto visual dos suportes lineares. Os painéis de vidro são fixados à estrutura portante através de fixações pontuais das arestas do vidro. Outra característica deste tipo de ligações é facilitar a drenagem de água na superfície exterior do vidro, devido à redução dos elementos de fixação [2]. Existem dois tipos de fixações pontuais por aperto, as fixações por grampos e as fixações aparafusadas. As fixações por grampos são utilizadas para transferir cargas que atuam perpendicularmente ao plano do vidro, enquanto que as fixações aparafusadas são utilizadas para transferir cargas que atuam no plano do vidro. A transferência de cargas das fixações por aperto são feitas com recurso ao atrito na zona de aperto, dissipando as cargas pela área do vidro e evitando a concentração de tensões que ocorre quando se utiliza ligações totalmente aparafusadas [10].

As fixações por grampos são constituídas pela estrutura de aperto, calços de apoio e neoprene ou EPDM para evitar o contacto do vidro com o metal, como exemplificado na figura 11.

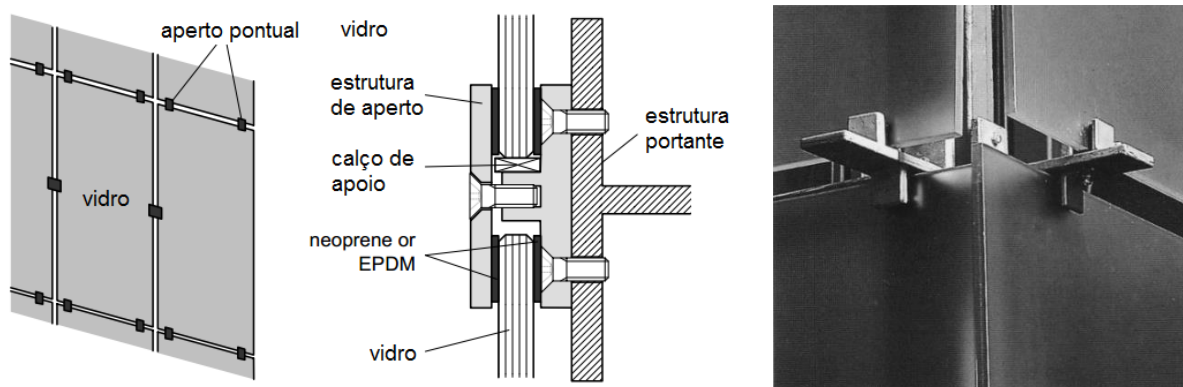


Figura 11 – Estrutura fixada através de fixações por aperto (adaptada de [2], [10]).

Suporte pontual aparafusado

As ligações pontuais aparafusadas são um tipo de fixação que é largamente utilizado em fachadas de edifícios através do sistema de vidro exterior agrafado. Este tipo de ligação requer que o vidro seja furado e o elemento de fixação atravessa o vidro totalmente, podendo deixar ou não relevo na face exterior. As fixações que deixam relevo na parte exterior do vidro são mais adequadas para transferir cargas no plano do vidro, pelo que são utilizadas para dar continuidade a elementos de vidro que estão limitados pela sua dimensão. As fixações que não

deixam relevo não são adequadas para transferir cargas no plano do elemento, pelo que são utilizadas como pontos de suporte [10].

As ligações aparafusadas podem ainda ser do tipo rígidas ou articuladas e devem ser constituídas por elementos intermédios (nylon, poliacetal ou alumínio) na zona do furo, de forma a distribuir as tensões que podem surgir na zona do furo. Estes materiais devem ser suficientemente rígidos para não deslizarem do furo e flexíveis de forma a permitirem uma adequada distribuição de tensões. Outro requisito destes materiais é não apresentarem fluência para evitar a diminuição da tensão de aperto do parafuso [10].

Na figura 12 apresenta-se um exemplo de uma estrutura fixada através de parafusos.

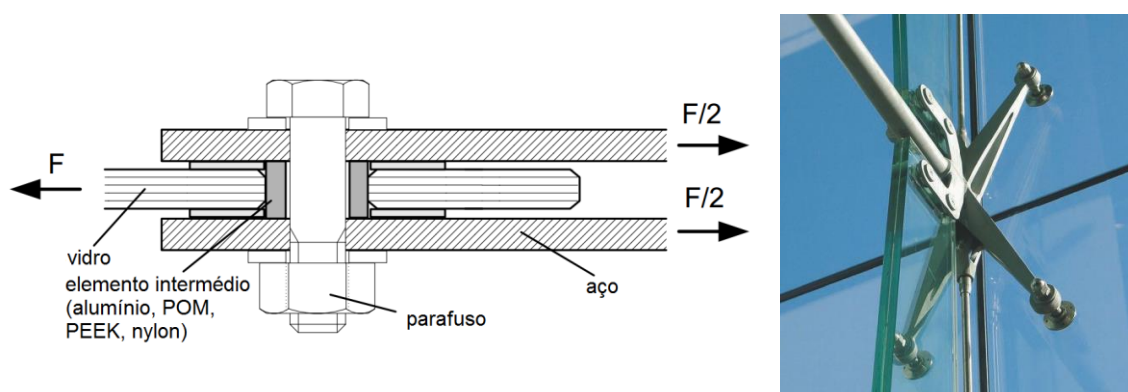


Figura 12 – Estrutura fixada através de parafusos (adaptada de [2], [7]).

3.2.2. Ligações por colagem

As ligações por colagem são o tipo de fixação em que a ligação estrutural entre o vidro e a estrutura de suporte é efetuada através de adesivos ou silicones estruturais que garantem adesão entre os materiais [10].

O vidro exterior colado é uma das aplicações deste tipo de ligações nas fachadas dos edifícios, e que possibilitam a construção de grandes panos envidraçados sem recorrer a armações ou fixações mecânicas. Como exemplo deste tipo de estrutura apresenta-se a figura 13. Uma das principais vantagens das ligações coladas em relação às fixações pontuais aparafusadas é a sua capacidade de transmitir tensões de forma uniforme, evitando pontos de tensão elevada no vidro [10].



Figura 13 – Projeto de estrutura em vidro recorrendo a ligações por colagem na Universidade de Estugarda, Alemanha [10].

Com recurso a silicones estruturais

As juntas de silicone estrutural eram originalmente utilizadas em sistemas de vidro exterior agrafado. Contudo, atualmente é utilizado quando se pretende obter uma ligação flexível e transparente entre o vidro e o alumínio, entre o vidro e o aço inoxidável e entre o vidro e o vidro [10].

Existem dois tipos de silicones estruturais, de apenas um ou de dois componentes. Os silicones de um componente caracterizam-se por a cura se iniciar imediatamente após o contacto com o ar e a sua humidade, podendo desenvolver-se durante três semanas, enquanto que nos silicones de dois componentes a cura começa logo após a mistura dos componentes, demorando no máximo três dias [10].

Outra característica que distingue os dois tipos de silicone é a geometria da junta, que no caso dos silicones de um componente a espessura deve ser superior a 6 mm e a largura inferior a 20 mm, enquanto que para os silicones de dois componentes a espessura deve ser superior a 6 mm e a largura inferior a 50 mm [10].

Com recurso a adesivos estruturais

As ligações coladas que utilizam adesivos de elevada resistência e rigidez distinguem-se por possibilitarem a criação de juntas com menor comprimento e menor espessura,

comparativamente com as ligações coladas com recurso à utilização de silicones estruturais. Embora apresentem uma geometria mais reduzida, os adesivos estruturais mais utilizados, que podem ser do tipo epóxicos ou acrílicos, apresentam em geral maior resistência e maior rigidez [10]. Estes dois tipos de adesivos distinguem-se principalmente por apresentarem juntas com espessuras diferentes. No caso dos adesivos de epóxicos formam-se juntas com espessuras superiores a 5 mm e que são recomendadas quando se utiliza vidro com tratamento por têmpera. No caso dos adesivos acrílicos formam-se juntas com espessuras inferiores a 1 mm. Os adesivos epóxicos apresentam uma temperatura de transição vítrea superior à dos adesivos acrílicos, e por isso tornam-se mais adequados a situações que requerem um bom comportamento a temperaturas elevadas [10].

3.3. Normas de ensaio

As normas de ensaio têm como finalidade a descrição dos procedimentos normalizados para a caracterização do comportamento mecânico do vidro e a sua resistência contra ações como o fogo, disparos de bala, vandalismo e explosões. Na presente dissertação vai-se dar destaque à norma europeia EN 1288, que determina a resistência à flexão incluindo o efeito das condições de ligação nos bordos de painéis de vidro planos. Esta norma divide-se em 5 partes, composta por 4 tipos de ensaio. Na presente dissertação incluiu-se a realização de um ensaio experimental com a finalidade de caracterizar mecanicamente o vidro, pelo que se procedeu à escolha do ensaio descrito na parte 3. Este ensaio é referente a um ensaio de flexão em 4 pontos e foi escolhido por ser um ensaio de mais fácil execução no laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da Universidade do Minho (LEST). Com este ensaio é possível caracterizar o vidro relativamente ao módulo de elasticidade e à tensão máxima na superfície do vidro no momento da rotura, incluindo tensões máximas nas arestas e avaliação de possíveis defeitos existentes nas arestas, que reduzem a resistência global do painel de vidro.

3.4. Normas de dimensionamento

Tal como outros materiais estruturais, o vidro também deve seguir um processo iterativo de desenho, constituído por uma série de etapas baseadas em regras de dimensionamento que garantam que a estrutura é capaz de cumprir adequadamente os estados limite últimos e de utilização.

Contrariamente ao que acontece com outros materiais, como o betão armado, não existe ainda para o vidro um eurocódigo com diretrizes que definam como se deve proceder para dimensionamento de estruturas recorrendo a este material, nem existe entre a comunidade científica consenso em torno das normas ou recomendações existentes de dimensionamento. No entanto, vários artigos de opinião e guias de aplicação têm sido publicados de forma a colmatar a falta de critérios de dimensionamento.

Os métodos de dimensionamento em vidro atualmente existentes não cobrem todos os tipos de configurações, cargas, condições de apoio e estado da superfície. A maior parte destas normas estão limitadas a elementos em vidro de forma retangular apoiados lateralmente de forma continua e sujeitos a cargas uniformemente distribuídas para fora do plano do vidro.

3.4.1. Regras práticas com base na experiência

Estas regras consistem em ferramentas muito úteis para o engenheiro estrutural, pois permite uma verificação rápida do cálculo estrutural. No entanto a sua utilização deve servir apenas para a obtenção de uma estimativa. Estas ferramentas podem servir de base para o projeto detalhado das estruturas mas nunca deverão substituir o projeto detalhado. Contudo são uma boa ajuda para assegurar que a seleção dos materiais, as quantidades e por consequência os custos, não divergem significativamente dos requisitos finais [2].

3.4.2. Verificação das tensões admissíveis

Este tipo de verificação baseado nas tensões admissíveis raramente consta das normas de dimensionamento de edifícios, por se provar que o comportamento dos materiais se afasta do obtido por este tipo de métodos simplicistas. No entanto continua a ser largamente utilizado no dimensionamento de estruturas em vidro [2]. A verificação rege-se pela seguinte expressão:

$$\sigma_E \leq \sigma_{adm} \quad (3.1)$$

Em que,

σ_E é a tensão máxima aplicada, calculada com base no valor característico da ação para o cenário mais desfavorável;

σ_{adm} é a tensão máxima admissível, correspondente ao valor da tensão de rotura obtida experimentalmente e dividida por um fator global de segurança, que tem em conta todas as incertezas e variáveis associadas às ações, resistência e modelação.

Esta expressão não contempla fatores como o tamanho dos elementos, as condições ambientais e a duração do carregamento. Estes valores estão implícitos no valor global da tensão admissível, a qual é definida de acordo com as diferentes normas de diferentes países e que se aplicam a casos específicos [2].

3.4.3. Normas de dimensionamento europeias e americanas

As regras descritas no subcapítulo anterior referiam algumas verificações iniciais a ter em conta quando se procede ao estudo para o desenvolvimento de soluções estruturais, no entanto todo o processo de dimensionamento deve ser regido por processos detalhados de dimensionamento. Pela pesquisa realizada foi possível verificar que não existe nenhuma norma portuguesa nem nenhum guia de apoio ao dimensionamento de estruturas em vidro, no entanto, a nível mundial existem algumas normas que abrangem algumas condições de dimensionamento. No contexto europeu, e segundo [2] e [3], existem algumas normas de dimensionamento, entre as quais a norma alemã DIN 18008, a norma austríaca Ö B 3716, a norma italiana CNR-DT 210, a norma holandesa NEN 2608, a norma belga NBN S23-002 e as pré-normas europeias prEN 13474 e prEN 16612. Dentro das normas apresentadas, a norma mais relevante, e à qual vamos dar destaque, é a pré-norma prEN 16612 que tem o título “*Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing*”. Esta norma é de 2013 e veio substituir a pré-norma prEN 13474 com o título “*Glass in building - Design of glass panes*”. A pré-norma prEN 13474 foi, durante vários anos, a norma de referência e era baseada no método de dimensionamento de DELR, primeiro método de dimensionamento de vidro europeu. A pré-norma prEN 13474, apesar de fornecer importantes métodos de dimensionamento e abranger um conjunto de situações, foi alvo de críticas por parte da comunidade científica, pelo que tem estado sucessivamente em estado de revisão [2].

A pré-norma prEN 16612 por ser a mais recente norma europeia e por ser baseada na anterior norma de referência, foi a norma escolhida como referência nesta dissertação. No subcapítulo 3.5.7 foi feito um estudo minimalista da norma tendo como referência um caso de estudo, em que os resultados serão comparados posteriormente com os resultados obtidos no estudo numérico.

De forma a colmatar a ausência de uma norma global para utilização a nível europeu, está em fase de desenvolvimento um eurocódigo de dimensionamento de estruturas em vidro por parte do comité europeu CEN/TC 250, e que atualmente é possível consultar o guia de suporte ao seu desenvolvimento, o qual foi utilizado como uma referência nesta dissertação.

Considerando normas norte-americanas, destaca-se a norma canadiana CAN/CGSB 12.20 com o título “*Structural Design of Glass for Buildings*” e a norma nacional americana ASTM E1300 com o título “*Standard of Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*”.

3.5. Vidro estrutural submerso

Na maioria das estruturas submersas, mais concretamente nas estruturas em estudo nesta dissertação, incluindo piscinas e aquários de grandes dimensões, a maioria das soluções existentes atualmente passam pela utilização de vidro de grandes espessuras, que acarretam elevados custos e um difícil processo de fabrico. Estes tipos de estrutura em vidro são mais exigentes relativamente aos critérios de dimensionamento, sendo necessário garantir estanquicidade do sistema e havendo uma considerável exigência relativamente à limitação das deformações admissíveis, o que obriga a redobrados cuidados no projeto da solução estrutural.

Na presente dissertação pretende-se estudar a aplicação do vidro com fins estruturais em superfícies envidraçadas submersas. Numa primeira análise a tipologia a adotar deverá ser a do vidro laminado, visto que esta tipologia permite a integração de várias camadas de vidro interpostas por camadas poliméricas. Deste modo os elementos de vidro podem atingir espessuras consideráveis e a rotura frágil pode ser evitada. Esta solução permite customizar a solução dos elementos de vidro tendo em conta as especificidades da aplicação a que se destina.

3.5.1. Soluções existentes (acrílico vs. vidro)

Quando se pretende adotar superfícies que beneficiem de transparência, a opção recai inevitavelmente para soluções em acrílico, visto que não apresenta os problemas associados ao modo de rotura frágil que são característicos do vidro. No entanto também já existem algumas aplicações de vidro neste tipo de estruturas, embora ainda de forma muito limitada e por vezes com problemas estruturais e funcionais.

O vidro foi o primeiro material a ser usado neste tipo de aplicações e durante um longo período de tempo, no entanto os sucessivos avanços na tecnologia do acrílico tornaram-no num material mais versátil e atualmente é o material mais utilizado neste tipo de estruturas. O acrílico permite a criação de grandes painéis, com diferentes formas, e permite a junção entre placas de acrílico através de adesivos estruturais. Por outro lado, para pequenas instalações, o vidro torna-se numa opção preferida devido ao menor custo em relação ao acrílico [11].

Em termos mecânicos, o acrílico tem um módulo de elasticidade de cerca de 3,3 GPa [12], valor muito inferior ao vidro que tem um módulo de elasticidade de cerca de 70 GPa. Além disto, o módulo de elasticidade do acrílico depende da temperatura, assim como da duração do carregamento, pelo que quando se procede ao seu dimensionamento deve-se considerar todos estes diferentes cenários. Com o aumento da temperatura e o aumento do tempo de carregamento, o módulo de elasticidade do acrílico baixa substancialmente. Como se pode comprovar pela análise da figura 14, com o aumento da temperatura a resistência à tração é menor, assim como para um aumento do tempo de carregamento.

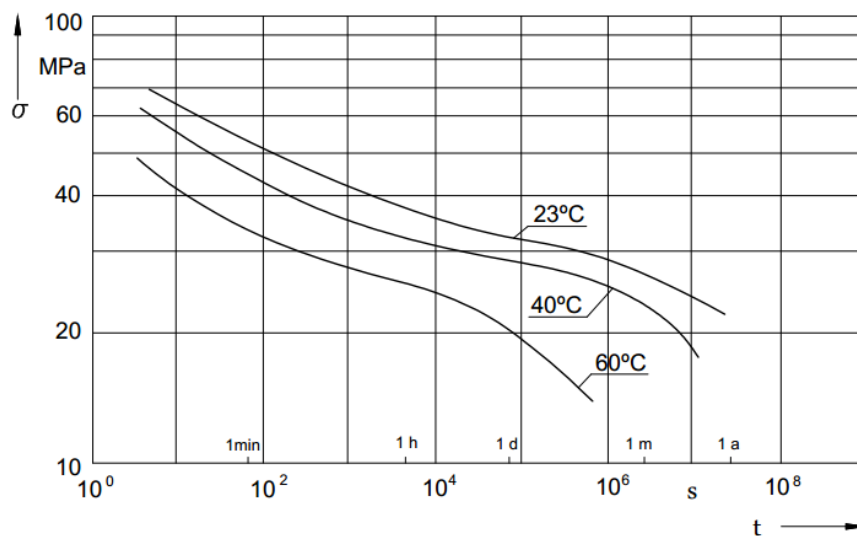


Figura 14 – Resistência à tração do acrílico para diferentes temperaturas ao longo do tempo (adaptada de [12]).

Em termos de limite de tensões, para uma estrutura em acrílico sujeito à carga permanente da água e para uma temperatura de até 40°C, a tensão máxima admissível tem o valor de 3 MPa, o que, comparado com o vidro e tal como será abordado em maior detalhe mais adiante, apresenta um valor muito inferior [12].

Em termos de dureza, o acrílico tem um valor de cerca de 3,5 Mohs, enquanto que o vidro tem um valor de 6 Mohs, o que o torna num material mais resistente a danos causados por objetos ou animais [13].

Pelas vantagens enunciadas, a hipótese de utilização do vidro em piscinas ou aquários pode-se tornar na melhor opção, e por esse motivo justifica-se o estudo da aplicação do vidro neste tipo de estruturas.

3.5.2. Vidro laminado em aplicações submersas

De acordo com a pesquisa realizada, a utilização de vidro laminado em ambiente submerso é raramente referida na literatura, e a informação existente relativamente aos cuidados e critérios a ter neste tipo de aplicação, em particular quando o vidro se encontra sujeito a carregamentos constantes de longa duração e em concreto a cargas hidrostáticas, é escassa. Os poucos exemplos referidos na bibliografia estão relacionados com janelas para submarinos, aviões e câmaras hiperbáricas [13].

A opção pelo vidro laminado é necessária neste tipo de aplicações que envolvem um elevado risco associado à rotura. A utilização do vidro laminado prende-se com o facto de, em caso de acidente e caso ocorra a rotura de uma camada de vidro, as camadas seguintes poderão manter-se estáveis e serem suficientes para garantir a estabilidade do sistema durante um período de tempo curto, até que se proceda à remoção da carga hidrostática através da drenagem da água e seja feita uma substituição do laminado [11].

Tendo como principal foco a segurança das pessoas que utilizam a piscina ou que visitam o aquário, é necessário garantir uma estratégia baseada na redundância e no comportamento pós-rotura do laminado, pelo que a escolha do tipo de vidro a utilizar na solução do laminado é um importante fator de escolha. Tal como demonstrado no capítulo anterior, a escolha do tipo de vidro a utilizar em soluções estruturais deve ser cuidadosa. Assim, para este tipo de solução exclui-se a utilização do vidro recozido, por se tratar de um vidro com menor resistência e menos permissivo a tensões e deformações. Entre o vidro termo-endurecido e temperado, a opção recai sobre o vidro termo-endurecido. Este tipo de vidro tem uma elevada resistência mecânica e um comportamento pós-rotura que garante uma maior estabilidade do painel de vidro comparativamente com o vidro temperado, que apresenta um comportamento pós-rotura

caracterizado pelo grande número de fragmentos de reduzido tamanho, que diminuem a hipótese de se manterem no sítio.

3.5.3. Peculiaridades da *interlayer*

A *interlayer*, material utilizado como elemento de ligação entre os vários painéis de vidro, tem um comportamento viscoelástico, pelo que sofre alterações no seu comportamento mecânico, nomeadamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, em função da temperatura a que está sujeito e da duração do carregamento.

Efeito da temperatura

A figura 15 mostra a distribuição de tensões normais em flexão para a secção de meio vão de um vidro laminado constituído por dois painéis de vidro e uma *interlayer* de PVB. A figura mostra o efeito mecânico de dissociação que ocorre para altas temperaturas no vidro laminado. A 5°C o laminado comporta-se como um material homogéneo com tensões de compressão na face superior e tensões de tração na face inferior. Neste caso, a *interlayer* não afeta a rigidez do laminado e a deflexão provocada pelo carregamento é pequena. Com o aumento da temperatura a rigidez do polímero diminui, resultando na dissociação das várias camadas que compõem o laminado. Para temperaturas de 40°C, o painel de vidro de cima apresenta tensões de compressão na face superior e de tração na face inferior e de forma semelhante para o painel inferior. Como resultado, a rigidez à flexão do laminado é reduzida significativamente e o laminado passa a apresentar grandes deformações. Também o valor absoluto dos níveis de tensão dos painéis de vidro aumenta, o que resulta numa rotura para cargas mais baixas. A temperaturas intermédias, e para valores intermédios do módulo de elasticidade, verifica-se uma fase de transição em que a dissociação dos painéis de vidro não é completa e o polímero continua a contribuir para a rigidez à flexão do laminado.

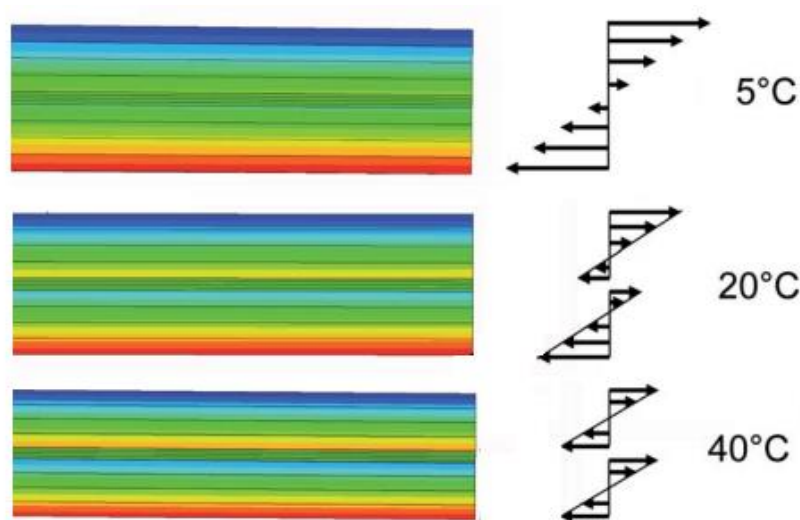


Figura 15 – Tensões de flexão a meio vão de um laminado constituído por dois painéis de vidro e uma película de PVB a diferentes temperaturas para um carregamento de 1 hora (adaptada de [14]).

A contribuição da película polimérica para a rigidez à flexão do laminado não depende apenas da temperatura mas também da duração do carregamento. Tal facto é demonstrado na figura 16, onde se pode verificar o aumento da deformação ao longo do tempo do laminado a diferentes temperaturas [14].

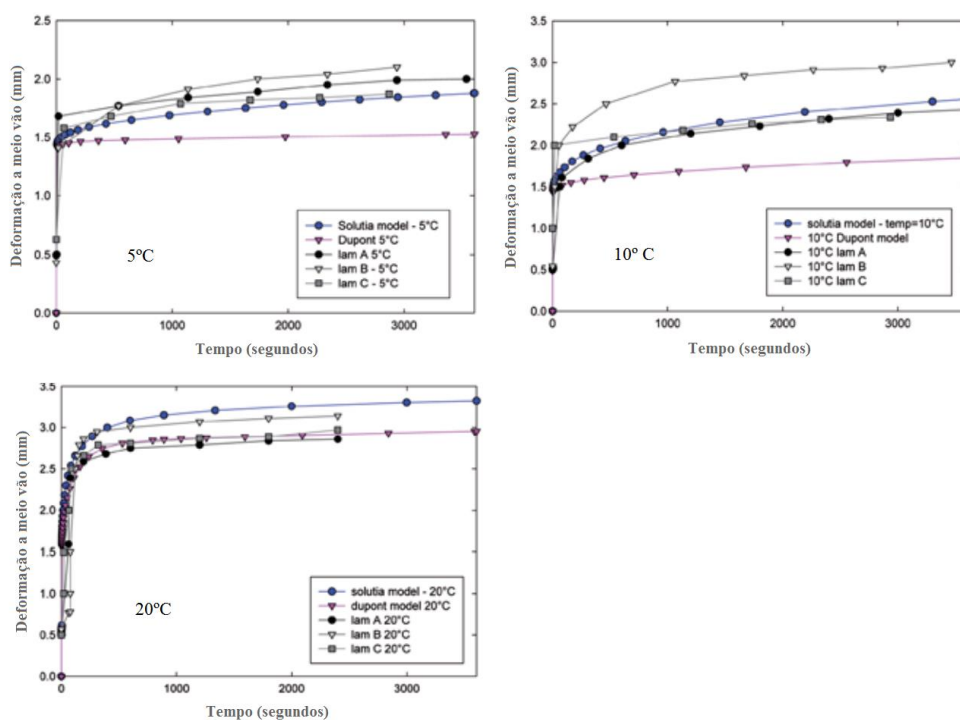


Figura 16 – Deformação a meio vão para um laminado constituído por dois painéis de vidro e uma película de PVB a diferentes temperaturas (adaptada de [14]).

Efeito da duração do carregamento

Como referido anteriormente, a duração do carregamento influencia o comportamento mecânico do laminado, e este é afetado pela alteração dos parâmetros mecânicos da *interlayer*. Tomando como referência o SentryGlas da Dupont, através da figura 17 e para uma temperatura de 30°C é possível verificar que, para um carregamento de 1 segundo, o módulo de elasticidade do SentryGlas Plus da DuPont tem o valor de 442 MPa, para 1 mês este valor é reduzido para 34,7 MPa, e para um carregamento de 10 anos estima-se um valor de 15,9 MPa [8].

		Duração do carregamento						
Temperatura	Módulo de elasticidade E (MPa)	1 s	3 s	1 min	1 hr	1 day	1 mo	10 yrs
	10 °C	692.	681.	651.	597.	553.	499.	448.
	20 °C	628.	612.	567.	493.	428.	330.	256.
	24 °C	581.	561.	505.	416.	327.	217.	129.
	30 °C	442.	413.	324.	178.	148.	34.7	15.9
	40 °C	228.	187.	91.6	27.8	13.6	9.86	8.84
	50 °C	108.	78.8	33.8	12.6	8.45	6.54	6.00
	60 °C	35.3	24.5	10.9	5.10	3.87	3.24	2.91
	70 °C	11.3	8.78	5.64	2.52	1.77	1.44	1.35
	80 °C	4.65	3.96	2.49	0.96	0.75	0.63	0.54

Figura 17 – Módulo de elasticidade para o SentryGlas Plus da Dupont (adaptada de [8]).

De forma semelhante e como se pode verificar pela figura 18, para a mesma temperatura de referência o coeficiente de Poisson também varia, tendo para um carregamento de 1 segundo o valor de 0,463, para 1 mês este valor é aumentado para 0,497, e para um carregamento de 10 anos, estima-se um valor de 0,499 [8].

		Duração do carregamento						
Temperatura	Coeficiente de poisson, ν	1 s	3 s	1 min	1 hr	1 day	1 mo	10 yrs
	10 °C	0.442	0.443	0.446	0.450	0.454	0.458	0.463
	20 °C	0.448	0.449	0.453	0.459	0.464	0.473	0.479
	24 °C	0.452	0.453	0.458	0.465	0.473	0.482	0.489
	30 °C	0.463	0.466	0.473	0.485	0.488	0.497	0.499
	40 °C	0.481	0.484	0.492	0.498	0.499	0.499	0.499
	50 °C	0.491	0.493	0.497	0.499	0.499	0.500	0.500
	60 °C	0.497	0.498	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500
	70 °C	0.499	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
	80 °C	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

Figura 18 – Coeficiente de Poisson para o SentryGlas Plus da Dupont (adaptada de [8]).

Aplicação em estruturas submersas

Para o caso em estudo, considerando que se trata de uma estrutura dimensionada para um tempo de vida útil de 10 ou mais anos, a contribuição da *interlayer* ao longo do tempo para transmissão de esforços tende a ser reduzida para valores próximos de zero. Assim, considerou-se que para este tipo de estrutura o módulo de elasticidade do PVB, e que será adotado no capítulo 6 referente à modulação numérica dos casos de estudo, tem o valor de 0,05 MPa.

Relativamente ao coeficiente de Poisson, tendo como referência uma temperatura de 30°C e um carregamento de 10 ou mais anos, este valor é muito próximo ao máximo, pelo que se adotou o valor de 0,499.

3.5.4. Método simplificado

O método simplificado trata-se de uma aproximação que utiliza o conceito de espessura efetiva e que permite que seja utilizado na análise com elementos finitos uma espessura equivalente de vidro, em vez de se definir um conjunto de painéis de vidro interpostos por *interlayers*. Com isto, é possível diminuir o tempo de cálculo em problemas mais complexos que envolvem múltiplos painéis de vidro e elementos de contacto entre estes e as películas poliméricas. Este método tem em conta a transferência de esforços das películas entre os painéis de vidro através de um coeficiente ω que está relacionado com a rigidez de corte da *interlayer* (G), as propriedades do vidro, a geometria do laminado e o comprimento e escala do problema [8].

A espessura efetiva para o cálculo das deformações à flexão é dada pela expressão (3.2),

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega \left(\sum_k h_k h_{m;k}^2 \right)} \quad (3.2)$$

em que h_k é a espessura de cada painel de vidro e $h_{m;k}$ a distância entre o eixo de cada painel de vidro e o eixo do laminado.

A espessura efetiva para o cálculo das tensões normais de flexão para cada painel de vidro é dado pela seguinte expressão,

$$h_{ef;\sigma;j} = \sqrt{\frac{(h_{ef;w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m;j})}} \quad (3.3)$$

em que h_j é a espessura do painel de vidro e $h_{m;j}$ a distância entre o eixo do painel de vidro e o eixo do laminado.

As duas expressões anteriores dependem do valor de ω , coeficiente que representa a transferência de esforços rasantes ao nível da *interlayer*. O valor varia entre 0, para uma transferência nula de esforços, e 1 para uma transferência de esforços total. Considerando o comportamento da *interlayer* neste tipo de estruturas, como já demonstrado anteriormente no subcapítulo 3.5.3 e segundo a pré-norma prEN 16612, para cargas permanentes, o valor de ω toma o valor de 0. Na figura 19 apresenta-se um exemplo das dimensões de um vidro laminado a considerar para o cálculo da espessura equivalente.

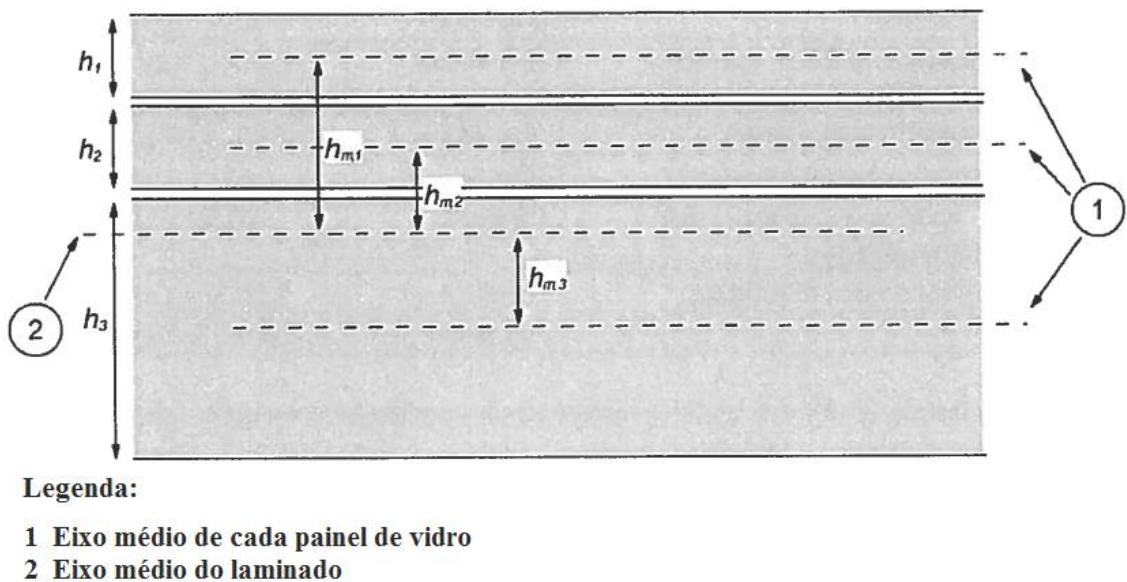


Figura 19 – Exemplo das dimensões de um vidro laminado (adaptada de [15]).

3.5.5. Tipos de ações

As ações são um dos elementos mais importantes que se deve ter em conta quando se pretende fazer o dimensionamento de qualquer estrutura. Na situação do vidro estrutural submerso, este cuidado é ainda maior por se tratar de uma estrutura que, em caso de excesso de carga, pode levar ao colapso de toda a estrutura e ao ferimento ou morte de possíveis utilizadores dos espaços.

Tendo em conta o tipo de estrutura, considera-se importante salientar os dois principais usos de painéis de vidro em ambiente submerso, a sua utilização em piscinas e em aquários. Na segunda aplicação, é expectável cuidado redobrado no dimensionamento por se tratar de um elemento que, além de estar sujeito uma carga hidrostática constante, pode ser o habitat de vários tipos de animais de grande porte, que exigem cuidados relativos ao comportamento destes contra a estrutura. Neste estudo, tentou-se fazer uma pesquisa das possibilidades existentes para a caracterização destes tipos de ação na estrutura. No entanto, quando se procede ao estudo de um caso especial, deverá ter-se em conta possíveis ações não contempladas nesta descrição.

Peso próprio

O peso próprio dos elementos em vidro pode resultar de duas configurações distintas. Num primeiro caso o painel de vidro é colocado verticalmente e no segundo caso quando se aplica o painel de vidro horizontalmente.

No primeiro caso, como o peso próprio do painel atua no plano, o peso próprio pode ser não considerado por não influenciar o aumento de tensões e deformações do painel.

No segundo caso, em que o vidro é colocado horizontalmente, o peso próprio do vidro é um elemento a ter em conta quando se procede ao dimensionamento porque conduz a um acréscimo de força que atua perpendicularmente ao plano do painel. O peso próprio, neste caso, pode ser contabilizado tendo em conta a densidade do vidro, que no caso dos vidros SLGG é de cerca de 2500 kg/m^3 .

Pressão hidrostática

A pressão hidrostática é a carga originada pela pressão da água nos painéis de vidro e é a principal ação que atua em qualquer tipo de estrutura submersa. É uma ação que pode variar ao longo do tempo de vida útil da estrutura, seja por despejo temporário ou por razões de limpeza ou manutenção da estrutura.

Para contabilizar esta ação é necessário conhecer a geometria do painel e a cota a que se situa a superfície da água. Tomando como referência a figura 20, a carga pode ser do tipo triangular (a), caso o painel esteja colocado na vertical e o bordo superior do painel de vidro se situe acima da superfície da água, do tipo trapezoidal retangular (b), caso o painel esteja colocado na vertical

e o bordo superior do painel de vidro se situe abaixo da superfície da água ou do tipo retangular (c), caso o painel esteja colocado na horizontal.

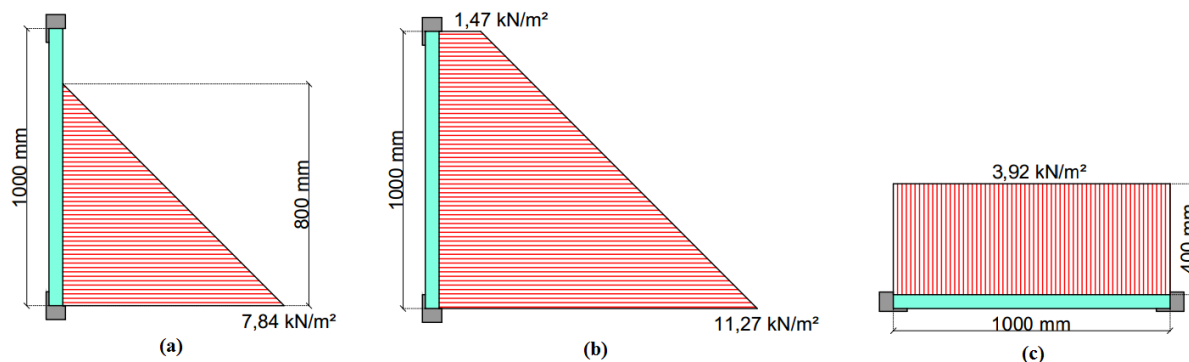


Figura 20 – Pressão hidrostática que atua nos painéis de vidro em diferentes situações.

Pressão hidrodinâmica

A pressão hidrodinâmica depende do tipo de aplicação a que a estrutura se destina, um exemplo é a pressão provocada pela ondulação originada pelo movimento de animais, pessoas ou objetos. Uma estratégia possível a adotar na consideração desta ação consiste em, no caso de painéis colocados verticalmente, fazer variar a carga triangular entre a altura mínima e máxima de água.

Vento

A carga do vento pode ser considerada na superfície do vidro seca e/ou na superfície de vidro molhada, caso o painel não esteja totalmente coberto com água. O valor das ações podem ter como base o definido no eurocódigo EN 1991 referente às ações em estruturas.

Cargas pontuais estáticas

Este tipo de ação não é de fácil quantificação e depende muito da função para a qual a estrutura é dimensionada. No caso de um aquário, em que a estrutura em vidro está parcialmente sujeita à carga da água e em que este funciona como elemento de separação entre o público e a zona de habitat dos animais, tal como no caso descrito em [13] devem ser consideradas as forças que

os animais podem exercer na superfície de vidro com e sem presença de água devido ao peso do seu corpo e possíveis objetos trazidos pelos animais.

Cargas pontuais dinâmicas

Assim como as cargas pontuais estáticas, a quantificação deste tipo de cargas é de difícil estudo e requer uma análise de hipóteses consoante a função para a qual a estrutura é dimensionada. Exemplos de cargas pontuais dinâmicas são as forças de impacto com que um animal, ao correr em direção ao painel de vidro, colide com o painel. Na caracterização destas forças é necessário considerar a velocidade máxima que o animal pode atingir e a zona do vidro mais crítica para este tipo de carga.

Ação da temperatura

A ação da temperatura deve ser considerada com especial cuidado e tendo em conta os vários cenários que podem ocorrer ao longo do período de utilização da estrutura. É necessário ter em conta que o painel de vidro pode estar sujeito a três tipos de ação térmica diferentes. Como exemplo refere-se o caso em que um painel de vidro é colocado na vertical e parcialmente coberto com água. Neste caso, no lado interior a temperatura da água é diferente da temperatura do ar, e no lado exterior a temperatura do ar pode ser diferente da temperatura interior. Outros cenários que devem ser tidos em conta são as variações térmicas ocorridas ao longo do ano, nomeadamente as temperaturas exteriores que podem ser negativas nos meses de inverno e positivas e elevadas no verão.

Danos na superfície do vidro

Outro fator também importante quando se procede ao estudo de implementação de uma solução em vidro é o possível dano causado em ambos os lados na superfície do vidro. Estes danos podem ser causados, por exemplo, pelos animais ou por objetos pertencentes às pessoas que frequentam o espaço, como anéis de pedras preciosas e outros tipos de objetos metálicos que poderão causar danos na estrutura.

3.5.6. Condições de apoio e proposta para sistema de fixação

Qualquer estrutura requer um sistema de apoio que garanta a rigidez necessária ao sistema e as condições pretendidas para o tipo de estrutura.

Nas estruturas em vidro submersas o sistema de apoio é um elemento muito importante, porque além da função estrutural, especificamente de suporte dos painéis de vidro, é necessário garantir a estanquicidade do sistema.

Como qualquer elemento em vidro, a estrutura que suporta o vidro não pode estar em contacto direto com o vidro devido à fragilidade do vidro e à dureza dos materiais. Por este facto, torna-se fundamental utilizar um elemento de transição na zona de contacto entre o vidro e a estrutura de suporte.

Em termos de estrutura, o sistema de fixação do vidro é muito semelhante ao do acrílico, baseando-se no suporte linear com recurso a elementos em aço-inox e a uma borracha como EPDM ou neoprene para fazer ligação com o vidro. O sistema de fixação deve garantir o não deslocamento do vidro em todas as direções assim como a sua rotação, tornando-se numa espécie de encastramento mas com alguma flexibilidade devido ao comportamento dos elementos de contacto em borracha. Além disto, é necessário conceber o sistema de fixação da estrutura de suporte à estrutura envolvente, que garanta da mesma forma a estanquicidade do sistema e a correta transmissão de esforços.

Após várias pesquisas e através da observação de soluções existentes, foi possível concluir que existem alguns fatores importantes que deverão ser considerados quando se procede ao dimensionamento do sistema de apoio. De entre as várias soluções existentes, e que já foram expostas anteriormente, a que mais se adequa a este tipo de estrutura são as de fixação linear por garantirem uma vedação em todos os bordos dos painéis. A figura 21 ilustra o sistema de suporte linear utilizado na fixação de painéis de acrílico.

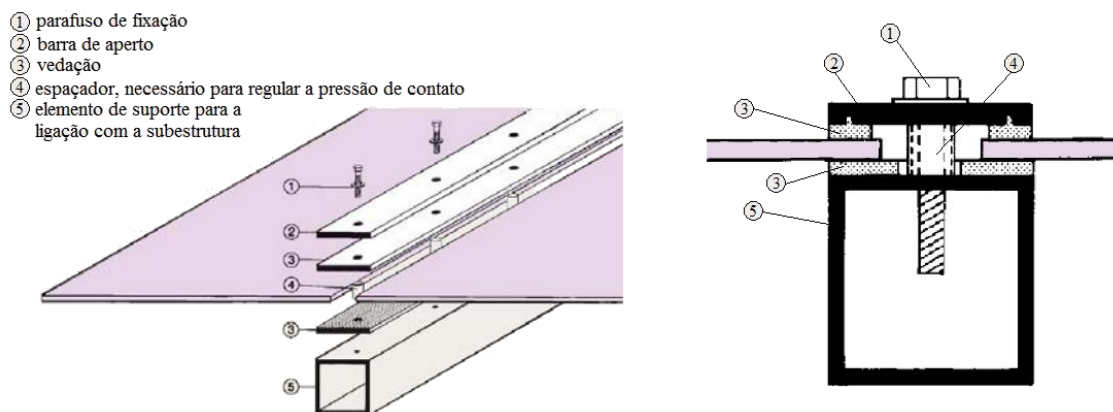


Figura 21 – Sistema de suporte linear utilizado na fixação de painéis de acrílico (adaptada de [16]).

De forma a estudar a melhor forma de suporte dos painéis de vidro, e tendo em conta as soluções existentes para acrílico, optou-se inicialmente por estabelecer alguns parâmetros importantes. Ao fixar um painel de vidro seria necessário aplicar uma força de compressão, de forma a garantir a não mobilidade do painel de vidro quando sujeito ao carregamento hidrostático. É necessário também garantir um comprimento de entrega suficiente, para impedir a rotação excessiva dos painéis ou mesmo que estes se escapem do sistema de fixação durante a deformação. Na figura 22 é exemplificado o esquema inicial de base ao sistema de apoio tendo em conta os parâmetros definidos anteriormente.

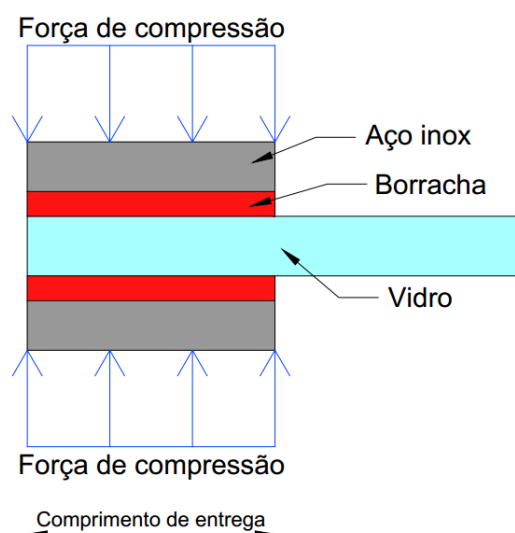


Figura 22 – Sistema base proposto para a fixação dos painéis de vidro.

Tendo em conta o modelo base, e após algumas reflexões sobre o sistema de suporte, elaborou-se um esquema com todos os componentes que constituem o sistema de fixação do vidro à estrutura de suporte, e desta com a estrutura envolvente.

A figura 23 representa o sistema de fixação idealizado em que os diversos elementos constituintes assumem uma função no sistema de fixação. A estrutura de suporte (3) é constituída por um elemento em aço inox que é fixado à estrutura envolvente (8) através de parafusos (7). A geometria do elemento é constituída por dois perfis em L soldados que garantem um espaçamento para o parafuso que fixa o painel de vidro (5). A geometria adotada também teve como fundamento a fixação em duas faces perpendiculares à estrutura envolvente, de forma a obter uma rigidez suficiente e a impedir a passagem de água entre a estrutura envolvente e a estrutura de suporte. Complementarmente, e de forma a garantir a correta posição e alinhamento do parafuso (5), foram colocadas peças tubulares de espessura reduzida soldadas à estrutura de suporte, como pode ser observado no modelo tridimensional representado na figura 24.

Do lado oposto do painel de vidro, e de forma a ser possível aplicar uma compressão nos bordos do painel, idealizou-se uma estrutura em aço inox tubular (4) constituída por negativos roscados espaçados de forma uniforme ao longo do bordo, aos quais se ligam os parafusos de fixação que garantem o confinamento do painel de vidro e a união entre os dois elementos em aço inox. Este elemento é tubular para ser menos suscetível ao efeito de torção, comparativamente a uma solução que recorresse a uma chapa.

O parafuso que faz a fixação do painel de vidro (5) através da fixação entre as duas estruturas em aço inox deve ser constituído por uma vedação na sua cabeça, de forma a impedir a penetração de água pelo furo.

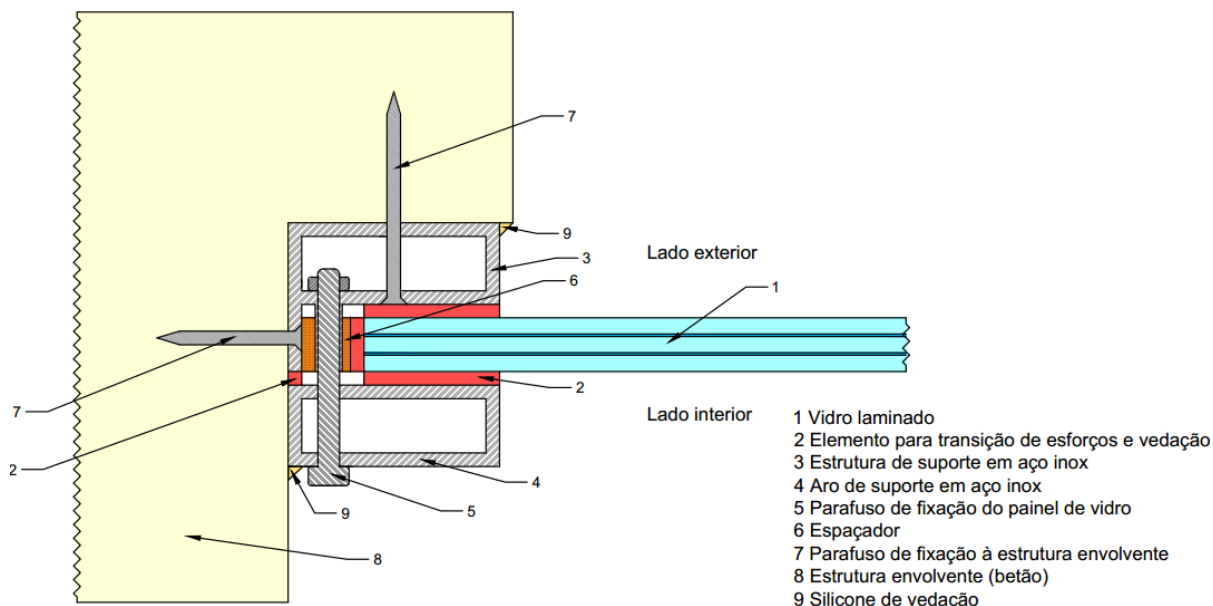


Figura 23 - Esquema de fixação dos painéis de vidro à estrutura envolvente.

A ligação entre as estruturas em aço inox e o vidro (2), e como já referido anteriormente deve ser constituído por um material que faça a transmissão de esforços do vidro para a estrutura de suporte e que garanta a vedação do sistema.

Complementarmente, o sistema de fixação deverá garantir o espaçamento do bordo do painel de vidro relativamente à estrutura de suporte, devendo esta função ser também garantida por elementos (6) que garantam o espaçamento e que são colocados entre os parafusos de fixação dos painéis de vidro.

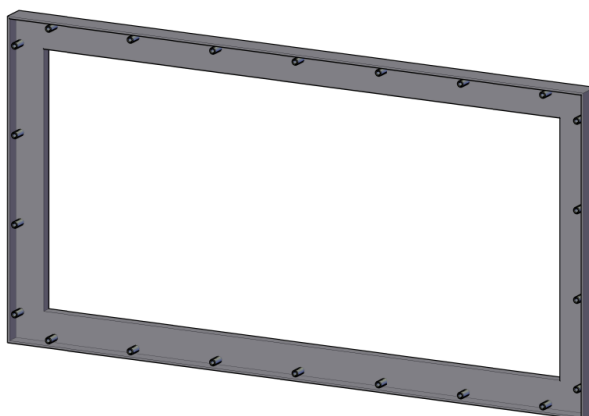


Figura 24 – Esquema da estrutura de suporte.

O dimensionamento dos vários elementos do sistema de suporte será estudado ao longo desta dissertação, nomeadamente a espessura do material responsável pela transferência de esforços, o comprimento de entrega do painel de vidro e a força de confinamento dos painéis de vidro.

No capítulo 4 foi feito um estudo experimental de forma a avaliar o comportamento do sistema de fixação e no capítulo 5 foi feito um estudo numérico com vista a obter uma correta modelação dos vários elementos do sistema de apoio, que permite também a extrapolação dos resultados obtidos para outras configurações e estruturas que não as estudadas. No capítulo 6 foi analisada a aplicação do sistema de apoio a dois casos de estudo e estudada a influência dos vários parâmetros de dimensionamento no comportamento do sistema.

3.5.7. Dimensionamento através da pré-norma prEN 16612

A prEN 16612 [15] é uma pré-norma europeia orientada para a determinação da capacidade resistente de painéis de vidro que se encontra em fase de desenvolvimento. Este estudo baseou-se na sua versão de 2013. Os princípios usados na determinação da capacidade resistente do vidro basearam-se no eurocódigo EN 1990 no que respeita às bases de dimensionamento estrutural. As ações foram determinadas de acordo com o eurocódigo EN 1991 referente às ações nas estruturas de base ao dimensionamento estrutural.

A pré-norma prEN 16612 fornece os princípios para a determinação da capacidade resistente do vidro, proporcionando um método geral para o cálculo e para a determinação da capacidade resistente através da experimentação, para qualquer tipo de aplicação. No caso de estudo desta dissertação focou-se a atenção para o método de cálculo e para a utilização do anexo B, referente à fórmula de cálculo das tensões e deformações para grandes deformações de painéis de vidro retangulares apoiados em todos os bordos.

A utilização desta norma tem como objetivo proceder a uma calibração dos modelos numéricos tendo em conta as condições abrangidas na norma, para uma posterior adaptação às condições existentes nas estruturas em vidro submerso, nomeadamente o tipo de carga e condições de apoio, já definidos no subcapítulo anterior.

A abordagem à norma tem em conta os procedimentos adotados para as estruturas submersas, pelo que se tentou sintetizar os procedimentos importantes ao dimensionamento deste tipo de estruturas.

Dada a limitação da norma aos casos particulares a que se refere, optou-se por estudar um caso contemplado na norma e fazer uma comparação com um modelo numérico dedicado. Assim, definiu-se uma solução de vidro laminado com as dimensões de 2800 x 1000 mm, simplesmente

apoiado em todos os bordos e sujeito a uma carga uniformemente distribuída com valor equivalente à pressão hidrostática para 1 metro de profundidade.

O dimensionamento foi feito para estado limite último, pelo que é necessário garantir que,

$$E_{ULS;d} \leq R_d \quad (3.4)$$

em que $E_{ULS;d}$ se refere ao valor de cálculo do efeito das ações, expresso pelo cálculo das tensões causadas pelas ações, e R_d ao valor de cálculo correspondente à resistência, expresso como o valor de cálculo máximo da força $f_{g;d}$ para estado limite último, tendo em conta um fator de segurança do material para estado limite último γ_M .

De forma a garantir a segurança da estrutura, deverá respeitar-se as duas seguintes condições:

1. O valor máximo das tensões calculadas não deverá exceder o valor de cálculo da resistência, dado pela expressão,

$$\sigma_{max} \leq f_{g;d} \quad (3.5)$$

2. O valor máximo da deformação calculado não deverá exceder o valor de cálculo da deformação, dado pela expressão,

$$w_{max} \leq w_d \quad (3.6)$$

O valor de cálculo para a resistência do vidro sujeito a tratamento térmico é dado pela expressão,

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v (f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} \quad (3.7)$$

- em que: k_{mod} é o fator para a duração do carregamento e é dado pela expressão:

$$K_{mod} = 0,663 t^{-\frac{1}{16}} \quad (3.8)$$

Considerando a carga hidrostática como uma carga permanente, e utilizando o valor típico presente na norma considerou-se o valor de $k_{mod}=0,29$;

- k_{sp} é o fator que tem em conta o tipo de superfície do vidro, que para vidro liso e sem alterações tem o valor de $k_{sp}=1$;
- $f_{g;k}$ é o valor característico da resistência à flexão do vidro recozido, que tem o valor de referência de $f_{g;k}= 45 \text{ N/mm}^2$;

- $\gamma_{M;a}$ é o valor recomendado para o fator parcial de segurança do material para o vidro recozido, e tem o valor de $\gamma_{M;a}=1,6$;
- k_v é um fator que tem com conta o processo de tratamento do vidro, que para o vidro tratado horizontalmente tem o valor de $k_v=1$;
- $f_{b;k}$ é o valor característico da resistência à flexão do vidro sujeito a tratamento e que tem os seguintes valores dependendo do tipo de vidro (tabela 3).

Tabela 3 – Valores característicos da resistência à flexão do vidro sujeito a tratamento.

Vidro termo-endurecido	Vidro temperado termicamente	Vidro temperado quimicamente
70 N/mm ²	120 N/mm ²	150 N/mm ²

Para o caso em estudo, optou-se pela utilização de vidro termo-endurecido, pelo que se tomou como referência o valor de $f_{b;k}= 70 \text{ N/mm}^2$;

- $\gamma_{M;v}$ é o valor recomendado para o fator parcial do material para o vidro sujeito a tratamento, e tem o valor de $\gamma_{M;v}=1,2$.

Assim, $f_{g;d}$ tem o valor de 28,99 MPa.

O valor de cálculo da deformação não é condicionado por nenhum requisito específico para o limite da deformação do vidro sobre carregamento. Nestes casos, segundo a norma, na ausência de alguma restrição o limite da deformação deverá ser limitado ao menor dos dois valores: vão/65 ou 50 mm. Considerando o vão de 2800 mm, a deformação máxima admissível é 43,08 mm.

Para o valor das ações é necessário fazer a combinação de ações para estado limite último. Por se tratar apenas de um exemplo de cálculo optou-se por considerar apenas a carga hidrostática como carga permanente, e sem a inclusão de cargas variáveis.

O valor de cálculo das ações para estado limite último é definido pela seguinte expressão:

$$F_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \gamma_Q \sum_i \psi_{0,i} Q_k, \quad (3.9)$$

Considerando que se trata de um elemento pertencente à estrutura principal, os fatores parciais de segurança são os definidos na tabela 4.

Tabela 4 – Fatores parciais de carga.

γ_Q	γ_G	
	Ação favorável	Ação desfavorável
1,5	1,0	1,3

Neste exemplo considerou-se a ação da carga hidrostática como desfavorável, pelo que o valor de F_d tem o valor de $F_d = 12,753 \text{ kN/m}^2$.

Cálculo das tensões e deformações de cálculo através do anexo B

As dimensões do painel são definidas pelas variáveis a e b , sendo que a se refere à menor dimensão do painel. O rácio entre as duas dimensões é dado por $\lambda = a/b$ e a área A por $A = a \times b$.

A tensão máxima de flexão é dada pela seguinte expressão,

$$\sigma_{max} = k_1 \frac{A}{h^2} F_d \quad (3.10)$$

A deformação máxima é dada pela seguinte expressão,

$$w_{max} = k_4 \frac{A^2}{h^3} \frac{F_d}{E} \quad (3.11)$$

em que os valores de k_1 e k_4 dependem da relação entre λ e da carga não dimensional, definida pela seguinte expressão,

$$p^* = \left(\frac{A}{4h^2} \right)^2 \frac{F_d}{E} \quad (3.12)$$

Para o caso em estudo definiu-se um laminado com dois painéis de 15 mm e uma *interlayer* de 0,76 mm em PVB. O cálculo da tensão e deformação máximas utiliza o método simplificado para a definição da espessura equivalente, como demonstrado no subcapítulo 3.5.4. Deste modo, o valor da tensão máxima tem o valor de $\sigma_{max} = 19,74 \text{ MPa}$ e o valor da deformação máxima tem o valor de $w_{max} = 3,67 \text{ mm}$.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1. Contexto

A utilização de modelos experimentais visa dois importantes objetivos deste trabalho. Por um lado pretende-se caracterizar os parâmetros dos materiais, nomeadamente o módulo de elasticidade do vidro e dos materiais responsáveis pela transmissão de esforços, assim como a resistência à tração do vidro. Por outro lado, e considerando um segundo modelo experimental, pretende-se estudar o sistema de apoio, nomeadamente os parâmetros que influenciam o comportamento do sistema.

4.2. Modelo de flexão em quatro pontos

4.2.1. Propósito

A utilização de um modelo de flexão em 4 pontos tem como objetivo estudar dois aspetos que são de todo o interesse para o tema em estudo nesta dissertação. Por um lado, a utilização de um modelo que, adotando procedimentos normalizados permita a caracterização dos parâmetros mecânicos do vidro, e por outro lado a verificação do comportamento do vidro nos modelos numéricos e sua calibração.

Como o objetivo do ensaio é fazer uma caracterização mecânica do vidro, nomeadamente fazer uma caracterização do vidro quanto à tensão de rotura e módulo de elasticidade, optou-se por adotar os procedimentos recomendados pela norma europeia existente, nomeadamente a norma de ensaio EN 1288-3 [17] já descrita no capítulo 3. Trata-se de um ensaio de flexão em quatro pontos e segue as diretrizes descritas na mesma norma.

4.2.2. Provetes para ensaio

Os provetes de vidro utilizados neste ensaio foram disponibilizados por uma empresa externa à universidade e foram fornecidos provetes de diferentes espessuras e de diferentes tipos, nomeadamente de vidro recozido e termo-endurecido. A utilização de vidro termo-endurecido para ensaio, em detrimento do vidro temperado, prende-se com a escolha deste tipo de vidro considerando o fim a que se destina, ou seja, em soluções de vidro laminado em ambiente submerso, tal como já foi analisado no capítulo 3. O ensaio de vidro recozido foi realizado com o objetivo de permitir a comparação com a situação em que se recorre a vidro sujeito a tratamento térmico. A utilização de vidro laminado neste ensaio foi excluída, considerando que a aplicação em estudo implica ações de longa duração e neste contexto a transferência de esforços ao nível da *interlayer* é nulo.

As dimensões dos provetes são as especificadas na norma EN1288-3, nomeadamente 1100 x 360 mm, tendo sido ensaiados 3 provetes de cada espessura, respetivamente de 6,8,12 e 15 mm.

Inicialmente não era conhecida a informação relativamente a quais os vidros que tinham sido sujeitos a tratamento térmico, pelo que se optou por utilizar um filtro polarizador para essa determinação. Quando o vidro é exposto a luz polarizada, e utilizando um filtro de luz polarizada também, é possível verificar de que tipo de vidro se trata pela confirmação da presença de tensões residuais no vidro, que ocorre no caso deste ser termo-endurecido. A presença de tensões residuais no vidro termo-endurecido pode ser verificada pela figura 25, onde é possível observar um elevado nível de tensões residuais junto ao bordo do painel de vidro.

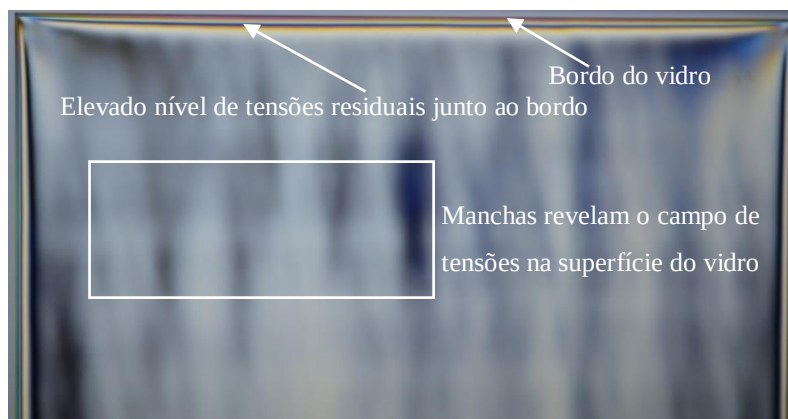


Figura 25 - Campo de tensões no vidro termo-endurecido, observado através de filtro polarizador.

A partir dos resultados obtidos deste teste foi possível concluir que o vidro fornecido de 6 e 8 mm foi sujeito a tratamento térmico, enquanto que o vidro de 12 e 15 mm não, tratando-se apenas de vidro recozido.

Os provetes utilizados no ensaio de flexão em 4 pontos foram os definidos na tabela 5.

Tabela 5 – Provetes do ensaio de flexão em quatro pontos.

Tipo de vidro	Termo-endurecido		Recozido	
Espessura [mm]	6	8	12	15
Provetes	P1	P4	P7	P10
	P2	P5	P8	P11
	P3	P6	P9	P12

Para garantir uma maior segurança durante o ensaio após a rotura do vidro, optou-se por colar sobre uma face de cada provete uma película transparente. A película foi colocada na face do vidro sujeita a compressão de forma a não interferir com a medição da resistência do provete. Adicionalmente, a película permite que os fragmentos do vidro quebrado se mantenham no sítio e seja possível observar o padrão de rotura de cada provete após o ensaio.

4.2.3. Equipamento utilizado e preparação dos ensaios

O equipamento utilizado para este ensaio incluiu um atuador hidráulico colocado verticalmente no pórtico E2-2 existente no laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da Universidade do Minho (LEST). O atuador utilizado tem a capacidade de aplicar força até ao valor máximo de 50 kN, e de medir o deslocamento imposto com uma precisão de 0,01 mm.

A configuração do ensaio e condições de apoio adotadas foram as prescritas na norma EN1288-3, consistindo num ensaio de flexão em quatro pontos. No presente caso o sistema de apoio adotado consistiu na utilização de dois rolos cilíndricos, com rotação livre em torno do seu eixo longitudinal, com um diâmetro de 40 mm. O sistema de carregamento utilizado, de forma semelhante ao sistema de apoio, consistiu em dois rolos cilíndricos de 40 mm de diâmetro afastados entre si de 200 mm, que aplicam a carga a meio vão do provete. A figura 26 representa o esquema de ensaio utilizado.

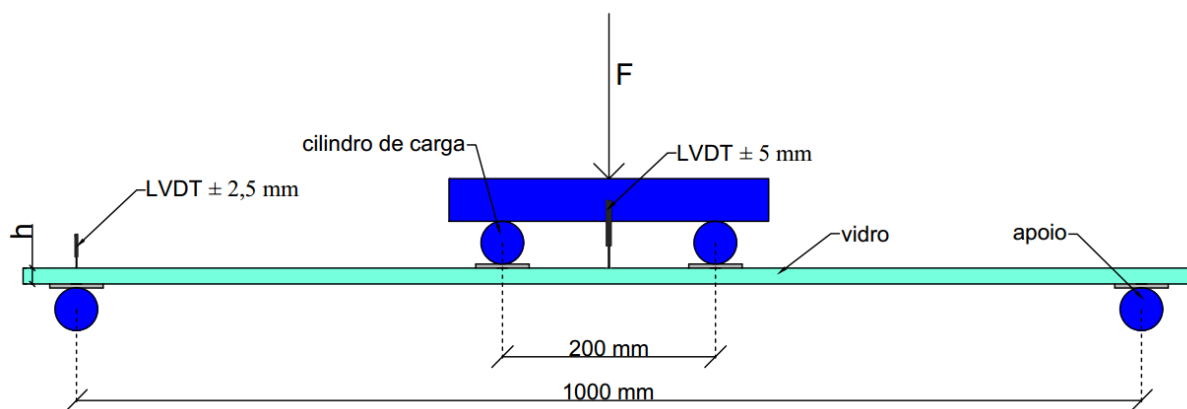


Figura 26 - Esquema de ensaio do modelo simplesmente apoiado.

De forma a evitar tensões locais elevadas no vidro na zona dos apoios cilíndricos foi colocado, como descrito na norma, uma tira de borracha de neoprene de 3,7 mm a toda a largura do provete.

A figura 27 representa o esquema de montagem utilizado incluindo todos os equipamentos necessários para a medição do ensaio.



Figura 27 - Esquema de montagem do modelo simplesmente apoiado.

Para medir o deslocamento vertical a meio vão foram utilizados dois LVDT (Linear variable differential transformer) com um campo de medição entre os ± 5 mm, representados na figura 28.

De forma a complementar o deslocamento vertical ocorrido no vidro foram colocados sobre um um dos apoios dois LVDT, com um campo de medição entre os $\pm 2,5$ mm, com o objetivo de

contabilizar o deslocamento vertical do vidro originado pela deformação do neoprene, representados na figura 29.

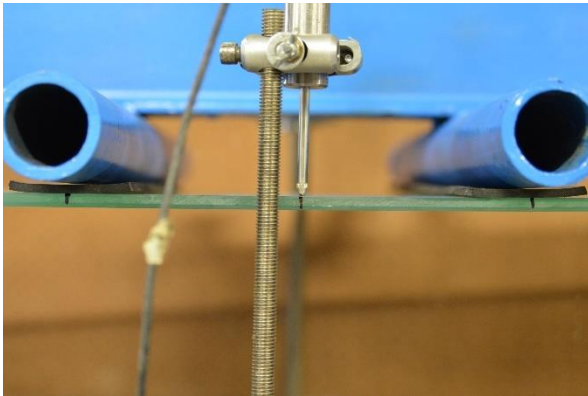


Figura 28 - Esquema de montagem a meio vão.

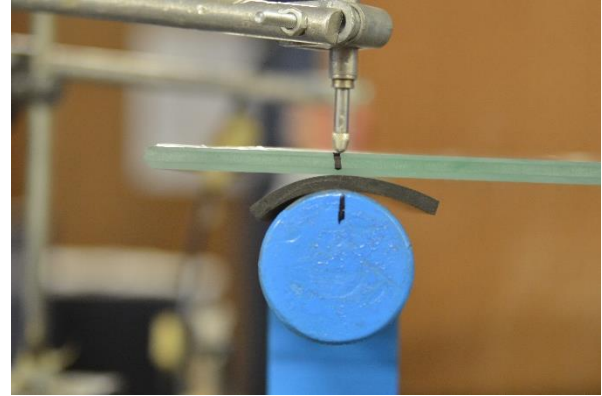


Figura 29 - Esquema de montagem na zona do apoio.

Todos os provetes foram ensaiados até à rotura, de forma a obter o valor da tensão de rotura do vidro consoante a espessura utilizada, e também para permitir, através do padrão de fendilhação na rotura, a identificação do local onde se iniciou a rotura do provete.

Todos os ensaios ocorreram a uma temperatura ambiente dentro dos limites impostos pela norma.

4.2.4. Procedimento experimental

Relativamente ao procedimento experimental houve a necessidade de, numa primeira fase, definir a velocidade de ensaio. A norma estipula que a tensão de flexão no vidro deve aumentar monotonicamente a uma taxa de $2 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2.\text{s}$. De forma a respeitar o procedimento de ensaio, e com vista a permitir o controlo do ensaio no pós-pico, optou-se por realizar o ensaio com controlo de deslocamento. Desta forma, de modo a garantir a taxa de aumento de tensão de flexão definida pela norma, para cada espessura dos provetes de vidro foi necessário fazer corresponder uma velocidade de ensaio em controlo de deslocamento diferente. Considerando a variação da tensão de $1,6 \text{ N/mm}^2.\text{s}$ de forma a reduzir a velocidade de ensaio, foi possível calcular a variação de momento fletor por segundo, para cada espessura de vidro, e com isto definir o valor do incremento da carga P a aplicar por segundo. Com o valor do incremento da carga P a aplicar por segundo, e assumindo comportamento linear elástico, foi possível obter o

incremento de deformação e definir a taxa de deslocamento vertical a aplicar em cada provete, de acordo com o procedimento que se descreve a seguir.

Na figura 30 é possível observar o comportamento de um provete de 6 mm durante o ensaio de flexão, e no momento imediatamente antes da rotura.

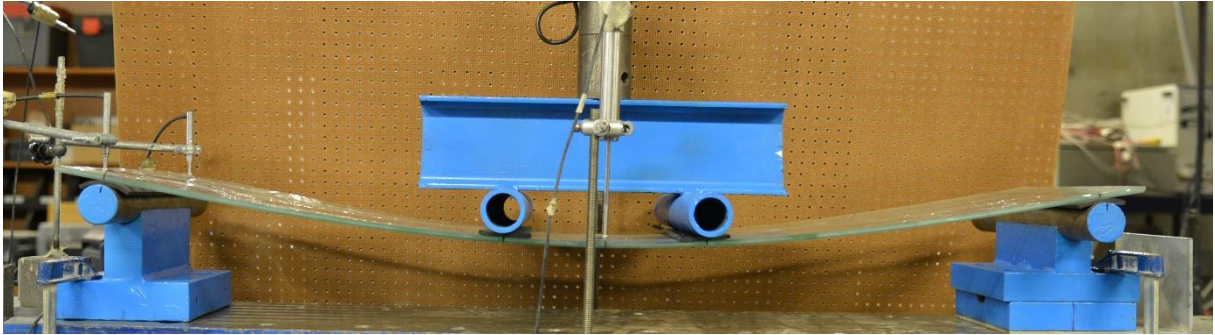


Figura 30 - Ensaio de flexão a decorrer.

Através da expressão (4.1) definida na norma foi possível obter a força máxima expectável para o ensaio, e com isto calcular a deformação máxima a meio vão para cada espessura assumindo comportamento linear elástico.

$$F_{max} = \frac{\sigma_{bB} 2Bh^2}{3(L_s - L_b) + \sigma_{bG}} \quad (4.1)$$

Tendo em conta as tensões máximas expectáveis e o tempo de ensaio previsto, calculou-se a velocidade do ensaio para as diferentes espessuras dos provetes a caracterizar, resultando nos valores indicados na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do ensaio de flexão em quatro pontos.

Espessura (mm)	ΔM (N.mm/s)	ΔP (N/s)	Velocidade de ensaio (mm/s)
6	3456	17,28	0,75
8	6144	30,72	0,56
12	13824	69,12	0,37
15	21600	108	0,3

4.2.5. Resultados experimentais

Tal como foi possível observar durante a realização dos ensaios, o vidro apresenta rotura frágil e é possível identificar, através do padrão de fendilhação após a rotura, qual o ponto a partir do qual se iniciou o processo de fendilhação do vidro, possivelmente o local onde haveria uma imperfeição não perceptível a olho nu e cuja propagação catastrófica originou a rotura. A propagação das fendas ocorreu, em geral, numa direção próxima da dos alinhamentos segundo os quais se aplicaram as cargas a meio vão.

Para o vidro termo-endurecido, e através da análise da figura 31, é perceptível a existência de duas regiões de fendilhação distintas: uma região que inclui o ponto de iniciação da fendilhação, e consequentemente um padrão de fendilhação condicionado pela iniciação das fendas neste ponto comum e a sua propagação até aos bordos do vidro, e uma outra região que fendilha devido aos efeitos secundários das tensões residuais instaladas na secção transversal. Por se tratar de um vidro que foi sujeito a tratamento térmico esta segunda região apresenta uma rotura completa em fragmentos de média dimensão, resultado do desequilíbrio das tensões normais na secção transversal originado pela iniciação do processo de fendilhação na primeira região anteriormente referida.

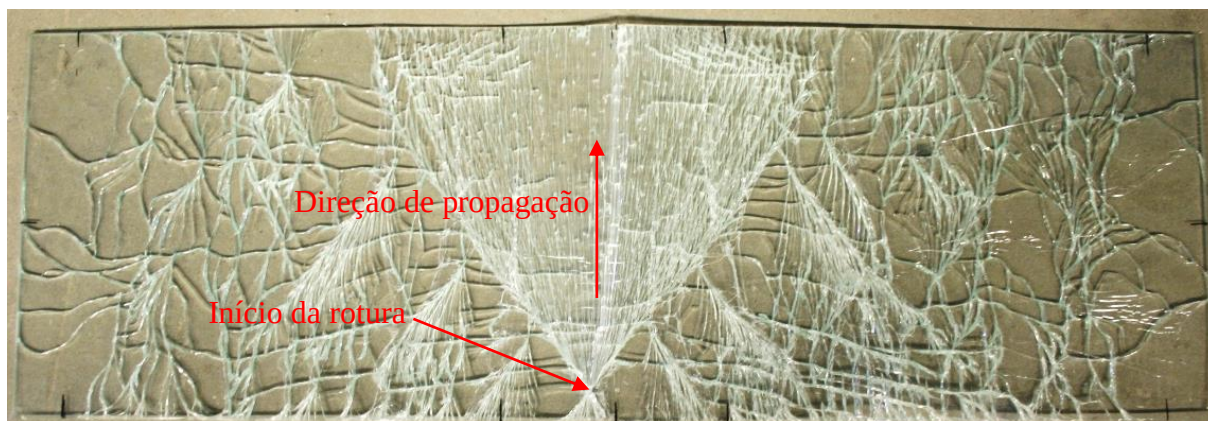


Figura 31 – Padrão de rotura de um provete de vidro termo-endurecido.

No caso do vidro recozido, isto é sem tratamento térmico, e através da análise da figura 32, dada a ausência de tensões internas residuais não se observa a segunda região de fendas referida no caso do vidro termo-endurecido. Isto é, apenas surgem fendas que irradiam a partir do ponto a partir do qual a fendilhação é iniciada (o defeito inicial) em direção aos bordos do provete em forma de leque, permanecendo as restantes regiões do painel de vidro visualmente intactas.



Figura 32 – Padrão de rotura de um provete de vidro recozido.

Os resultados obtidos em termos da resposta força *versus* deslocamento vertical são apresentados na figura 34 e na figura 35. O deslocamento a que ocorreu a rotura é medido através do LVDT interno do atuador, sendo por isso ligeiramente inferior à flecha máxima devido à deformação que ocorre entre os pontos de aplicação da carga, a 100 mm do meio vão (figura 33).

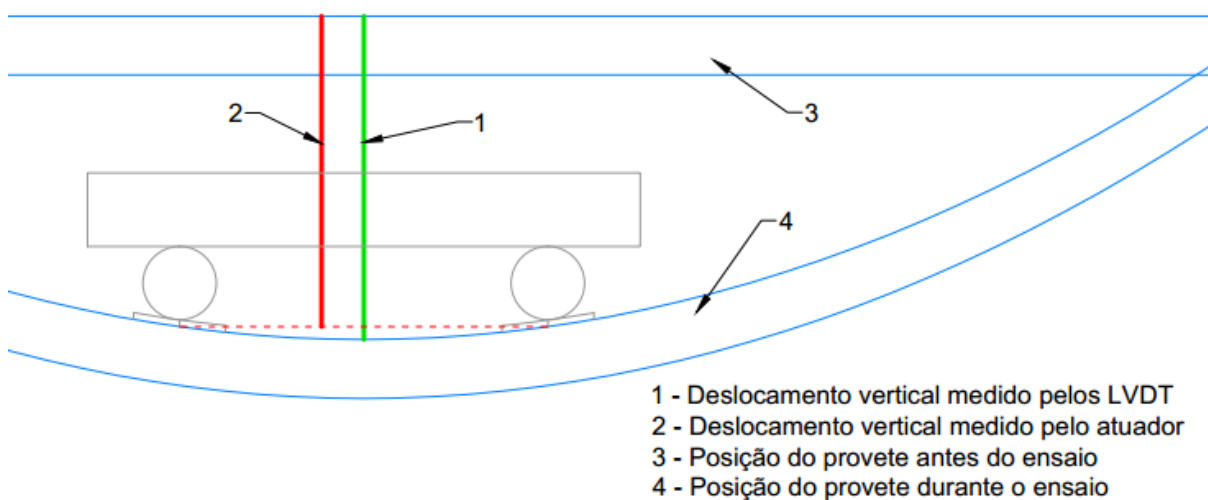


Figura 33 – Esquema do deslocamento medido através dos LVDT e do deslocamento medido através do atuador.

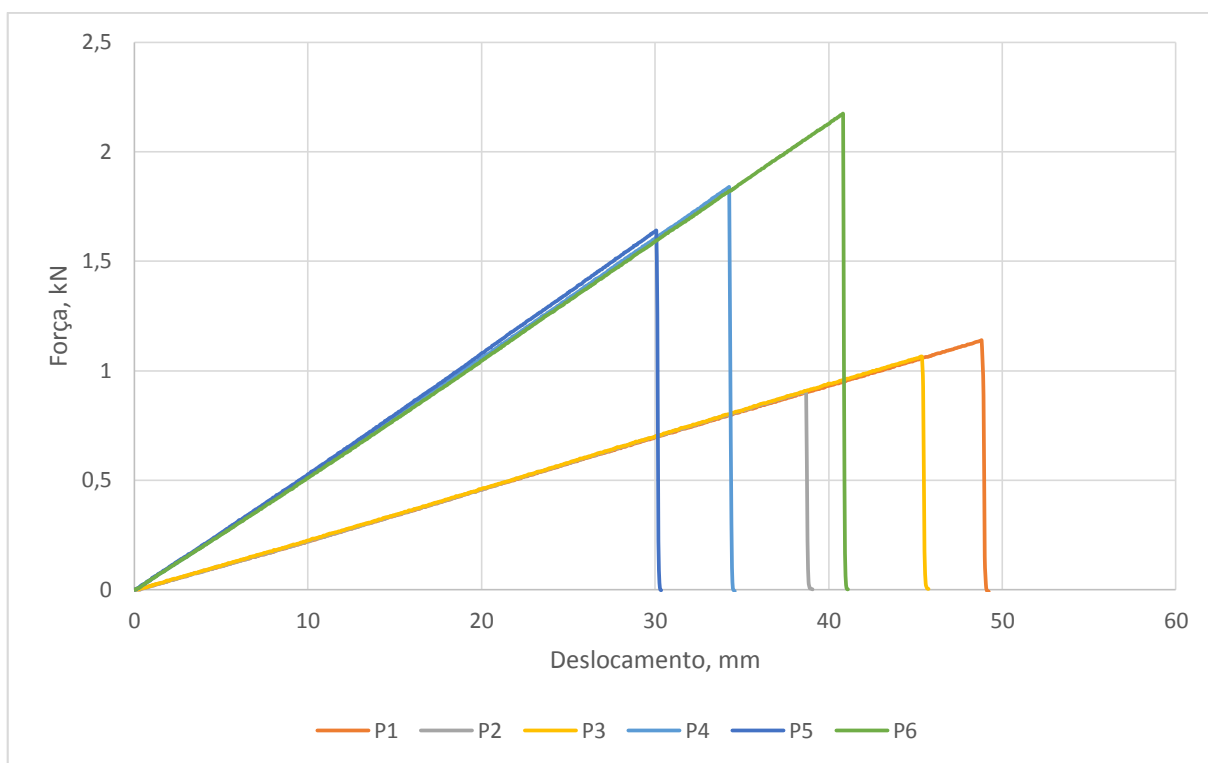


Figura 34 – Respostas força-deslocamento obtidas através do atuador para o vidro termo-endurecido, com as espessuras de 6 mm para os provetes P1, P2 e P3 e 8 mm para os provetes P4, P5 e P6.

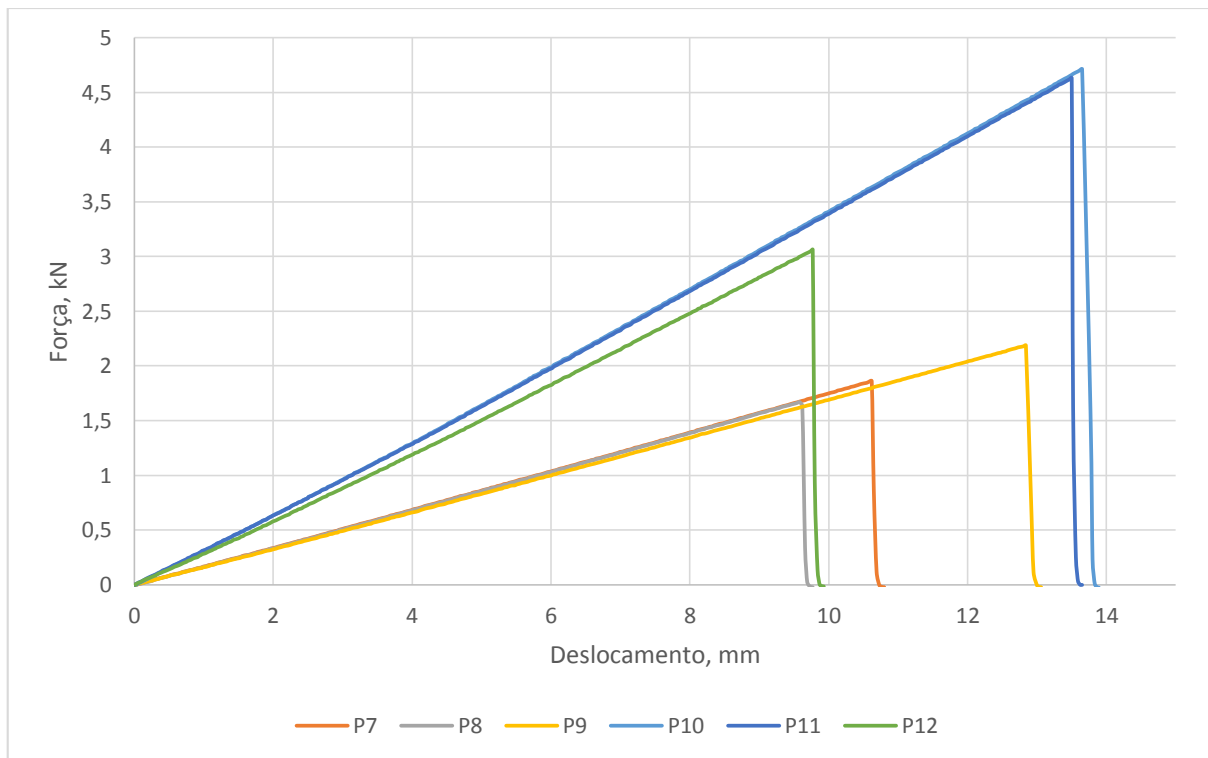


Figura 35 – Respostas força-deslocamento obtidas através do atuador para o vidro recozido, com as espessuras de 12 mm para os provetes P7, P8 e P9 e 15 mm para os provetes P10, P11 e P12

Após obtenção dos dados fornecidos pelo equipamento de ensaio foi feito um processamento de forma a contabilizar, para efeitos de cálculo, todas as ações que foram aplicadas ao longo do ensaio. Para cálculo da flecha máxima foi contabilizada a flecha originada pelo peso próprio do vidro, pela colocação da peça de aplicação de carga constituída pelos dois rolos cilíndricos, e o deslocamento obtido durante o ensaio a meio vão, descontando-se o deslocamento vertical ocorrido no apoio devido à deformação do neoprene.

Os resultados do ensaio de flexão estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de flexão.

Provete	Tempo de ensaio (s)	Carga de rotura (N)	Flecha (mm)
P1	65,11	1212,58	53,97
P2	51,51	977,58	43,83
P3	60,51	1137,58	50,80
P4	61,21	1913,58	37,06
P5	53,71	1714,58	32,50
P6	72,91	2247,58	43,90
P7	28,7	1934,58	10,83
P8	25,9	1742,58	9,72
P9	34,71	2260,58	13,04
P10	45,51	4785,58	13,34
P11	45,01	4704,58	13,31
P12	32,61	3136,58	9,54

Segundo a norma de ensaio, para efeitos de avaliação, apenas os provetes em que a rotura se iniciou dentro da zona do provete compreendida entre os dois rolos cilíndricos que aplicam carga podem ser considerados como válidos. Desta forma, os provetes P2, P4, P9 e P12 foram excluídos para efeitos de cálculo das tensões médias de rotura e do módulo de elasticidade dado que o processo de fendilhação se iniciou e maioritariamente se localizou fora da zona central, como pode ser comprovado pela análise dos padrões de fendilhação obtidos, apresentados no anexo 1.

O cálculo da tensão de rotura em flexão foi feito com recurso à expressão (4.2) definida na norma EN 1288-3.

$$\sigma_{bB} = k \left[F_{max} \frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_{bG} \right] \quad (4.2)$$

Sendo que a componente da tensão de tração que é devida ao peso próprio é dada pela expressão (4.3).

$$\sigma_{bG} = \frac{3\rho g L_s^2}{4h} \quad (4.3)$$

O módulo de elasticidade foi calculado com recurso à expressão (4.4).

$$E = \frac{3F_{max}}{4Bh^4y} \left[\frac{L_s^3}{3} + \frac{L_b^3}{6} + \frac{L_s L_b^2}{2} \right] \quad (4.4)$$

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 8 (provetes com espessuras de 6 mm e de 8 mm) e na tabela 9 (provetes com espessuras de 12 mm e de 15 mm):

Tabela 8 – Tensão de rotura e módulo de elasticidade para o vidro termo-endurecido.

Vidro termo-endurecido	Carga de rotura (N)	Momento (N.mm)	Tensão de rotura (MPa)	E (MPa)
P1	1213	242515	112,28	72502
P3	1138	227515	105,33	71653
Média (6 mm)			108,80	72077
Desvio padrão			3,47	424,55
Coeficiente de variação			3,19%	0,59%
P5	1715	342915	89,30	72859
P6	2248	449515	117,06	71469
Média (8 mm)			103,18	72164
Desvio padrão			13,88	695,01
Coeficiente de variação			13,45%	0,96%
Média total			105,99	72121
Desvio padrão			10,50	577,53
Coeficiente de variação			9,91%	0,80%

Relativamente ao vidro com tratamento térmico é possível verificar que o valor médio da tensão de rotura obtido tanto para o vidro de 6 como para o de 8 mm é muito próxima, pelo que se concluiu que se trata do mesmo tipo de vidro.

Tabela 9 - Tensão de rotura e módulo de elasticidade para o vidro recozido.

Vidro recozido	Carga de rotura (N)	Momento (N.mm)	Tensão de rotura (MPa)	E (MPa)
P7	1935	386915	44,78	73485
P8	1743	348515	40,34	73439
Média (12 mm)			42,56	73462
Desvio padrão			2,22	23,04
Coefficiente de variação			5,22%	0,03%
P10	4786	957115	70,90	77349
P11	4705	940915	69,70	76177
Média (15 mm)			70,30	76763
Desvio padrão			0,60	585,85
Coefficiente de variação			0,85%	0,76%
Média total			56,43	75113
Desvio padrão			13,96	1701,63
Coefficiente de variação			24,75%	2,27%

Relativamente ao vidro sem tratamento térmico é possível verificar que existe uma clara diferença na tensão de rotura do vidro de 12 e 15 mm, o que leva a concluir que se tratam de vidros com uma composição diferente e consequentemente com uma resistência à flexão do vidro de 15 mm superior ao de 12 mm, o que é também demonstrado por um módulo de elasticidade superior.

Pela análise dos resultados, foi possível constatar que os provetes de vidro se dividiam em dois grupos distintos, o que à partida era um dado desconhecido. Os resultados indicaram claramente que os provetes de vidro com espessuras de 6 mm e de 8 mm foram sujeitos a tratamento térmico, podendo ser classificados como vidro termo-endurecido, tendo demonstrado

resistências muito superiores aos provetes com espessuras de 12 mm e de 15 mm, que deste modo se conclui não possuírem tratamento térmico e tratem-se de provetes de vidro recozido.

Os valores característicos de resistência à flexão para os dois tipos de vidro definidos nas normas EN 12150 e EN 1863, e já apresentados no subcapítulo 3.5.7. relativo ao dimensionamento através da pré-norma prEN 16612, são 45 MPa para o vidro recozido e 70 MPa para o vidro termo-endurecido. Tomando estes valores como referência, é possível concluir que os valores médios obtidos experimentalmente para o vidro recozido (56 MPa) são próximos do valor de referência, fazendo uma média entre as duas espessuras de vidro analisadas. Em comparação com o vidro de 12 mm, verifica-se um valor da média abaixo do valor característico. Relativamente ao vidro termo-endurecido, os valores médios obtidos experimentalmente (106 MPa) são consideravelmente superiores aos característicos.

Quanto ao módulo de elasticidade, notou-se uma tendência para um aumento muito ligeiro deste valor com o aumento da espessura, que pode ser justificado pela diminuição da importância do efeito dos defeitos superficiais no comportamento global do painel de vidro com o aumento da espessura. De qualquer modo a diferença observada é pouco expressiva, pelo que se optou por calcular o valor médio do módulo de elasticidade considerando todos os ensaios realizados em todos os tipos de provete. O valor médio do módulo de elasticidade obtido foi 73617 MPa.

4.3. Modelo em consola

4.3.1. Propósito

A utilização de um modelo em consola tem como finalidade fazer um estudo do comportamento do sistema de fixação que pode ser utilizado genericamente em aplicações de vidro em ambiente submerso. Com isto, pretende-se estudar a deformabilidade do sistema e em particular da junta de neoprene, o seu possível descolamento quando sujeito a cargas, o efeito da aplicação de uma tensão de pré-confinamento para fixação do vidro e o efeito da relação entre os vários parâmetros geométricos dos elementos envolvidos no comportamento do sistema de fixação. Adicionalmente, utilizou-se outro material para transferência de esforços, nomeadamente o teflon que possui maior rigidez, de forma a avaliar a alteração do comportamento do sistema de fixação resultante da adoção de um material mais rígido para a zona de junta. Por último, testou-se também a situação em que não é utilizado nenhum material na zona de junta, efetuando-se o contacto direto entre o painel de vidro e os apoios em aço.

4.3.2. Provetes para ensaio

Os provetes fornecidos para ensaio tinham inicialmente a mesma geometria que os provetes do ensaio de flexão, no entanto optou-se por cortar os provetes de vidro recozido de forma a obter um maior número de provetes para ensaio. Quanto aos provetes de vidro termo-endurecido, dada a impossibilidade de os cortar, foram ensaiados com a dimensão original. Deste modo foram ensaiados 2 provetes de 6 mm de espessura e 3 de provetes de 8 mm com as dimensões de 1100 x 360 mm, 6 provetes de 12 mm de espessura e 6 provetes de 15 mm com as dimensões de 550 x 360 mm.

Os provetes utilizados no ensaio em consola foram os definidos na tabela 10.

Tabela 10 - Provetes do ensaio em consola.

Tipo de vidro	Termo-endurecido		Recozido	
Espessura [mm]	6	8	12	15
Provetes	P16	P13	P1	P7
	P17	P14	P2	P8
		P15	P3	P9
			P4	P10
			P5	P11
			P6	P12

Em todos os provetes foi colada uma película transparente sobre a face sujeita a compressão, de forma a controlar a possível projecção de estilhaços no instante da rotura e permitir a observação do padrão de fendilhação de cada provete após o ensaio.

4.3.3. Equipamento utilizado e preparação dos ensaios

O equipamento utilizado para este ensaio e que está esquematizado na figura 36 incluiu um atuador hidráulico (1) colocado verticalmente no pórtico E2-2 (11) existente no laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da Universidade do Minho (LEST). O atuador utilizado tem a capacidade de aplicar força até ao valor máximo de 50 kN, e de medir o deslocamento imposto com uma precisão de 0,01 mm.

O sistema de apoio concebido encontra-se representado na figura 36 e teve como intuito confinar entre duas chapas metálicas (3), com largura igual à dos provetes, o vidro (2) e o neoprene, permitindo manter paralelas as faces das duas chapas durante o ensaio. De modo a garantir uma rigidez suficiente do sistema de apoio e impedir o deslocamento das placas de aço durante o ensaio, de um dos lados do sistema de apoio foi colocado um cubo metálico (6) fixado por parafusos (9) ao pórtico (11). Do lado oposto foi colocada uma viga metálica (7) que foi fixada horizontal e paralelamente ao cubo através de parafusos metálicos, e verticalmente através de uma cantoneira (8) ao pórtico.

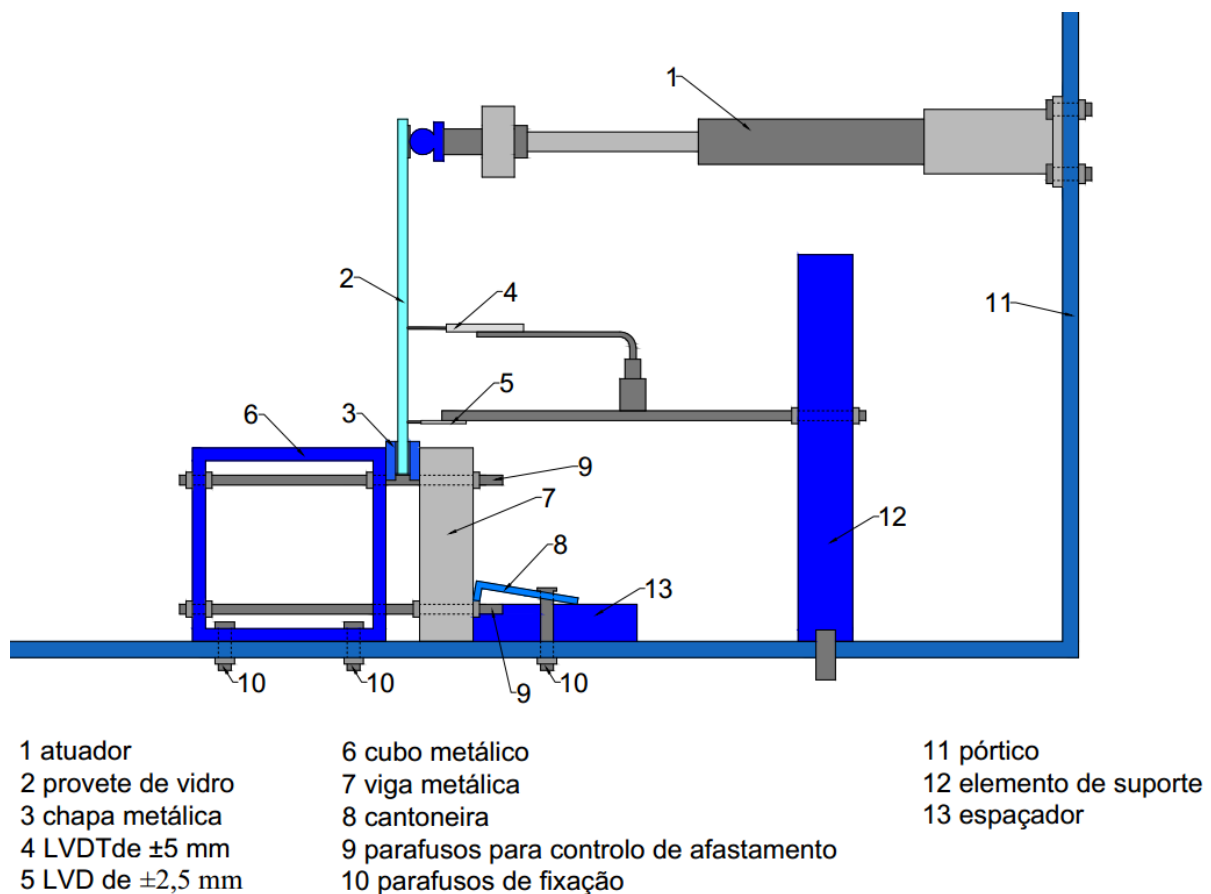


Figura 36 – Esquema de montagem do ensaio em consola.

Um dos objetivos mais importantes do ensaio era avaliar a influência da pressão de confinamento exercida sobre a junta e o vidro, pelo que o sistema concebido teria que ser suficientemente flexível para permitir o ensaio de diferentes pressões de confinamento. No sistema concebido, o controlo da pressão de confinamento foi realizado através do aperto dos quatro parafusos identificados na figura 36 pelo número 9, que simultaneamente garantiam um afastamento uniforme entre as placas.

O carregamento é transmitido ao painel de vidro por um cilindro metálico com 40 mm de diâmetro, que aplica uma força a 480 ou 490 mm de distância do sistema de apoio, dependendo do comprimento de entrega. De forma a evitar o contacto entre o cilindro metálico e o vidro, foi colocado borracha de neoprene de 3,7 mm de espessura a toda a largura do cilindro.

De forma a medir o deslocamento do painel de vidro junto ao apoio foram utilizados dois LVDT (5) com um campo de medição entre os $\pm 2,5$ mm.

Para medir a flecha máxima, foi utilizado o sistema interno de medição do atuador.

Para uma melhor calibração e comparação com o modelo numérico que se descreve no capítulo subsequente, foi utilizado um LVDT com um campo de medição entre os ± 5 mm entre os LVDT colocados junto ao apoio e o ponto de aplicação da carga. O esquema de ensaio está representado na figura 37, onde é possível observar todos os equipamentos utilizados para o ensaio.

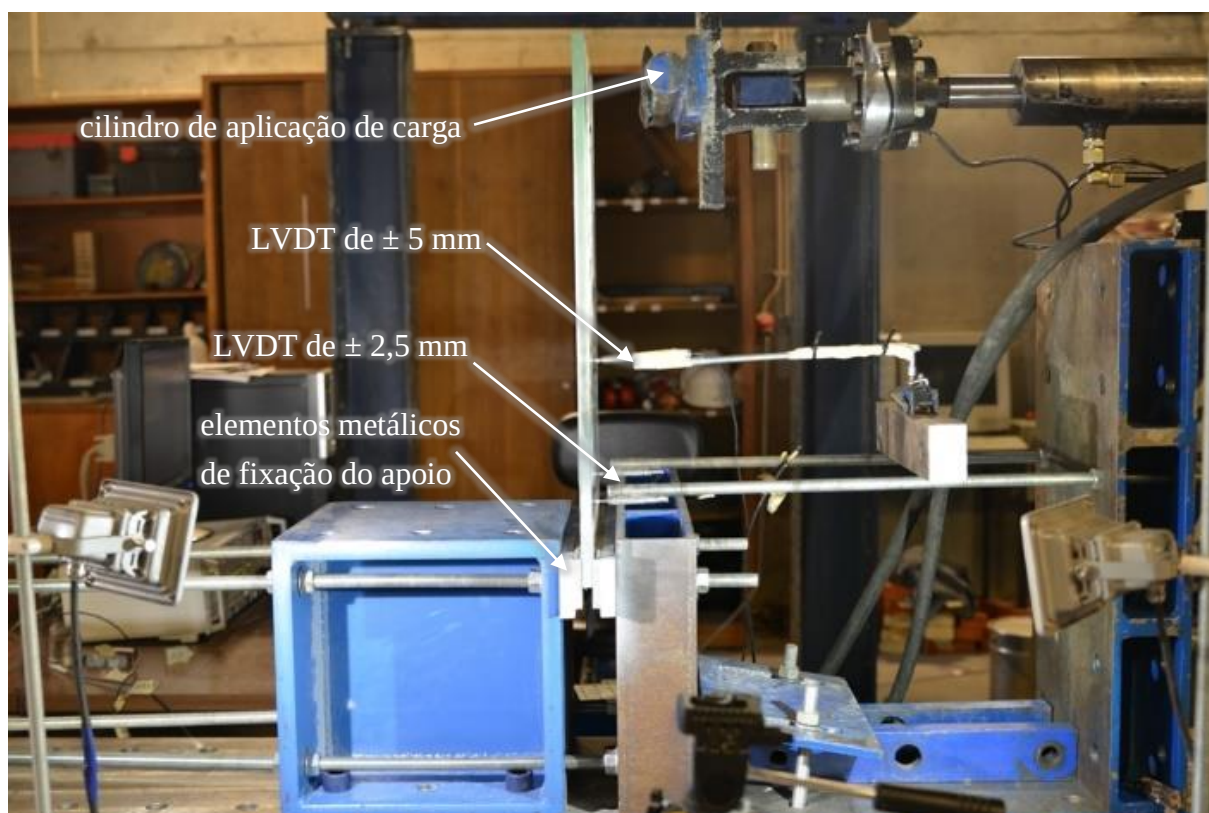


Figura 37 – Esquema de ensaio em consola.

Complementarmente, e dado a impossibilidade de colocar sensores para medir as deformações na zona do apoio, procedeu-se à sua monitorização através de análise de fotografia digital, como demonstrado na figura 38, utilizando a técnica de DIC (*Digital Image Correlation*).

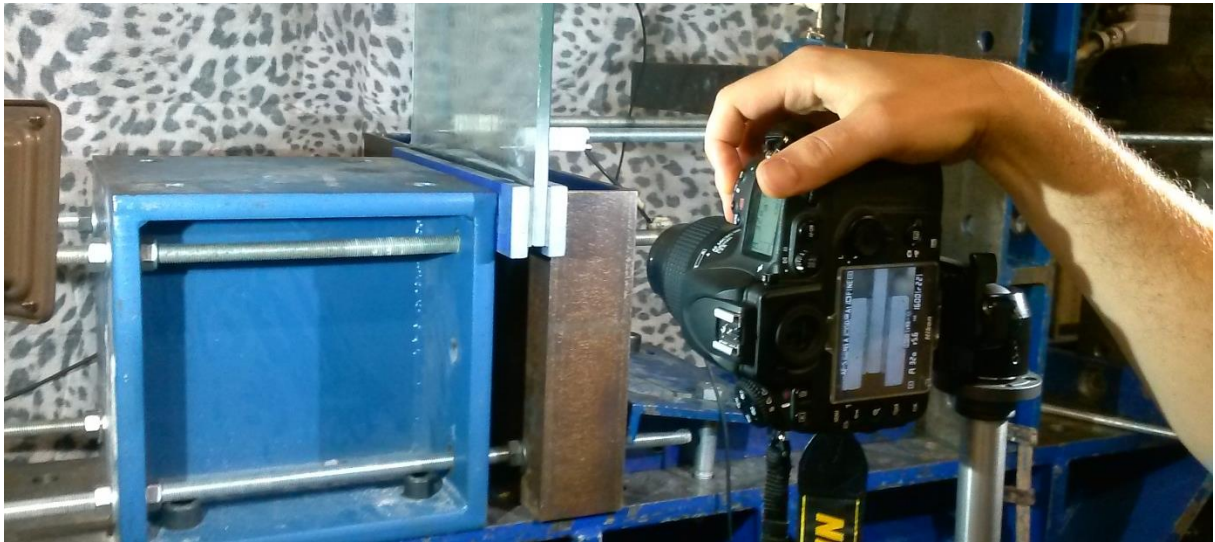


Figura 38 - Equipamento fotográfico para análise da deformação ao nível do sistema de fixação.

Através da utilização de fotografia digital para monitorização do comportamento do apoio e da utilização de um *software* para correlação digital de imagem, foi possível avaliar a influência dos parâmetros adotados na rigidez rotacional do apoio.

Para processamento de imagem através de DIC utilizou-se o *software* NCORR que é um *software open source* desenvolvido em ambiente MATLAB® e que se apresenta na figura 39.

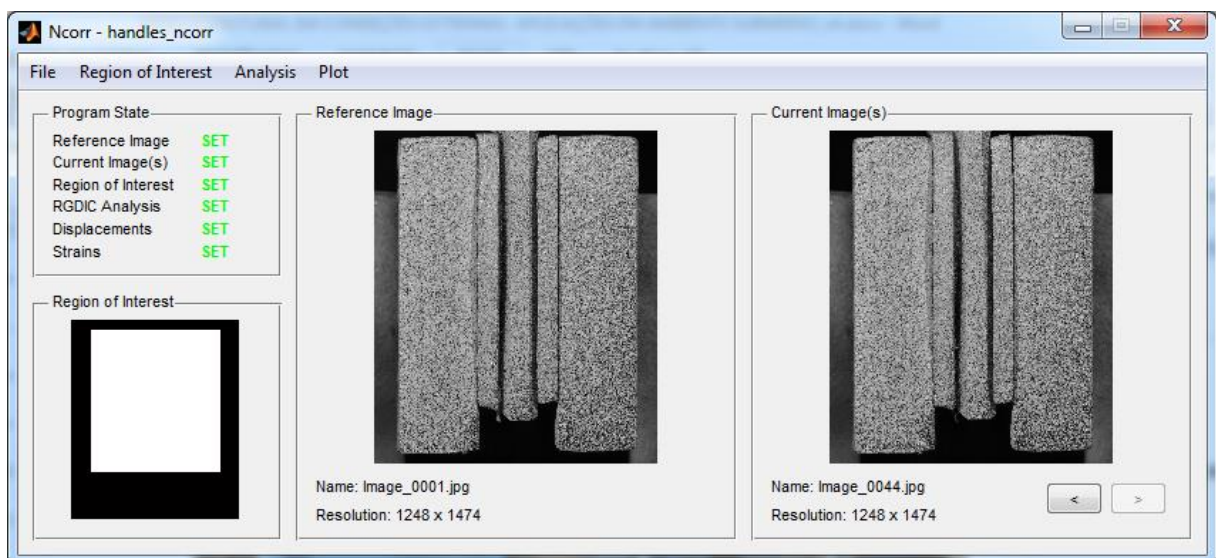


Figura 39 – Interface do *software* NCORR.

Para o pós-processamento utilizou-se o *software* NCORR_POST que tem as mesmas bases de funcionamento do software de processamento e que se apresenta na figura 40.

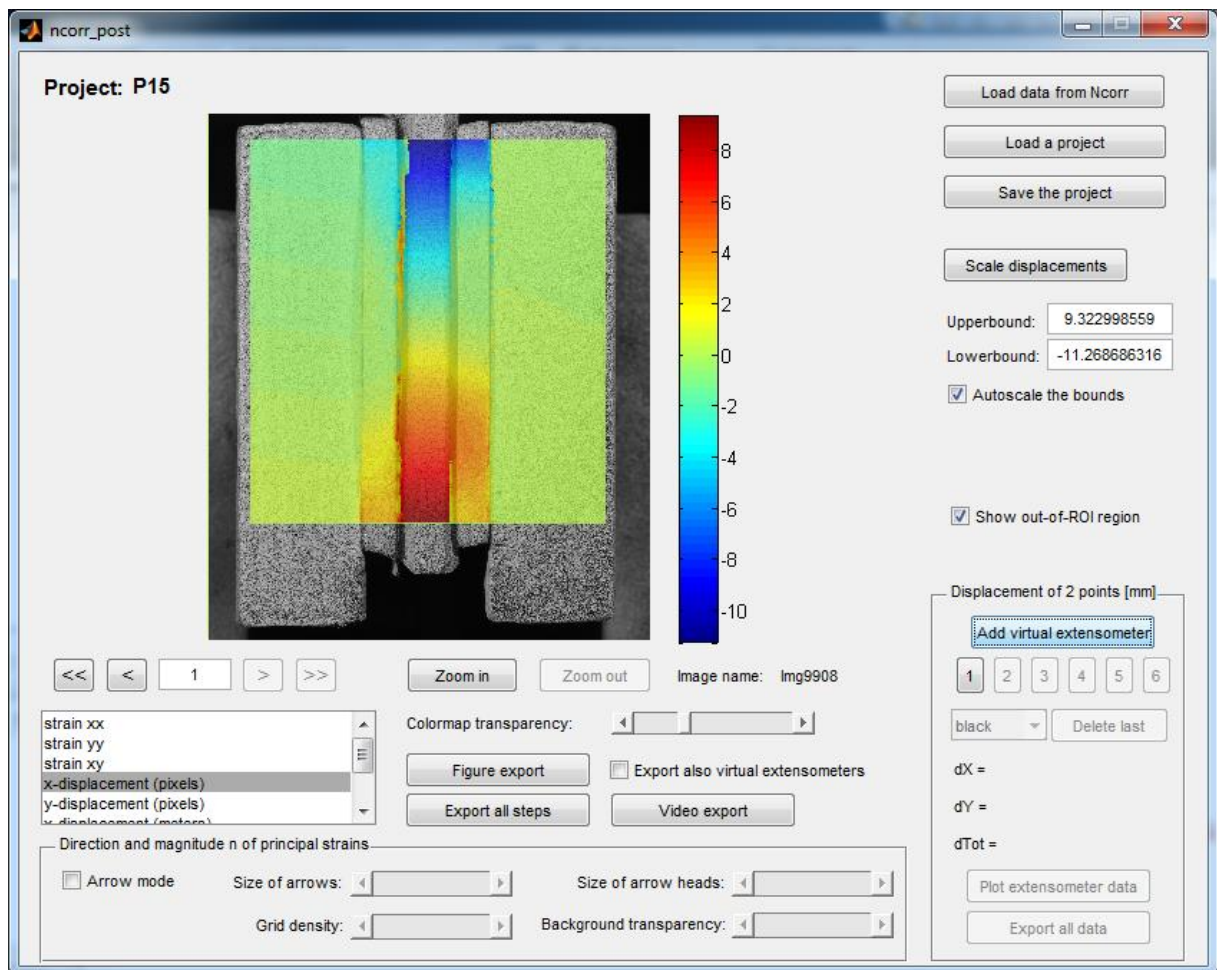


Figura 40 – Interface do *software* de pós processamento NCORR_POST.

A utilização do DIC permite, entre outros, determinar o deslocamento ocorrido em cada ponto para cada fotografia tirada ao longo do ensaio, relativamente à fotografia inicial relativa ao estado indeformado. Dado que a duração dos ensaios é de apenas alguns minutos optou-se por fazer um estudo com base em fotografias tiradas a cada 20 segundos, e em sincronia com o ensaio.

4.3.4. Procedimento experimental

Para a definição do procedimento experimental começou-se por definir a velocidade de ensaio. De modo a obter maior estabilidade durante a realização do ensaio optou-se por definir o procedimento de ensaio em controlo de deslocamento, adotando-se uma velocidade de deslocamento do atuador constante e igual a 50 $\mu\text{m/s}$. Este valor baseou-se na experiência adquirida durante a realização dos ensaios de flexão. Considerando que o objetivo principal deste estudo é o de avaliar a influência de vários parâmetros do sistema de fixação e não o modo

de rotura do painel de vidro em particular, optou-se por fixar um valor da velocidade de ensaio igual para todos os provetes de forma a não incluir mais uma variável no processo de análise.

Por forma a estruturar o estudo experimental optou-se por definir um modelo base, a partir do qual se procedeu à alteração dos vários parâmetros em estudo, de forma sistemática. Os parâmetros analisados foram a espessura do painel de vidro, o comprimento de entrega do vidro no sistema de fixação, o número de camadas de neoprene na zona de junta e o nível de pré-compressão aplicada nos elementos metálicos de fixação. A figura 41 representa o esquema da zona de fixação com a identificação dos parâmetros analisados nos ensaios.

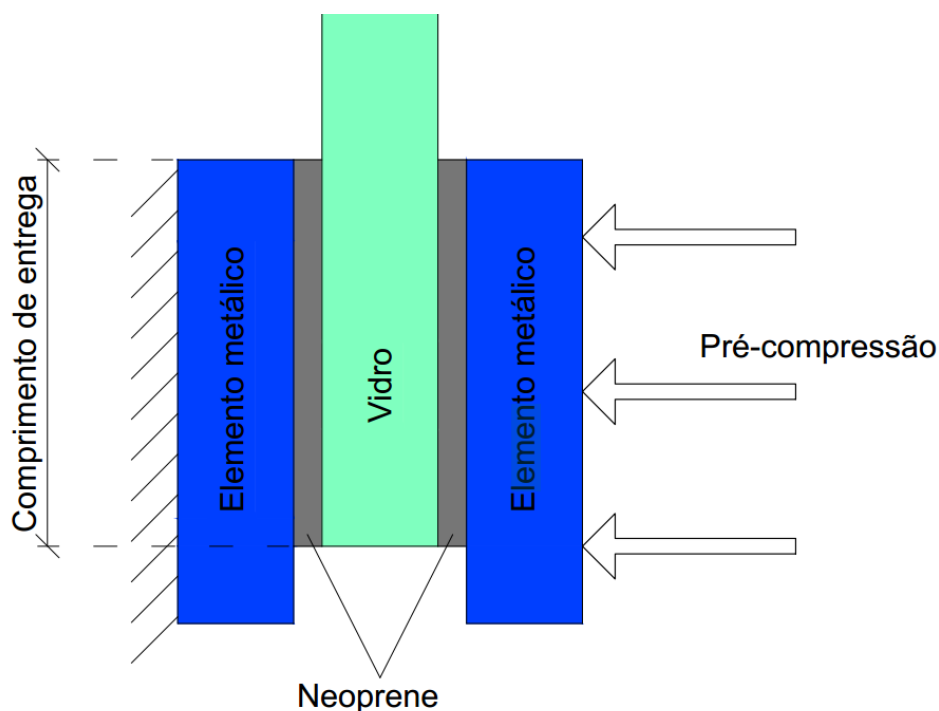


Figura 41 – Esquema da zona de fixação e identificação dos parâmetros que influenciam o comportamento do apoio.

No decurso do programa experimental alguns provetes não atingiram a rotura, tendo-se interrompido o ensaio por rotação excessiva do apoio, facto comprovado pela análise da figura 42 e da figura 43. Assumindo que o comportamento do vidro é linear elástico, optou-se por voltar a ensaiar esses provetes e deste modo aumentar o número de condições de apoio diferentes. Foi possível ainda testar a utilização do teflon como material de contacto na zona da junta, que se trata de um material mais rígido e menos deformável. Por último, optou-se ainda por testar a configuração de apoio em que se omitiu o material na zona de junta, confinando-se o vidro sem material para transferência de esforços e dando-se o contacto diretamente do painel de vidro com os elementos de fixação em aço. Deste modo verificou-se o comportamento estrutural do vidro com um apoio totalmente rígido.



Figura 42 – Rotação excessiva do provete sem ocorrer rotura.



Figura 43 – Rotação excessiva do provete na zona da fixação.

Para a aplicação da pré-compressão ao nível do apoio, controlado através do deslocamento imposto através dos 4 parafusos referenciados anteriormente, definiu-se valores de pré-compressão em percentagem que correspondem à deformação imposta relativamente à espessura inicial dos elementos de contacto, neste caso do neoprene. Como exemplo, uma configuração com uma tira de neoprene de 3,71 mm em cada um dos lados do vidro e sujeito a uma pré-compressão de 10% implica a imposição de uma pré-deformação inicial no aparelho de fixação de 0,742 mm.

Tendo em conta a rigidez do teflon, não foi possível aplicar pré-compressão no material de forma controlada, tendo sido confinado até uma força de aperto elevada dos parafusos, considerando como termo de comparação a experiência com os elementos de neoprene.

Considerando que os provetes que foram ensaiados múltiplas vezes podem sofrer uma redução do valor da tensão resistente, sempre que se atinjam valores da tensão próximos do valor de rotura, optou-se por identificar estes provetes com a denominação de “Px_2” no caso de terem sido ensaiados uma segunda vez e com a denominação de “Px_3” no caso de terem sido ensaiados uma terceira vez, sendo x o número do provete.

Desta forma, na tabela 11 e na tabela 12 identificam-se todos os provetes e respetivas condições de ensaio adotadas.

Tabela 11 – Condições definidas para o apoio em cada provete de vidro recozido.

○ Espessura de 12 mm				
Provette	Comprimento de entrega [mm]	Material utilizado	Espessura [mm]	Pré-compressão [%]
P1	50	Neoprene	3,71	10
P2	50	Neoprene	3,71	5
P3	50	Neoprene	7,42	10
P4	50	Neoprene	7,42	5
P5	30	Neoprene	7,42	10
P6	30	Neoprene	3,71	10
P5_2	50	Teflon	4,15	-
P6_2	50	-		
○ Espessura de 15 mm				
Provette	Comprimento de entrega [mm]	Material utilizado	Espessura [mm]	Pré-compressão [%]
P7	50	Neoprene	3,71	10
P8	50	Neoprene	3,71	5
P9	50	Neoprene	7,42	10
P10	50	Neoprene	7,42	5
P11	30	Neoprene	7,42	10
P12	30	Neoprene	3,71	10
P9_2	50	Neoprene	7,42	15
P9_3	50	Teflon	4,15	-
P11_2	50	-		

Tabela 12 - Condições definidas para o apoio em cada provete de vidro termo-endurecido.

○ Espessura de 8 mm				
Proвете	Comprimento de entrega [mm]	Material utilizado	Espessura [mm]	Pré-compressão [%]
P13	50	Neoprene	7,42	10
P14	50	Teflon	4,15	-
P15	50	Neoprene	3,71	10
P13_2	50	Teflon	4,15	-
○ Espessura de 6 mm				
Proвете	Comprimento de entrega [mm]	Material utilizado	Espessura [mm]	Pré-compressão [%]
P16	50	Neoprene	7,42	10
P17	50	Teflon	4,15	-

4.3.5. Resultados experimentais

Por se tratar de um ensaio em consola, a região na qual as tensões normais na secção transversal do painel de vidro são máximas localiza-se na zona onde o painel de vidro contacta com a face superior dos elementos metálicos de fixação, sendo esta a zona onde mais provavelmente se inicia a rotura do provete (figura 44). O padrão de fendilhação obtido para cada um dos ensaios realizados pode ser consultado no anexo 2.

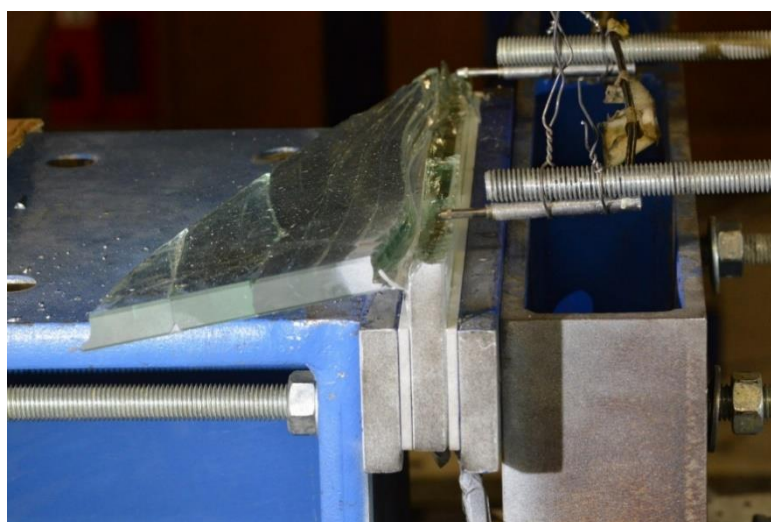


Figura 44 – Local de rotura dos provetes no ensaio em consola.

Os resultados obtidos nos ensaios em consola em termos de carga de rotura e flecha obtida no instante da rotura encontram-se apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do ensaio em consola.

Provete	Tempo de ensaio (s)	Carga de rotura (N)	Deslocamento no atuador (mm)
P1	361,78	954	18,09
P2	591,93	945	29,59
P3	653,35	808	32,65
P4	873,2	789	43,66
P5	1200,37	Não atingiu a rotura	60,01
P6	1855,73	Não atingiu a rotura	92,78
P5_2	250,15	982	12,5
P6_2	191,14	783	9,57
P7	716,06	1521	35,79
P8	1167,37	1572	58,36
P9	250,15	Não atingiu a rotura	72,47
P10		Não ensaiado	
P11	1200,57	Não atingiu a rotura	60,02
P12	1944,85	Não atingiu a rotura	97,23
P9_2	1491,74	Não atingiu a rotura	74,58
P9_3	178,34	1141	8,91
P11_2	222,05	1423	11,1
P13	1965,15	Não atingiu a rotura	98,23
P14	782,98	992	39,13
P15	863,1	927	43,15
P13_2	807,48	1035	40,36
P16	1153,37	512	57,67
P17	250,15	484	41,25

Após a análise da resposta experimental do provete P9 optou-se por não ensaiar o provete P10 por se tratar de uma configuração ainda mais flexível que a do provete P9, que deste modo

resultaria numa resposta ainda mais flexível e que terminaria por excesso de rotação ao nível do sistema de fixação.

Respostas força-deslocamento

Os resultados obtidos em termos de resposta força-deslocamento são apresentados nas figuras 45, 46, 47 e 48 para as diferentes espessuras de vidro ensaiadas. O deslocamento a que ocorreu a rotura é medido através do LVDT interno do atuador.

Os ensaios são caracterizados, em geral, por uma resposta força-deslocamento em que, após um aumento da força proporcional ao aumento do deslocamento, ocorre um decréscimo gradual do incremento de força observado à medida que o deslocamento continua a aumentar, evidenciando um comportamento não linear elástico do sistema de fixação. Este efeito, que é mais evidente no caso dos provetes em que não se atinge a rotura, está associado à perda de rigidez rotacional do apoio, originada pela perda de contacto nas zonas da junta entre o neoprene e o vidro e entre o neoprene e o elemento metálico. Numa fase inicial do ensaio, a área de contacto da junta é máxima, verificando-se um aumento significativo da força à medida que se aplica o deslocamento. No decorrer do ensaio, devido à rotação do vidro e à diminuição da área de contacto da junta, verifica-se uma diminuição do incremento da força exercida à medida que se aplica o deslocamento. Este efeito será novamente analisado posteriormente, aquando da análise da deformação do sistema de fixação recorrendo à correlação digital de imagem.

Na figura 45 apresentam-se as respostas força-deslocamento obtidas para os provetes de vidro com 12 mm de espessura.

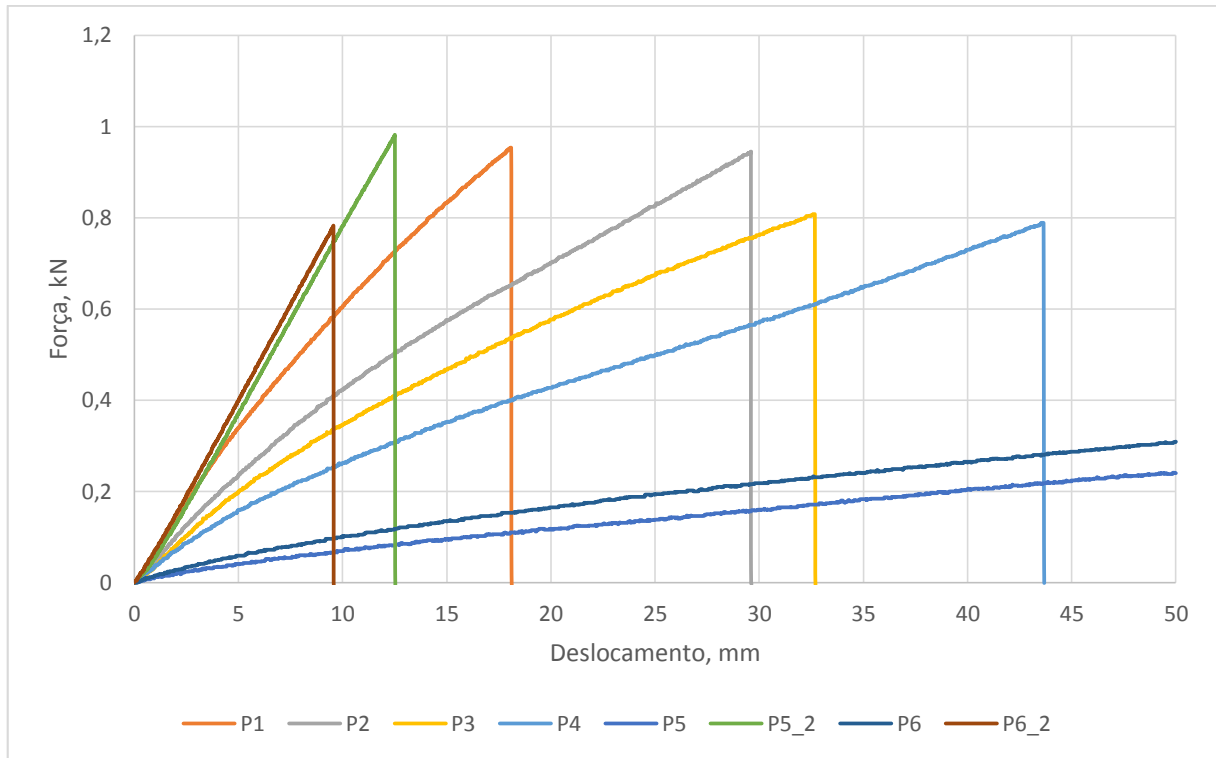


Figura 45 – Respostas força-deslocamento para os provetes de 12 mm.

○ Variação da espessura de neoprene

Para os provetes de 12 mm é perceptível, pela análise da figura 45, que para um aumento da espessura de neoprene, para a mesma força, a deformação obtida é maior, pelo que um aumento da espessura origina uma maior flexibilidade do apoio. Esta observação é comprovada pela comparação entre as respostas obtidas para os provetes P1 e P3, P2 e P4, e para os provetes P5 e P6. Com estas comparações foi possível verificar que, mantendo os restantes parâmetros constantes e variando a espessura de neoprene entre 3,71 mm (P1, P2 e P6) e 7,42 mm (P3, P4 e P5), se obtém a mesma conclusão para as três comparações. Na comparação entre os provetes P1 e P3 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma pré-compressão de 10%. Na comparação entre os provetes P2 e P4 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma pré-compressão de 5%. Na comparação entre os provetes P5 e P6 adotou-se um comprimento de entrega de 30 mm e uma pré-compressão de 10%.

○ Variação da pré-compressão

Relativamente ao nível de pré-compressão aplicada, e através da análise da figura 45, é perceptível que para um nível de pré-compressão menor se obtêm maiores deformações, para a mesma força aplicada. Esta observação pode ser verificada comparando as respostas obtidas para os provetes P1 e P2 e os provetes P3 e P4. Com estas comparações foi possível verificar

que, mantendo os restantes parâmetros iguais e variando entre estes a pré-compressão aplicada entre 10% (P1 e P3) e 5% (P2 e P4), se obteve a mesma conclusão para as duas comparações. Na comparação dos provetes P1 e P2 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma espessura de neoprene de 3,71 mm. Na comparação dos provetes P3 e P4 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma espessura de neoprene de 7,42 mm.

- Variação do comprimento de entrega

Relativamente ao comprimento de entrega, sobressai da análise do gráfico da figura 45 o facto de um comprimento de entrega de 50 mm ter resultado na rotura dos provetes, enquanto que para os provetes com comprimentos de entrega de 30 mm não foi possível atingir a rotura. Esta observação pode ser verificada comparando as respostas obtidas para os provetes P1 e P6 e para os provetes P3 e P5. Com estas comparações foi possível verificar que, mantendo os restantes parâmetros iguais e variando entre estes o comprimento de entrega entre 50 mm (P1 e P3) e 30 mm (P5 e P6), se obteve a mesma conclusão para as duas comparações. Na comparação dos provetes P1 e P6 adotou-se uma espessura de neoprene de 3,71 mm e uma pré-compressão de 10%. Na comparação dos provetes P3 e P5 adotou-se uma espessura de neoprene de 7,42 mm e uma pré-compressão de 10%. É, deste modo, possível verificar que para um comprimento de entrega menor a rigidez do apoio é também menor, o que origina uma maior deformação ou um menor valor de carga para a mesma deformação.

- Utilização de teflon

A utilização de teflon em vez de neoprene, por se tratar de um material mais rígido, resultou em níveis de deformação claramente menores comparativamente com qualquer uma das configurações em que se utilizou neoprene.

- Não utilização de um material para a transferência de esforços

A não utilização de um material para transferência de esforços, estando o vidro em contacto direto com os elementos metálicos, originou uma resposta força-deslocamento muito semelhante à que se obteve com a utilização de teflon. No entanto, sendo o aço um material extremamente duro e pouco deformável, e sendo o vidro um material frágil, a acomodação de tensões na zona de contacto é mais difícil, resultando em concentrações de tensões mais elevadas que provocam a rotura do vidro para um valor de carga inferior.

Na figura 46 apresentam-se as respostas força-deslocamento obtidas para os provetes de vidro com 15 mm de espessura.

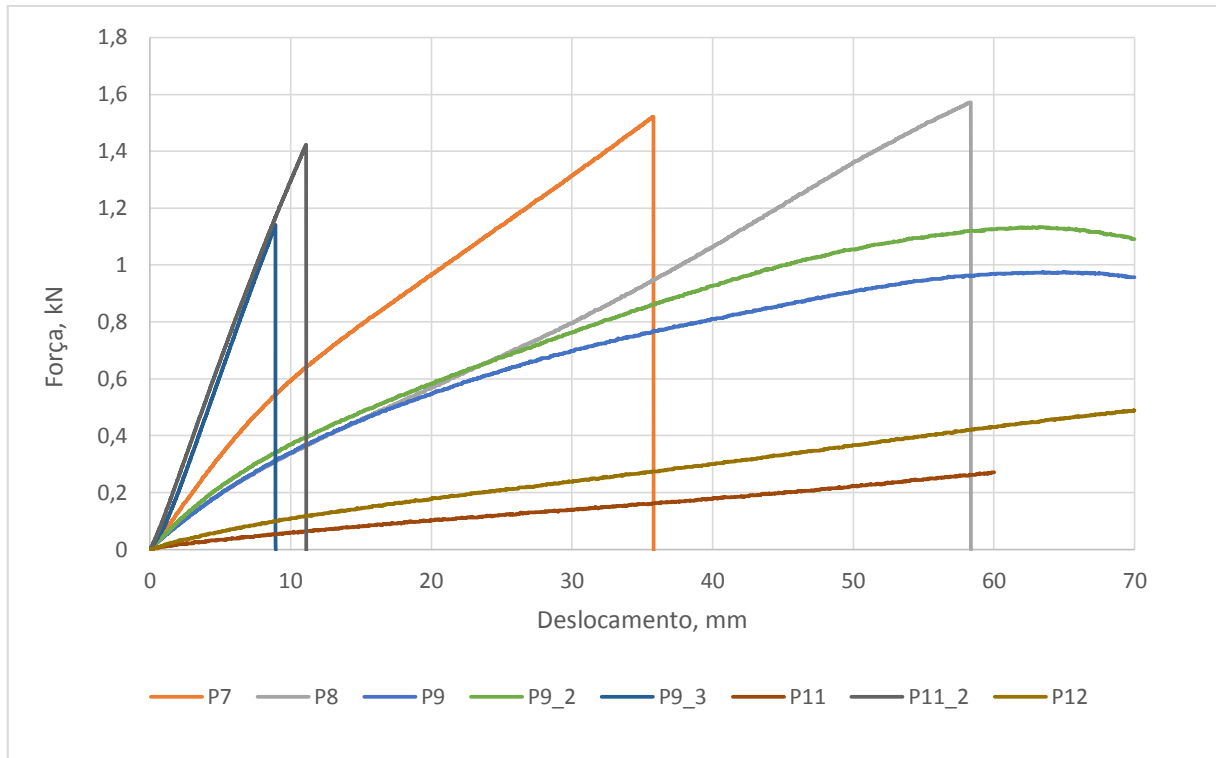


Figura 46 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 15 mm.

De forma semelhante ao estudado para o vidro de 12 mm, dos ensaios com provetes de vidro de 15 mm é possível retirar, em geral, conclusões semelhantes.

- Variação da espessura de neoprene

Relativamente à variação da espessura de neoprene, o mesmo efeito é novamente verificado comparando as respostas força-deslocamento dos provetes P7 e P9 e dos provetes P11 e P12. Com estas comparações foi possível verificar que, mantendo os restantes parâmetros iguais e variando entre estes a espessura de neoprene entre 3,71 mm (P7 e P12) e 7,42 mm (P9 e P11), se obteve a mesma conclusão para as duas comparações. Na comparação dos provetes P7 e P9 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma pré-compressão de 10%. Na comparação dos provetes P11 e P12 adotou-se um comprimento de entrega de 30 mm e uma pré-compressão de 10%.

- Variação da pré-compressão

O efeito da pré-compressão no comportamento do sistema de fixação é revelado pela comparação das respostas força-deslocamento obtidas para os provetes P8 e P7, variando entre estes o nível de pré-compressão entre 5% e 10%, e as obtidas para os provetes P9 e P9_2, variando entre estes o nível de pré-compressão entre 10% e 15%, mantendo os restantes

parâmetros iguais. Com estas comparações obteve-se a mesma conclusão para as duas comparações. Na comparação dos provetes P8 e P7 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma espessura de neoprene de 3,71 mm. Na comparação dos provetes P9 e P9_2 adotou-se um comprimento de entrega de 50 mm e uma espessura de neoprene de 7,42 mm.

- Variação do comprimento de entrega

O efeito do comprimento de entrega no desempenho do sistema de fixação é demonstrado pela comparação das respostas força-deslocamento obtidas para os provetes P7 e P12, e das respostas obtidas para os provetes P9 e P11. Com estas comparações foi possível verificar que mantendo os restantes parâmetros iguais e variando entre estes o comprimento de entrega entre 50 mm (P7 e P9) e 30 mm (P11 e P12), verificou-se a mesma conclusão para as duas comparações. Na comparação dos provetes P7 e P12 adotou-se uma espessura de neoprene de 3,71 mm e uma pré-compressão de 10%. Na comparação dos provetes P9 e P11 adotou-se uma espessura de neoprene de 7,42 mm e uma pré-compressão de 10%.

- Utilização de teflon

De forma semelhante ao ocorrido com os provetes de 12 mm, a utilização de teflon para o elemento de junta originou uma resposta força-deslocamento mais rígida, ou seja, para o mesmo valor de carga obtiveram-se deformações menores.

- Não utilização de um material para a transferência de esforços

A não utilização de material para acomodação de tensões ao nível da junta, de forma semelhante ao ocorrido nos provetes de 12 mm, resultou numa resposta força-deformação semelhante à que se obteve com a utilização de teflon. No entanto a rotura ocorreu para uma carga superior à que se verificou com a utilização do teflon, contrariamente ao previsto e ao obtido para o caso dos provetes de 12 mm. Provavelmente a reutilização do provete P9 pela terceira vez no ensaio com teflon, tendo anteriormente atingido nos ensaios P9 e P9_2 valores próximos da carga de rotura, poderá ter sido condicionada por uma danificação da superfície do vidro, nomeadamente a abertura das micro fendas na superfície do vidro, que resultou numa diminuição da sua resistência à tração aparente durante este último ensaio, no qual se atingiu a rotura.

Na figura 47 apresentam-se as respostas força-deslocamento obtidas para os provetes de vidro com 8 mm de espessura.

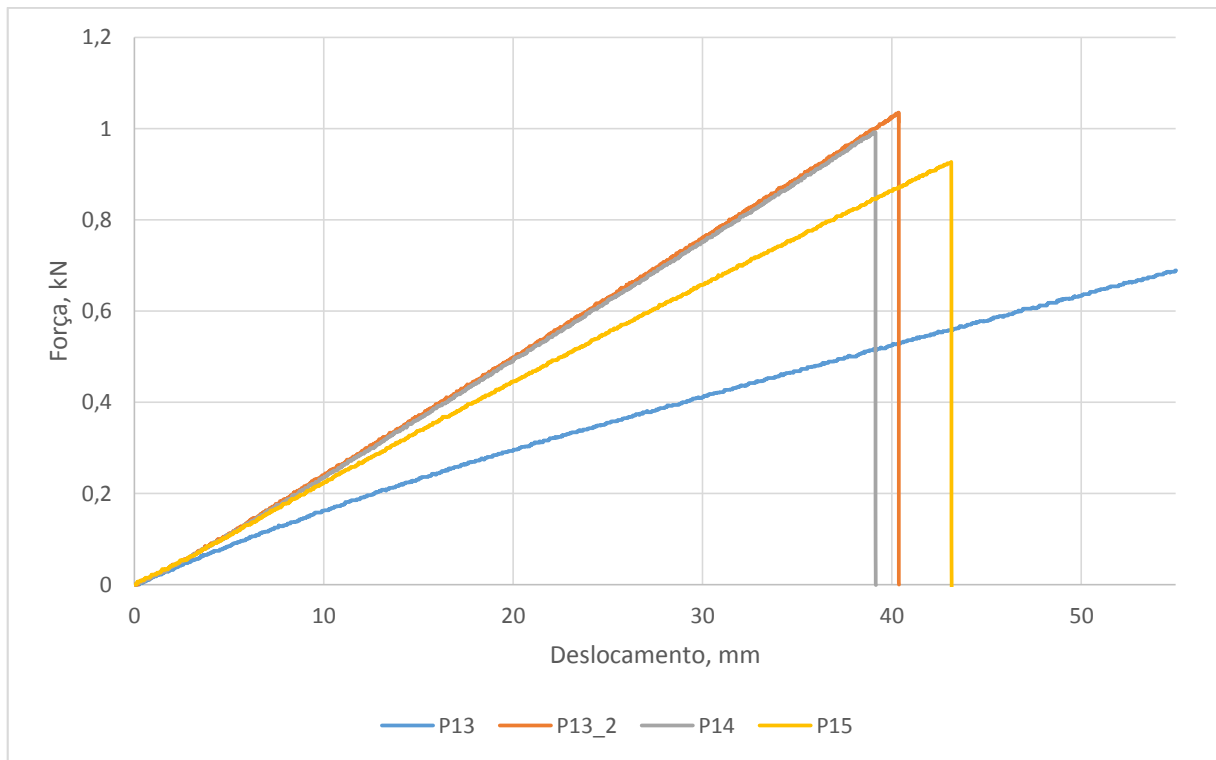


Figura 47 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 8 mm.

Relativamente aos ensaios com vidro termo-endurecido de 8 mm, novamente se verifica que, para uma espessura maior de neoprene na zona de contacto, não ocorre a rotura do provete de vidro (P13), enquanto que para uma espessura inferior ocorre a rotura (P15), de forma semelhante ao já ocorrido nos ensaios com espessuras superiores de vidro.

Também de forma semelhante ao já comprovado anteriormente para os provetes de maior espessura, a utilização de teflon em vez de neoprene na zona de contacto resulta numa menor deformabilidade do sistema de fixação (P14 e P13_2), revelada pelos níveis de deformação menor registados para a mesma força quando comparado com a situação em que se recorre ao neoprene como material para os elementos de contacto (P13 e P15).

Por se ter efetuado apenas um ensaio com teflon para cada uma das espessuras de vidro estudadas, pretendeu-se esclarecer a coerência e a possível variabilidade da resposta obtida. Assim, procedeu-se ao ensaio de outro provete utilizando os mesmo parâmetros, com o objetivo de verificar se a resposta força-deslocamento era coincidente com o primeiro provete. Pela análise das duas respostas, onde é possível verificar uma sobreposição das respostas, pode-se concluir que a transmissão de esforços do vidro para os elementos metálicos através do teflon foi conseguida de forma correta, tendo atingido a rotura para valores de força próximos.

Na figura 48 apresentam-se as respostas força-deslocamento obtidas para os provetes de vidro com 6 mm de espessura.

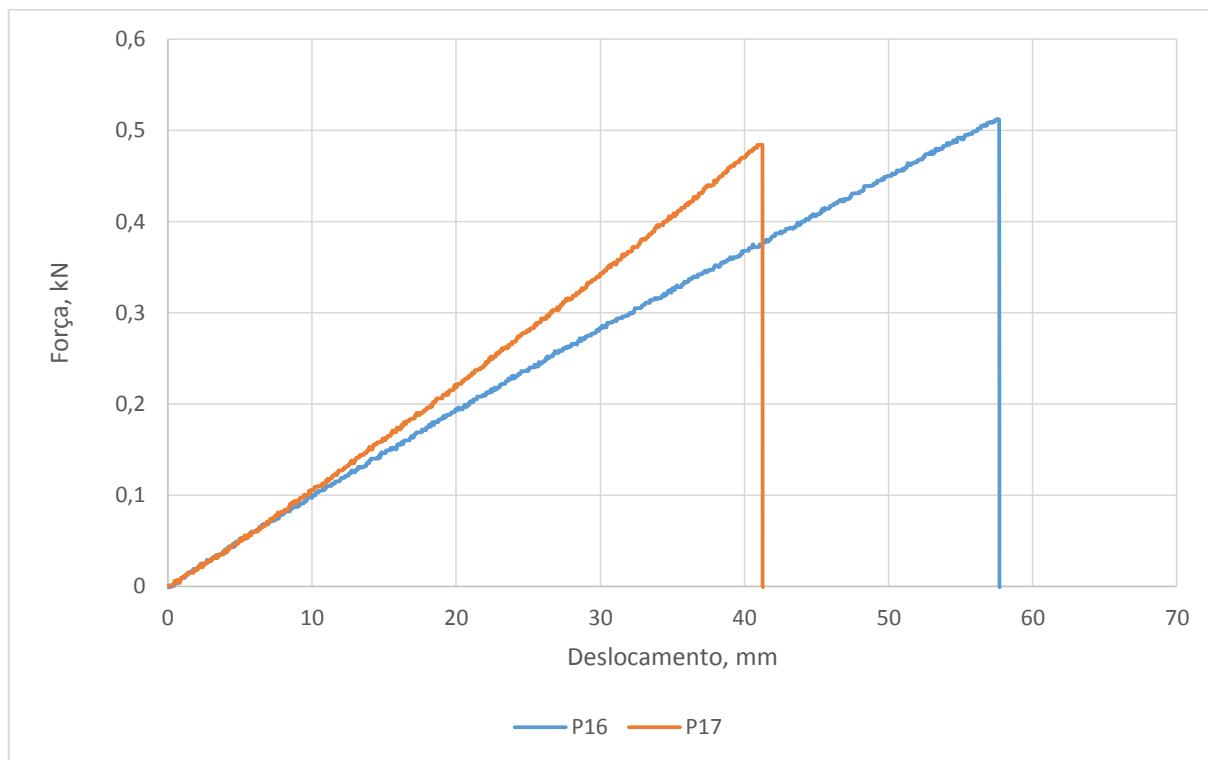


Figura 48 - Respostas força-deslocamento para os provetes de 6 mm.

Relativamente aos provetes de 6 mm, e considerando a disponibilidade de apenas 2 provetes, optou-se por comparar as duas condições extremas na definição do sistema de fixação, ou seja, a situação em que o contacto ao nível da junta é estabelecido pelo elemento mais flexível (neoprene) e com uma espessura superior, e a situação em que o contacto ao nível da junta é estabelecido pelo material mais rígido (teflon) e com uma espessura inferior.

Pela análise da figura 48 é possível verificar que as respostas força-deslocamento obtidas se distinguem claramente, tendo-se obtido deformações consideravelmente superiores, para um mesmo nível de carga, no caso da configuração do sistema de fixação mais flexível. No instante da rotura, que ocorre para uma força aproximadamente semelhante, o deslocamento registado ao nível do ponto de aplicação da carga é 1,4 vezes superior no caso do sistema de fixação mais flexível. É possível observar também, tal como anteriormente, que a perda de rigidez do sistema de fixação com o aumento da carga é tanto mais evidente quanto menor a rigidez dos elementos de contacto entre o vidro e as peças de aço do sistema de fixação.

4.3.6. Análise da deformação do sistema de fixação por intermédio da correlação digital de imagem (DIC)

Após o processamento das fotografias da zona de fixação durante o ensaio, foi possível obter medições de deslocamentos entre pontos muito próximos, que de outra forma não seria possível obter, dada a dimensão reduzida da zona a monitorizar e do número de deslocamentos a registar. A obtenção de resultados através do processamento das imagens baseou-se na utilização de extensómetros virtuais que permitem definir pontos e determinar os deslocamentos ocorridos nesses pontos ao longo de todas as fotografias, relativamente à fotografia relativa ao estado indeformado. Assim, definiu-se um conjunto de pontos na região inferior da zona de entrega do vidro, e outro conjunto de pontos na região superior da zona de entrega. O deslocamento relativo de cada ponto é determinado em relação ao elemento metálico da fixação, que de acordo com a análise efetuada não sofre deslocamento. Algumas zonas na interface entre o vidro e os elementos metálicos que estão em contacto com o neoprene apresentam erro de correlação de imagem superior (figura 49) devido ao facto de a borracha ser um material muito deformável e desse modo, quando sujeita a carregamento, sofrer deformação significativa para fora do plano, ficando sobreposta parcialmente na face do vidro e/ou dos elementos metálicos.

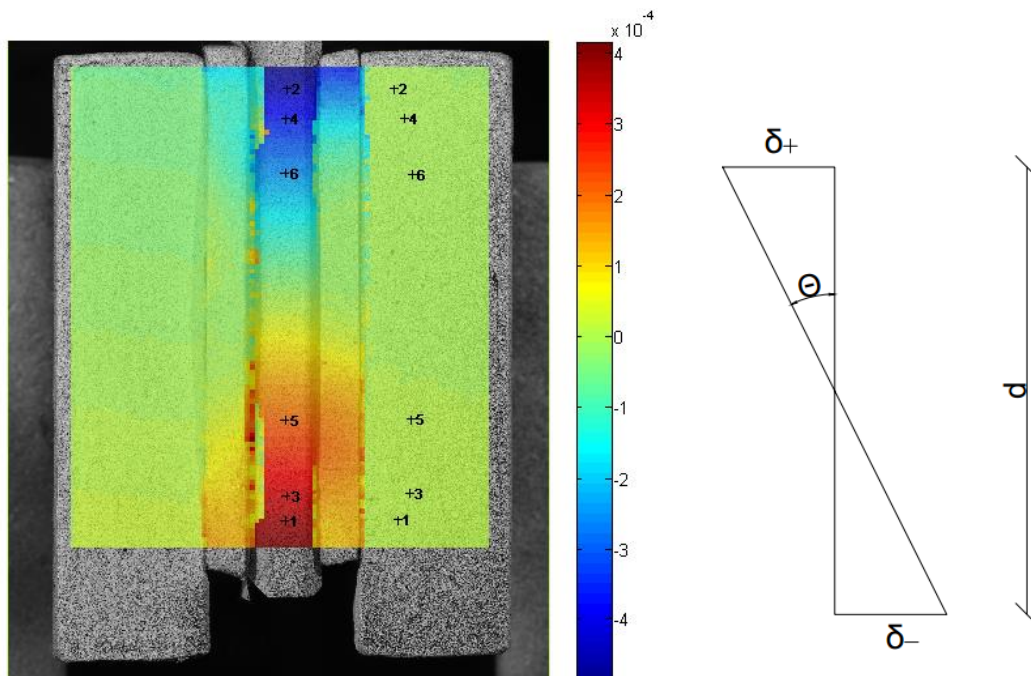


Figura 49 – Campo de deslocamentos horizontais e posicionamento dos extensómetros virtuais.

A rotação do vidro ao nível do sistema de fixação foi calculada tendo por base o deslocamento relativo medido em dois extensómetros virtuais e a distância entre eles na direcção do eixo do vidro, através da expressão 4.5 (ver figura 49).

$$\frac{\delta^+ + \delta^-}{d} = \theta \quad (4.5)$$

Para o cálculo do momento flector obteve-se o valor da força aplicada ao longo do ensaio, medida pelo atuador. Para determinar o braço, ou seja a distância do ponto de aplicação da carga ao centro de rotação do vidro no apoio, utilizaram-se os resultados obtidos por intermédio do DIC (figura 50). Através da análise dos deslocamentos segundo a direcção x, e definindo um espectro entre valores muito próximos de zero, é possível apresentar o diagrama de deslocamentos em apenas duas cores, sendo que a região de transição entre cores destaca o ponto com deslocamento zero e em torno do qual se deu a rotação do vidro.

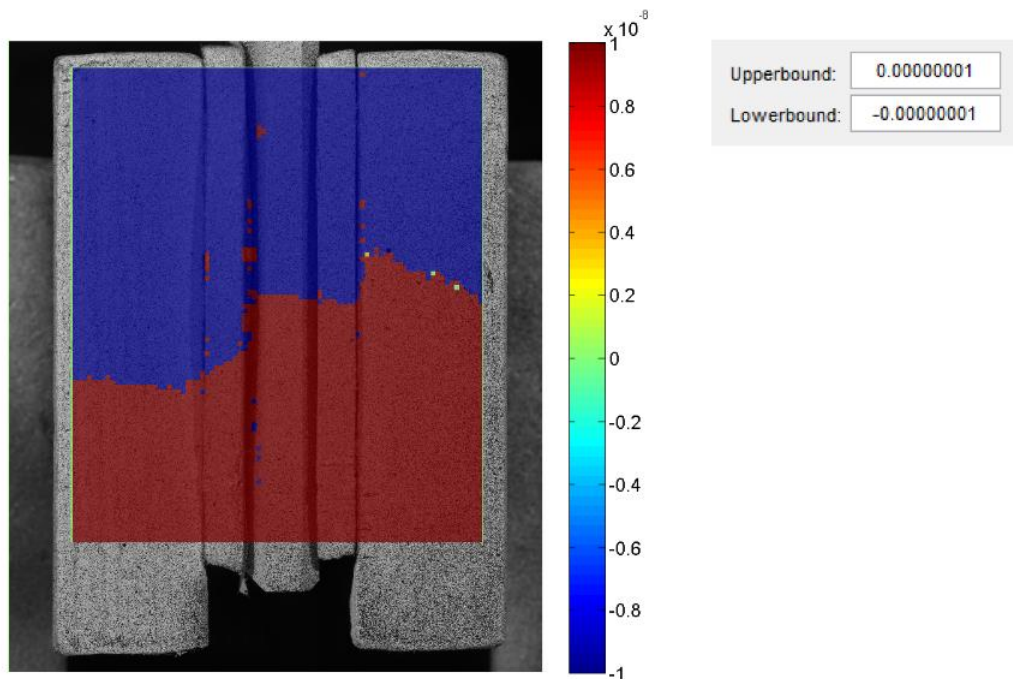


Figura 50 – Determinação do centro de rotação do vidro através de DIC.

De forma a confirmar a precisão e exatidão desta metodologia, colocou-se em 3 zonas distintas do aparelho de fixação diferentes pares de pontos (figura 49) que definem extensómetros virtuais e obtiveram-se as respostas momento-rotação ao nível do encastramento proporcionado pelo sistema de fixação, apresentadas na figura 51. Dada a semelhança das respostas obtidas confirma-se que a metodologia origina resultados precisos. Adicionalmente, é possível

constatar que existe uma diminuição da rigidez rotacional do apoio durante o ensaio, tal como se esperava, considerando os resultados discutidos anteriormente.

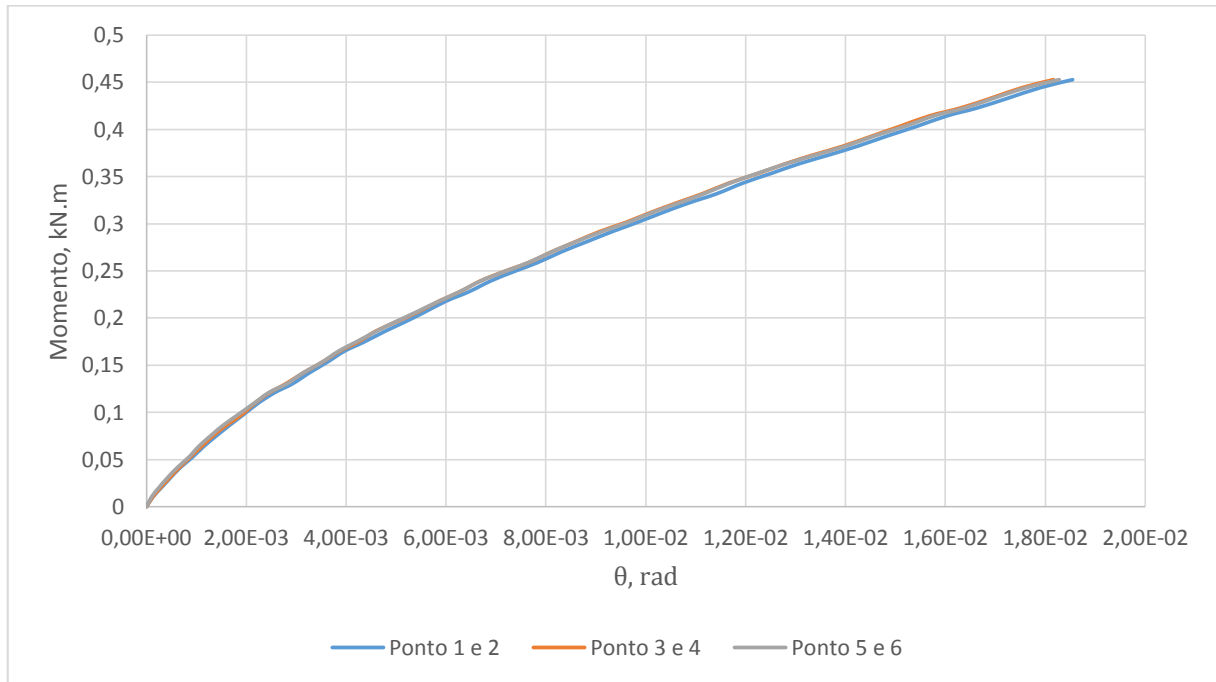


Figura 51 – Respostas momento-rotação ao nível do encastramento (sistema de fixação) obtidas considerando os deslocamentos medidos em 3 pares de pontos em diferentes localizações do sistema de fixação, com base no processamento de imagem digital.

Efeito da espessura e da pré-compressão na rigidez rotacional do apoio

De forma exemplificativa, procedeu-se à análise da deformação ao nível do sistema de fixação usando o processamento de imagem dos provetes P1, P2, P3 e P4, de forma a fazer uma comparação entre os parâmetros definidos. A figura 52 apresenta as respostas momento-rotação ao nível do encastramento obtidas para os provetes P1, P2, P3 e P4, com base no processamento digital de imagem.

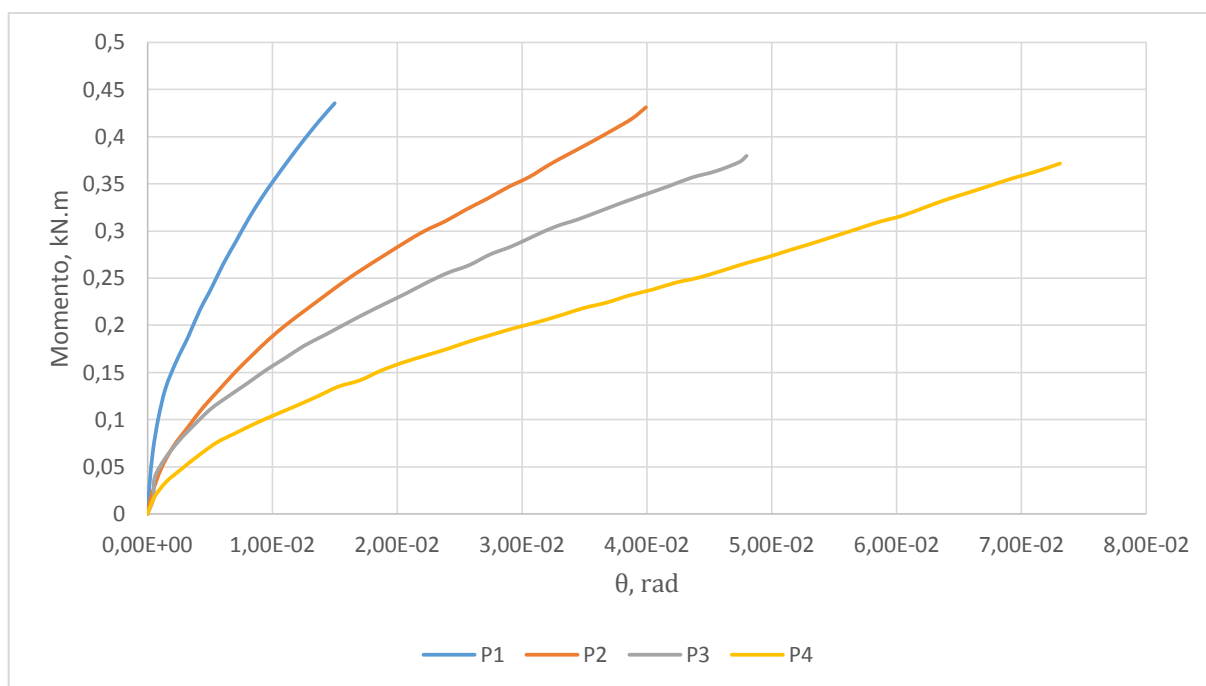


Figura 52 – Respostas momento-rotação ao nível do encastramento (sistema de fixação) obtidas para os provetes P1, P2, P3 e P4, com base no processamento de imagem digital.

Analisando os resultados obtidos é possível confirmar o efeito que a espessura de neoprene utilizada tem na rigidez rotacional da fixação. Comparando as respostas obtidas para os provetes P1 e P3 e para os provetes P2 e P4 é possível verificar que, para o mesmo valor de momento, a rotação é maior para uma espessura de neoprene superior, o que resulta numa rigidez rotacional inferior. Os resultados obtidos são, em geral, bastante úteis visto que permitem a determinação direta do comportamento não linear elástico do sistema de fixação estudado em termos de rigidez rotacional.

Relativamente ao nível de pré-compressão aplicada é possível, por comparação direta entre os provetes P1 e P2 e os provetes P3 e P4, avaliar a sua influência na rigidez rotacional. Para um nível de pré-compressão mais elevado, a rigidez rotacional é superior. No entanto mantém-se o seu comportamento não linear.

Efeito da variação do comprimento de entrega na rigidez rotacional do apoio

De forma exemplificativa, procedeu-se também à comparação das respostas momento-rotação obtidas para o provete P5 e P3, em que foram mantidas todas as condições exceto o comprimento de entrega, que no caso do provete P3 é de 50 mm e no caso do provete P5 é de 30 mm. A figura 53 apresenta as respostas momento-rotação ao nível do encastramento obtidas para os provetes P5 e P3, com base na correlação digital de imagem.

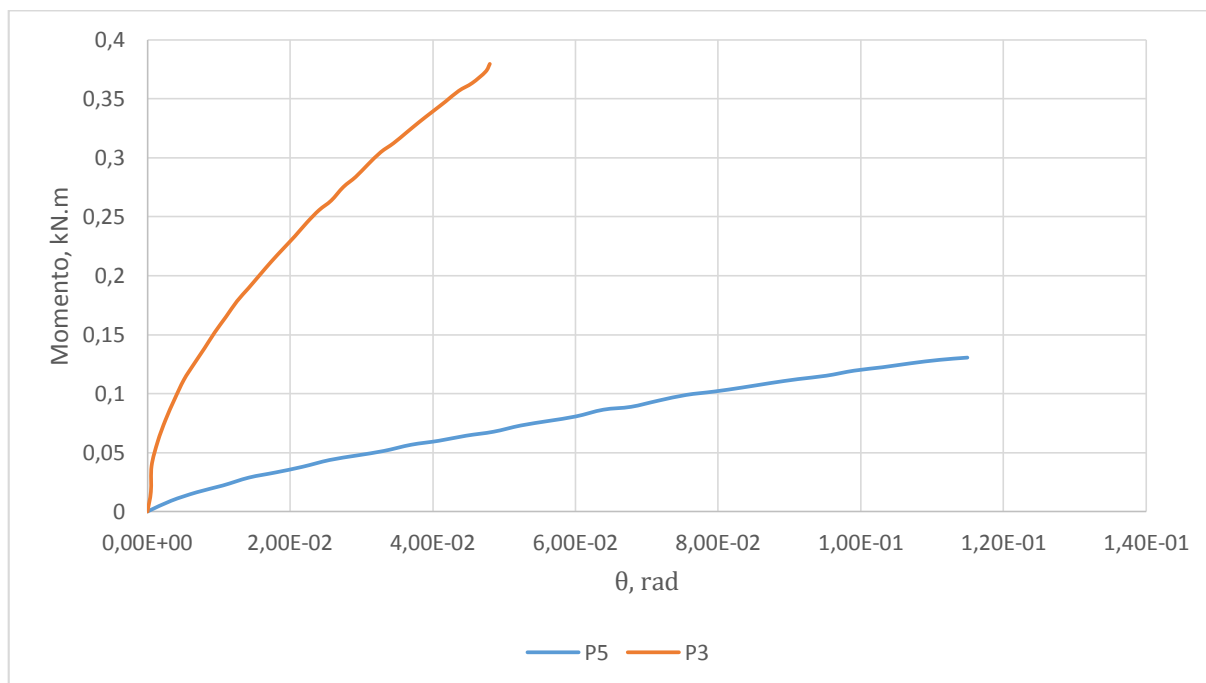


Figura 53 - Respostas momento-rotação obtidas para os provetes P5 e P3.

Pela análise da figura 53 é possível verificar que a alteração do comprimento de entrega de 30 mm para 50 mm resulta num incremento muito significativo da rigidez rotacional do apoio, pelo que uma diminuição no comprimento de entrega, ao resultar numa diminuição da rigidez rotacional do apoio, permite uma maior deformação do painel de vidro. No entanto não se deve esquecer o facto de um menor comprimento de entrega resultar também numa menor folga para acomodar deslocamentos no plano do painel de vidro, assim como numa força de fixação do vidro no seu plano menor.

Efeito da utilização de materiais mais rígidos para transição de esforços na rigidez rotacional do apoio

Para comparar o efeito da adoção de materiais mais rígidos na zona de junta para fazer a transição de esforços do sistema de apoio para o painel de vidro, comparou-se a resposta momento-rotação obtida para o provete P1, no qual se utilizou neoprene, para o provete P5_2, no qual se utilizou teflon, e para o provete P6_2, sem utilização de qualquer material de junta, estando o vidro em contacto direto com os elementos metálicos do sistema de apoio. Os resultados obtidos encontram-se representados na figura 54.

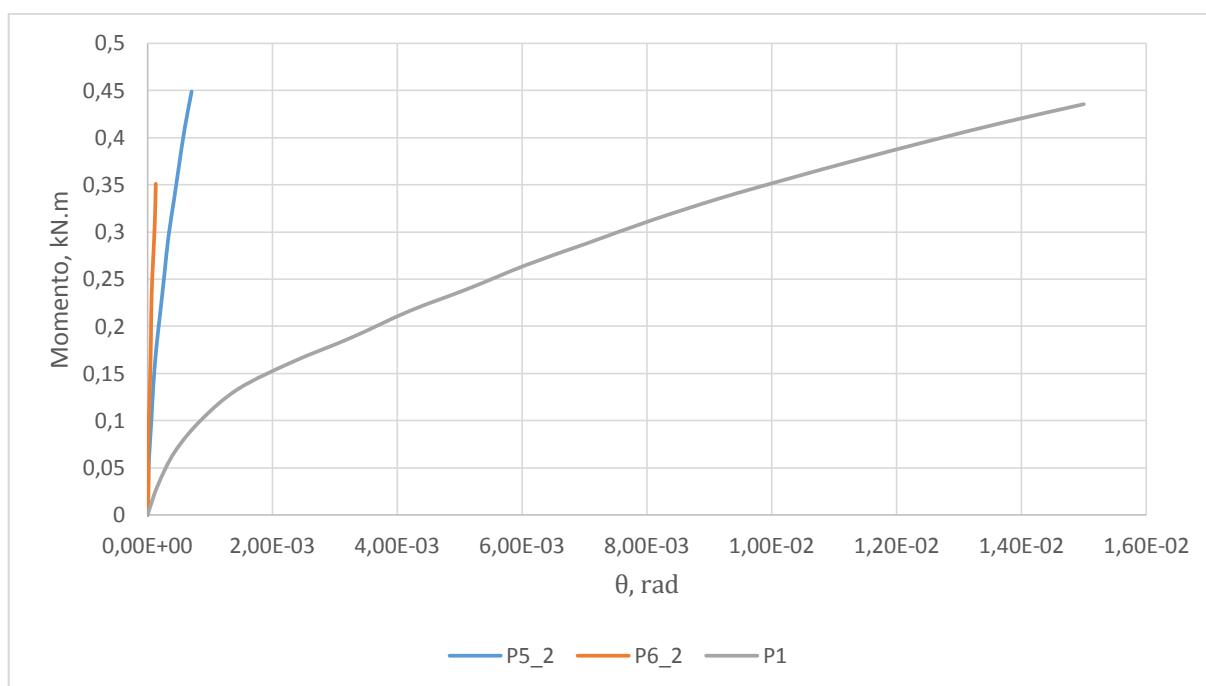


Figura 54 - Respostas momento-rotação obtidas para os provetes P5_2, P6_2 e P1.

Pela análise da figura 54 é possível verificar que a utilização de materiais mais rígidos influencia de forma muito significativa a rigidez rotacional do apoio, diminuindo significativamente o nível de deformações do apoio. No caso da não utilização de material para transferências de esforços, e apesar da dureza do aço e da impossibilidade de acomodar a transição de tensões mais suaves, ocorreu uma pequena rotação do vidro no apoio. Isto terá ocorrido, provavelmente, devido a um contacto entre as superfícies do vidro e dos elementos metálicos não totalmente uniforme, e por não ser possível confinar com muita pressão as superfícies dos elementos de fixação para evitar a rotura prematura do vidro. Tal como esperado, neste caso o momento que provoca a rotura do provete é significativamente inferior ao obtido nos restantes casos.

4.3.7. Comparação de resultados obtidos através da correlação digital de imagem (DIC) com resultados obtidos através dos LVDT.

Com o objetivo de proceder a uma validação dos resultados obtidos através do DIC na caracterização da deformação ocorrida no apoio, procedeu-se à modelação do ensaio utilizando o programa de análise estrutural ftool [18]. A partir dos resultados da rigidez rotacional obtida através do DIC e apresentada no subcapítulo anterior, definiu-se no programa ftool um elemento de barra que visa simular o comportamento do provete de vidro durante o ensaio experimental (figura 55). O sistema de apoio definido é constituído por um apoio duplo e por uma mola com uma rigidez rotacional igual à obtida através do DIC, para o instante do ensaio em que se obtém a deformação máxima e a correspondente carga aplicada, exercida através do atuador.



Figura 55 – Definição do sistema estrutural no Ftool.

Os ensaios escolhidos para esta verificação foram os já referidos anteriormente no contexto da análise de fotografia digital, e que foram utilizados para fazer uma comparação de resultados em função dos parâmetros de dimensionamento definidos para o sistema de apoio. A obtenção do deslocamento no ponto de carregamento através do Ftool é apresentada na figura 56.

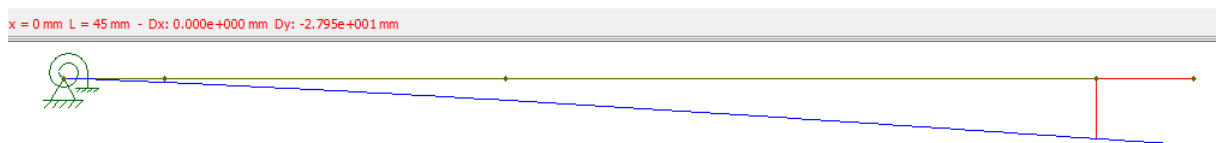


Figura 56 – Deformada e obtenção do deslocamento no ponto de carregamento, por intermédio do Ftool.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Comparação entre a deformação obtida no atuador e a obtida através do Ftool.

Provete	Força aplicada [N]	Rigidez rotacional [kNm/rad]	δ atuador [mm]	δ Ftool [mm]	Diferença relativa [%]
P1	913	29,03	17	16,09	-5,35
P2	904	10,80	28,01	27,95	-0,21
P3	796	7,91	32	30,78	-3,81
P4	779	5,08	43,01	42,29	-1,67
P5	272	1,14	60	57,25	-4,58
P5_2	941	634,79	11,99	9,94	-17,07
P6_2	736	2635,66	9,01	7,58	-15,92

Tendo em conta os resultados obtidos, é possível verificar que existe um erro máximo de 17,07% da deformação obtida através do atuador relativamente à obtida com recurso à rigidez rotacional obtida pelo DIC. A maior diferença entre ambos os resultados foi obtida para os provetes P5_2 e P6_2, podendo provavelmente ser explicada pela rotação muito reduzida experimentada pelos provetes devido à utilização de um material muito rígido na junta e à não utilização de material para transmissão de esforços respetivamente, o que eleva muito a rigidez do apoio. Deste modo, visto que apenas se mediu a deformação numa das faces do apoio, a possibilidade de ocorrerem deformações diferentes em ambas as faces do apoio aumenta de significado quando se medem deformações menores, aumentando deste modo a diferença de resultados observada.

Nos restantes casos em que se utilizou neoprene, a diferença máxima entre os resultados obtidos foi de 5,35%.

Com isto, é possível constatar que os resultados obtidos através do DIC permitem uma análise com resultados muito satisfatórios, pelo que a sua utilização neste modelo experimental foi de extrema relevância para a caracterização do comportamento do sistema de apoio. Certamente as diferenças observadas estarão mais relacionadas com a ausência de uma simetria perfeita do comportamento dos painéis de vidro e do sistema de fixação, do que a erros do algoritmo de correlação de imagem ou do sistema de medição dos deslocamentos.

5. ESTUDO NUMÉRICO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1. Modelação numérica

5.1.1. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é um método numérico usado para resolver problemas de equações diferenciais através de aproximações [5]. Deste modo permite resolver problemas estruturais complexos, em que a geometria e as condições de apoio da estrutura podem assumir configurações muito diversas. A descrição em maior detalhe do método dos elementos finitos, e em particular do tipo de elementos, ações e condições fronteira utilizados neste estudo não foram contemplados neste documento por falta de espaço. No entanto o leitor é remetido para a bibliografia da especialidade, em particular para a consultada no âmbito deste estudo [19].

5.1.2. *Software* – ABAQUS

O programa utilizado para a análise numérica foi o *software* comercial ABAQUS/CAE versão 6.11, que se trata de um software comercial baseado no método dos elementos finitos e que permite resolver problemas mais simples do tipo análises lineares, a modelos mais complexos com não linearidade geométrica e material. A escolha do *software* a utilizar ao longo deste trabalho foi feita tendo em conta o tipo de elementos necessários para a análise considerando os efeitos de não linearidade geométrica, a possibilidade de simular vários tipos de materiais como vidro, neoprene, aço inox e a interação entre estes através de elementos de contacto. Por outro lado, a escolha foi também determinada pela existência constatada de vários trabalhos de investigação com vidro laminado por outros autores recorrendo a este *software*.

5.1.3. Propósito

A modelação numérica tem como vantagem a possibilidade de se representar modelos físicos e variar os seus parâmetros de forma a estudar o comportamento e obter resultados sem recorrer

a ensaios experimentais. Contudo, é possível comparar os modelos numéricos com os resultados experimentais de forma a proceder à sua validação, e deste modo proceder posteriormente à extrapolação do modelo para outras configurações de carga e condições fronteira, outras geometrias e propriedades dos materiais.

5.2. Modelo do ensaio de flexão em quatro pontos

Considerando os resultados experimentais obtidos com os provetes de vidro ensaiados em flexão referidos anteriormente, procedeu-se à realização de um modelo de elementos finitos desse mesmo ensaio com o objetivo de calibrar corretamente os parâmetros do modelo, por comparação com resultados obtidos dos ensaios experimentais. Através da análise de resultados é possível, por tentativas, calibrar os modelos numéricos até que o erro entre os resultados do modelo numérico e os experimentais seja o menor possível. Posteriormente, os parâmetros calibrados desta forma poderão ser utilizados para estimar o comportamento de outras configurações do sistema de apoio, geometria da estrutura ou carregamento.

Dado que estamos a tratar um ensaio de flexão simples, que deste modo apresenta comportamento cilíndrico, importa caracterizar o comportamento do vidro ao longo da direção do seu vão, pelo que se optou por utilizar um modelo 2D em estado plano de deformação para avaliar as deformações e as tensões ocorridas no vidro. No entanto é importante referir que um modelo em estado plano de deformação apenas aproxima o comportamento real obtido nos ensaios experimentais devido ao efeito da deformação na direção transversal à direção do vão por força do coeficiente de Poisson. No entanto este efeito é quase insignificante, dada a reduzida espessura e a considerável largura dos painéis de vidro ensaiados.

5.2.1. Geometria

A geometria adotada neste modelo é a mesma utilizada no modelo físico e que já foi referida no capítulo 4.2, com a exceção da largura do provete que não é considerada, dado que se trata de um modelo em estado plano de deformação. A modelação contemplou apoios simples nas extremidades do painel de vidro, à semelhança do que ocorreu no programa experimental, mantendo um vão de 1000 mm entre os apoios cilíndricos. De forma a contabilizar a

contribuição das tiras de neoprene no deslocamento e na transição de esforços do vidro para o apoio, estas também foram consideradas no modelo numérico.

De forma a garantir a mesma sequência de carregamento que no ensaio experimental, foi adicionada no instante inicial a carga imposta pelo peso próprio do elemento que aplica a força a meio vão nos ensaios experimentais.

Com o objetivo de obter uma melhor aproximação entre os resultados numéricos e experimentais procedeu-se à simulação de todos os ensaios válidos, nomeadamente, todos os ensaios em que a rotura do provete se deu na zona de flexão pura.

O modelo numérico do ensaio de flexão em 4 pontos realizado no ABAQUS é apresentado na figura 57.



Figura 57 – Modelo numérico do ensaio de flexão em 4 pontos.

5.2.2. Materiais

Os materiais utilizados são os descritos no capítulo 4.2, nomeadamente o vidro e o neoprene, assim como os apoios cilíndricos metálicos. Os parâmetros dos materiais utilizados no modelo numérico foram os deduzidos a partir dos resultados experimentais considerando os valores médios, tanto para o vidro como para o neoprene. O módulo de elasticidade do neoprene foi obtido através de um ensaio de compressão. Todos os materiais foram definidos como tendo um comportamento elástico e isotrópico, e modelados como sólidos homogêneos e deformáveis.

Os parâmetros utilizados foram os definidos na tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelação do modelo simplesmente apoiado.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	73617	0,23
Neoprene	19	0,49
Aço	210000	0,3

5.2.3. Modelação

A geometria e as condições de apoio adotadas na modelação do ensaio de flexão em quatro pontos foram semelhantes para todos os ensaios realizados.

De modo a simular o aumento gradual da área de contacto entre os apoios cilíndricos e as faixas de neoprene, na zona de interação entre o neoprene e os apoios cilíndricos foram adotados elementos de contacto superfície-superfície com comportamento tangencial, com uma formulação de fricção denominada de *penalty* e com um coeficiente de fricção de 0,19, de forma a estabelecer um comportamento de fricção realista entre os materiais.

A interação entre o neoprene e o vidro foi definida como do tipo *tie*, ou ligação rígida, de forma a simplificar o modelo e a diminuir o tempo de cálculo, atendendo a que ao nível desta interface não é expectável uma alteração da área de contacto durante o ensaio, não havendo por isso benefício na utilização de elementos de contacto.

A malha de elementos finitos utilizada tem uma dimensão de 0,5 mm em ambas as direções, tendo sido utilizados elementos de 8 nós e integração total.

Em todos os ensaios procedeu-se a uma análise do tipo não linear geométrica, ainda que neste caso em particular não seja expectável que daí advenha um efeito significativo.

5.2.4. Cargas e condições de apoio

Para simular corretamente o comportamento dos apoios cilíndricos restringiu-se o deslocamento dos cilindros nas duas direções e deixou-se a sua rotação desimpedida. Nos cilindros dispostos nos pontos de aplicação da carga restringiu-se apenas os deslocamentos horizontais.

A carga máxima a aplicar neste modelo foi a obtida através de cada um dos ensaios experimentais de flexão em 4 pontos, com o valor da força de rotura obtido em cada ensaio dividida pelos dois cilindros.

5.2.5. Resultados

De modo a verificar a correta modelação do ensaio de flexão, foi feita uma comparação em termos de deformações entre os resultados obtidos numericamente (δ modelação) e os resultados obtidos experimentalmente (δ experimental).

O deslocamento obtido a meio vão no modelo experimental foi registado com o uso de dois LVDT colocados a meio vão, tal como descrito anteriormente. A contabilização do deslocamento vertical resultou da soma do deslocamento devido à colocação do suporte e devido à atuação da carga, descontando o deslocamento vertical ocorrido nos apoios devido à deformação do neoprene.

Os resultados apresentados correspondem aos deslocamentos e tensões obtidas para a força de rotura dos provetes.

Na tabela 16 apresenta-se uma comparação da tensão máxima obtida experimentalmente com a obtida através da análise numérica.

Tabela 16 - Comparação da tensão máxima obtida experimentalmente com a obtida através da análise numérica.

Provete	Carga aplicada [N]	σ experimental [MPa]	σ modelação [MPa]	Diferença relativa [%]
P1	1213	112,28	110,30	-1,76
P3	1138	105,33	103,60	-1,64
P5	1715	89,30	87,96	-1,50
P6	2248	117,06	115,10	-1,67
P7	1935	44,78	44,48	-0,67
P8	1743	40,34	40,06	-0,69
P10	4786	70,90	70,36	-0,76
P11	4705	69,70	69,17	-0,76

Em termos de tensões máximas, é possível verificar que a diferença entre os resultados numéricos e experimentais é reduzida, sendo no máximo 1,76%. O valor máximo da diferença entre os resultados experimentais e numéricos dá-se para os provetes com menor espessura e que foram sujeitos a tratamento térmico, aos quais correspondem tensões de rotura superiores.

Relativamente aos provetes de vidro recozido, as diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos registadas são menores, situando-se abaixo de 1%. Tendo em consideração os resultados obtidos, pode-se concluir que a modelação numérica está correta sob o ponto de vista estático e que dá resultados bastante próximos dos experimentais. O erro existente, que se considera de pouca relevância, poderá estar associado a pequenos desalinhamentos no sistema de ensaio e às imperfeições na geometria do vidro, nomeadamente a pequenas diferenças de espessura ao longo dos provetes que foram verificadas durante a realização do programa experimental.

Na tabela 17 apresenta-se uma comparação do deslocamento obtido experimentalmente com o obtido na análise numérica.

Tabela 17 – Comparação do deslocamento a meio vão obtido experimentalmente com o obtido na análise numérica.

Proвете	Carga aplicada [N]	δ experimental [mm]	δ modelação [mm]	Diferença relativa [%]
P1	1213	53,74	49,76	-7,41
P3	1138	50,80	46,69	-8,09
P5	1715	32,50	29,73	-8,52
P6	2248	43,90	38,91	-11,37
P7	1935	10,83	10,12	-6,56
P8	1743	9,72	9,11	-6,28
P10	4786	13,34	12,87	-3,52
P11	4705	13,31	12,66	-4,88

Em relação às deformações máximas obtidas, é possível verificar que existe uma diferença máxima de -11,37% entre o modelo numérico e o modelo experimental, sendo que para todos os provetes as deformações obtidas numericamente foram inferiores às obtidas experimentalmente.

Face às diferenças de resultados obtidos, muito provavelmente estas estarão relacionadas com erros na medição dos deslocamentos, originados por pequenos desalinhamentos no sistema de ensaio, nomeadamente ao posicionamento dos LVDT no apoio e a meio vão, que provocaram assimetrias e resultaram em desvios relativamente à situação perfeita (modelo numérico).

5.3. Modelo em consola

A utilização de um modelo em consola tem como objetivo o de, numa primeira fase, permitir a calibração do modelo com base nos resultados experimentais e, posteriormente, a extrapolação do comportamento do sistema de apoio para situações diferentes das que foram ensaiadas.

5.3.1. Geometria

A geometria adotada para este modelo tenta replicar a geometria adotada no estudo experimental, pelo que se simulou a geometria de todos os elementos presentes no modelo experimental. Tomou-se como exemplo o ensaio do provete P4, por ser um provete que atinge deformações consideráveis e para o qual a deformação do neoprene é mais pronunciada e exime maiores variações da espessura. Desta forma, o modelo é constituído por um painel de vidro de 12 mm e com duas camadas de neoprene em cada uma das faces do vidro, além dos elementos metálicos de confinamento.

5.3.2. Materiais

Os materiais utilizados são os descritos no capítulo 4.3, respetivamente o vidro e o neoprene, assim como os elementos metálicos em aço. Os parâmetros dos materiais utilizados no modelo numérico foram obtidos através dos valores médios dos ensaios experimentais, tanto para o vidro como para o neoprene.

Todos os materiais foram definidos como tendo um comportamento elástico e isotrópico e modelados como sólidos homogéneos e deformáveis.

Os parâmetros utilizados apresentam-se na tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelação do modelo em consola.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	73617	0,23
Neoprene	19	0,49
Aço	210000	0,3

5.3.3. Modelação

O tipo de modelo utilizado para a representação do ensaio experimental escolhido foi um modelo em estado plano de deformação, que comparado com o mesmo modelo de volumes representa de forma correta o comportamento do painel de vidro e do sistema de apoio.

De modo a simular o aumento e diminuição da área de contacto entre o vidro e as faixas de neoprene, na zona de interação entre o neoprene e o vidro foram adotados elementos de contacto superfície-superfície com comportamento tangencial, com uma formulação de fricção denominada de *penalty* e com um coeficiente de fricção de 0,19, de forma a estabelecer um comportamento de fricção realista entre os materiais.

A interação entre o neoprene e os elementos metálicos foi definida como do tipo *tie*, ou ligação rígida, de forma a simplificar o modelo e a diminuir o tempo de cálculo, atendendo a que no ensaio experimental se colou o neoprene aos elementos metálicos para manter a correta posição dos elementos.

Na construção da malha de elementos finitos adotou-se uma dimensão em ambas as direções de 1 mm para todos os elementos, exceto para as camadas de neoprene, em que se utilizou uma malha com a dimensão elementar de 0,5 mm em ambas as direções, por se tratarem de elementos de menor espessura e que sofrem grandes deformações. A malha definida é apresentada na figura 58.

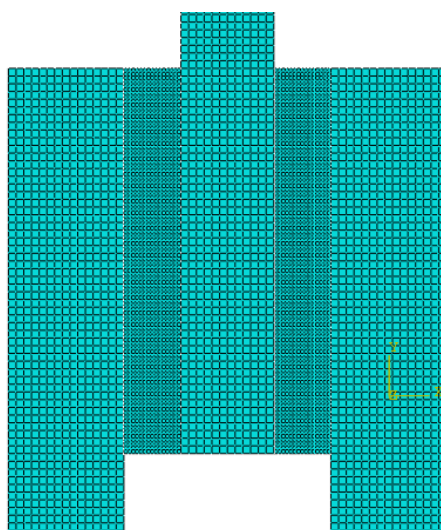


Figura 58 – Malha de elementos finitos.

Numa primeira fase definiu-se o modelo numérico em que os elementos metálicos de confinamento se encontravam encastrados. No entanto verificou-se que o modelo experimental

não permanecia totalmente fixo durante o ensaio, havendo um pequeno deslocamento devido à descompressão na região de um dos parafusos. De forma a obter uma aproximação entre os resultados dos vários ensaios e os dos modelos numéricos era necessário alterar a rigidez do neoprene, no entanto esta alteração não representava o comportamento real do sistema de fixação, pois o módulo de elasticidade não pode ser diferente para diferentes ensaios.

Desta forma, verificou-se que o sistema experimental sofria uma deformação quando se iniciava a aplicação da carga (facto facilmente observado através da análise da figura 59), havendo uma rotação do elemento metálico que confina o neoprene e o vidro. Na parte inferior, durante a descompressão do elemento de neoprene nesta zona, verifica-se em geral um deslocamento horizontal que é superior ao observado na parte superior do elemento metálico.

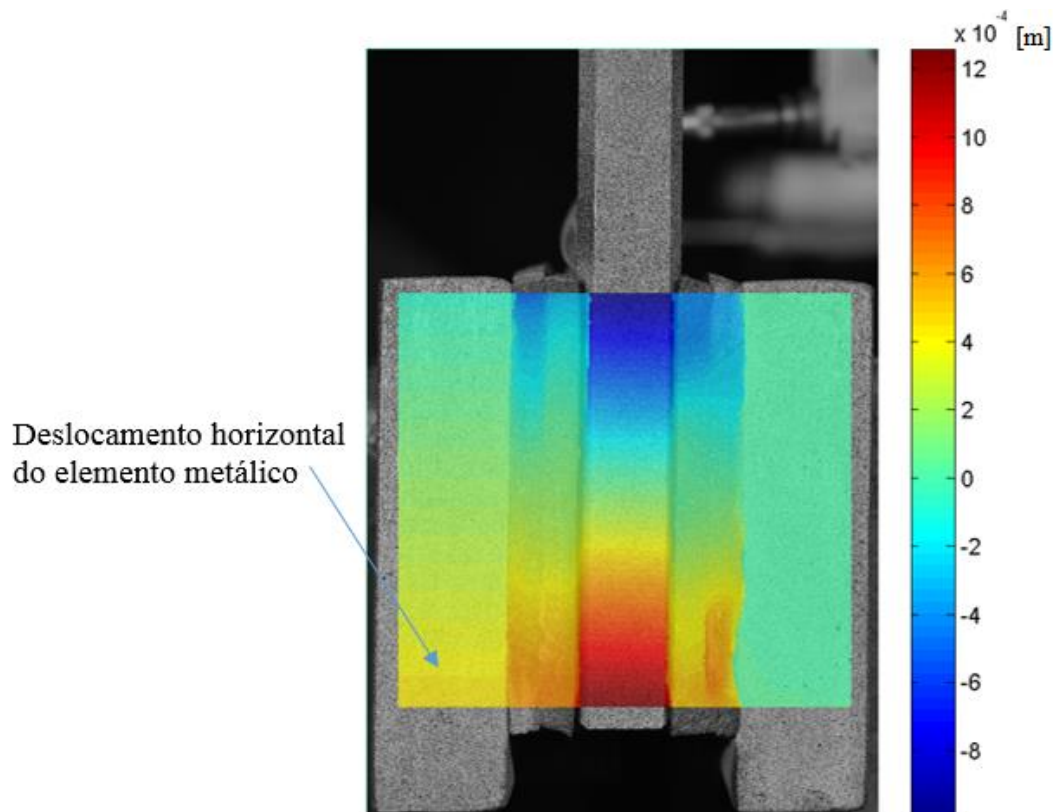


Figura 59 – Deslocamento horizontal do elemento metálico verificado através da correlação digital de imagem.

Assim, calculou-se a rigidez dos parafusos e colocou-se no modelo numérico duas molas que representavam os 4 parafusos do modelo experimental (figura 60). Com isto foi possível obter uma melhor aproximação de resultados do modelo numérico relativamente ao modelo experimental.

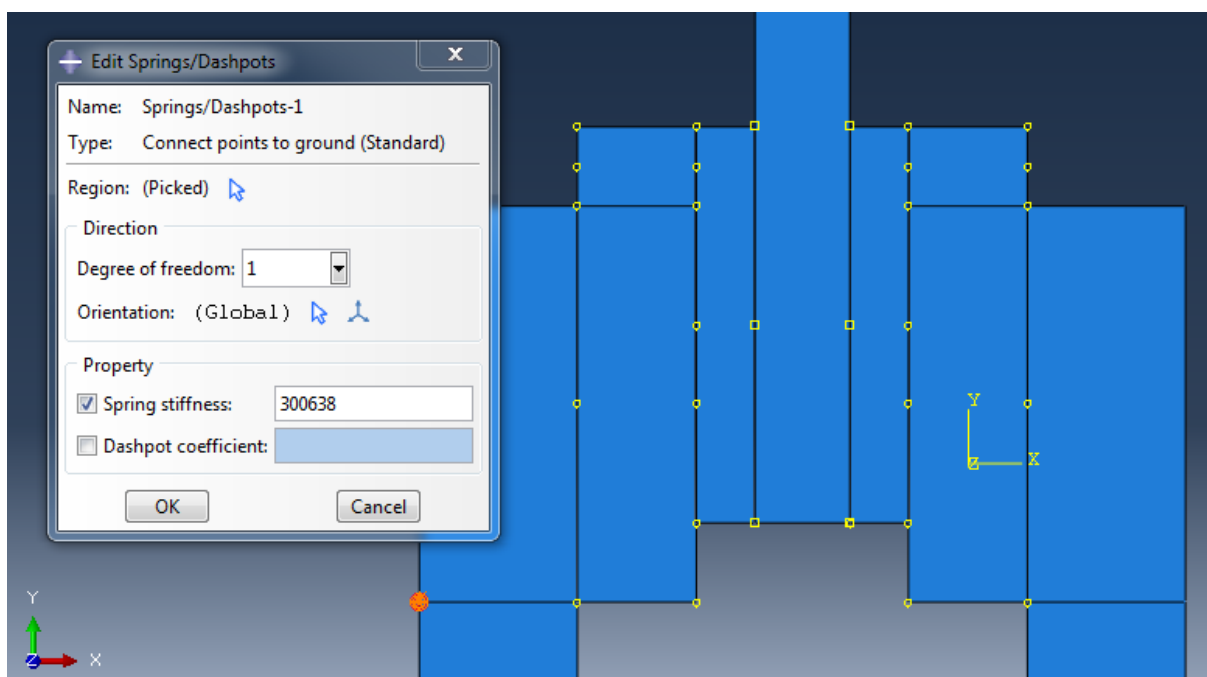


Figura 60 – Definição das interações entre materiais e rigidez da mola.

5.3.4. Cargas e condições de apoio

As condições de apoio definidas visam simular o real comportamento do sistema de apoio. Deste modo, as condições fronteira correspondentes à etapa de ensaio foram prescritas em duas etapas, em que na primeira etapa se prescreveu a pré-tensão ao nível do sistema de confinamento, e na segunda etapa se prescreveu o carregamento. Assim, na primeira etapa impôs-se um deslocamento entre os dois elementos metálicos de confinamento equivalente ao valor da pré-compressão a aplicar. Na segunda etapa aplicou-se uma carga de valor igual à carga de rotura do provete.

5.3.5. Resultados

De modo a verificar a correta modelação do sistema de apoio optou-se por utilizar como exemplos de estudo os resultados experimentais relativos aos provetes P1, P2, P3 e P4. Estes ensaios diferem na espessura de neoprene utilizada na junta e no nível de pré-compressão aplicada no sistema de fixação, pelo que a utilização destes provetes é suficiente para verificar a qualidade do modelo.

Para a conveniente calibração dos modelos foi feita uma comparação em termos de deformações obtidas numericamente (δ modelação) e experimentalmente (δ experimental), apresentada na tabela 19.

Tabela 19 - Comparação do deslocamento no ponto de aplicação da carga obtido experimentalmente e numericamente.

Provete	Carga aplicada	δ experimental	δ modelação	Diferença
	[N]	[mm]	[mm]	relativa [%]
P1	954	18,09	13,7	-24,37
P2	945	29,59	15,6	-47,29
P3	808	32,65	14,8	-54,67
P4	789	43,66	17,5	-59,91

Os resultados obtidos apresentam divergências consideráveis. Os resultados obtidos numericamente apresentam valores de deformação inferiores aos resultados experimentais, o que leva a concluir que o modelo numérico está demasiado rígido comparativamente ao modelo experimental. Esta diferença de resultados pode estar associada à difícil execução do ensaio experimental, nomeadamente ao difícil controlo do deslocamento aplicado nos elementos metálicos de confinamento de modo a introduzir a pré-tensão. A medição do deslocamento entre elementos metálicos foi realizada através de um paquímetro, e a pré-compressão foi aplicada através do aperto dos parafusos. Pelos resultados obtidos é possível verificar que um aumento da espessura de neoprene, assim como uma menor pré-compressão que resultam numa diminuição da rigidez do apoio, resulta em erros mais consideráveis entre os resultados numéricos e os experimentais.

Provavelmente poder-se-iam obter melhores resultados efetuando o controlo do nível de pré-compressão por intermédio do controlo de tensão de confinamento, nomeadamente através da utilização de atuadores colocados horizontalmente que garantissem um valor da tensão de confinamento de forma rigorosa.

Em termos das tensões máximas atingidas no vidro, procedeu-se também a uma comparação entre os resultados obtidos numericamente (σ modelação) e os resultados obtidos experimentalmente (σ experimental), tal como apresentado na tabela 20.

Tabela 20 - Comparação de tensões máximas de tração obtidas experimentalmente com as obtidas numericamente.

Provete	Carga aplicada [N]	σ experimental [MPa]	σ modelação [MPa]	Diferença relativa [%]
P1	954	53,02	46,34	-12,6
P2	945	52,61	45,89	-12,77
P3	808	45,13	39,23	-13,08
P4	789	42,91	38,25	-10,87

Os resultados obtidos em termos de tensões máximas apresentam diferenças entre o modelo numérico e o experimental significativamente menores que as observadas anteriormente relativamente às deformações, tendo-se obtido uma diferença máxima de 13,08%. As diferenças de resultados observadas para os vários provetes apresentam valores semelhantes, não havendo, em contraste com o que se observou anteriormente em termos de deslocamentos, um aumento do erro com a diminuição da rigidez do apoio. O valor das tensões dependerá sobretudo do valor da força aplicada e da distância desta ao ponto do apoio no qual o deslocamento horizontal é nulo. Esta distância é aproximadamente constante ao longo do ensaio para todos os casos.

Independentemente dos resultados obtidos, a modelação deste ensaio visava sobretudo a análise do comportamento do sistema de fixação no modelo numérico, pelo que se optou por fazer esta análise através da utilização dos mesmos modelos que os utilizados anteriormente, mas desta vez para prescrever o deslocamento no atuador obtido experimentalmente, em vez de impor a carga obtida experimentalmente aquando da rotura dos provetes. Como exemplo, utilizou-se os resultados obtidos para o provete P4 por ser um provete que sofreu uma das maiores deformações ao nível do sistema de fixação e no qual os efeitos de deformação e descolamento do neoprene são mais evidentes. Para verificar o comportamento do apoio recorreu-se à sequência de fotografias utilizada para o DIC, selecionando a que foi obtida imediatamente antes do instante em que se atingiu a rotura. A figura 61 apresenta uma comparação entre a fotografia digital e o modelo numérico.

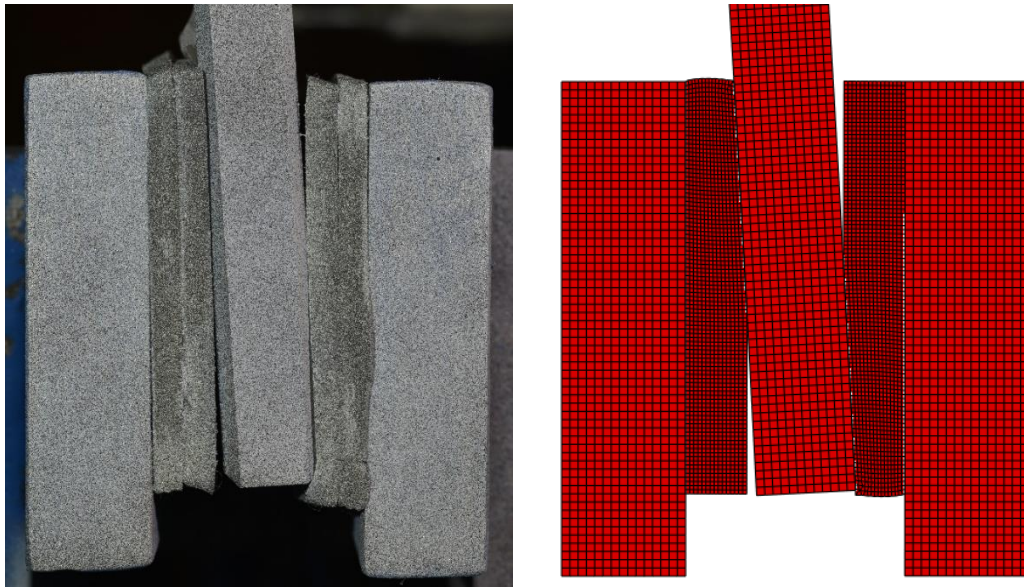


Figura 61 – Comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico.

Pela comparação da fotografia com o modelo experimental é possível verificar que o comportamento do modelo numérico é muito próximo do obtido experimentalmente, verificando-se o descolamento do neoprene nas zonas tracionadas e a sua deformação nas zonas comprimidas.

Na figura 62 apresenta-se uma sobreposição do modelo numérico à fotografia do ensaio imediatamente antes da rotura.

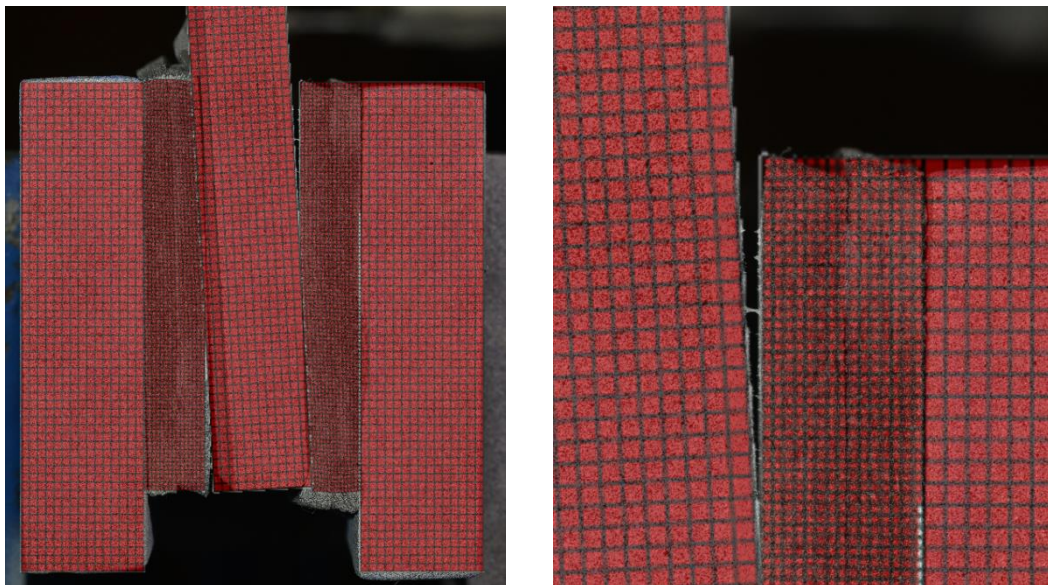


Figura 62 – Sobreposição do modelo numérico à fotografia do ensaio imediatamente antes da rotura e pormenor do descolamento do neoprene.

Através da sobreposição da fotografia com o modelo numérico é possível verificar que a rotação do vidro é essencialmente idêntica em ambos os casos, assim como a deformação do neoprene. O deslocamento do neoprene na zona tracionada do vidro também é evidente em ambos os casos.

6. ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS DE ESTUDO

6.1. Definição do modelo geral

De modo a verificar a correta modelação do problema em análise, realizou-se um estudo que inclui a comparação de resultados com os que se obtêm a partir da pré-norma prEN 16612 estudada no capítulo 3, dada a impossibilidade de realizar um ensaio experimental para o tipo de condições de apoio e geometria em causa.

Numa primeira parte deste capítulo pretende-se realizar o dimensionamento de um sistema de painéis de vidro através da norma e comparar com os resultados obtidos através do modelo numérico que considera a mesma geometria, condições de apoio e carregamento, variando algumas opções de modelação.

Numa segunda parte do capítulo será analisada a utilização de uma espessura equivalente no modelo numérico, através da utilização do método simplificado descrito na mesma norma.

Por último, proceder-se-á à alteração das condições de apoio do painel de forma a estudar a sua influência nos resultados numéricos.

6.1.1. Geometria

A geometria adotada para o modelo genérico será semelhante à geometria adotada nos casos de estudo, com as dimensões do painel de vidro de 2800 x 1000 mm. O sistema é constituído por um painel de vidro laminado composto por duas chapas de vidro de 15 mm e por uma película de 0,76 mm de PVB.

6.1.2. Materiais

O módulo de elasticidade do PVB em condições de temperatura ambiente e para situações de carregamento de curto prazo é de 9 MPa [20]. No entanto, devido à natureza de carácter

permanente do carregamento, e de acordo com o que já foi discutido no capítulo 3, ao longo do tempo e para carregamento constante o PVB perde a rigidez inicial, pelo que se assumiu a não contribuição do PVB para a transferência de esforços ao nível da interface. Dessa forma adotou-se um módulo de elasticidade muito baixo na modelação. Os parâmetros materiais utilizados na modelação foram os definidos na tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros utilizados na modelação para a calibração de modelos.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	70000	0,23
PVB	0,05	0,42
Neoprene	19	0,49

6.1.3. Modelação

Para proceder à modelação utilizou-se uma malha de elementos de volume, tendo-se optado por realizar um modelo 3D de forma a obter resultados do comportamento global do painel de vidro incluindo os elementos de apoio, em termos de tensões e de deformações.

A interação entre o vidro e a *interlayer* foi estabelecida por intermédio de ligações tipo *tie* ou diafragma rígido, por se tratar de uma ligação do tipo “colada” e que deste modo é representada de forma correta, considerando o comportamento real do vidro laminado constituído por painéis de vidro intercalados por *interlayers*.

A interação do neoprene com o vidro foi estabelecida por intermédio de elementos de contacto superfície-superfície, com comportamento tangencial e com uma formulação de fricção denominada de *penalty*, com um coeficiente de fricção de 0,19.

A malha de elementos finitos utilizada teve por base elementos com a dimensão de 15mm em todas as direções e foi definida tendo em conta a menor dimensão dos painéis de vidro, nomeadamente a sua espessura (figura 63).

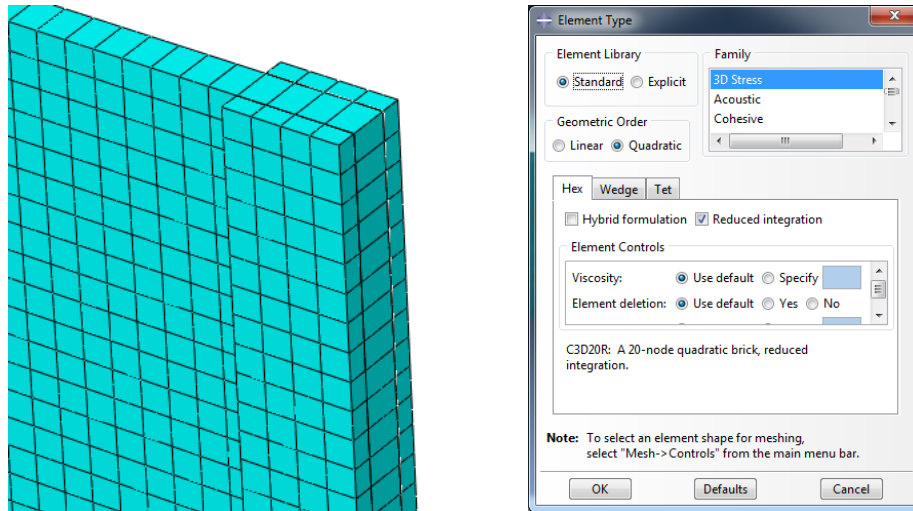


Figura 63 – Malha de elementos finitos adotada e tipo de elementos utilizados.

6.1.4. Cargas e condições de apoio

Para ir de encontro às condições explicitadas na norma, o painel de vidro deverá estar simplesmente apoiado nos quatro bordos. A carga a aplicar é uniformemente distribuída e deste modo definiu-se uma carga hidrostática constante para uma profundidade de 1000 mm. Sendo esta a única carga considerada e sendo o seu efeito considerado como o de uma ação permanente desfavorável para estado limite último, multiplicou-se o seu valor por um fator parcial de segurança de 1,3. A carga a aplicar tem o valor de 12,753 kPa.

Na figura 64 apresenta-se as condições de apoio e a definição da carga no modelo numérico.

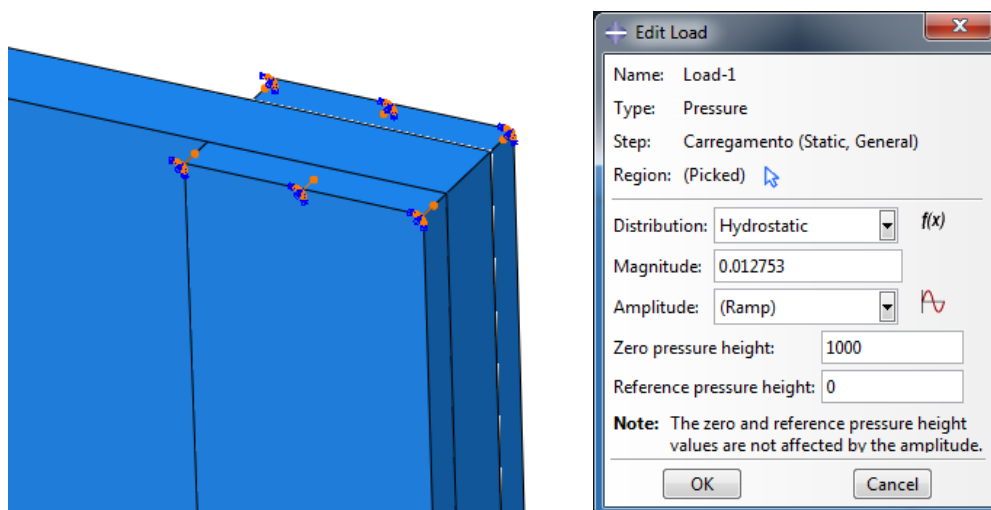


Figura 64 – Condições de apoio do modelo e tipo de carga.

6.1.5. Resultados

Resultados obtidos através da pré-norma prEN 16612

Através do cálculo realizado no capítulo 3.5.7. foi possível obter os valores da tensão máxima e da deformação máxima para as condições geométricas e de fronteira consideradas no presente caso. O valor da tensão máxima foi de 19,74 MPa e o valor da deformação máxima de 3,67 mm.

Resultados obtidos através do modelo numérico considerando o painel duplo com PVB

Após a modelação do painel de vidro com as condições descritas anteriormente, nomeadamente considerando um painel de vidro laminado constituído por dois painéis de vidro e uma *interlayer*, procedeu-se ao estudo da influência nos resultados de diferentes parâmetros tais como a utilização de elementos de 8 e 20 nós e a utilização da integração reduzida ou total. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos no Abaqus para painel duplo com PVB.

	Elementos de 8 nós		Elementos de 20 nós	
	Integração reduzida	Integração total	Integração reduzida	Integração total
σ_{max}^+ (MPa)	3,57	15,63	19,92	19,91
σ_{max}^- (MPa)	3,57	15,81	20,09	20,09
δ_{max} (mm)	148,9	4,604	3,855	3,855

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que, para a dimensão da malha de elementos definida, os elementos de 8 nós não conferem uma aproximação suficientemente satisfatória aos resultados obtidos pela norma, subestimando o valor das tensões e sobrestimando o valor das deformações. No caso dos elementos de 20 nós, a integração reduzida ou total dá resultados muito aproximados entre si, pelo que a utilização da integração reduzida pode ser adotada para diminuir o tempo de cálculo. Os resultados obtidos através de elementos de 20 nós aproximam bastante bem os obtidos através da norma, pelo que o modelo estará satisfatoriamente calibrado para simular o comportamento do sistema em estudo.

Considerando a utilização de elementos de 20 nós, a diferença entre os resultados obtidos na norma e os obtidos na modelação são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Diferença de resultados entre a pré-norma prEN 16612 e a modelação no Abaqus.

	prEN 16612	Abaqus	Diferença relativa
σ_{max}^+ (MPa)	19,74	19,91	0,86 %
δ_{max} (mm)	3,67	3,86	5,18 %

Utilização de uma espessura equivalente do painel

Através da utilização do método da espessura equivalente já descrito no subcapítulo 3.5.4., procedeu-se ao cálculo da espessura equivalente a utilizar para o cálculo das tensões e das deformações do painel. O resultado obtido para o cálculo das tensões foi uma espessura de 21,2132 mm e para o cálculo das deformações uma espessura de 18,8988 mm. Com base nestes resultados procedeu-se à modelação de um painel simples com a espessura equivalente e mantendo as condições de apoio abrangidas pela norma. Nesta fase procedeu-se também ao cálculo estrutural através de uma análise linear e não linear geométrica.

Os resultados obtidos no modelo numérico para elementos de 20 nós e integração total apresentam-se na tabela 24.

Tabela 24 – Resultados obtidos no Abaqus utilizando a espessura equivalente.

	Linearidade geométrica	Não linearidade geométrica
σ_{max}^+ (MPa)	19,87	19,83
σ_{max}^- (MPa)	19,87	19,86
δ_{max} (mm)	3,69	3,68

Analisando estes resultados pode-se concluir que a utilização de uma espessura equivalente conduz a resultados muito próximos dos obtidos aquando da modelação dos dois painéis de vidro e *interlayer*. Deste modo, o procedimento baseado numa espessura equivalente consiste numa alternativa válida e mais simples para o cálculo estrutural, já que diminui consideravelmente o tempo e os recursos necessários para o cálculo, pela não necessidade de utilização de elementos de interface/contacto ao nível da *interlayer*.

A diferença de resultados obtidos para um painel duplo com PVB e os resultados obtidos utilizando a espessura equivalente apresentam-se na tabela 25.

Tabela 25 – Diferença de resultados obtidos considerando a utilização de painel duplo com PVB e a utilização da espessura equivalente.

	Painel duplo com PVB	Espessura equivalente	Diferença relativa
σ_{max}^+ (MPa)	19,91	19,87	-0,2 %
δ_{max} (mm)	3,86	3,69	-4,4 %

Relativamente à utilização de uma análise geométrica linear ou não linear, pode-se concluir que o recurso a uma análise linear geométrica sobrestima os valores das tensões e das deformações. Segundo [3], para grandes deformações os efeitos de não linearidade geométrica devem ser considerados para relações entre vãos de 1:1 a 1:3 [3]. A norma está elaborada não tendo em conta os efeitos de não linearidade geométrica, pelo que o valor real das tensões que atuam no vidro são inferiores às calculadas, assim como as deformações. Embora neste exemplo a diferença seja pequena, noutros casos essa diferença entre os resultados de uma análise linear geométrica e de uma análise não linear geométrica pode ser mais acentuada.

Na tabela 26 apresenta-se a diferença de resultados obtidos através de uma análise geométrica linear e de uma análise geométrica não linear.

Tabela 26 – Diferença de resultados obtidos através de uma análise geométrica linear e de uma análise geométrica não linear.

	Linearidade geométrica	Não linearidade geométrica	Diferença relativa
σ_{max}^+ (MPa)	19,90	19,83	-0,3 %
δ_{max} (mm)	3,69	3,68	-0,27 %

Utilização de apoios adotando o sistema de fixação com junta em neoprene

O sistema de fixação dos painéis de vidro, contrariamente ao que foi utilizado nos modelos anteriores deste capítulo, é do tipo encastramento com alguma flexibilidade. Assim, neste subcapítulo substituiu-se o apoio simplesmente apoiado por um apoio constituído por neoprene com um comprimento de entrega de 40 mm, uma espessura de 4 mm e uma pré-compressão de 10%, aplicado em todos os bordos do painel de vidro. O objetivo deste modelo é o de permitir

a comparação direta entre os dois tipos de apoio mantendo a carga que atua no painel, e de verificar a diferença nas tensões e deformações observadas.

Na tabela 27 apresenta-se os resultados obtidos com a adoção do sistema de fixação com junta em neoprene obtidos através de uma análise geométrica linear e de uma análise geométrica não linear.

Tabela 27 – Resultados obtidos com a adoção do sistema de fixação com junta em neoprene.

	Linearidade geométrica	Não linearidade geométrica
σ_{max}^+ (MPa)	9,21	8,55
σ_{max}^- (MPa)	9,27	8,63
δ_{max} (mm)	1,50	1,39

Através da análise dos resultados é possível concluir que a utilização de apoios em que se adota o sistema de fixação com junta em neoprene diminui de forma muito significativa o valor das tensões máximas assim como a deformação, o que se justifica pela restrição criada ao nível do apoio que impede a rotação excessiva do painel de vidro ao nível do apoio.

A diferença entre os resultados obtidos com a utilização de apoios simples ou de apoios adotando o sistema de fixação com junta em neoprene são dados na tabela 28.

Tabela 28 – Diferença de resultados obtidos entre a utilização de apoios simples e de apoios adotando o sistema de fixação com junta em neoprene.

	Simplemente apoiado	Encastrado com neoprene	Diferença relativa
σ_{max}^+ (MPa)	19,83	8,55	-56,88 %
δ_{max} (mm)	3,68	1,39	-62,23 %

6.2. Caso de estudo 1 – Painel de vidro apoiado em 3 lados com bordo superior livre

Neste subcapítulo pretende-se dar sequência ao estudo realizado no subcapítulo 6.1. Este modelo tem como objetivo realizar um estudo sobre o dimensionamento de um painel de vidro laminado para utilização numa estrutura sujeita a uma carga hidrostática. Para esse efeito, serão

estudados os vários parâmetros que influenciam o comportamento do painel, em particular do sistema de apoio.

6.2.1. Geometria

A geometria adotada é semelhante à definida anteriormente, consistindo num painel de vidro com as dimensões de 2800 x 1000 mm, orientado verticalmente. A superfície da água será definida pelo bordo superior do painel, tendo uma profundidade total correspondente à menor dimensão do painel, nomeadamente 1000 mm.

O número de painéis de vidro, assim como a variação das espessuras não vão ser considerados neste estudo, ficando o estudo restrito à simulação de um painel duplo de vidro com PVB, em que cada painel de vidro tem a espessura de 15 mm e o PVB de 0,76 mm. O modelo base é constituído por um sistema de apoio com uma junta cuja espessura é de 4 mm, uma pré-compressão de 10% e um comprimento de entrega de 40 mm. A partir do modelo base serão alterados os parâmetros principais e estudada a influência dessa variação no comportamento do painel, com vista a escolher a melhor configuração em que as tensões e deformações no painel de vidro são menores.

O modelo numérico do caso de estudo 1 realizado no ABAQUS é apresentado na figura 65.

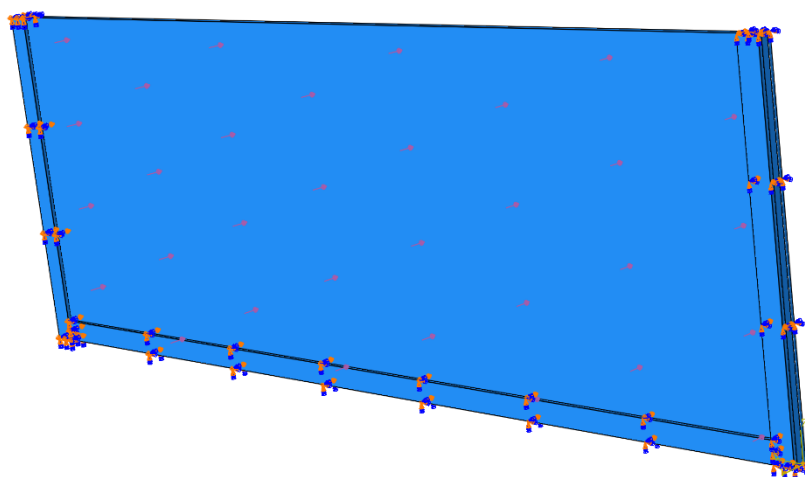


Figura 65 - Modelo numérico do caso de estudo 1.

6.2.2. Materiais

Os materiais a serem utilizados neste estudo são o vidro e o neoprene como elemento de junta e transferência de esforços.

Os parâmetros utilizados apresentam-se na tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros dos materiais utilizados no caso de estudo 1.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	70000	0,23
Neoprene	19	0,49

6.2.3. Modelação

Para proceder à modelação da estrutura recorreu-se à utilização dos elementos de volume já utilizados anteriormente no subcapítulo 6.1, mantendo-se os mesmos tipos de interações entre os materiais também já referidas.

A modelação do vidro laminado foi concretizada considerando um só painel, utilizando o método simplificado da espessura equivalente.

A malha de elementos finitos utilizada tem por base elementos de dimensões semelhantes também às adotadas anteriormente, 15 mm, tendo-se utilizado elementos de 20 nós e integração reduzida.

Em todos os ensaios fez-se uma análise não linear geométrica.

De forma a aplicar a pré-compressão no sistema de fixação e de forma a verificar o correto comportamento do sistema criaram-se duas etapas distintas. Na primeira etapa é aplicada a pré-compressão ao nível do sistema de fixação, traduzida por um deslocamento imposto na face exterior do apoio. Na segunda etapa foi aplicada a carga.

6.2.4. Cargas e condições de apoio

Por simplificação do modelo, considerou-se apenas a carga hidrostática a atuar no painel de vidro. Assim, e considerando o painel de vidro colocado verticalmente e com a superfície da água no bordo superior do vidro, a carga hidrostática a considerar é do tipo triangular e assume o valor de 0 kN no bordo superior e de 12,753 kPa no bordo inferior.

Por simplificação do modelo, optou-se por não incluir os elementos em aço inox pertencentes à estrutura de suporte envolvente, considerando que a face exterior do neoprene e que em

condições de serviço está em contacto com a estrutura em aço inox, se encontra perfeitamente encastrada.

A aplicação do neoprene foi realizada no bordo inferior do painel de vidro e nos bordos laterais, ficando o bordo superior livre.

6.2.5. Resultados

Variação da espessura de neoprene

A espessura de neoprene adotada vai influenciar os valores das tensões e deformações no painel de vidro, na medida em que uma maior espessura permite uma maior deformação do painel de vidro e consequentemente conduz a maiores valores de tensão máxima. Por outro lado, uma diminuição na espessura de neoprene impede a transmissão mais gradual de esforços do painel de vidro para o apoio, conduzindo a tensões junto ao bordo do painel de vidro mais elevadas, que por vezes são superiores às tensões registadas no centro do painel. Desta forma, torna-se necessário fazer um dimensionamento desta espessura de forma a obter um equilíbrio nas tensões obtidas.

Os resultados obtidos e analisados têm por base as tensões principais máximas e as deformações máximas ocorridas no painel de vidro para diferentes espessuras de neoprene, mantendo em todos os casos a pré-compressão de 10% e um comprimento de entrega de 40 mm. O resumo dos resultados obtidos apresentam-se na figura 66.

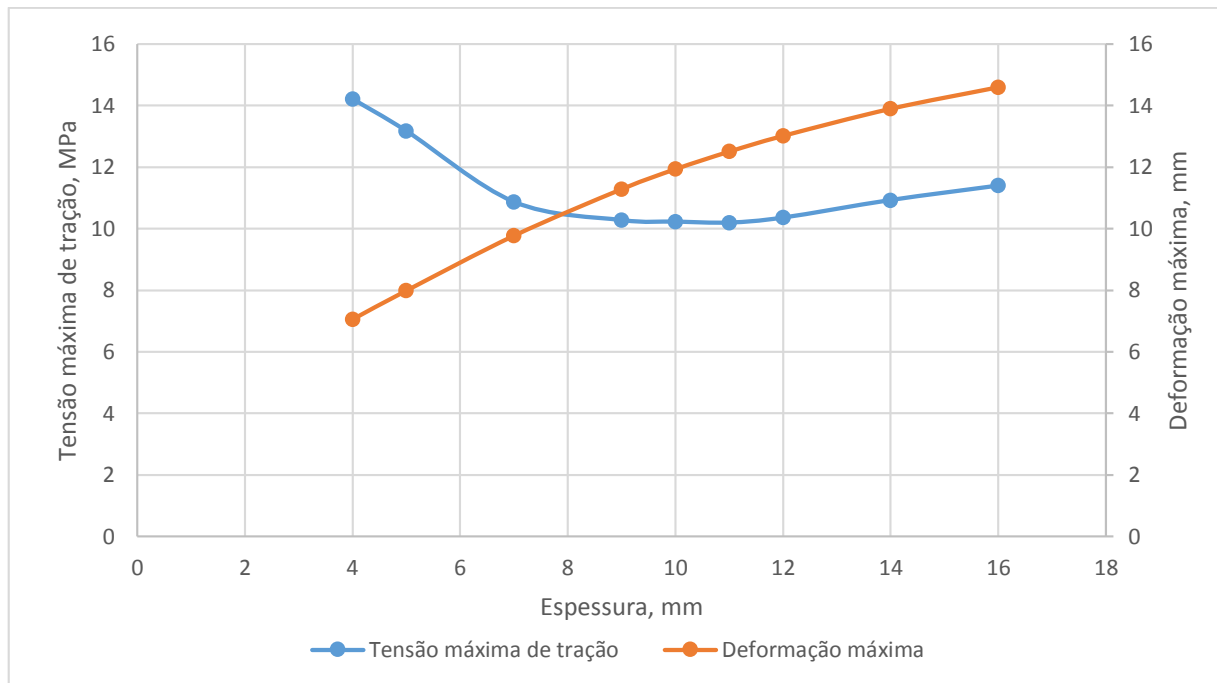


Figura 66 – Influência da espessura de neoprene no comportamento do vidro laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.

Pela análise dos resultados obtidos é possível verificar que, partindo do modelo base com uma espessura de 4 mm e aumentando a espessura de neoprene, o valor das tensões máximas de tração que se localizam junto ao bordo, na face do painel sujeito a compressão, vão sendo reduzidas até atingirem um ponto ótimo (figura 67). Esta consequência resulta da maior permissividade do painel a acomodar deformações, pelo que um aumento da espessura traduz-se numa melhoria em termos de esforços máximos.

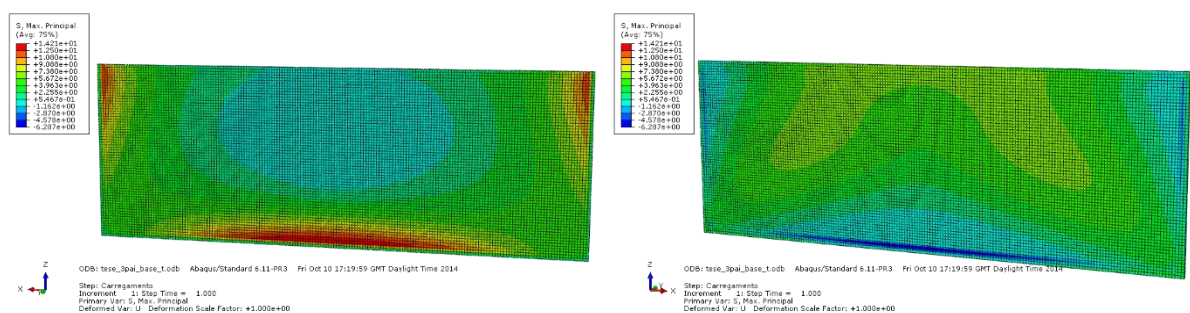


Figura 67 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 4 mm (imagens ampliadas no anexo 3).

Por outro lado, quando se aumenta demasiado a espessura de neoprene, e para espessuras acima dos 11 mm, um aumento da espessura traduz-se numa maior deformação do painel, e consequentemente num aumento das tensões máximas de tração, que deixam de se registar na

face sujeita à compressão e junto aos bordos e passa a ocorrer no centro do painel e na face sujeita a trações (figura 68).

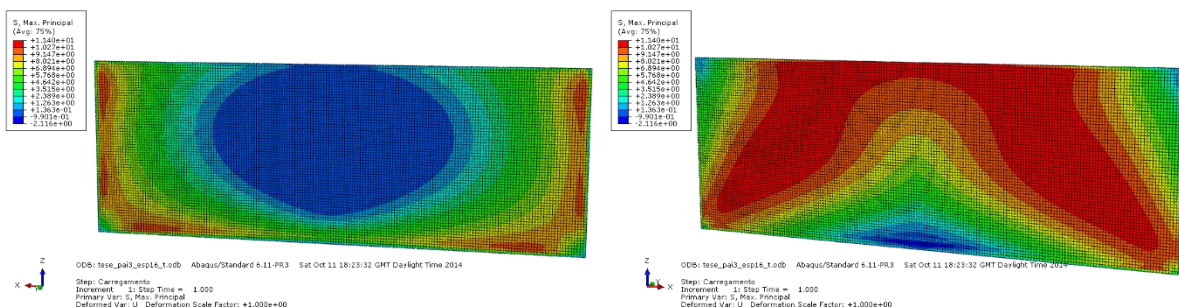


Figura 68 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 16 mm (imagens ampliadas no anexo 3).

Deste modo é possível concluir que a espessura de neoprene ideal a utilizar neste caso é de 11 mm, para a qual as tensões junto aos bordos e no centro do painel assumem valores intermédios, permitindo uma diminuição das tensões de tração globais do sistema (figura 69).

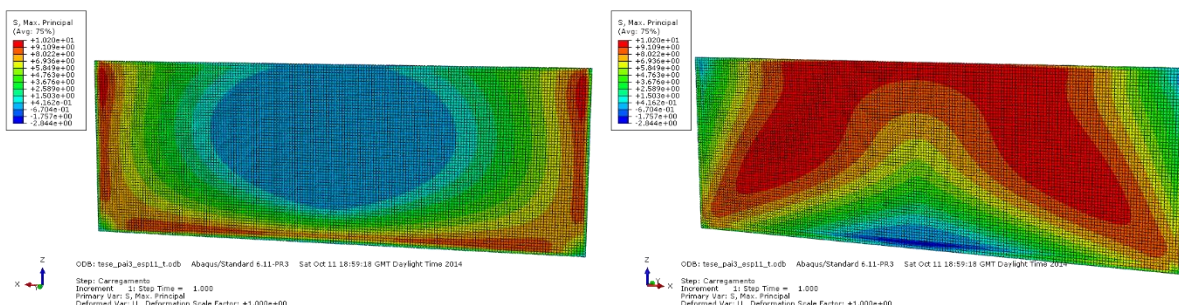


Figura 69 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma espessura de 11 mm (imagens ampliadas no anexo 3).

Variação da pré-compressão

À semelhança do ocorrido quando analisado o efeito da variação da espessura de neoprene, também a pré-compressão aplicada influencia a permissividade do apoio relativamente a deformações do painel. Assim, a pré-compressão aplicada deverá ser suficiente para evitar o excesso de deformação do painel e impedir que ocorra o descolamento do neoprene relativamente à face do vidro ou até possíveis infiltrações. Por outro lado, a pré-compressão não deverá ser excessiva por forma a evitarem-se tensões demasiado elevadas junto ao bordo do vidro.

Os resultados obtidos e analisados baseiam-se nos valores das tensões principais máximas obtidas e nas deformações máximas ocorridas no painel de vidro para diferentes valores de pré-compressão do neoprene, mantendo em todos os casos a espessura ideal definida anteriormente de 11 mm e um comprimento de entrega de 40 mm. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 70.

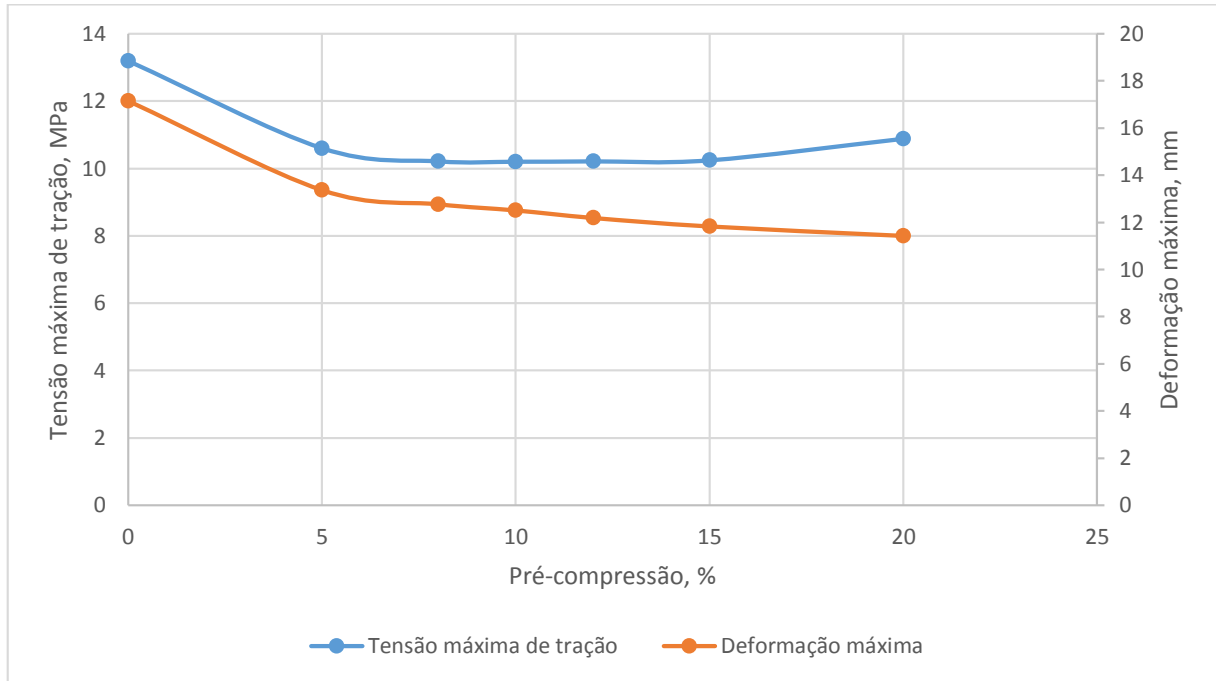


Figura 70 - Influência da pré-compressão do neoprene no comportamento do laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.

Pela análise dos resultados obtidos é possível verificar que, no caso em que não se aplica a pré-compressão no sistema de fixação, o valor da deformação é muito elevado, o que origina valores das tensões máximas de tração elevadas na face do vidro sujeita a trações (figura 71).

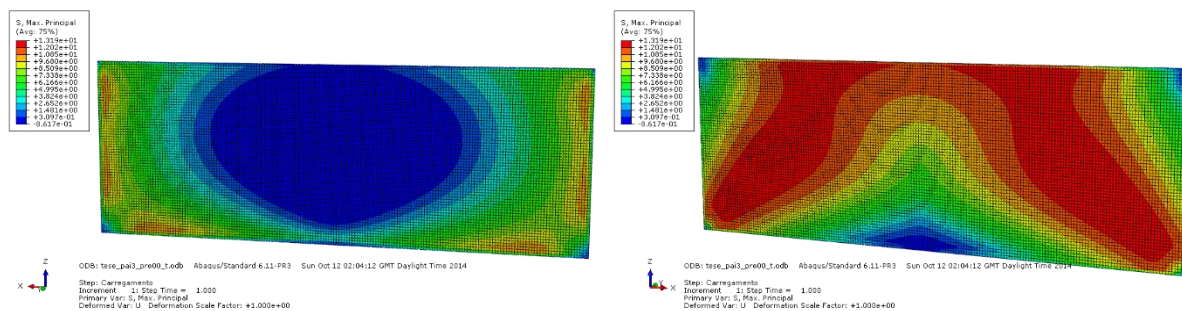


Figura 71 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para o caso em que não se aplica pré-compressão no sistema de fixação (imagens ampliadas no anexo 3).

Na mesma condição, a ausência da tensão de confinamento vai provocar um descolamento do neoprene, que é visível na figura 72, e que pode originar a perda de estanquicidade do sistema.

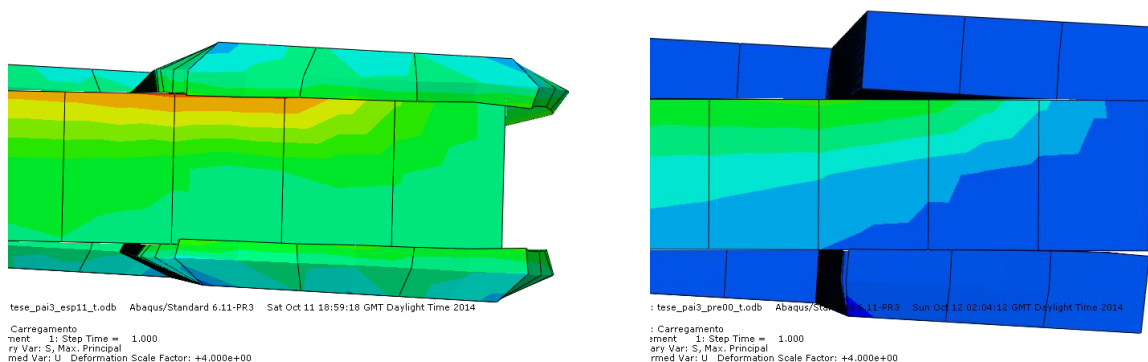


Figura 72 – Interação do vidro com o apoio em neoprene quando sujeito a carregamento ampliada 4 vezes, para uma pré-compressão de 10% [esquerda] e sem aplicação de pré-compressão [direita].

Por outro lado, se a pré-compressão aplicada for muito elevada podem originar-se tensões de tração elevadas no bordo (figura 73), pelo que a aplicação de uma pré-compressão intermédia torna-se na melhor solução, neste caso específico esse valor será 10%.

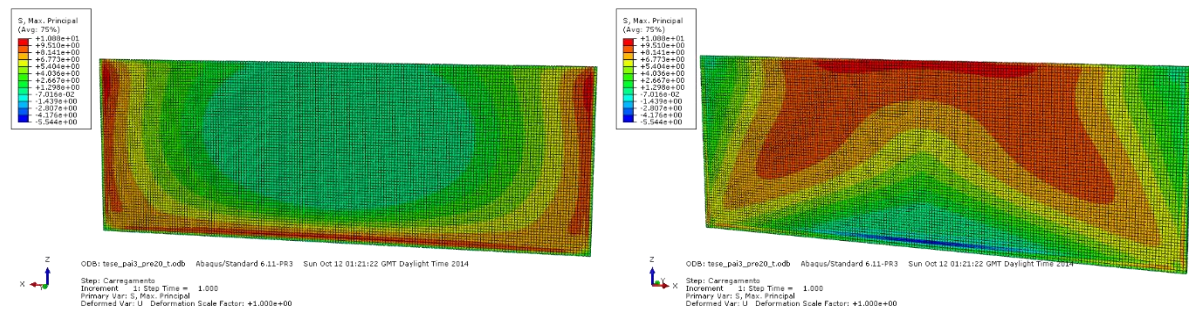


Figura 73 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para uma pré-compressão do neoprene de 20% (imagens ampliadas no anexo 3).

Variação do comprimento de entrega

O comprimento de entrega é outro parâmetro que deve ser tido em conta quando se procede ao dimensionamento do sistema estrutural e do painel de vidro. Este comprimento deverá ser suficiente para limitar as tensões, as deformações e a possibilidade do vidro se escapar por não existir tolerância suficiente para acomodar a deformação do painel de vidro no seu próprio plano. Por outro lado, um comprimento de entrega excessivo pode originar tensões de tração demasiado elevadas, além de aumentar os custos do sistema, por ser necessário a colocação de uma estrutura de suporte de maiores dimensões.

Os resultados obtidos e analisados de seguida baseiam-se nos valores das tensões principais máximas e das deformações máximas ocorridas no painel de vidro para diferentes comprimentos de entrega, mantendo-se em todos os casos a espessura ideal definida anteriormente de 11 mm e a pré-compressão ideal de 10%. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 74.

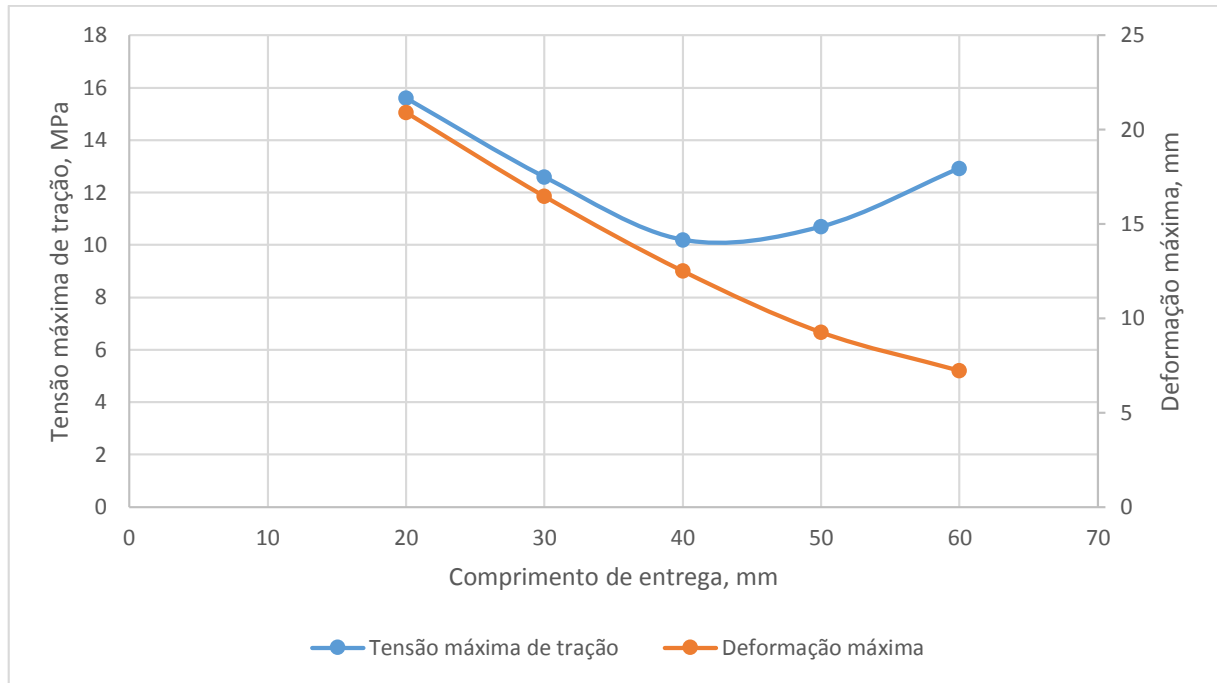


Figura 74 - Influência do comprimento de entrega no comportamento do laminado em termos de tensões de tração e deformações máximas.

Pela análise dos resultados obtidos é possível verificar que, para um comprimento de entrega reduzido (figura 75), a permissividade do apoio para acomodar deformações do painel de vidro é maior, o que resulta em deformações maiores do painel e consequentemente as tensões de tração tornam-se mais elevadas na face do vidro sujeita a trações.

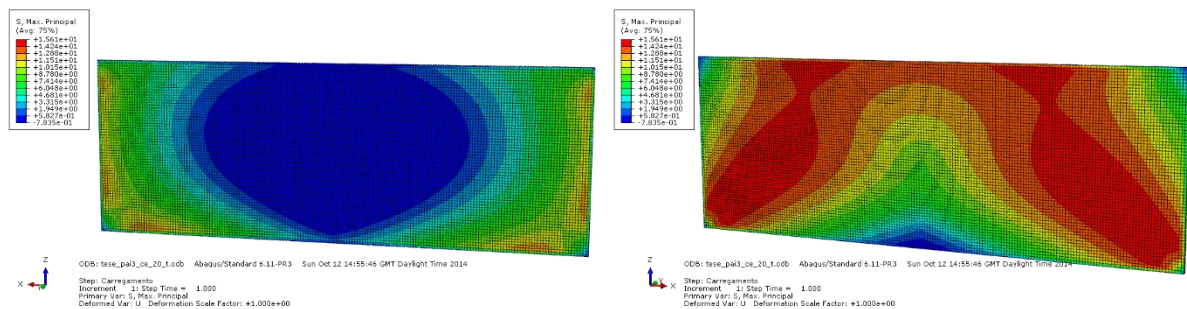


Figura 75 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para um comprimento de entrega de 20 mm (imagens ampliadas no anexo 3).

Por outro lado, a utilização de um comprimento de entrega excessivo limita muito as deformações no painel e em resultado surgem tensões de tração elevadas junto ao bordo do painel na face sujeita a compressão (figura 76), pelo que a adoção de um comprimento de entrega intermédio é a solução ideal, que neste caso é de 40 mm.

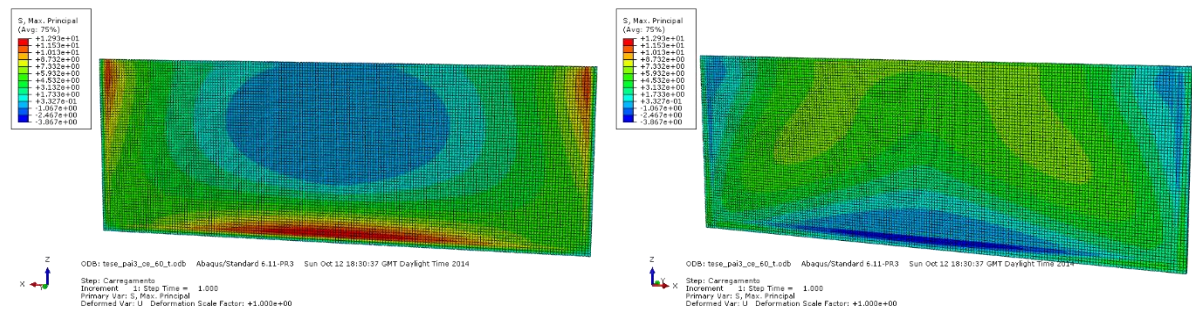


Figura 76 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão [esquerda] e na face sujeita a tração [direita] para um comprimento de entrega de 60 mm (imagens ampliadas no anexo 3).

6.3. Caso de estudo 2 – Painel de vidro apoiado em 4 lados (janela)

Neste subcapítulo pretende-se realizar dois estudos distintos. Por um lado pretende-se estender a utilização da solução encontrada no estudo anterior para uma nova aplicação, incluindo o apoio no bordo superior. Por outro lado pretende-se verificar a profundidade máxima a que o painel de vidro nestas condições poderá ser colocado, respeitando os valores máximos para as tensões admissíveis definidos pela pré-norma prEN 16612. O cálculo da tensão máxima admissível tem em conta os fatores parciais do material dependendo do tipo de vidro, da duração do carregamento, das condições da superfície do vidro e dos valores característicos da resistência, tal como já mencionado anteriormente no subcapítulo 3.5.7.

A geometria, materiais e parâmetros utilizados na modelação são os mesmos que os utilizados no subcapítulo anterior referente ao caso de estudo 1.

O modelo numérico do caso de estudo 2 realizado no ABAQUS é apresentado na figura 77.

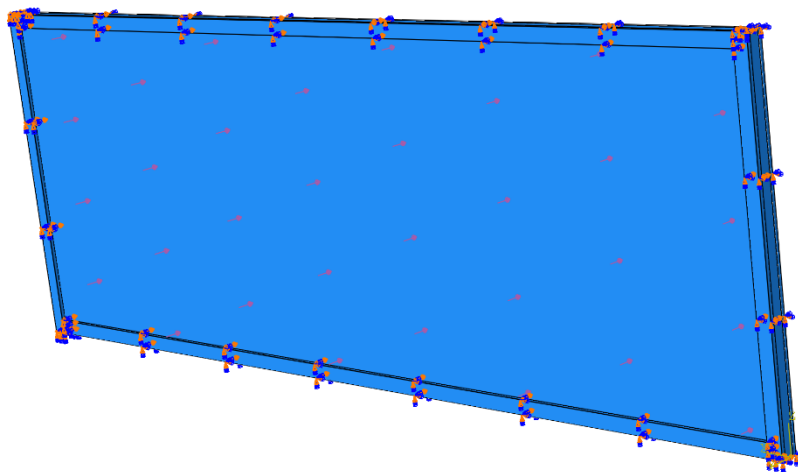


Figura 77 - Modelo numérico do caso de estudo 2.

6.3.1. Comparação das tensões e deformações máximas com as obtidas no caso de estudo 1

Neste modelo apenas se acrescentou os elementos de neoprene e apoios no bordo superior do painel de vidro, mantendo-se todos os restantes parâmetros utilizados na melhor solução encontrada anteriormente. Os parâmetros definidos são uma espessura de neoprene de 11 mm, uma pré-compressão de 10% e um comprimento de entrega de 40 mm. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 30.

Tabela 30 – Comparação de resultados para painel apoiado em 3 e em 4 bordos.

	Apoio em 3 bordos	Apoio em 4 bordos	Diferença relativa
σ_{max}^+ (MPa)	10,2	7,418	27,3%
σ_{max}^- (MPa)	10,24	7,564	26,1%
δ_{max} (mm)	12,51	1,086	91,3%

Em termos de tensões principais máximas, observando a figura 78 é perceptível que a região onde surgem as tensões máximas de tração para um painel apoiado em 3 bordos concentram-se na zona onde há maior flexibilidade, nomeadamente no bordo livre. Num painel apoiado em 4 bordos, a distribuição de tensões ocorre de forma diferente. Como o painel se encontra apoiado de forma igual em todos os bordos, as tensões máximas concentram-se no centro do painel, onde há uma maior deformabilidade. Por se tratar de uma carga triangular, com valor de carga superior na zona inferior do painel, as tensões concentram-se ligeiramente abaixo do eixo médio

vertical. A fixação nos 4 bordos representa uma diferença muito significativa relativamente à fixação em 3 bordos, havendo uma redução da tensão de tração de cerca de 27,3%,

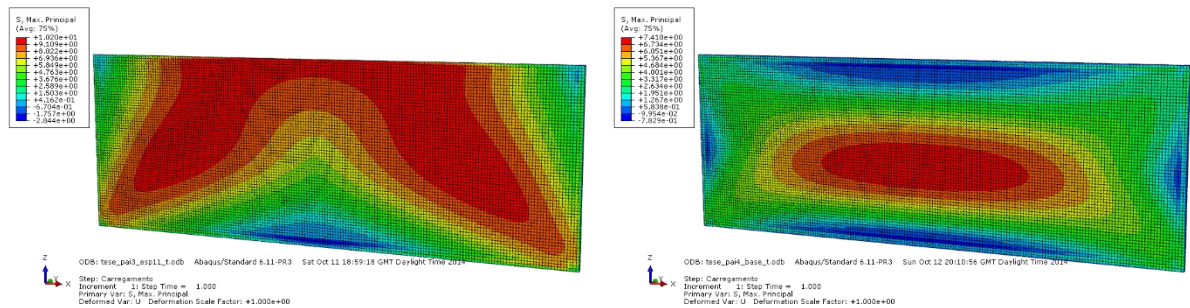


Figura 78 – Tensões principais máximas para painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).

Em termos de tensões principais mínimas (figura 79), à semelhança do que se observou para as tensões de tração num painel apoiado em 3 bordos, as tensões máximas de compressão encontram-se no centro do painel, numa zona mais próxima do bordo livre. Num painel apoiado em todos os bordos, as tensões de compressão são máximas no centro do painel. No entanto verificam-se tensões próximas das máximas na zona junto ao bordo do lado em que o painel está sujeito à compressão, devido à deformação do painel nos bordos e à existência de compressão pela aplicação da pré-compressão. A diferença entre as tensões registadas nos dois sistemas de apoio representa um decréscimo de cerca de 26,1% pela fixação do bordo superior.

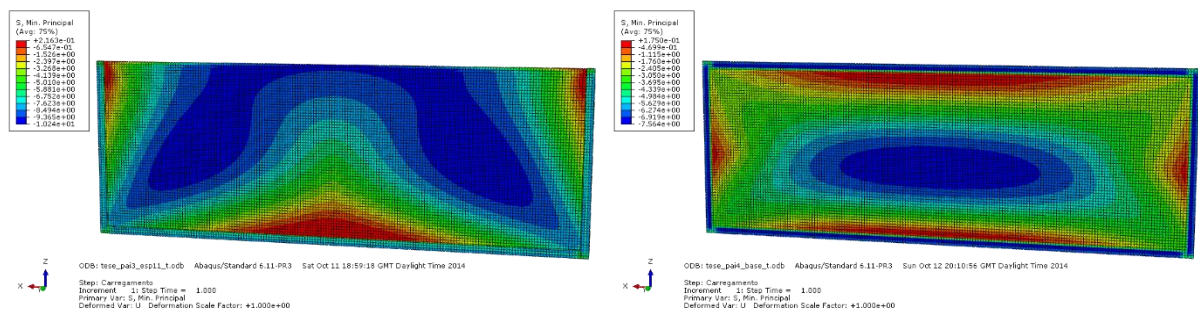


Figura 79 - Tensões principais mínimas para o painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para o painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).

Em termos de deformações (figura 80), a deformação que ocorre no painel apoiado em três bordos é máxima na zona do bordo livre, enquanto que para o painel apoiado em todos os bordos a deformação é máxima no centro do painel, numa zona ligeiramente a baixo do centro devido à maior intensidade da carga na zona inferior (diagrama de pressões triangular). A diferença de deformação entre os dois esquemas de apoio são muito díspares, sendo que a fixação do bordo superior representa uma redução na deformação de cerca de 91,3%.

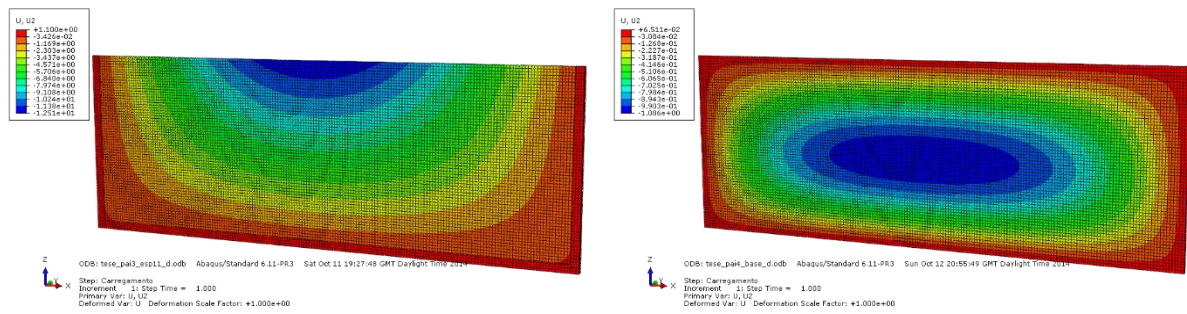


Figura 80 – Deformações máximas para o painel apoiado em 3 bordos [esquerda] e para o painel apoiado em 4 bordos [direita] (imagens ampliadas no anexo 4).

6.3.2. Valor máximo do carregamento

Tomando como referência a pré-norma prEN 16612, para painéis de vidro termo-endurecido o valor característico da resistência à flexão é de 70 N/mm^2 , pelo que o valor de cálculo da tensão admissível determinado pela expressão 3.7 é 29 N/mm^2 .

Tendo em conta este valor, realizou-se um ensaio numérico em que o bordo inferior do painel se situava a 2 metros de profundidade e posteriormente a 3 metros de profundidade, pelo que se constatou que o valor da tensão máxima de tração tinha o valor de $36,3 \text{ MPa}$, valor superior ao valor de cálculo para a tensão admissível definida pela norma.

Com isto, procedeu-se ao cálculo do painel para uma profundidade de 10 metros de forma a perceber se o aumento das tensões máximas era diretamente proporcional ao aumento da profundidade e ao aumento linear da carga triangular.

A figura 81 apresenta a relação entre a profundidade à qual é colocado o painel de vidro e a tensão máxima de tração instalada.

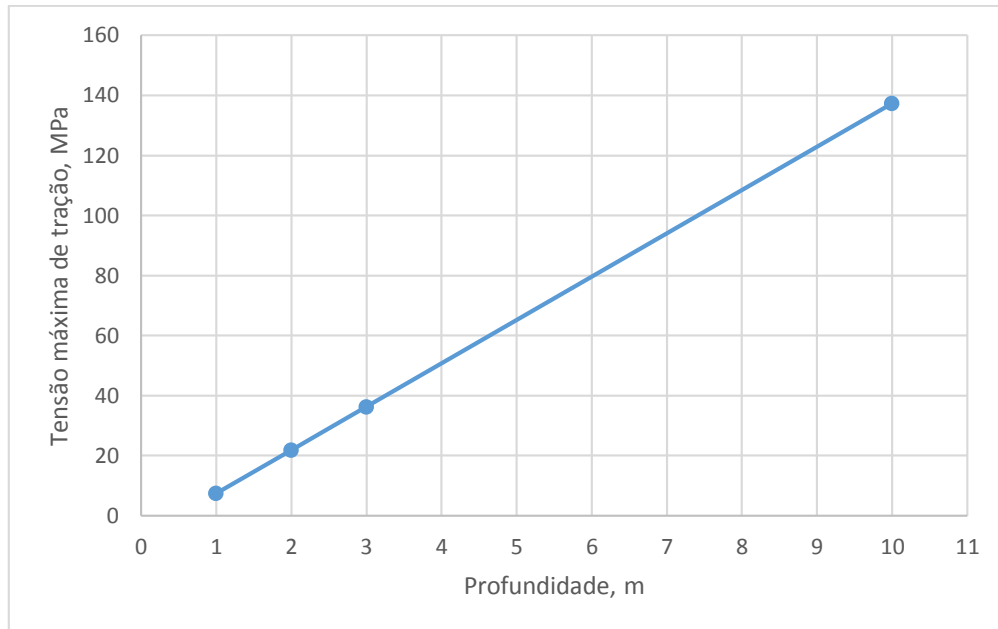


Figura 81 – Relação entre a profundidade à qual é colocado o painel de vidro e a tensão máxima de tração instalada.

Assim, foi possível verificar que a variação de tensões é muito próxima de um comportamento linear, pelo que bastou fazer uma interpolação numérica para estimar a profundidade máxima a que o painel pode estar sujeito. Este cálculo resultou num valor para a profundidade máxima de 2,5 metros.

6.3.3. Comparação com painel em acrílico

Por último, e retomando a comparação iniciada anteriormente entre as propriedades mecânicas do acrílico e as do vidro, procedeu-se à execução de um modelo numérico constituído por um painel de acrílico com uma espessura equivalente à de um painel duplo de vidro de 15 mm. Assim, definiu-se um painel em acrílico com a espessura de 30 mm de forma a fazer uma comparação entre as tensões e deformações obtidas pela utilização deste tipo de material.

Os parâmetros utilizados para o acrílico foram o módulo de elasticidade de 3,3 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,37 [21].

As condições de apoio e de carregamento foram as mesmas que as definidas para o painel em vidro apoiado em 4 bordos e sujeito a uma carga hidrostática com 1 metro de profundidade.

Os resultados principais que se obtiveram foram os seguintes: tensão máxima = 3,85 MPa; deformação máxima = 0,66 mm.

As deformações máximas e tensões máximas de tração para o painel em acrílico apoiado em 4 bordos são apresentadas na figura 82.

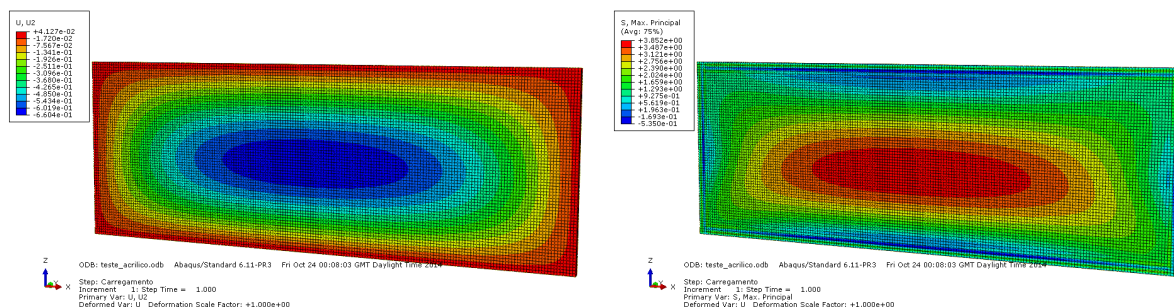


Figura 82 – Deformações máximas [esquerda] e tensões principais máximas [direita] para painel em acrílico apoiado em 4 bordos (imagens ampliadas no anexo 4).

Os resultados obtidos em termos de tensões para o painel em acrílico, e segundo o descrito nas diretrizes de dimensionamento em acrílico [21], o valor de 3,85 MPa ultrapassa o valor máximo da tensão admissível de 3 MPa, pelo que a espessura de acrílico é inferior à mínima requerida. Relativamente às deformações, a deformação máxima não excede os valores máximos regulamentares.

Comparativamente com o vidro, para as mesmas condições, um painel em vidro com as mesmas dimensões apresenta um valor da tensão máxima de tração mais elevado. No entanto, o valor máximo da tensão admissível do vidro tem um valor de 29 MPa, pelo que a solução em vidro poderia ser aligeirada, levando a uma maior economia em termos de material.

Em termos de custos, o vidro apresenta um menor custo por quantidade que o acrílico, pelo que a solução em vidro seria mais económica.

7. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta dissertação consistiu em analisar as soluções existentes atualmente para estruturas transparentes, passando pela utilização de acrílico submerso assim como pela utilização de vidro estrutural em edifícios, de forma a perceber como se poderia adaptar a um sistema de vidro submerso. Numa primeira fase, o objetivo concentrou-se em definir regras de dimensionamento para este tipo de sistema, baseado em normas e regras de dimensionamento já existentes. No entanto, depois de se efetuarem várias pesquisas constatou-se que as normas e artigos de dimensionamento existentes se baseavam em regras de dimensionamento para painéis simplesmente apoiados, com cargas uniformemente distribuídas. Com isto, surgiu o desafio de adaptar estas regras existentes ao caso em estudo. Associado a isto, a construção de um modelo experimental que representasse o caso em estudo era de difícil execução, não havendo condições para proceder à sua construção e posterior ensaio. Assim, optou-se por concentrar o estudo nos fatores que influenciam a utilização de vidro laminado em ambiente submerso e na calibração de modelos numéricos que permitiram, numa fase posterior, o estudo de casos práticos à escala real.

De forma a organizar as várias fases de trabalho realizadas, apresenta-se em seguida as principais dificuldades e conclusões retiradas dos resultados obtidos por capítulos.

7.1. Estado da arte relativo à tecnologia do vidro e ao vidro estrutural

Relativamente ao segundo capítulo, na qual se fez uma abordagem sobre as bases do vidro como elemento de utilização geral, foi possível encontrar informação tanto a nível nacional como internacional. Para a realização do capítulo optou-se por incidir a pesquisa maioritariamente em fontes internacionais, nomeadamente em livros de referência, sendo mais abundantes e detalhados.

Após o estudo realizado, constatou-se que o vidro é um material que tem visto a sua utilização crescer nos últimos anos, facto associado às recentes evoluções ao nível do processo de fabrico

e tratamento do vidro. Atualmente o processo de fabrico de vidro permite criar painéis de grandes dimensões e de elevada qualidade, pelo que é comum ver fachadas em alvenaria serem substituídas por fachadas envidraçadas. Esta alteração na arquitetura dos edifícios fez com que o vidro ganhasse mais relevância, e com isto verifica-se um aumento no interesse em estudar o vidro nas mais diversas aplicações. Embora tenha havido um constante melhoramento no processo de fabrico e tratamento do vidro, o problema que limita a utilização do vidro continua a existir, ou seja a sua baixa resistência a esforços de tração, que associada ao facto de o vidro ter rotura frágil, apresentam limitações e requerem um estudo pormenorizado quando aplicado como elemento estrutural.

Relativamente aos tipos de vidro, foi possível verificar que existe uma grande variedade de vidros, que satisfazem as cada vez mais exigentes necessidades construtivas. A utilização de vidro laminado, que surgiu com a sua utilização na indústria automóvel, tem adquirido uma grande popularidade e é atualmente a solução mais utilizada em elementos de vidro estrutural nos edifícios.

Em termos de ligações, foi possível verificar que hoje em dia existe um conjunto de soluções que permitem customizar as soluções estruturais com vidro, sendo possível encontrar edifícios revestidos com vidro e em que os elementos de ligação passam despercebidos, com recurso a ligações mecânicas pontuais ou ligações por colagem.

7.2. Vidro estrutural submerso

Em termos de vidro estrutural submerso, as pesquisas efetuadas, tanto a nível nacional como internacional resultaram em poucos resultados. A utilização de vidro em ambiente submerso já foi usada anteriormente, mas com o aparecimento e evolução do acrílico, a utilização de vidro neste tipo de estruturas deixou de ser aplicado, muito devido ao facto de o vidro apresentar menor permissividade a deformações e baixo valor de resistência à tração. No entanto, a combinação de vidros sujeitos a tratamento de melhoramento e associados a sistemas de vidro laminado vieram fazer do vidro uma alternativa à utilização do acrílico, pelo que já existem algumas aplicações deste género, mas ainda de forma muito reduzida.

As películas poliméricas que surgiram nos últimos anos vieram permitir a utilização do vidro laminado em condições mais exigentes. No caso do vidro laminado submerso, o estudo feito incluiu um dos aspetos que mais influência tem no comportamento do laminado neste tipo de

aplicações: o efeito da temperatura e a duração do carregamento nas propriedades mecânicas da interlayer.

O processo de dimensionamento do vidro submerso foi, de uma forma geral, difícil de realizar devido à ausência de normas e artigos de informação que permitissem adaptar regras existentes às condições exigidas pela aplicação em ambiente submerso. Desta forma, incidiu-se o estudo de dimensionamento na mais recente pré-norma europeia prEN 16612, analisando-se uma situação em que as condições de apoio não eram as indicadas para o tipo de aplicação. No entanto, este dimensionamento contempla a utilização de cargas uniformemente distribuídas que podem ser consideradas em painéis de vidro colocados horizontalmente e sujeitos a cargas de longa duração. A utilização desta norma, apesar de não permitir o dimensionamento de estruturas em vidro submersas, teve como finalidade proceder a uma calibração do modelo numérico, garantindo a sua validade.

7.3. Estudo experimental

A realização do estudo experimental formava parte dos objetivos definidos inicialmente no âmbito desta dissertação. Numa primeira fase existia a intenção de realizar um ensaio à escala real, que incluiria a conceção e ensaio do sistema de fixação estudado e desenvolvido no âmbito deste estudo. No entanto várias condicionantes obrigaram a limitar o estudo experimental aos ensaios realizados à escala laboratorial, necessários para a determinação dos parâmetros mecânicos dos painéis de vidro e do sistema de fixação em estudo, assim como para a calibração dos modelos numéricos usados para simular os casos de estudo à escala real.

O primeiro ensaio realizado, baseado na norma EN 1288-3, tinha como objetivo proceder à caracterização do material e dos seus parâmetros mecânicos, tendo sido respeitadas as diretrizes definidas na norma e tendo resultado num ensaio feito com rigor e com resultados dentro do esperado. Como ponto negativo considera-se o facto de terem sido ensaiados poucos provetes, o que devido à variabilidade de resultados conduziu a uma caracterização aproximada do material em estudo.

O segundo ensaio, relativo ao modelo em consola, consistiu num ensaio não normalizado concebido para permitir perceber o funcionamento do sistema de fixação, variando os parâmetros geométricos e mecânicos do apoio, nomeadamente o comprimento de entrega do vidro, a espessura e pré-compressão aplicada no material responsável pela transferência de

esforços do vidro para a estrutura de suporte. Inicialmente, o estudo era previsto incluir apenas o ensaio de diferentes tipos de vidro (recozido e termo-endurecido) e diferentes espessuras de vidro, além da variação dos parâmetros do apoio, ficando restrito à utilização de neoprene como material utilizado para a transferência de esforços. No entanto, devido à excessiva flexibilidade de algumas configurações e à não rotura dos provetes, incluiu-se a utilização de um material mais rígido para a transferência de esforços, nomeadamente o teflon, assim como o ensaio com a não inclusão de material. O ensaio experimental em consola, contrariamente ao ensaio de flexão em quatro pontos foi um ensaio com um elevado grau de dificuldade. Após montagem do esquema de ensaio, verificou-se que a maior dificuldade estava na imposição do deslocamento dos elementos metálicos que traduzia o nível de pré-compressão, que era controlado através de um paquímetro e aplicado através do aperto de quatro parafusos. Provavelmente o ajuste e contínua medição do deslocamento em vários pontos não resultou suficientemente de forma precisa para a aplicação em estudo.

No entanto, após análise dos resultados foi possível verificar que o ensaio realizado cumpriu o esperado, tendo sido possível obter resultados com o comportamento previsto. A utilização da fotografia digital e do software de DIC comprovou-se ser uma ferramenta muito importante neste ensaio, pois permitiu que fosse feita uma monitorização contínua do sistema de apoio, sem o qual teria sido muito difícil ou impossível de realizar com outros equipamentos de medição.

Em termos de resultados, através da análise dos vários diagramas que relacionam a força-deslocamento, assim como a análise através do DIC, foi possível concluir que:

- Um aumento da espessura de neoprene resulta numa maior flexibilidade do apoio;
- Um aumento na pré-compressão aplicada no apoio resulta numa menor flexibilidade do apoio;
- Um aumento do comprimento de entrega do vidro resulta numa menor flexibilidade do apoio;
- A utilização de um material mais rígido (teflon) para a transferência de esforços resulta numa maior rigidez do apoio, limitando mais a rotação no apoio comparativamente a um material menos rígido (neoprene);
- A não utilização de material para a transferência de esforços resulta numa má acomodação de tensões, levando à rotura do vidro para valores de cargas inferiores;

- A utilização de uma espessura excessiva do material para transferência de esforços resulta numa rotação excessiva e no escorregamento do vidro do sistema de apoio;
- A utilização de uma pré-compressão de valor insuficiente resulta também numa rotação excessiva e escorregamento do vidro do sistema de apoio.

7.4. Estudo numérico dos ensaios experimentais

O estudo numérico dos ensaios experimentais teve como objetivo principal o de verificar a correta modelação dos vários elementos que constituem o sistema de apoio do vidro, pelo que se procedeu à modelação tanto do ensaio de flexão em quatro pontos como do ensaio em consola. Os resultados obtidos na modelação do ensaio de flexão em quatro pontos foram, como verificado no capítulo 5, satisfatórios, uma vez que se obteve um comportamento correto do vidro quando sujeito a carregamentos, e valores próximos dos obtidos experimentalmente. Tal como explicado anteriormente, um aumento no número de provetes de vidro resultaria numa maior precisão do cálculo do módulo de elasticidade do vidro, e consequentemente permitiria uma maior aproximação dos modelos numéricos aos experimentais.

No ensaio em consola, apesar de terem sido obtidas maiores diferenças entre os resultados experimentais e os numéricos, possivelmente originado pela diferença na rigidez do apoio definida experimentalmente e numericamente, foi importante verificar os seguintes aspetos: a interação entre o vidro e o neoprene foi bem definida, pelo que se verifica uma deformação do neoprene nas zonas comprimidas e um descolamento do neoprene nas zonas tracionadas; comparativamente com a análise de fotografia digital, é possível também verificar que a rotação do vidro e o descolamento do neoprene para a mesma deformação imposta na zona do carregamento são idênticos para o modelo experimental e para o modelo numérico.

7.5. Estudo numérico dos casos de estudo

O estudo numérico dos casos de estudo foram divididos em três subcapítulos, tendo sido feito uma calibração de modelos através de um modelo geral, a construção de um modelo apoiado em três bordos e a construção de um modelo apoiado em quatro bordos. Relativamente ao modelo geral, a modelação de um sistema abrangido pela norma foi de extrema importância e revelou resultados muito próximos, o que garantiu uma correta modelação do sistema de vidro

laminado. Por outro lado, a adoção de várias opções no modelo numérico permitiu perceber a diferença de resultados que se obtém em função da análise feita assim como na definição da malha de elementos.

O caso de estudo 1 foi construído tendo por base o modelo definido no subcapítulo do modelo geral, e apesar de não haver um modelo experimental para comprovação dos resultados obtidos, a sucessão de resultados permitiu perceber a influência dos parâmetros anteriormente estudados no capítulo 4.

O caso de estudo 2 foi construído como forma de complementar o estudo do caso de estudo 1, por se tratar de uma configuração diferente, nomeadamente ao nível do sistema de fixação e que influencia e difere no comportamento do laminado. Por último, a comparação com um painel em acrílico foi essencial para perceber que o vidro, neste tipo de casos, pode ser considerado uma alternativa que permite economizar o sistema pretendido, garantindo as condições de segurança necessárias.

Em termos de resultados, através da análise dos parâmetros que influenciam o sistema de apoio para um painel de vidro apoiado em três bordos foi possível concluir que:

- Uma espessura de neoprene insuficiente resulta em valores de tensão mais elevados na zona do apoio;
- Uma espessura de neoprene excessiva resulta em valores de tensão mais elevados no centro do painel;
- Uma pré-compressão insuficiente resulta numa maior permissividade a deformações e por consequência a valores mais elevados de tensão no centro do painel;
- Uma pré-compressão excessiva resulta em valores de tensão mais elevados na zona do apoio;
- Um comprimento de entrega insuficiente resulta numa maior permissividade a deformações e por consequência a valores mais elevados de tensão no centro do painel;
- Um comprimento de entrega excessivo resulta em valores de tensão mais elevados na zona do apoio.

Comparativamente com o painel apoiado em quatro bordos, foi possível concluir que houve uma redução muito significativa em termos de valores de tensões e deformações máximas, pelo que o suporte em todos os bordos exige soluções estruturais de menores espessuras.

De forma complementar, procedeu-se à análise do valor máximo do carregamento para a solução definida, sendo que foi possível concluir que, de forma a respeitar os valores das tensões máximas admissíveis segundo a pré-norma prEN 16612, a profundidade máxima a que se podia sujeitar os painéis é de 2,5 metros, o que corresponde a um valor da tensão máxima de tração de 29 MPa no centro do painel.

Por último, através da utilização de um painel em acrílico com a espessura equivalente ao laminado, foi possível verificar que o valor das tensões máximas ultrapassam as tensões máximas admissíveis para o dimensionamento de acrílico submerso.

7.6. Considerações finais e perspetivas de desenvolvimento futuro

Tendo por base o trabalho realizado e apresentado ao longo desta dissertação, considera-se que os objetivos que foram estabelecidos inicialmente foram cumpridos, tendo sido possível com este trabalho avaliar a abrangência dos requisitos e das condicionantes da utilização de vidro estrutural em ambiente submerso.

Nesta fase final, e depois de um longo período de trabalho, é possível olhar para o trabalho feito e perceber as melhorias que podiam ser feitas caso existisse algum trabalho anterior sobre o tema em estudo. Entre as várias conclusões já discutidas, destaca-se o facto de não haver informação suficiente para a definição de regras de dimensionamento e que poderá no futuro ser de mais fácil execução com a elaboração do eurocódigo para dimensionamento de estruturas em vidro [3].

Em termos de trabalhos futuros, e relativamente aos modelos experimentais, a disponibilidade de equipamento e de provetes para a realização de um ensaio experimental constituído por um painel de vidro laminado e sujeito a uma carga hidrostática seria uma boa forma de verificação do funcionamento do sistema estrutural. Este ensaio seria útil para avaliar as deformações reais do painel de vidro e verificar a estanquicidade do sistema, mediante a utilização de diferentes parâmetros nos apoios.

Em termos de modelos numéricos, considera-se que os modelos numéricos utilizados são suficientemente capazes de simular as situações analisadas, pelo que a utilização do software escolhido é uma boa opção para este tipo de análise, permitindo ao engenheiro projetista uma fácil definição da geometria e o cálculo do sistema. Numa perspetiva de trabalhos futuros, a

realização de um algoritmo capaz de fazer a interligação entre a geometria requerida e o software de cálculo seria uma ferramenta útil para automatizar e otimizar a solução estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Callewaert, Dieter.** *Stiffness of glass/ionomer laminates in structural applications.* Department of Structural Engineering, Ghent University, Doctoral Thesis. Ghent : Faculteit ingenieurswetenschappen en architectuur, 2012. Doctoral Thesis. ISBN 978-90-8578-469-2.
- [2] **Haldimann, Matthias, Luible, Andreas e Overend, Mauro.** *Structural use of glass.* Zurich : IABSE-AIPC-IVBH, 2008. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [3] **Feldmann, M. e Kasper.** *Guidance for european structural design of glass components.* Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint research centre. Ispra : Publications office of the european union, 2014. ISBN 978-92-79-35093-1.
- [4] **Pinto, Armando.** *Componentes de edifícios. Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro.* Lisboa : LNEC, 2010.
- [5] **Bength, Camilla.** *Bolt fixings in toughened glass.* Department of Construction Sciences, Lund University, Master's Dissertation. Lund : Structural Mechanics, 2005. Master's Dissertation. ISSN 0281-6679.
- [6] **Vários autores.** A fabricação do vidro. [Online] Saint Gobain Glass. [Citação: 18 de 5 de 2014.] <http://www.saint-gobain-glass.com.br/fabricacao.asp>.
- [7] **Wurm, Jan.** *Glass structures – Design and construction of self-supporting skins.* Basel : s.n., 2007. ISBN: 978-3-7643-7608-6.
- [8] **Bennison, Stephen J., Qin, Maria Hx e Davies, Phillip S.** *High-performance laminated glass for structurally efficient glazing.* s.l. : DuPont de Nemours & Co. Inc., 2008.
- [9] **Vários autores.** Phase developments. [Online] 2008. [Citação: 28 de 5 de 2014.] <http://www.phasedevelopments.co.uk/page25.html>.
- [10] **Valarinho, Luís G. D. C. S.** *Construção em vidro estrutural. Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP.* Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2010. Tese de mestrado.
- [11] **Vários autores.** Acrylic v. glass. [Online] 2011. <http://www.reynoldspolymer.com/userfiles/files/Acrylic%20v%20Glass%20RPT11-005.pdf>.

- [12] —. Plexiglas product description. [Online] 2000. [Citação: 29 de 09 de 2014.]
- [13] **Majoral, Albert Vidal**. Can glass compete with acrylics in large aquarium enclosures? *Glass Files*. [Online] 2011. [Citação: 19 de 3 de 2014.] <http://www.glassfiles.com>.
- [14] **D’Haene, Pol e Savineau, Gérard**. Mechanical properties of laminated safety glass - FEM study. *Glass files*. [Online] 2007. <http://www.glassfiles.com>.
- [15] **BSI Group**. *prEN 16612 Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing*. 2013.
- [16] **Evonik Industries AG**. Vertical glazing with plexiglas. *Plexiglas*. [Online] 01 de 2014. [Citação: 29 de 09 de 2014.] <http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Sheet/Verarbeitungsrichtlinien/311-9-Vertikalverglasung-mit-PLEXIGLAS-en.pdf>.
- [17] **BSI Group**. *EN 1288-3 - Glass in building. Determination of the bending strength of glass. Part 3: Test with specimen supported at two points (four-point bending)*. 2000.
- [18] **Martha, Luiz Fernando**. Ftool - Two-dimensional Frame Analysis Tool. *Tecgraf PUC-RIO*. [Online] 2.12. <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>.
- [19] **Dassault Systèmes**. *Abaqus/CAE User's Manual*. 2010. User's manual.
- [20] **Fröling, Maria**. *Strength design methods for laminated glass*. Department of construction sciences, Lund University. Lund : s.n., 2011. Licentiate Dissertation. ISSN 0281-6679.
- [21] **Vários autores**. Aquarium Glazing. [Online] Degussa, 10 de 2006. [Citação: 23 de 7 de 2014.]
- [22] **Serafinavičius, Tomas, et al**. *Long-term laminated glass four point bending test with PVB, EVA and SG interlayers at different temperatures*. [ed.] Elsevier Ltd. 2013.
- [23] **Pesek, Ondrej e Melcher, Jindrich**. Influence of shear forces on deformation of structural glass beams. [Online] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2012/Paris/CHEMCIV/CHEMCIV-40.pdf>. ISBN: 978-1-61804-137-1.
- [24] **Akter, Shaheda Tahmina e Khani, Mohammad Sadegh**. *Characterisation of laminated glass for structural applications*. Institutionen för bygg- och energiteknik, Linnaeus University. Växjö : s.n., 2013. Master thesis.

- [25] **Wit, Jelle Matthijs de.** *Computational modeling of cold bent glass panels*. Department of Structural Engineering, Delft University Of Technology. Delft : s.n., 2009. Master Thesis Report.
- [26] **Vários autores.** Acrylic panel thickness. [Online] Hydrosight. [Citação: 5 de 06 de 2014.] <http://www.hydrosight.com/acrylic-panel-thickness/>.
- [27] **Blaber, Justin e Antoniou, Antonia.** *Ncorr instruction manual*. Georgia Institute of Technology. 2014. Instruction Manual.
- [28] **Nežerka, Václav.** *Ncorr_post – open-source Digital Image Correlation (DIC) post-processing tool*. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague. Prague : s.n., 2014. Instruction Manual.
- [29] **Casaccio, Sandro.** Laminated glass for modern marine glazing. *Glass files*. [Online] 2011. [Citação: 19 de 3 de 2014.] <http://www.glassfiles.com/>.
- [30] **Gizzi, Valentina e Bennison, Stephen J.** New Marine Glazing Developments. *Glass files*. [Online] 2009. [Citação: 19 de 3 de 2014.]
- [31] **Overend, Mauro, Gaetano, Sergio De e Haldimann, Matthias.** Diagnostic Interpretation of Glass Failure. *University of Cambridge*. [Online] 2 de 2007. [Citação: 14 de 8 de 2014.] http://www-g.eng.cam.ac.uk/gft/media/PG%20projects/Mauro's%20publication/Diagnostic_Interpretation_of_Glass_Failure_DRAFT.pdf.
- [32] **Vários autores.** *Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features*. West Conshohocken : ASTM International, 2003.
- [33] **DuPont.** *SentryGlas Plus Elastic Properties (SGP 500)*. 14 de 4 de 2008.
- [34] **Fröling, Maria.** *Strength design methods for glass structures*. Department Of Construction Sciences, Lund University. Lund : s.n., 2013. Doctoral Thesis. ISBN 978-91-7473-600-7.

ANEXOS

ANEXO 1

Padrão de fendilhação após rotura dos provetes de vidro ensaiados simplesmente apoiados

Vidro termo-endurecido de 6 mm



Figura 83 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P1.



Figura 84 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P2.



Figura 85 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P3.

Vidro termo-endurecido de 8 mm



Figura 86 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P4.



Figura 87 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P5.



Figura 88 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P6.

Vidro recozido de 12 mm



Figura 89 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.



Figura 90 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.



Figura 91 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P9.

Vidro recozido de 15 mm



Figura 92 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P10.



Figura 93 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P11.



Figura 94 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P12.

ANEXO 2

Padrão de fendilhação após rotura dos provetes de vidro ensaiados em consola

Vidro recozido de 12 mm



Figura 95 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P1.



Figura 96 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P2.



Figura 97 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P3.



Figura 98 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P4.



Figura 99 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P5.



Figura 100 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P6.

Vidro recozido de 15 mm

Figura 101 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.



Figura 102 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.



Figura 103 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P7.



Figura 104 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P8.

Vidro termo-endurecido de 8 mm

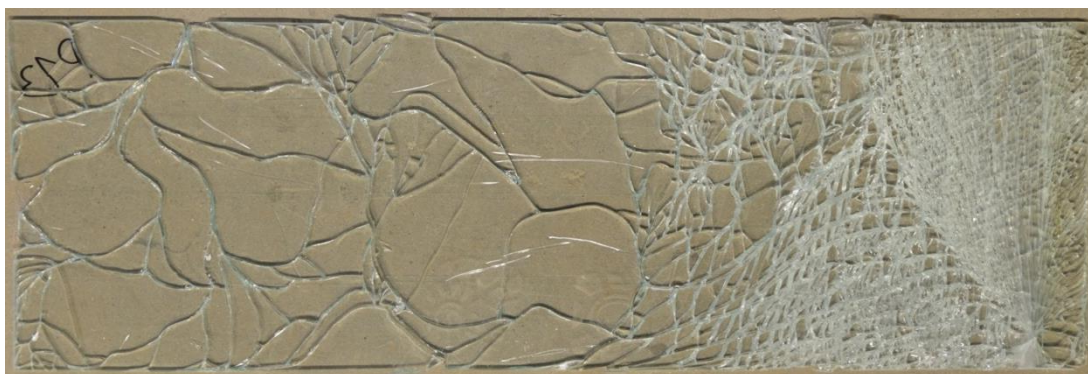


Figura 105 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P13.



Figura 106 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P14.

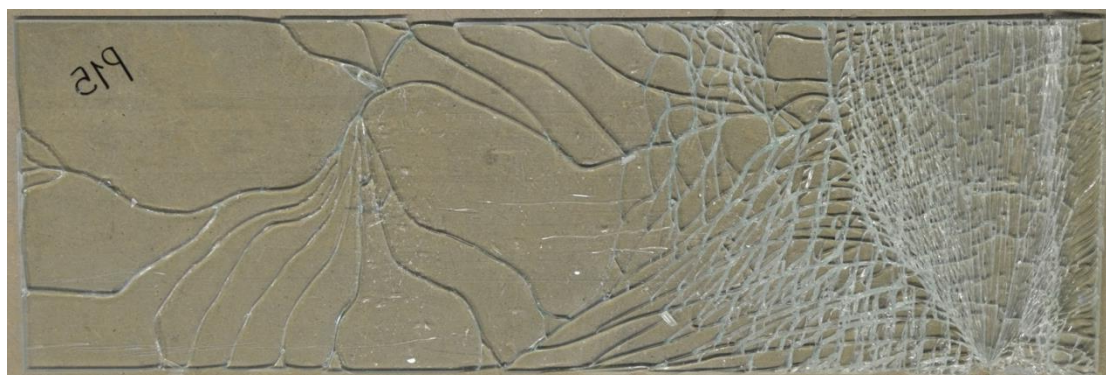


Figura 107 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P15.

Vidro termo-endurecido de 6 mm



Figura 108 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P16.

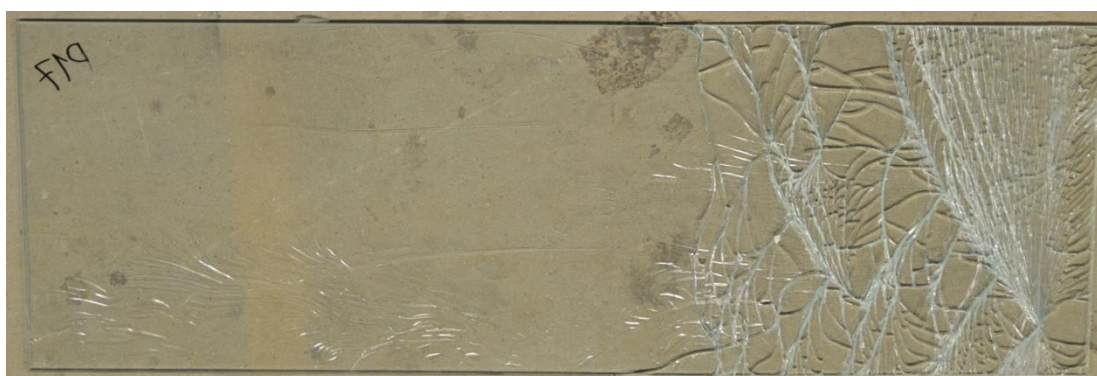


Figura 109 – Padrão de fendilhação após rotura do provete P17.

ANEXO 3

Resultados gráficos da modelação numérica do caso de estudo 1

Variação da espessura de neoprene

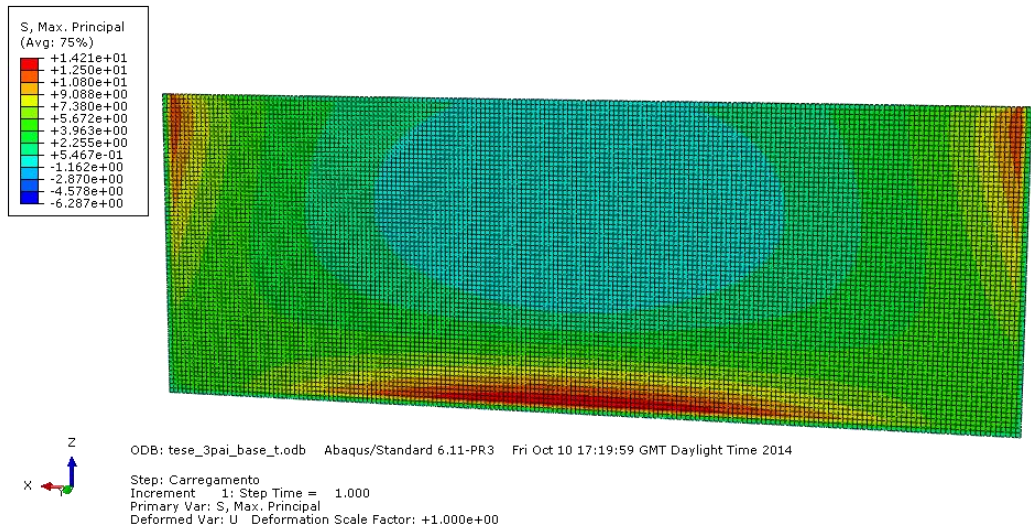


Figura 110 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 4 mm.

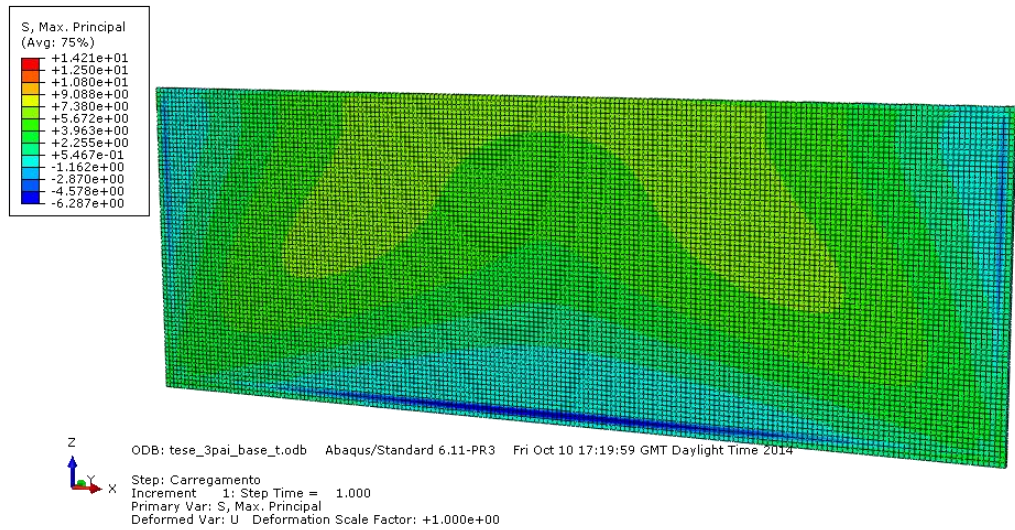


Figura 111 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 4 mm.

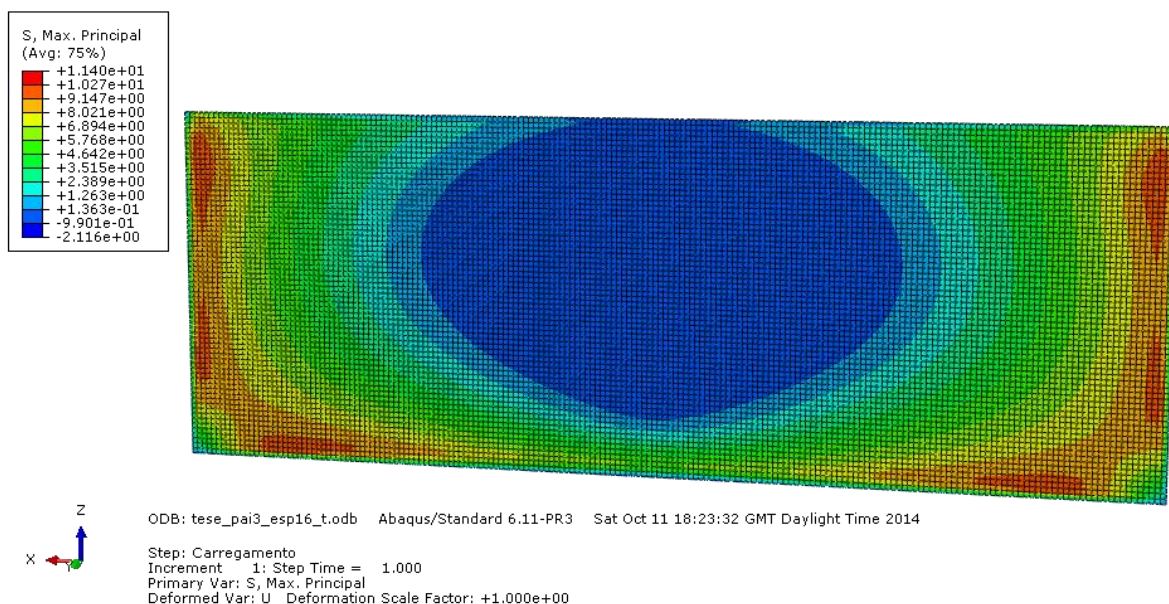


Figura 112 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 16 mm.

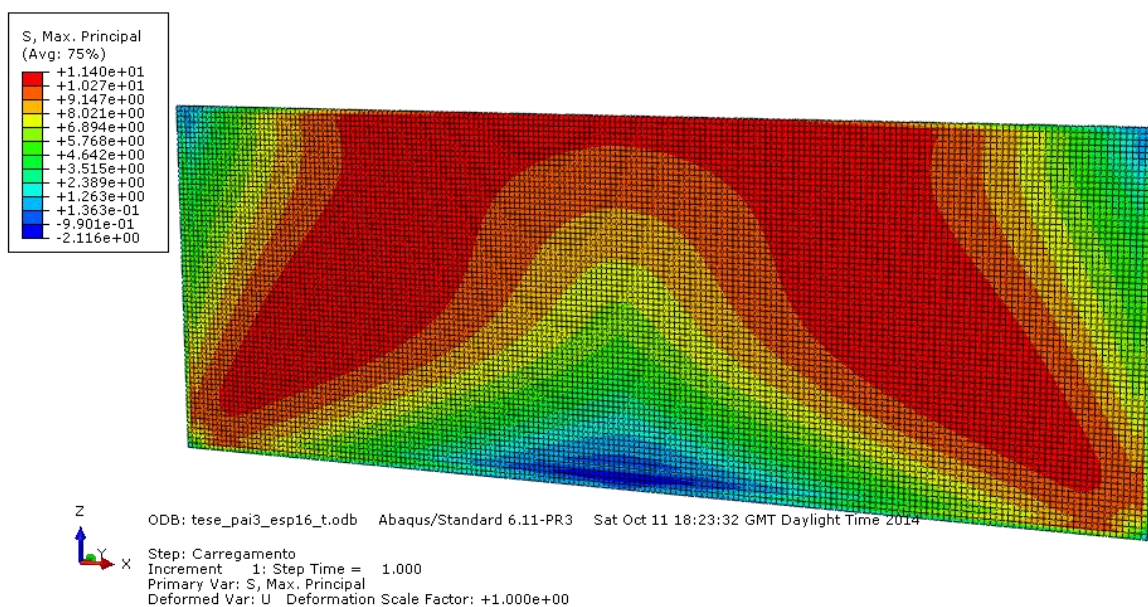


Figura 113 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 16 mm.

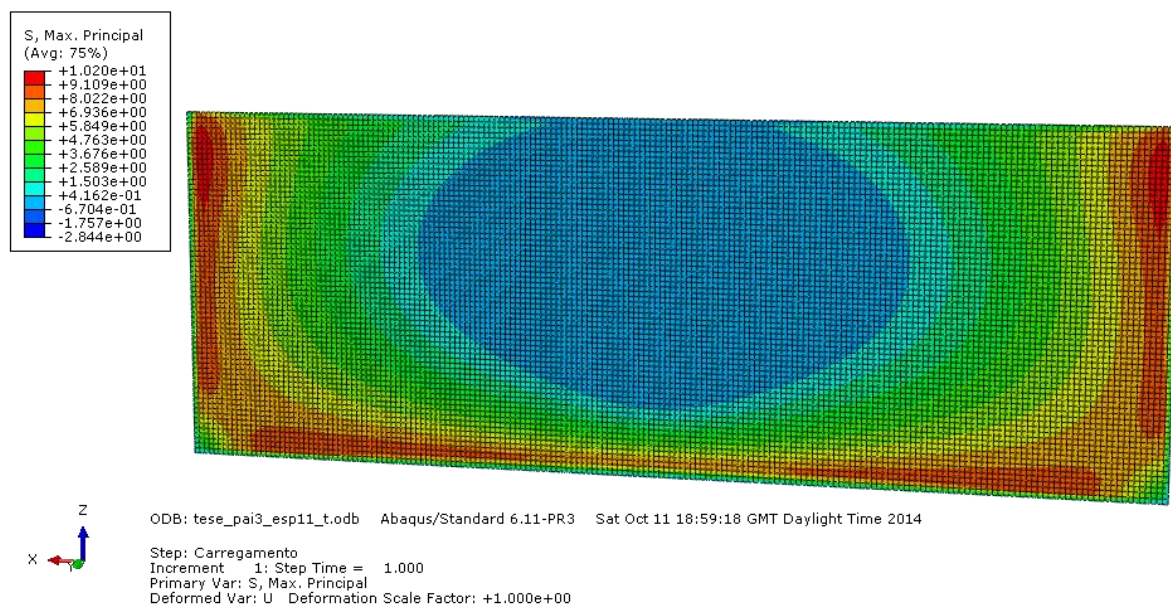


Figura 114 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma espessura de 11 mm.

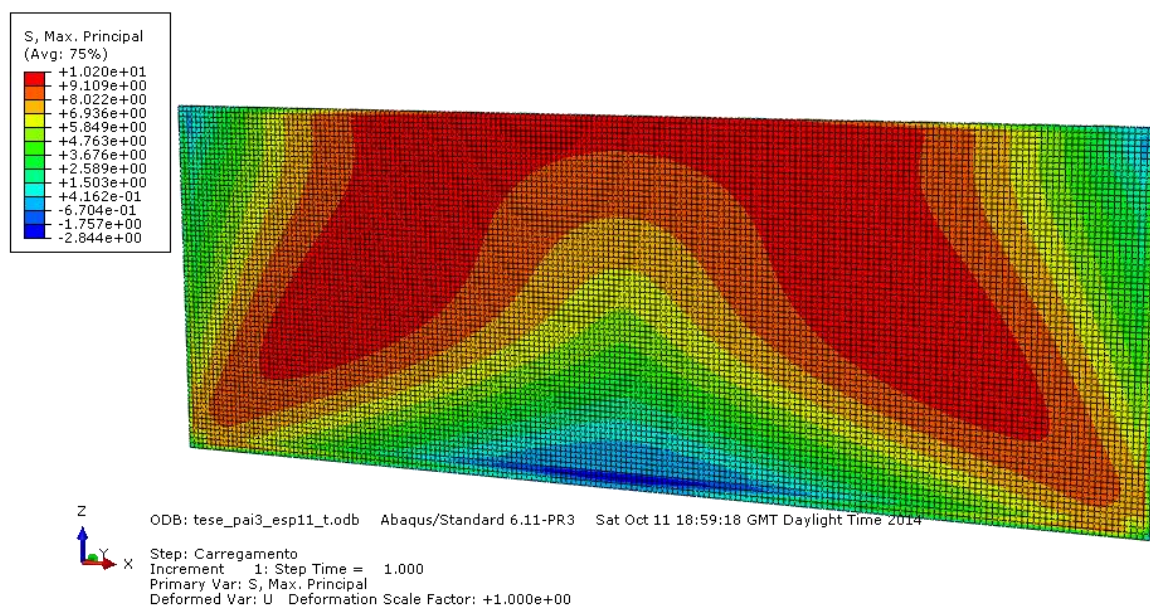


Figura 115 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma espessura de 11 mm.

Variação da pré-compressão

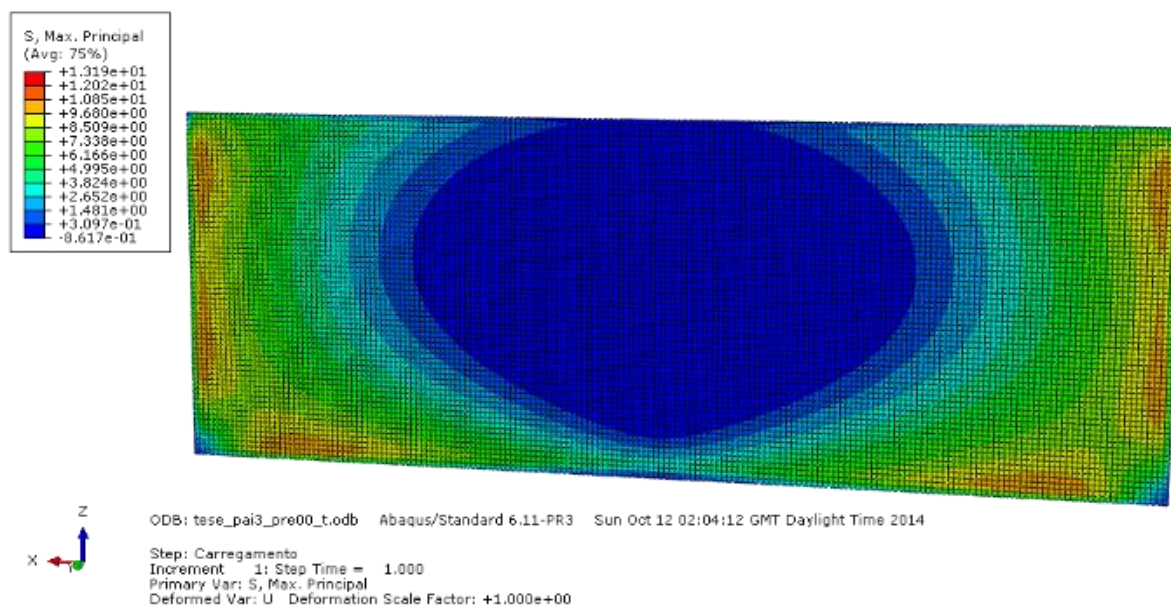


Figura 116 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para a não aplicação de pré-compressão no neoprene.

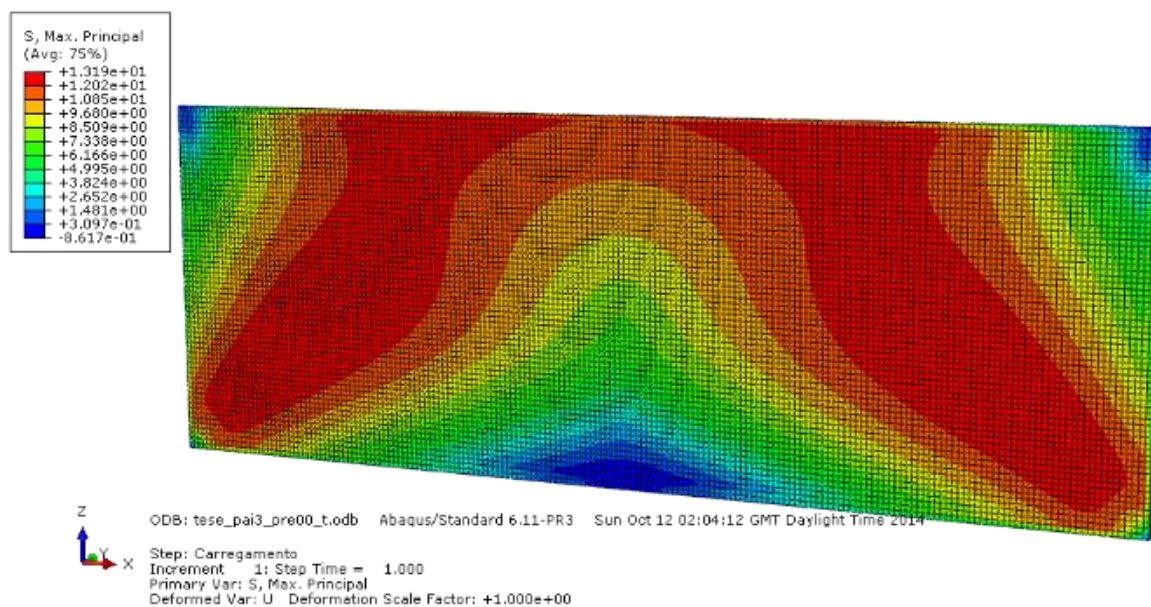


Figura 117 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para a não aplicação de pré-compressão do neoprene.

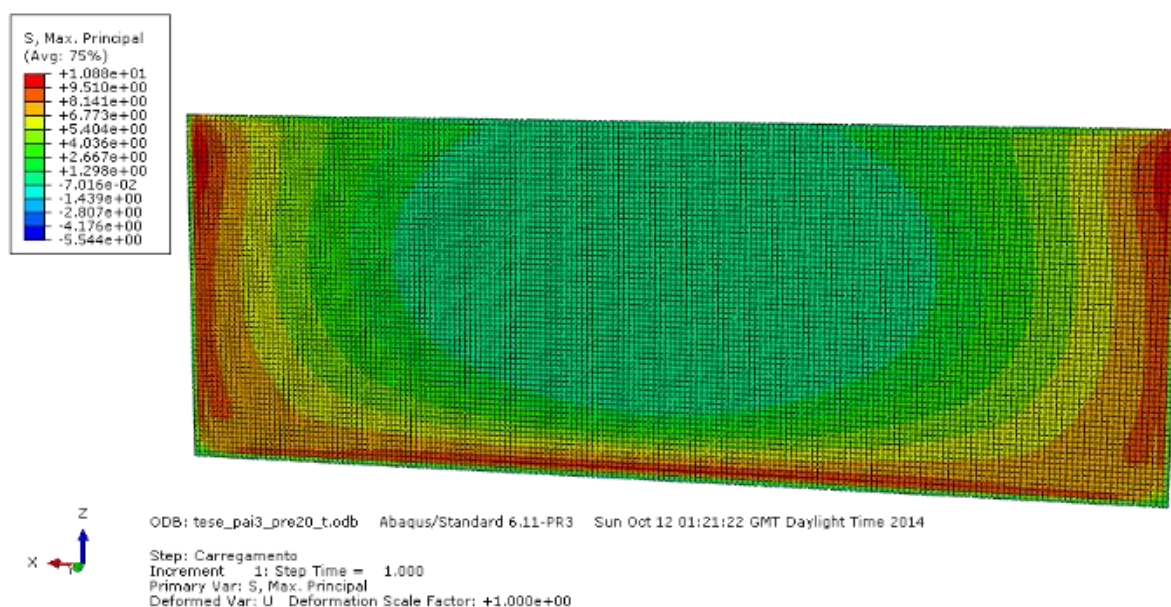


Figura 118 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para uma pré-compressão do neoprene de 20%.

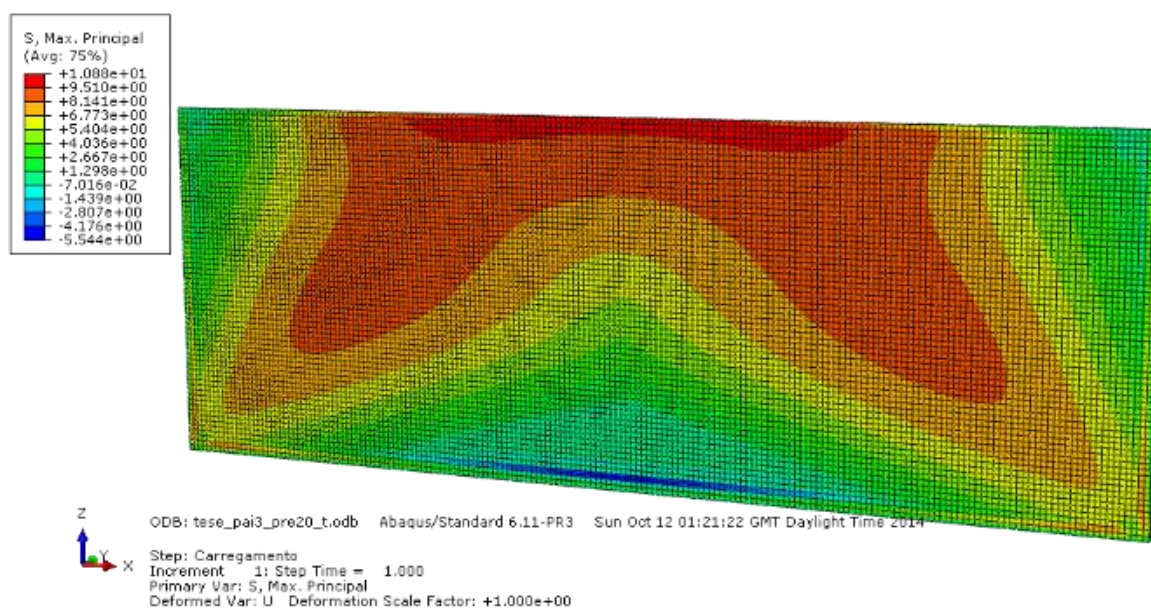


Figura 119 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para uma pré-compressão do neoprene de 20%.

Variação do comprimento de entrega

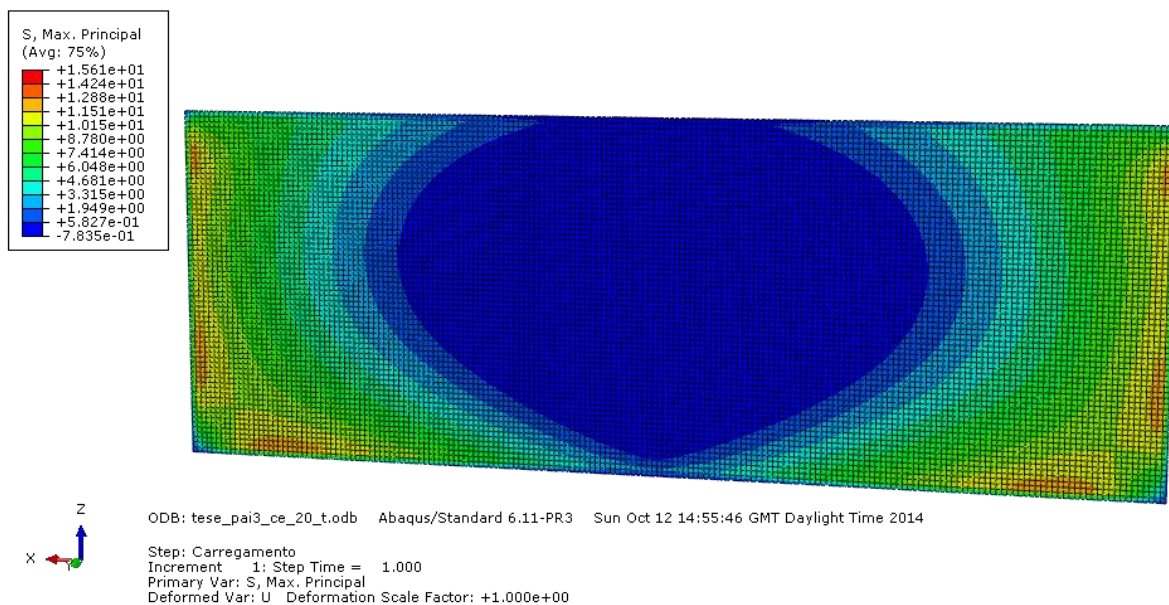


Figura 120 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para um comprimento de entrega de 20 mm.

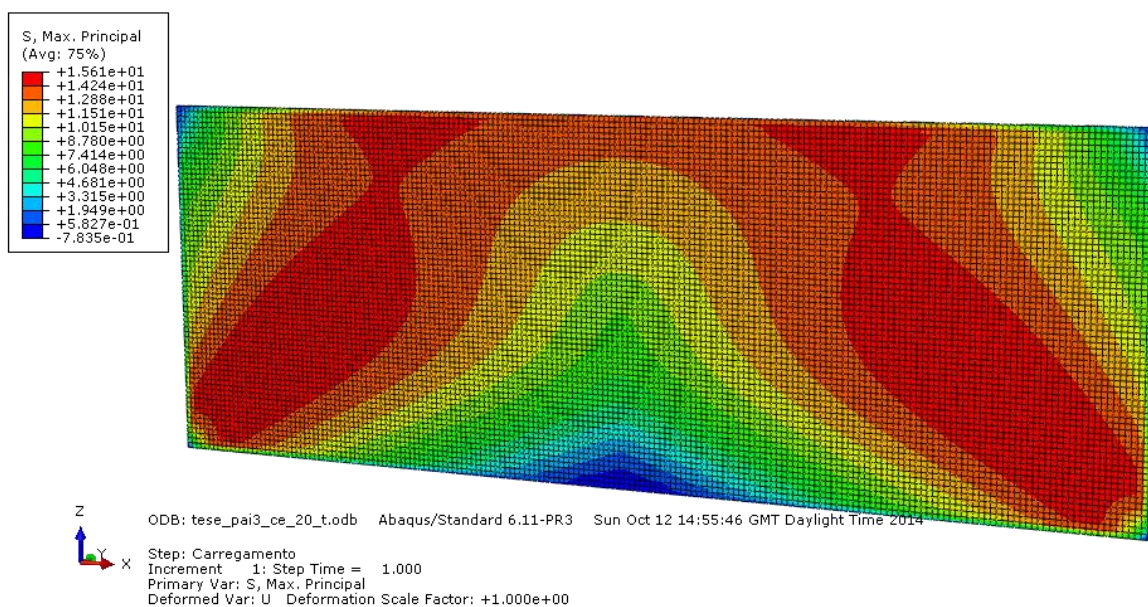


Figura 121 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para um comprimento de entrega de 20 mm.

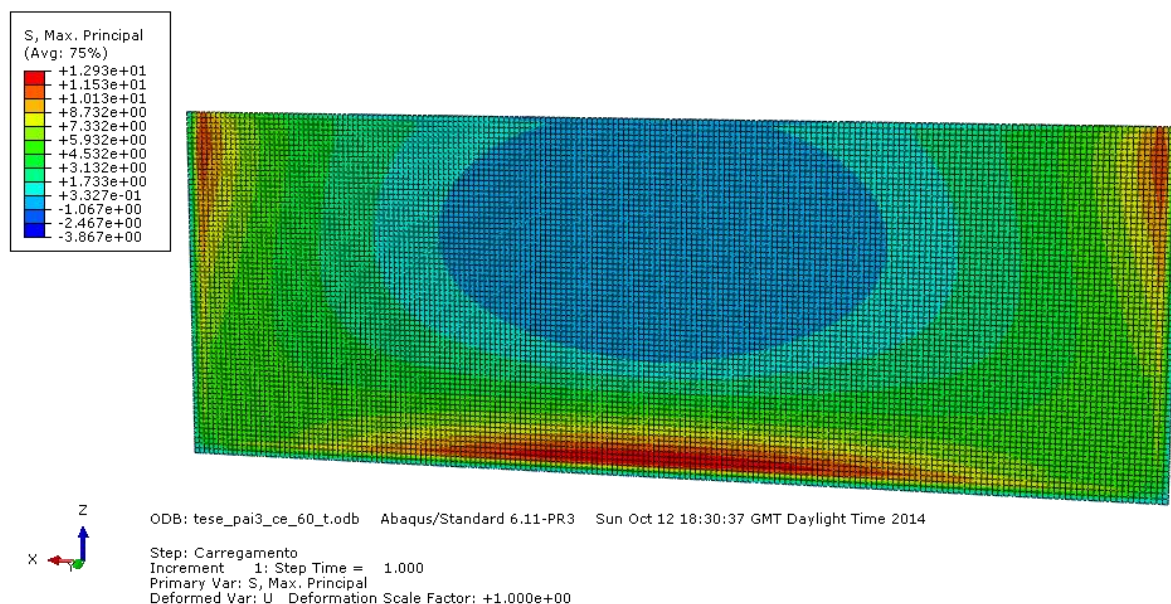


Figura 122 - Tensões principais máximas na face sujeita a compressão para um comprimento de entrega de 60 mm.

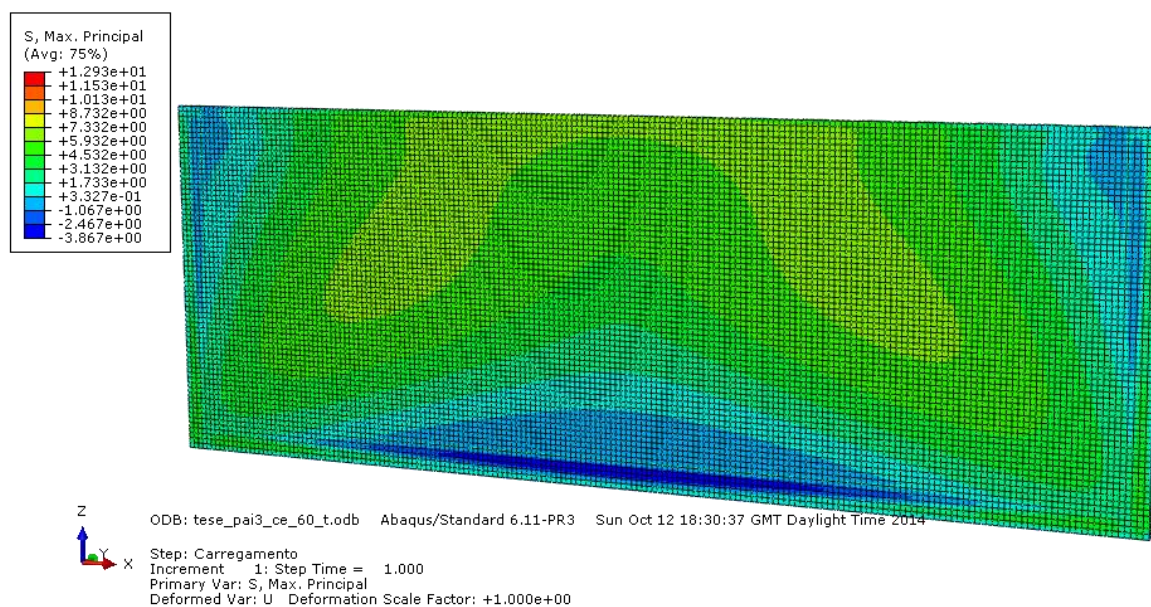


Figura 123 - Tensões principais máximas na face sujeita a tração para um comprimento de entrega de 60 mm.

ANEXO 4

Resultados gráficos da modelação numérica do caso de estudo 2

Comparação do efeito das tensões e deformações máximas com o caso de estudo 1

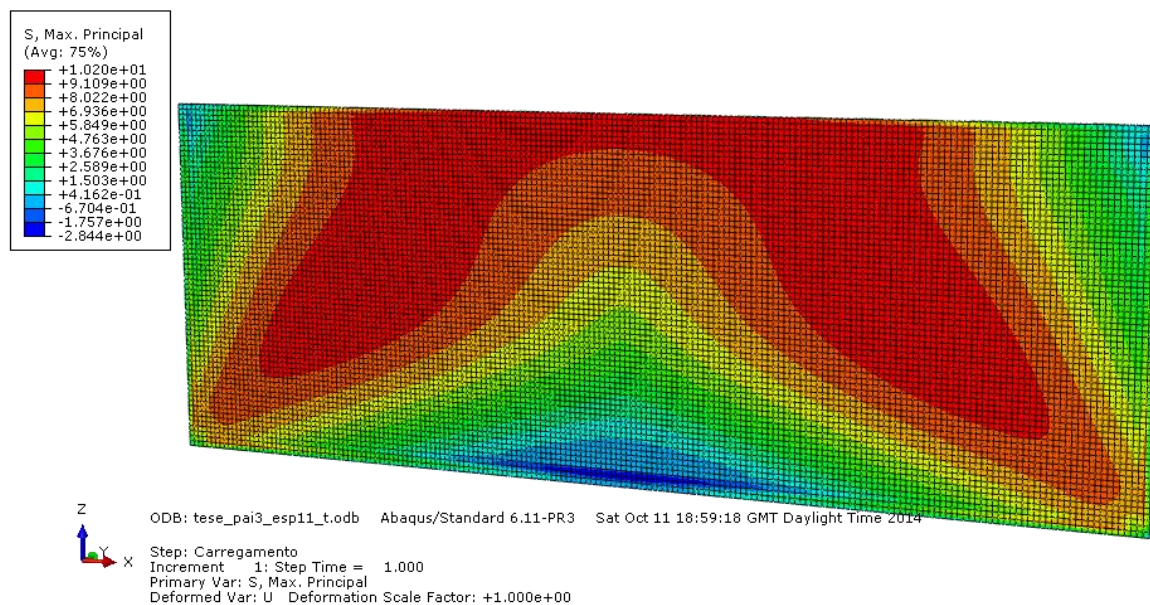


Figura 124 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 3 bordos.

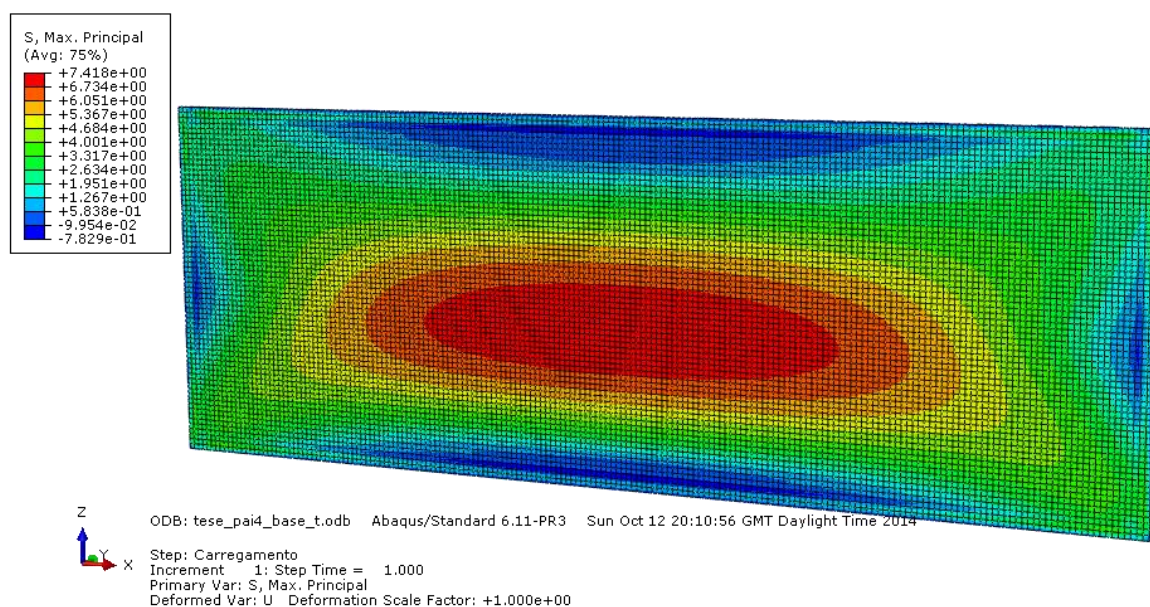


Figura 125 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 4 bordos.

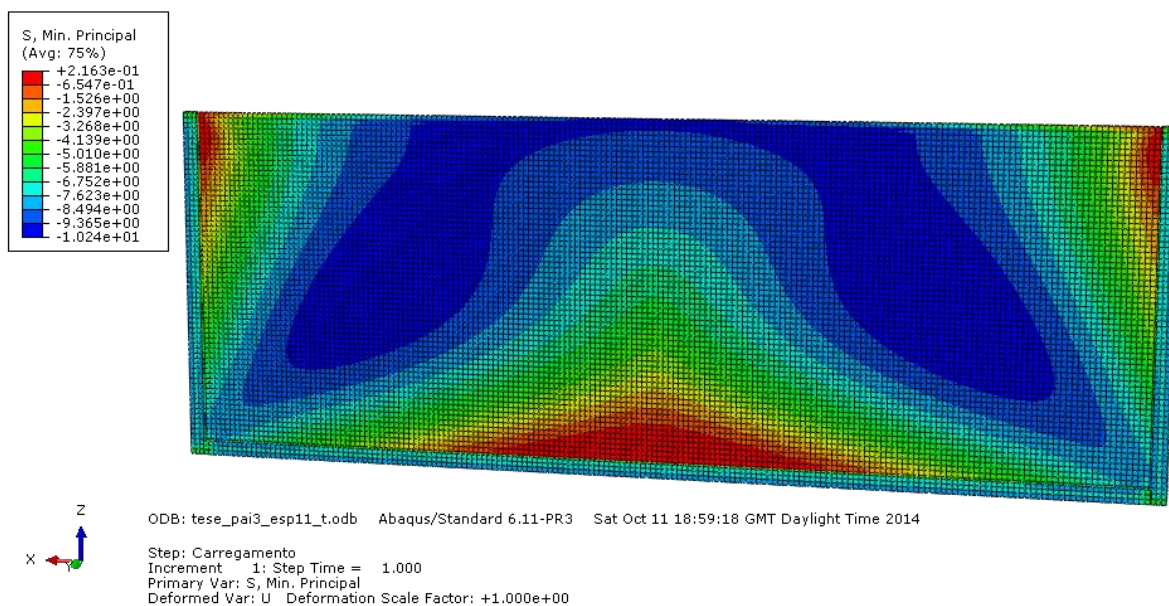


Figura 126 - Tensões principais mínimas para painel apoiado em 3 bordos.

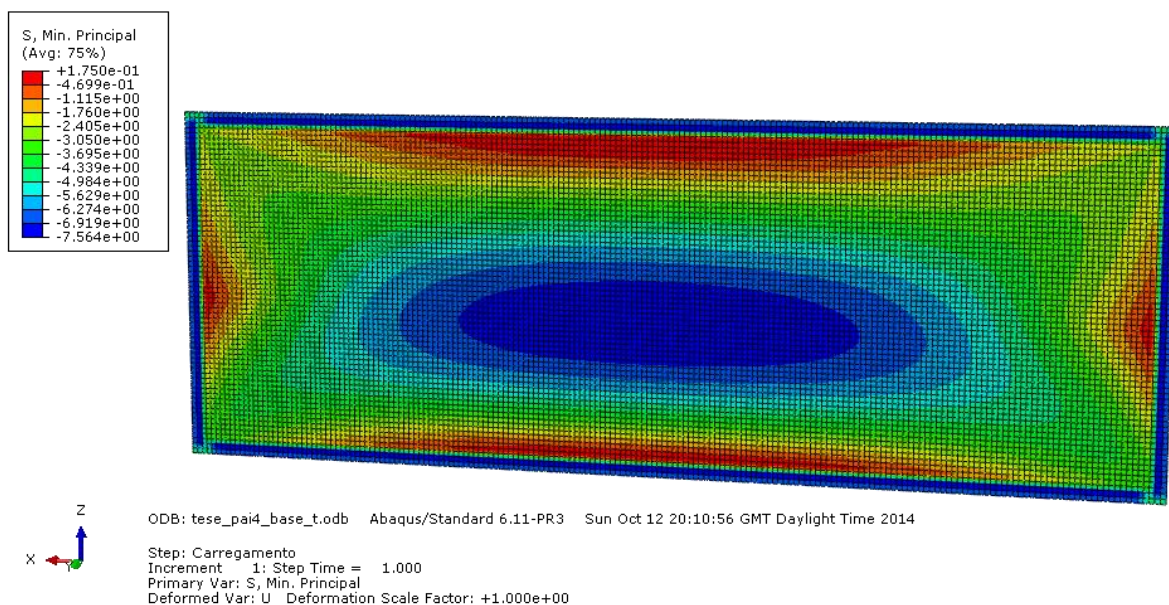


Figura 127 - Tensões principais máximas para painel apoiado em 4 bordos.

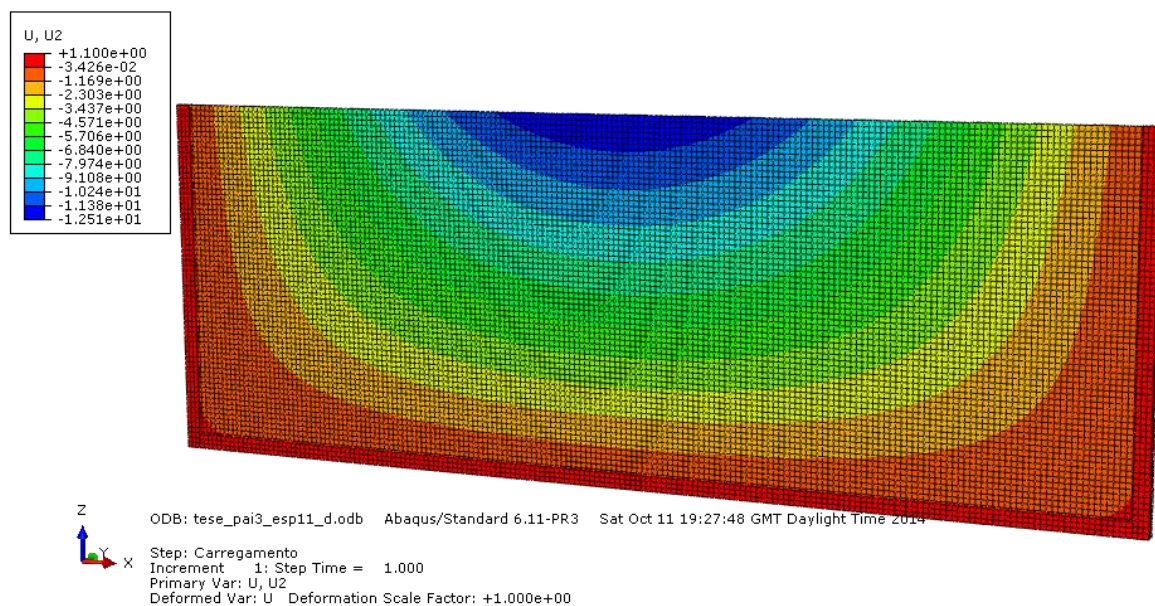


Figura 128 - Deformações na direção perpendicular ao painel para o painel apoiado em 3 bordos.

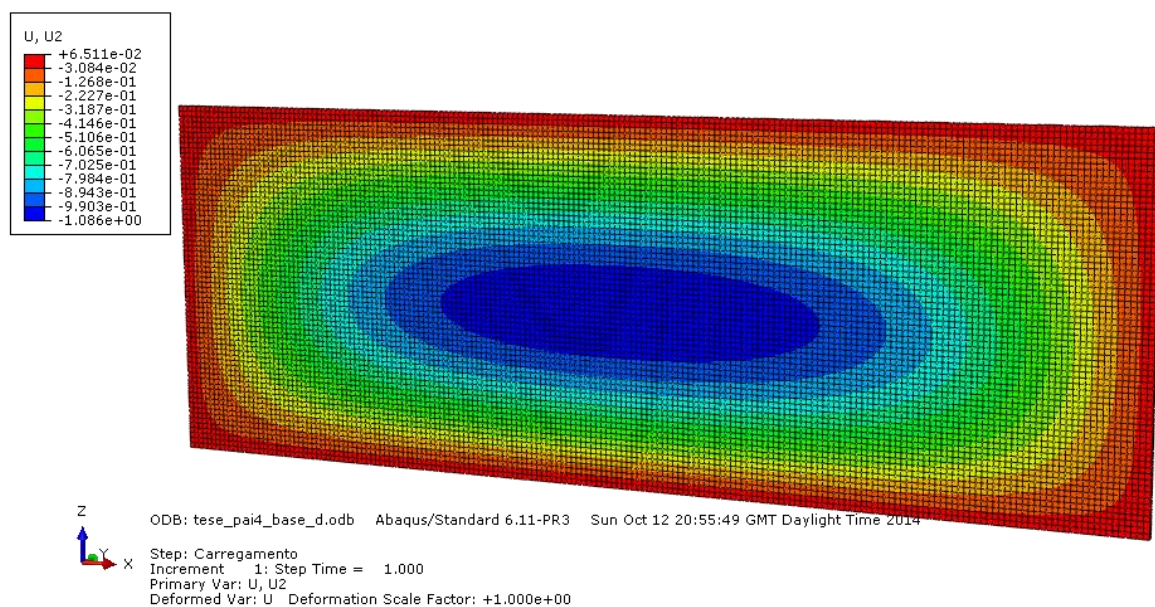


Figura 129 - Deformações na direção perpendicular ao painel para o painel apoiado em 4 bordos.

Utilização de painel em acrílico

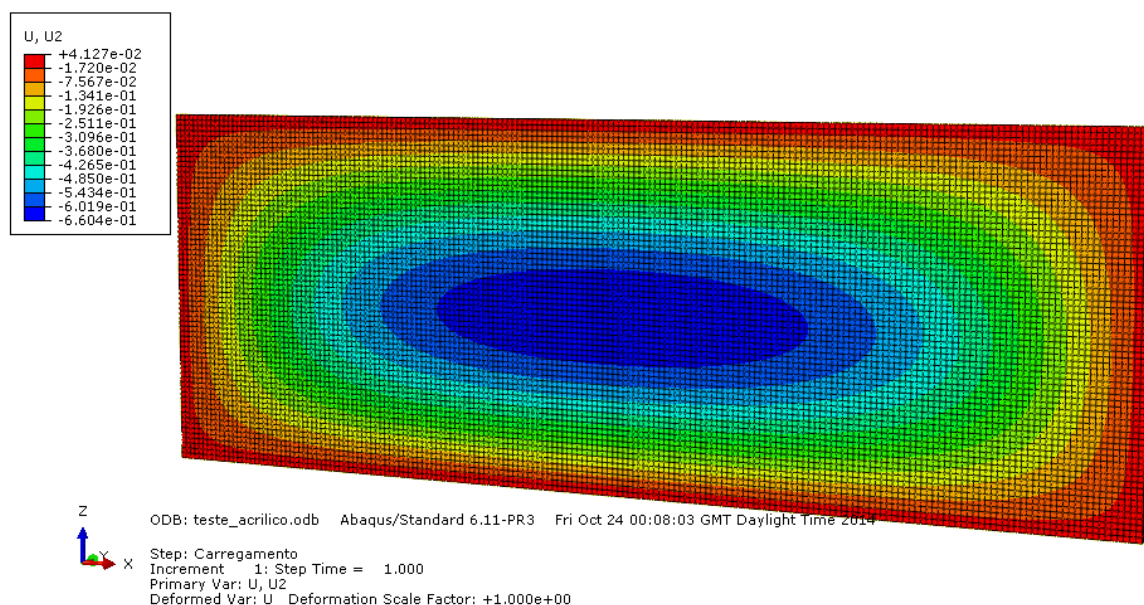


Figura 130 - Deformações na direção perpendicular ao plano do painel para o painel em acrílico apoiado em 4 bordos.

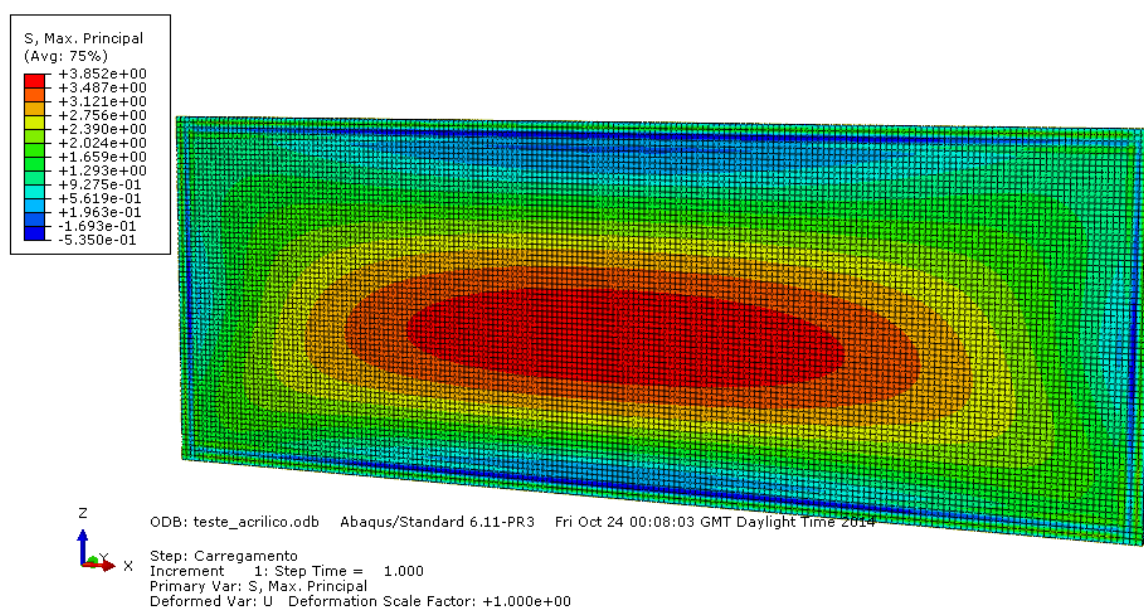


Figura 131 - Tensões principais máximas para painel em acrílico apoiado em 4 bordos.