



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

Caracterização de ensaios de vigas de vidro

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

Autor

Gonçalo da Costa Rolo

Orientadoras

Prof. Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves

Prof. Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago

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

Coimbra, Janeiro, 2014

AGRADECIMENTOS

Embora uma tese seja, pela sua finalidade académica, um trabalho considerado individual, há contributos de natureza diversa que não podem e nem devem deixar de ser realçados. Por essa razão, desejo expressar os meus agradecimentos:

As primeiras palavras são para as orientadoras Prof. Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves e Prof. Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago por me terem aceiteado nesta orientação, pela disponibilidade e ajuda, assim como pelas críticas e correcções ao longo do extenso tempo que levou este trabalho.

Ao Marco Pinho e ao Rui Ferreira, colaboradores do projecto S-Glass, pela ajuda ao longo deste trabalho e ajuda nos trabalhos de laboratório.

Aos funcionários do laboratório por toda a ajuda prestada em diversos momentos.

Aos meus pais, cujo esforço para me ajudar o melhor que sabem, me ajudaram a chegar até aqui sendo os responsáveis pelo meu percurso. Também aos meus irmãos, que não preciso dizer nada mas agradeço-lhes, por me aturarem e sofrerem às minhas mãos quando precisei de alguém para chatear e descontraír.

À Margarida, pelo apoio e carinho mostrados e cuja companhia nunca é demais.

Ao Carlos, Marcos e Raul, os amigos que ainda partilham comigo a sua hora de almoço e os tempos de descontração no bar a jogar cartas. Não só a eles mas também ao resto do grupo de colegas mas acima de tudo amigos com quem partilhei estes últimos anos de percurso académico, por toda a amizade, companheirismo e os diversos momentos de estudo e lazer.

A todos o meu Obrigado!

RESUMO

O vidro é um material milenar usado na construção há muitos séculos, e cuja utilização tem vindo a aumentar. O vidro é considerado um material nobre por excelência, muito devido às suas propriedades naturais e grande transparência, que têm a capacidade de melhorar a estética de qualquer construção.

A expansão do uso de produtos de vidro no sector da construção é acompanhada pela ausência de normas para a concepção e aplicação segura de produtos de vidro. Assim, uma das principais preocupações é a necessidade de garantir um nível elevado de competências técnicas, para estar à altura dum mercado global cada vez mais competitivo dos produtos de vidro.

O trabalho da presente tese encontra-se no âmbito de um projecto de investigação presentemente em curso no DEC da FCTUC. Trata-se do projecto S-GLASS cujo objectivo é dar contribuições ao desenvolvimento de normas europeias para vidro estrutural. Neste trabalho é apresentada a preparação dos ensaios do comportamento de vigas de vidro sob os efeitos de acções monotónicas, cíclicas e térmicas, com e sem cabos de pré-esforço. O interesse deste trabalho deve-se a necessidade de um documento normativo único a nível Europeu que estabeleça formulações de dimensionamento e recomendações de projecto, havendo ainda muito por definir, mesmo na bibliografia já existentes. Como é do conhecimento, todas as estruturas são sensíveis às acções mencionadas, e num material com uso cada vez mais crescente como é o vidro, é de extrema importância definir correctamente os seus métodos de ensaio para melhor o entender como material estrutural.

A falta de documentação que estabeleça as formulações de ensaio deste tipo de elementos leva a que seja necessário investir muito tempo a conceber, testar e otimizar os métodos e concepções de ensaio, quando se poderia partir duma etapa mais avançada, caso existisse informações sobre os aspectos referidos em estudo.

Nesta dissertação são apresentados os aspectos tecnológicos e logísticos inerentes à elaboração dos layouts otimizados para os ensaios de vigas de vidro estrutural para 4 situações distintas: (i) ensaios de caracterização reológica (ii) viga reforçada com sistema exterior de pré-esforço; (iii) solicitação cíclica e (iv) solicitação térmica.

ABSTRACT

The glass is an ancient material used in construction for centuries, and its use has been encouraged and increasing day by day. The glass is considered a noble material, largely due to its natural properties of lightness and transparency, because it has the ability to improve the beauty and harmony of any construction.

The expansion of the use of glass products in the construction sector is accompanied by the nonexistence of standards for the design and safe application of glass products. As well, a major concern is the need to ensure a high level of technical skills to be at the height of an increasingly competitive global market for the glass products.

The work of this thesis lies in the framework of a research project currently underway in DEC-FCTUC. It is the S-GLASS project whose goal is to make contributions to the development of European standards for structural glass. In this work is presented the preparation of the tests of the behavior of glass beams under the effects of monotonic, cyclic and thermal actions, with and without pre-stress cables. The interest of this work is due to the need that exists in a single European document to stabilize formulations and recommendations for project, because there is still much to be defined, even in the existing literature. As known, all structures are sensitive to the actions mentioned, and a material with ever increasing use as is glass, it is extremely important to set correctly their test methods to better understand this structural material

The lack of documentation establishing the test formulations of this type of elements leads to the need to invest a lot of time to design, test and optimize the methods and conceptions of testing, when we could start in a more advanced stage, if we had information about this aspects referred in study.

In this dissertation are presented the technological and logistical aspects inherent to the development of optimized layouts for structural glass beams for 4 distinct situations: (i) rheological characterization tests (ii) beam strengthened with external system of prestressing (iii) Cyclical Loading and (iv) thermal stress.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ABREVIATURAS.....	x
SIMBOLOGIA.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Estrutura da Dissertação	2
2. O VIDRO.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. Métodos de Fabrico do Vidro.....	3
2.3. Propriedades	4
2.3.1. Propriedades Químicas	4
2.3.2. Propriedades Físicas e Mecânicas	5
2.4. Tipos de Vidro	7
2.4.1. Vidro Temperado	7
2.4.2. Vidro Termo-Endurecido.....	9
2.4.3. Vidro Laminado	9
2.5. Aplicações do Vidro.....	11
3. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS.....	14
3.1. Layout de Ensaio.....	14
3.1.1. Layout de Ensaio para Cargas Monotónicas e Cíclicas.....	15
3.1.2. Layout de Ensaio para Cargas Térmicas	17
3.2. Teste de ensaio à camara climática	21
3.2.1. Ensaio para estabilização da temperatura a 50°C na câmara térmica	21
3.2.2. Ensaio para estabilização da temperatura a 80°C na câmara térmica	22
3.3. Testes de Ensaio a Isolamento/Refrigeração Térmica para Células de Carga	24

3.3.1.	Caixa preenchida com isolamento	24
3.3.2.	Sistema de Refrigeração a Água.....	26
3.3.3.	Teste de temperatura a 80°C com sistema de arrefecimento.....	27
3.4.	Colagem de Termopar ao vidro.....	30
3.5.	Ensaio Térmico a provete com SentryGlass	31
3.6.	Ensaio de caracterização do comportamento reológico do vidro	34
3.6.1.	Geometria e instrumentação	35
3.6.2.	Optimização do Layout de ensaio	36
3.6.2.1	Elementos de isolamento dos pontos de contacto.....	36
3.6.2.2	Carro de carga	38
3.6.3.	Ensaio	39
3.7.	Sistema de Cabo de Pré-esforço	42
4.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS	45
4.1.	Ensaio de Carregamento Monotónico sem cabo de Pré-esforço	45
4.1.1.	Instrumentação	45
4.1.2.	Ensaio e seus resultados	48
4.2.	Ensaio de Carregamento Monotónico com cabo de Pré-esforço	54
4.2.1.	Instrumentação	55
4.2.2.	Ensaio e seus resultados	57
4.3.	Ensaio de Carregamento Cíclico.....	68
4.3.1.	Instrumentação	69
4.3.2.	Ensaio e seus resultados	71
5.	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de fabrico do vidro (retirado de (Valarinho, 2010)).	4
Figura 2.2 - Distribuição estatística da tensão de rotura do vidro devido ao aumento do dano à superfície do vidro, com a) superfície de um vidro novo, b) superfície do vidro depois de sujeito a acções climáticas e c) superfície do vidro com dano inerente à sua utilização no tempo (retirado de (Valarinho, 2010)).	7
Figura 2.3 – Processo de obtenção do vidro temperado (retirado de (Nielsen, 2009)).	8
Figura 2.4 - O princípio do vidro temperado (retirado de (Haldimann, Luible, & Overend, 2008)).	8
Figura 2.5 – Padrão de fragmentação do vidro temperado (retirado de (Vicar@)).	9
Figura 2.6 - Comparações entre SGP e PVB: (a) tensão deformação e (b) deformação das películas (retirado de (DuPont@)).	10
Figura 2.7 - Comparação entre valores de E do SGP e PVB em função da temperatura (retirado de (DuPont@)).	10
Figura 2.8 - Coberturas de Vidro: (a) Palm House em Londres (Schittich, Stab, Balkow, Schuler, & Sobek, 1999) e (b) Museu de História em Berlim (retirada de (Valarinho, 2010)).	11
Figura 2.9 - Cobertura em Vidro: Espaço Estação em Curitiba.	12
Figura 2.10 - Fachadas em Vidro: (a) Estádio E.C.C. em Coimbra e (b) Centro Nacional de Arte de Tóquio.	12
Figura 2.11 - Vigas de vidro num edifício em Budapeste (retirada de (Valarinho, 2010)).	13
Figura 2.12 - Estrutura de <i>glass fins</i> num edifício da Citroen em São Paulo (retirado de (T2G@)).	13
Figura 3.1 - Esquematização do modelo (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	14
Figura 3.2 - Pórtico de ensaios e pormenores dos apoios superior e inferior na extremidade da viga.	15
Figura 3.3 - Pormenores dos apoios e contraventamentos: (a) no ensaio simples, (b) no ensaio cíclico e (c) contraventamento junto a aplicação de carga.	16
Figura 3.4 - Pormenor do apoio e chapa de alumínio.	16
Figura 3.5 - Viga de carregamento (a) simples para ensaio monotónico e (b) sistema para ensaio cíclico.	17
Figura 3.6 - Pórtico de ensaios com câmara térmica.	18
Figura 3.7 - (a) Esqueleto interior da câmara térmica, (b) pormenor do tampo sandwich, (c) um topo lateral da câmara.	18
Figura 3.8 - Caixa inferior da câmara térmica.	19
Figura 3.9 - Câmara Térmica.	19
Figura 3.10 - Dimensões da câmara térmica.	20
Figura 3.11 - Sistema de circulação e aquecimento do ar, o exaustor (de cor azul) e forno.	20
Figura 3.12 - Localização e indicação dos termopares dentro da câmara para o teste a 50°C.	21
Figura 3.13 - Temperaturas do teste à camara climática a 50°C.	22
Figura 3.14 - Localização e indicação da instrumentação dentro da camara para o teste a 80°C.	22
Figura 3.15 - Temperaturas medidas pelos termopares: (a) normais e (b) de vareta.	23
Figura 3.16 - Temperatura de saída do forno e média dos termopares.	23

Figura 3.17 - Preparação da caixa de isolamento para célula de carga.	25
Figura 3.18 - Temperaturas do teste ao sistema de isolamento com lã-de-rocha.	25
Figura 3.19 - Preparação e Sistema de bombeamento de água para a célula de carga.	26
Figura 3.20 - Temperaturas do teste ao sistema de refrigeração com tubo de água.	27
Figura 3.21 - Preparação do sistema de refrigeração e termopar para as células de carga.	28
Figura 3.22 – Localização das células de carga, à frente na foto as que se encontram em (2) junto da entrada de ar.	28
Figura 3.23 - Bomba e sistema de refrigeração a ventoinha.	29
Figura 3.24 - Temperaturas no interior da câmara e das células de carga.	29
Figura 3.25 - Temperaturas atingidas nas células de carga.	30
Figura 3.26 - Métodos de colagem dos termopares ao vidro e componentes.	31
Figura 3.27 - Dimensões do provete em mm.	32
Figura 3.28 – Esquema de localização dos termopares.	32
Figura 3.29 - Vista de termopares da superfície do vidro e do interior do SentryGlass.	33
Figura 3.30 - Temperaturas do interior da mufla, medidas pelos termopares.	33
Figura 3.31 - Variação da temperatura na superfície do vidro e no interior do SentryGlass.	34
Figura 3.32 – Esquema de ensaio da norma EN 1288-3:2000	35
Figura 3.33 - Representação dos provetes: (a) Dimensões e esquema de ensaio; b) Localização da instrumentação. (retirado de (Jordão & Pinho, 2014))	35
Figura 3.34 – Provede4 com extensómetros aplicados	36
Figura 3.35 – Ensaio à borracha.	37
Figura 3.36 – Posições de início de fractura nos vários provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	37
Figura 3.37 - Esquemas de instalação da célula entre as duas peças do carro de carga (a) Duas células e parafuso, (b) Apenas um célula e parafusos e (c) Célula roscada (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	39
Figura 3.38 – Resultados dos primeiros 3 provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014))	39
Figura 3.39 – Ensaio dos provetes: (a) Equipamento usado no ensaio: máquina universal Servosis de 60ton e (b) Pormenor do ensaio	40
Figura 3.40 – Resultados dos provetes 4, 5 e 6 (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	40
Figura 3.41 – Roturas dos vários provetes.	41
Figura 3.42 - Sistema de cabo de pré-esforço.	42
Figura 3.43 - Pormenor esquemático do sistema de união do cabo à viga de vidro.	43
Figura 3.44 - Pormenor do desviador dos cabos.	44
Figura 4.1 – Viga antes do ensaio.	45
Figura 4.2 - Localização dos deflectómetros.	46
Figura 4.3 - Localização dos extensómetros.	46
Figura 4.4 - Rotura da viga de vidro.	48
Figura 4.5 – Evolução do padrão da fractura (retirado de (Jordão & Pinho, 2014))	49
Figura 4.6 – Relação entre o deslocamento a meio-vão e a carga aplicada (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	49

Figura 4.7 – Deformação final da viga a meio vão e nos apoios (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	50
Figura 4.8 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P1, (b) Agrupamento P2.....	50
Figura 4.9 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P3, (b) Agrupamento P4.....	51
Figura 4.10 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P5, (b) Agrupamento P6.....	51
Figura 4.11 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P7, (b) Agrupamento P8.....	52
Figura 4.12 - Deformações: (a) Verticais – Agrupamento P9, (b) Horizontais – Agrupamento P10.	52
Figura 4.13 – Deformações Horizontais: Agrupamento P11.....	53
Figura 4.14 – Valores corrigidos das deformações verticais (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).....	54
Figura 4.15 - (a) Pormenor da zona de ancoragem do pré-esforço e (b) viga antes do ensaio.....	55
Figura 4.16 – Geometria da viga e traçado do cabo de pré-esforço (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	55
Figura 4.17 - Localização dos deflectómetros.....	56
Figura 4.18 - Localização dos extensómetros.	56
Figura 4.19 – Variação do pré-esforço com a carga aplicada no ensaio.....	58
Figura 4.20 – Curva de comportamento global e respectivos pontos notáveis (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	59
Figura 4.21 – Localização dos danos estruturais sofridos ao longo do ensaio (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	60
Figura 4.22 – Rotura nos apoios e deformação fora do plano. (a) Vista geral; (b) Pormenores da rotação (em cima) e esmagamento do vidro contra o rolete (em baixo).....	60
Figura 4.23 – Diferença entre valores de pré-esforço dos cabos durante o carregamento.	61
Figura 4.24 – Avaliação da simetria da carga durante o ensaio (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	61
Figura 4.25 - Resultado Experimental do Agrupamento P1.....	62
Figura 4.26 - Resultado Experimental do Agrupamento P2.....	62
Figura 4.27 - Resultado Experimental do Agrupamento P3.....	63
Figura 4.28 - Resultado Experimental do Agrupamento P4.....	63
Figura 4.29 - Resultado Experimental do Agrupamento P5.....	64
Figura 4.30 - Resultado Experimental do Agrupamento P6.....	64
Figura 4.31 - Resultado Experimental do Agrupamento P7.....	65
Figura 4.32 - Resultado Experimental do Agrupamento P8.....	65
Figura 4.33 - Resultado Experimental do Agrupamento P9.....	66
Figura 4.34 - Resultado Experimental do Agrupamento P10.....	66
Figura 4.35 - Resultado Experimental do Agrupamento P11.....	67
Figura 4.36 - Resultado Experimental do Agrupamento P12.....	67
Figura 4.37 - Desalinhamento da viga em relação ao carro de carga	68
Figura 4.38 – Viga antes do ensaio.....	69
Figura 4.39 - Localização dos deflectómetros.....	69
Figura 4.40 - Localização dos extensómetros.	70
Figura 4.41 - Estratégia de carga cíclica.	72

Figura 4.42 - Fracturas da viga ao longo do tempo de carregamento: (a) primeira, ocorrida sobre rolete (b) segunda, que é a continuação da anterior até ao cimo da viga e (c) última fractura ocorrida a meio da viga.	73
Figura 4.43 - Pormenor do apoio da primeira fractura.....	73
Figura 4.44 – Curva do comportamento global.	74
Figura 4.45 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P1, (b) Agrupamento P2.....	74
Figura 4.46 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P3, (b) Agrupamento P4.....	75
Figura 4.47 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P5, (b) Agrupamento P6.....	75
Figura 4.48 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P7, (b) Agrupamento P8.....	76
Figura 4.49 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P9, (b) Agrupamento P10.....	76
Figura 4.50 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P11, (b) Agrupamento P12.....	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grupos químicos do vidro (retirado de (Cruz, et al., 2012)).....	5
Tabela 2.2 – Propriedades físicas do vidro (retirada de (Valarinho, 2010)).....	6
Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).	41
Tabela 4.1 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.....	47
Tabela 4.2 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.....	56
Tabela 4.3 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.....	70
Tabela 4.4 - Estratégia de carga para carregamento cíclico.	71

ABREVIATURAS

4PB – Ensaio de flexão a quatro pontos, do inglês *four point bending*
a.C. – Antes de Cristo
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
 B_2O_3 – Óxido de Boro
BSG – Vidro de boro-silicatos
CaO – Óxido de Cálcio
DEC – Departamento de Engenharia Civil
E – Módulo de Elasticidade
EN – Norma Europeia
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
 K_2O – Óxido de Potássio
MgO – Óxido de Magnésio
 Na_2O – Óxido de Sódio
NP-50 – Cola adesiva com uma resina de poliéster e peróxido orgânico da empresa TML
PVB - Polivinil butiral
SGP – SentryGlas® Plus
 SiO_2 – Sílica
SLSG – Vidro de silicatos
TML – Empresa Tōkyō Sokki Kenkyūjo

SIMBOLOGIA

% - Percentagem
°C – Graus Celsius
bar – Bares (medida de pressão)
cos – Cosseno
 F_u – Força de rotura
 $F_{\text{máx}}$ – Força máxima
 F_{res} – Força residual
GPa – GigaPascal
I – Inércia
 $\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ – Joules por Kilograma-Kelvin
K – Graus Kelvin
 Kg/m^3 – Kilograma por metro cubico
kN – KiloNewton
m – metro

M – Momento Flector

mm – milímetro

mm/s – milímetro por segundo

MPa – MegaPascal

N – Newton

nm- nanometro

sin – seno

W/m²K – Watts por metro quadrado kelvin

w_u - deslocamento

$\epsilon_{méd}$ – Extensão média

λ – Comprimento de onda

$\delta_{máx}$ – Deslocamento máximo

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima

σ_x – Tensão segundo um eixo xx

σ_y – Tensão segundo um eixo yy

σ_θ - Tensão segundo uma orientação θ

θ – orientação de um angulo

τ_{xy} - Tensão tangencial xy

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objectivos

O estudo desta dissertação está incluído no projecto S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente, PTDC/ECM/116609/2010, em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da FCTUC. Procura-se através deste, contribuir para a caracterização e avaliação do material e seus métodos de ensaio, visa o desenvolvimento das normas e procedimentos de ensaio no domínio do vidro estrutural e pretende criar e analisar o desempenho estrutural de vigas de vidro com um sistema exterior de pré-esforço.

Apesar do desenvolvimento feito no estudo da área do vidro estrutural, os engenheiros ainda continuam a ter dificuldades em algumas decisões relacionadas com a sua utilização, uma vez que é um material, embora em uso crescente, ainda pouco estudado. Tendo em vista essa limitação, definiu-se este trabalho com o objectivo de avaliar através de ensaios experimentais a idealização de sistemas e métodos de ensaio e o comportamento de vigas de vidro a carregamentos monotónicos e cíclicos, quer à temperatura ambiente quer a altas temperaturas.

A falta de documentação que estabeleça as formulações de ensaio deste tipo de elementos leva a que seja necessário investir muito tempo a conceber, testar e otimizar os métodos e concepções de ensaio, quando se poderia partir duma etapa mais avançada, caso existisse informações sobre os aspectos referidos em estudo.

Ao realizar este trabalho desenvolveram-se os seguintes pontos:

- Desenvolver uma câmara térmica que permita a execução de ensaios de flexão a temperaturas até 80°C;
- Idealização e concepção dum sistema para a fixação de pré-esforço através de cabos exteriores às vigas ensaiadas;
- Mediante ensaios experimentais verificar, otimizar e esquematizar as metodologias de ensaio e o funcionamento de cada sistema de ensaio;
- Através dos ensaios experimentais de carregamento monotónico, cíclico e térmico, recolher informação quanto ao comportamento das vigas.

1.2. Estrutura da Dissertação

O texto deste trabalho divide-se em cinco capítulos fundamentais, sendo este o capítulo introdutório, o qual inclui um enquadramento geral do trabalho.

O Capítulo 2, designado de “O Vidro” é focado no material vidro, explicando o seu fabrico desde que este material começou por ser utilizado, mostrando as suas propriedades químicas e mecânicas, os diferentes tipos de vidro fabricados, E ainda algumas das aplicações ao nível da construção e da engenharia civil.

O Capítulo 3, denominado “Preparação dos Ensaios e Metodologia Experimental”, apresenta o grande objectivo deste trabalho que é a preparação e concepção otimizada dos métodos de ensaios. São descritos os procedimentos levados a cabo para a idealização e preparação de todo o layout de ensaio, assim como a elaboração e testes prévios a mecanismos necessários para a realização dos ensaios.

No Capítulo 4, chamado “Estudo Experimental do Comportamento das Vigas”, são apresentados os resultados dos ensaios efectuados aos provetes através do método 4 point bending (4PB).

O Capítulo 5, “Conclusões”, sintetiza o trabalho realizado bem como as sugestões de melhoramento do sistema actual. São ainda sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

2. O VIDRO

2.1. Introdução

O vidro é um material milenar, cuja data da sua descoberta ainda não foi consensualmente estabelecida, mas existem vestígios da sua utilização que datam aproximadamente de 3000 a 2000 a.C. Os primeiros objectos de vidro foram encontrados em necrópoles egípcias e a sua utilização era apenas como objetos de adorno. A sua produção em série deu-se próximo ao ano 100 a.C., quando os romanos desenvolveram técnicas de fabricação e começaram a utilizar o sopro.

A sua utilização tem vindo a ganhar protagonismo, principalmente desde o início do século XIX. Este aumento do uso em engenharia civil tem vindo a ser estimulado, sobretudo, pelos arquitectos, que nas últimas décadas têm apresentado projectos cada vez com mais elementos de vidro, muito graças às suas funções naturais de luminosidade e transparência, que têm a capacidade de elevar o patamar estético de qualquer construção.

O aumento da utilização do vidro não se justifica apenas com base nas suas características naturais, mas também com uma evolução dos seus padrões de qualidade, que se tem conferido ao nível do desempenho das estruturas de vidro, da eficácia e eficiência com que o vidro é utilizado.

É ao nível do desempenho estrutural que se tem mostrado um desafio para o engenheiro. Este tem procurado solucionar e satisfazer o mercado, criando e tornando possíveis diferentes, maiores e melhores estruturas de vidro, desenvolvendo assim linhas de investigação com soluções de vidro como material estrutural, assim como a sua aplicação como elemento de suporte e transferência de cargas. Apesar dessa utilização do vidro ter vindo a sofrer um grande impulso, as suas principais aplicações traduzem-se muito ainda nas simples aplicações não estruturais (janelas), e que não transmitem relevância estrutural.

2.2. Métodos de Fabrico do Vidro

Até ao século XX, o método de fabrico do vidro consistia no antigo sistema do vidro soprado. E em 1914 surge o primeiro processo fabril, conhecido como processo de Fourcault. Este processo consistia numa estiração vertical, passando o vidro por uma fenda que lhe conferia a espessura desejada. Este método era também imperfeito pois apesar de ter sido um grande

avanço na época, a falta de homogeneidade química e térmica no vidro levava a várias irregularidades no vidro.

Após sucessivos melhoramentos e avanços no método de produção, é na década de 50 que surge o processo que é utilizado ainda hoje como padrão mundial no processo de fabricação do vidro. Criado pela firma Pilkington Brothers, é um processo que permite obter placas de vidro de alta qualidade, com espessuras constantes, faces paralelas e planas, o que aumenta a qualidade do vidro. Muitas vezes apelidado como “processo de flutuação” – do inglês “float process” – é constituído pelos passos esquematizados na Figura 2.1 (Valarinho, 2010):

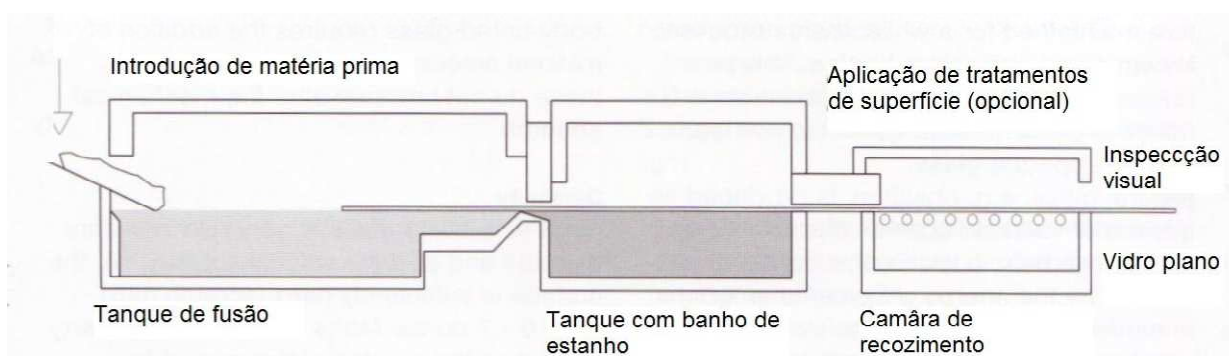


Figura 2.1 - Processo de fabrico do vidro (retirado de (Valarinho, 2010)).

A matéria-prima é misturada com a precisão necessária, em termos de componentes, e fundidas num forno a temperaturas entre os 1600 e 1800°C, de seguida, é continuamente escoado até um tanque de estanho fundido onde arrefece e solidifica gradualmente (é aqui que o vidro adquire a espessura pretendida). A utilização do estanho prende-se pelo largo espectro de temperaturas que este material se mantém no estado líquido, e devido a ter um peso específico superior ao do vidro, permitindo assim a flutuação do vidro sobre ele (Valarinho, 2010). No forno de recozimento, o vidro é arrefecido de forma lenta e uniformemente, para assim evitar a criação de tensões internas e de choque térmico, o processo termina com o vidro apresentando superfícies polidas e paralelas. Esta última etapa de fabrico dá o nome a este tipo de vidro, sendo por isso denominado por “vidro recozido”.

2.3. Propriedades

2.3.1. Propriedades Químicas

O vidro é um material sólido, homogéneo e inorgânico, que se obtém por um arrefecimento rápido, o que impede uma apropriada cristalização do material. No grupo dos materiais vítreos

incluem-se todos os que apresentem estas características, e ainda mais alguns que podem diferir na composição química. Segundo alguns autores (mencionado em (Marinho, 2012)) o vidro pode ser dividido quimicamente em cinco grupos, no entanto a indústria do vidro foca-se, particularmente, em dois: os vidros de silicatos (SLSG), que representam a grande maioria dos vidros e, os designados vidros de boro-silicatos (BSG), em menor escala.

Um vidro de silicatos é, na sua essência, constituído por Sílica (SiO_2), seguido de Óxido de Cálcio e de Óxido de Sódio (CaO e Na_2O) e em menores quantidades, pode aparecer Óxido de Magnésio e Óxido de Alumínio (MgO e Al_2O_3). Os BSG diferem dos primeiros por uma alteração nos compostos secundários, que passam a ser constituídos por Óxido de Boro (B_2O_3), podendo conter, Óxido de Potássio e Óxido de Sódio (K_2O e Na_2O). Estes novos compostos consagram uma maior resistência a variações térmicas e a corrosão de ácidos, o que faz com que estes sejam muito escolhidos, principalmente, para uso em laboratórios químicos (Valarinho, 2010).

Tabela 2.1 – Grupos químicos do vidro (retirado de (Cruz, et al., 2012))

Grupos Químicos do Vidro	Observações
Vidros de Silicatos	Vidros mais comuns, usados no vidro plano. Usado no desenvolvimento do processo float.
Vidros de Sílica Fundida ou Quartzo	Coefficiente de expansão térmica baixo e alta resistência química. Aplicados em laboratórios de alta tecnologia.
Vidros de Borossilicato	Resistência à corrosão química e coeficiente de expansão térmica baixa. Usados em utensílios domésticos e de laboratório.
Vidros de Chumbo	Alto índice de refração e densidade. Vidros com alto teor de chumbo são usados como protetores de radiação.
Vidros de Silicato de Alumínio	Sílica a 50% e alto teor de alumínio. Grande durabilidade química.

2.3.2. Propriedades Físicas e Mecânicas

Uma das propriedades mais importantes do vidro, como já referido anteriormente, é a sua transparência. O Vidro é um material com elevada transmitância na gama do espectro visível. Além da transparência, o vidro é produzido usualmente em superfícies muito lisas e impermeáveis.

As restantes propriedades do vidro são apresentadas resumidamente na Tabela 2.2. Comparando algumas das suas características com outros materiais habituais da construção civil, vê-se que o vidro tem um peso específico aproximado ao do betão armado e uma rigidez mais elevada, mas para ambas as propriedades apresenta valores inferiores ao aço.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas do vidro (retirada de (Valarinho, 2010)).

Propriedades	SLSG
Densidade	2 500 kg/m ³
Módulo de Young	70 GPa
Módulo de distorção	28 GPa
Coefficiente de Poisson	0,23
Temperatura de fusão	600°C
Coefficiente de expansão térmica	9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Calor específico	720 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Dureza (escala de Mohs)	6,5

O vidro apresenta um comportamento não convencional em termos de resistência. Teoricamente, o vidro pode atingir tensões de rotura à tracção até 32GPa, no entanto, resultados demonstram que a resistência à tracção apresenta uma alargada dispersão de muito baixa repetitividade. É consensual que tal deve-se principalmente ao estado da superfície do vidro, que contém vários micro-defeitos, invisíveis a olho nu, e sem qualquer tipo de padrão ou orientação, com um desenvolvimento desses defeitos muito variável.

Com o aumento do tempo de carregamento dá-se um aumento do danos superficiais, o que por sua vez leva a uma diminuição do valor médio da tensão de rotura, bem como à diminuição da sua dispersão (Figura 2.2).

Toda a incerteza respeitante ao cálculo da tensão resistente do vidro torna-o, de uma maneira, inseguro para o uso estrutural, contudo a sua utilização tem vindo a progredir positivamente e surge com os vários tipos de vidro existentes e com os variados tratamentos que lhe são aplicados.

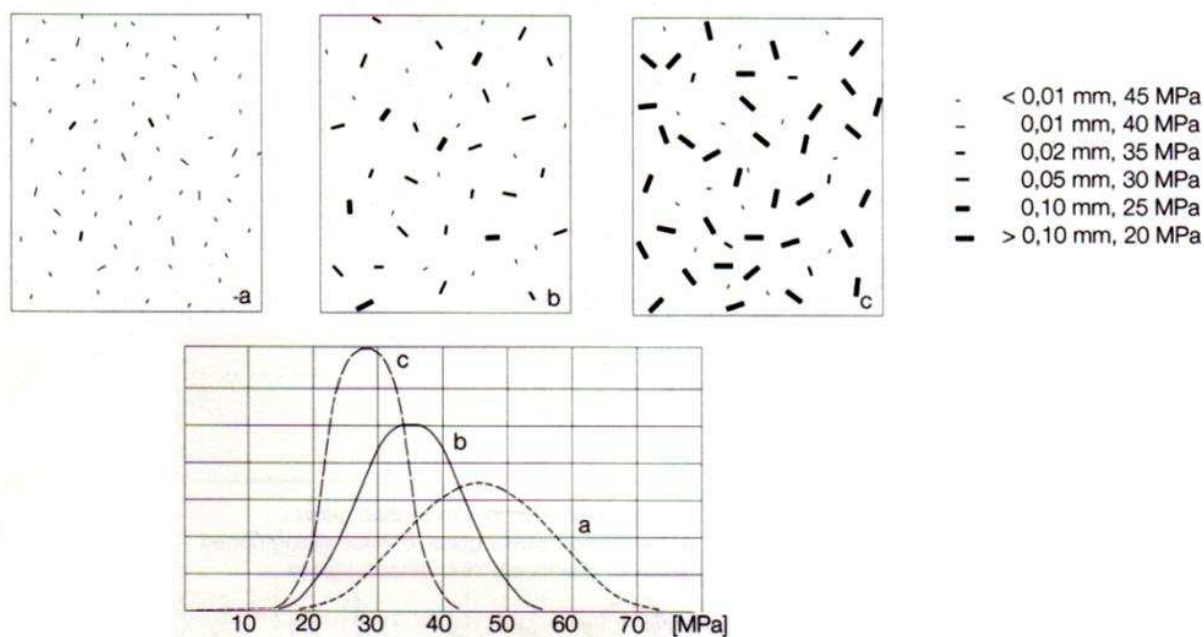


Figura 2.2 - Distribuição estatística da tensão de rotura do vidro devido ao aumento do dano à superfície do vidro, com a) superfície de um vidro novo, b) superfície do vidro depois de sujeito a acções climáticas e c) superfície do vidro com dano inerente à sua utilização no tempo (retirado de (Valarinho, 2010))

2.4. Tipos de Vidro

Nas operações de pós processamento, o vidro é frequentemente tratado das seguintes formas:

- Corte no tamanho e forma pretendida;
- Tratamento das arestas;
- Introdução de furos para efeitos de ligação;
- Aplicação de revestimentos;
- Tratamento térmico;
- Alteração da superfície para efeito decorativo.

2.4.1. Vidro Temperado

A têmpera ou tratamento por calor é o tratamento mais importante da indústria vidraceira, o que leva a que este tipo de vidro seja o mais utilizado na construção.

A aplicação da têmpera forma um campo de tensões favoráveis que impedem o desenvolvimento dos defeitos existentes na superfície do vidro (Figura 2.4).

Na Figura 2.3 apresenta-se o esquema do processo de têmpera. O vidro temperado é obtido através do recozido, em que este é novamente aquecido até uma temperatura próxima do seu ponto de amolecimento e arrefecido rapidamente por jactos de ar, de modo a que a zona superficial do painel de vidro arrefeça mais rápido que o seu interior e contraia-se. Depois de retirado do forno, continua a arrefecer à temperatura ambiente, originam-se então fortes tensões de compressão na superfície e de tracção no seu interior.

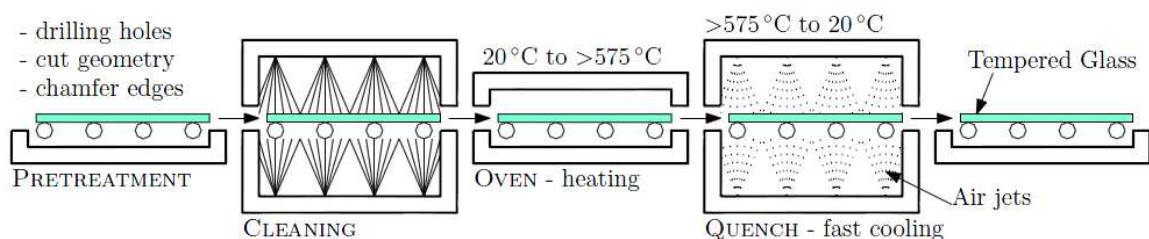


Figura 2.3 – Processo de obtenção do vidro temperado (retirado de (Nielsen, 2009)).

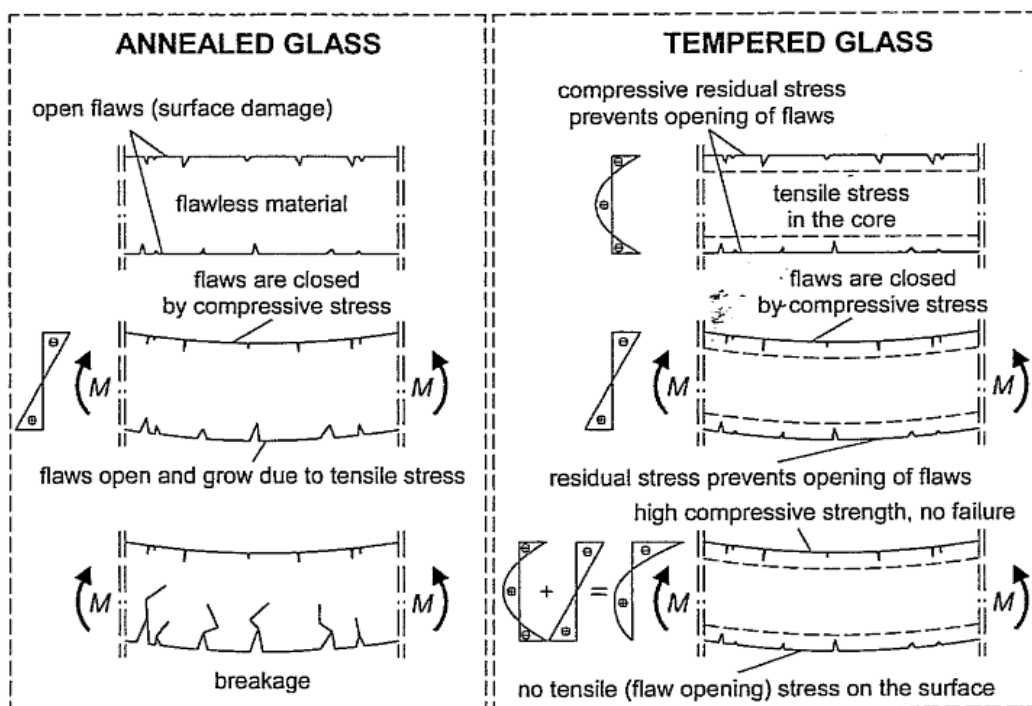


Figura 2.4 - O princípio do vidro temperado (retirado de (Haldimann, Luible, & Overend, 2008)).

A vantagem principal deste tipo de vidro é o aumento da sua tensão resistente à tracção, que é de aproximadamente 250MPa.



Figura 2.5 – Padrão de fragmentação do vidro temperado (retirado de (Vicar@)).

2.4.2. Vidro Termo-Endurecido

O vidro termo-endurecido é produzido da mesma forma que o vidro temperado, mas sofre um arrefecimento mais lento, dando origem desta forma a um campo de tensões de menor valor e, logicamente, a uma tensão resistente menor que a obtida para o vidro temperado.

2.4.3. Vidro Laminado

Este tipo de vidro é formado por duas ou mais placas de vidro recozido, temperado, ou até de ambos os tipos, unidas através de um filme intercalar transparente. A concepção deste conjunto, além da colagem do filme, inclui uma passagem por autoclave a temperaturas de 140°C e pressões superiores a 14 bar.

Este tipo de vidro é capaz de suportar grandes impactos, e perante a quebra de uma das placas de vidro, através da película aderente, conseguimos que a outra possa superar esse facto pela manutenção da sua integridade. Além disso, a película aderente permite que o vidro, depois da rotura, continue no lugar, garantindo assim um aumento da segurança quanto a possíveis quedas e melhorando o desempenho estrutural do laminado após a rotura. O filme mais comum é o polivinil butiral (PVB), e é comercializado com uma espessura de 0,38 mm. Neste trabalho utilizar-se-á outro tipo, o SentryGlas® Plus (SGP), que oferece cinco vezes mais resistência e é 100 vezes mais rígido que um filme convencional de PVB (DuPont@). Como comprovado também pelos gráficos de comparação da Figura 2.6. Segundo a empresa

DuPont, empresa que detém a patente do SGP, o SGP apresenta valores de módulo de elasticidade sempre mais elevados do que o PVB, mesmo com variações de temperatura, como apresentado na Figura 2.7.

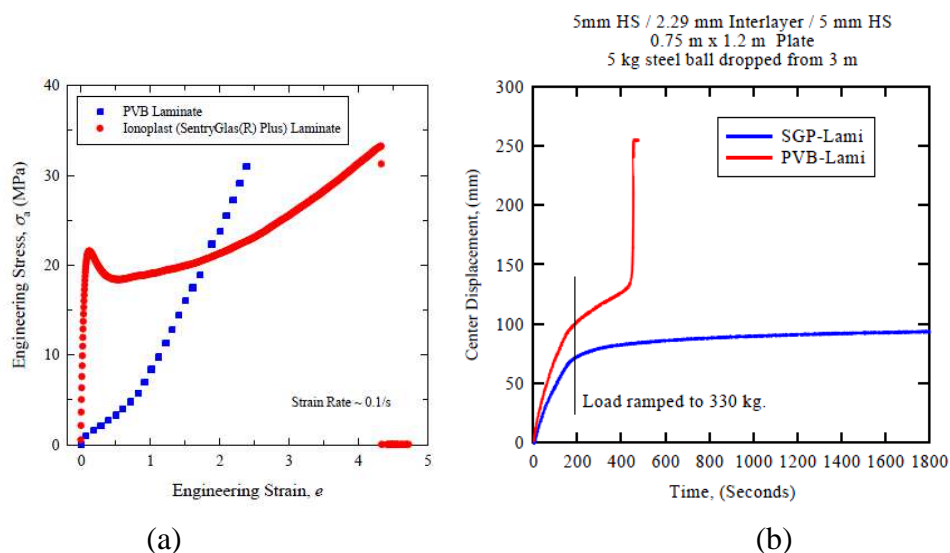


Figura 2.6 - Comparações entre SGP e PVB: (a) tensão deformação e (b) deformação das películas (retirado de (DuPont@)).

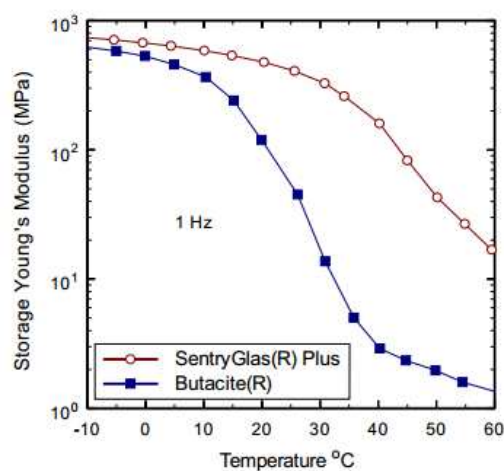


Figura 2.7 - Comparação entre valores de E do SGP e PVB em função da temperatura (retirado de (DuPont@)).

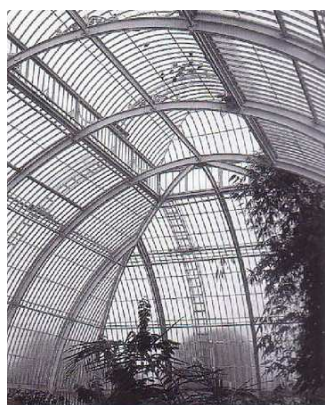
Os vidros de segurança, à prova de bala ou anti-incêndio, são formados por sistemas de painéis laminados, sendo bastante comuns na construção. Por exemplo, um sistema de vidro laminado constituído por painéis de BSG (possuem uma melhor resistência a alterações térmicas) pode constituir um sistema com um bom desempenho na resistência ao fogo.

2.5. Aplicações do Vidro

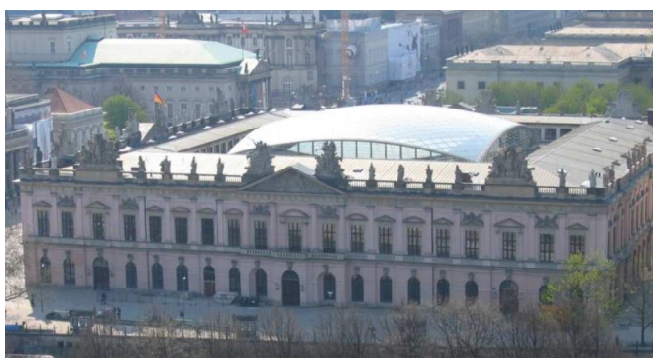
Actualmente, o vidro é um dos maiores símbolos de modernidade que se pode encontrar num edifício. Para se conseguir um ambiente exclusivo e moderno, o vidro tem sido empregado cada vez mais em obras da construção civil: em coberturas, fachadas, guarda-corpos, escada, muros, pavimentos, etc. O seu uso na construção, ao longo da história, tem vindo a crescer desde o simples uso em janelas até às grandes fachadas envidraçadas, e elementos estruturais de suporte.

As primeiras utilizações do vidro como janela, tinha como objectivo principal a passagem da luz e obtenção da luminosidade máxima possível no interior do edifício. Estes, apesar de estarem sujeitos às acções externas não são considerados elementos estruturais, uma vez que não fazem parte de uma estrutura portante.

Com os avanços tecnológicos da revolução industrial, nos séculos XVIII e XIX, chegaram novas ideias e visões para a utilização do vidro e começam a aparecer as primeiras coberturas, em forma de cúpula, revestidas por vidro e com uma grelha de aço, desta forma era aumentada a transparência dos edifícios e a sua luminosidade interior.



(a)



(b)

Figura 2.8 - Coberturas de Vidro: (a) Palm House em Londres (Schittich, Stab, Balkow, Schuler, & Sobek, 1999) e (b) Museu de História em Berlim (retirada de (Valarinho, 2010)).



Figura 2.9 - Cobertura em Vidro: Espaço Estação em Curitiba.¹

No fim desse mesmo século, surgem as primeiras fachadas totalmente envidraçadas, em que os elementos de vidro, sujeitos a ações externas, possuíam sempre uma estrutura secundária em aço que suportava as ações horizontais, ficando o vidro com o cargo de preenchimento.



Figura 2.10 - Fachadas em Vidro: (a) Estádio E.C.C. em Coimbra² e (b) Centro Nacional de Arte de Tóquio³.

A utilização do vidro como viga é um passo muito importante no que respeita à utilização estrutural do vidro. Durante o séc. XX verificou-se, um aumento do uso do vidro, e não é de estranhar que, para se obter uma maior transparência e luminosidade no interior dos edifícios, cada vez se tente restringir menos a sua utilização.

¹ Foto retirada do site: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=584596>

² Foto retirada do site: <http://www.zerozero.pt/estadio.php?id=26> no slideshow de fotos

³ Foto retirada do site: <http://www.absolutjapon.com/el-centro-nacional-de-arte-de-tokio>



Figura 2.11 - Vigas de vidro num edifício em Budapeste (retirada de (Valarinho, 2010)).

O crescente interesse utilização do vidro como único elemento de fachada deve-se, num primeiro momento, às suas características estéticas e de transparência, pois dão um belo impacto sobre o espectador, uma vez que os permite um maior contacto com o exterior associado a uma leveza da estrutura da envolvente.

A evolução das fachadas de vidro deve-se ao desenvolvimento e à qualidade do vidro, mas também à evolução dos sistemas de fixação. Nos últimos anos, tem-se verificado a redução ao máximo de caixilharias e de estruturas secundárias metálicas de forma a aumentar ainda mais a leveza e transparência dos edifícios, esses elementos metálicos têm sofrido uma permuta por um sistema totalmente envidraçado, e que se denomina por *glass fins*. *Glass fins* são painéis de vidro, com a secção rectangular e de desenvolvimento longitudinal, aplicados na perpendicular com os painéis de fachada. Estes elementos, absorvem os esforços resultantes da acção do vento e o seu comportamento é corresponde ao de viga. Para permitir uma maior absorção de esforço e maiores áreas com esta solução é habitual possuírem uma malha de cabos de pré-esforço.



Figura 2.12 - Estrutura de *glass fins* num edifício da Citroen em São Paulo (retirado de (T2G@)).

3. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios experimentais e as simulações numéricas permitem a compreensão do comportamento dos elementos de vidro. Estes elementos, como constituintes de fachadas, encontram-se expostos a várias acções externas como o aquecimento térmico, e acções cíclicas devido à acção de ventos sobre as fachadas.

Para a execução de qualquer ensaio é necessário a concepção e execução do seu layout. Para estes ensaios não foi diferente, e teve-se de pensar e idealizar todo o layout e estrutura de ensaio, desde o espaço ocupado no laboratório até à montagem e construção do pórtico de ensaios e câmara térmica para os ensaios a temperatura elevada.

3.1. Layout de Ensaio

O esquema estrutural pretendido para os ensaios deste trabalho corresponde a uma configuração de ensaio de flexão em 4 pontos (4PB). A viga encontra-se ao alto e contraventada em 4 secções, duas sobre os apoios e duas junto à zona de aplicação de carga, como representado na Figura 3.1. As dimensões dos provetes são 3000 mm x 300 mm e a secção laminada é composta por duas camadas de vidro de 10 mm cada, unidas por uma película de SentryGlas® Plus (SGP) com 1,52 mm.

Os ensaios são efectuados em controlo de deformação e com medição e registo dos valores da carga aplicada, deformação vertical e horizontal ao longo da viga e de extensões em diversos pontos.

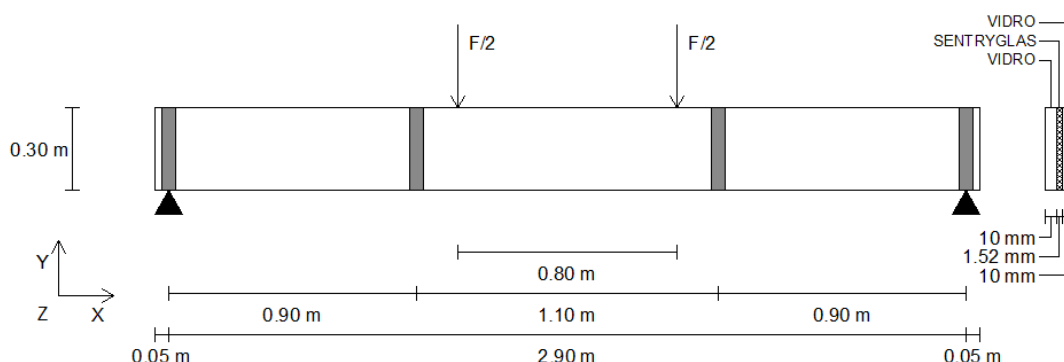


Figura 3.1 - Esquematização do modelo (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

3.1.1. Layout de Ensaio para Cargas Monotónicas e Cíclicas

Para os ensaios monotónicos e cíclicos, no pórtico de ensaio as vigas são restringidas nas extremidades com roletes a simular apoios duplos. Para o caso dos ensaios de acção cíclica, esses apoios encontram-se quer inferior quer superiormente, de modo a que quando seja efectuado o ensaio haja a leitura das forças nos apoios quando o atuador quer esteja a carregar ou a descarregar.

O esquema de ensaio tem de ser suportado por um sistema exterior, na Figura 3.2 é visível o pórtico de ensaios e a sua constituição, os habituais pilares e viga, o actuador de carregamento, dois blocos de betão para servir de apoio e reacção às células de carga e apoios da viga, entre eles há um lintel que os segura e impede a sua movimentação. Este sistema é bastante robusto, pois uma vez que as deformações obtidas nas vigas de vidro são muito pequenas, é necessário que todo o sistema que as envolve seja o mais indeformável possível.

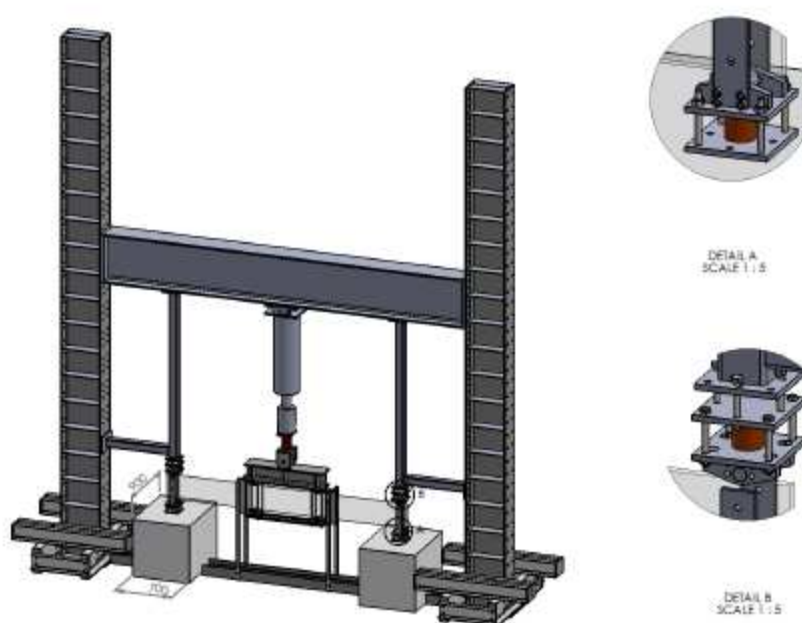


Figura 3.2 - Pórtico de ensaios e pormenores dos apoios superior e inferior na extremidade da viga.

O contraventamento, como já indicado anteriormente, é feito em quatro secções, nos apoios e nas proximidades da aplicação da carga. Este sistema é executado através de perfis tubulares fixos na viga de lintel, que fica por baixo do vidro, entre os blocos de betão e o contacto ao vidro é feito com parafusos capeados com círculos de nylon (Figura 3.3). Este sistema além de ser reutilizável para todos os ensaios, permite uma fácil afinação e uma rápida montagem e

desmontagem. A escolha do nylon deve-se ao facto do material apresentar um reduzido coeficiente de atrito.

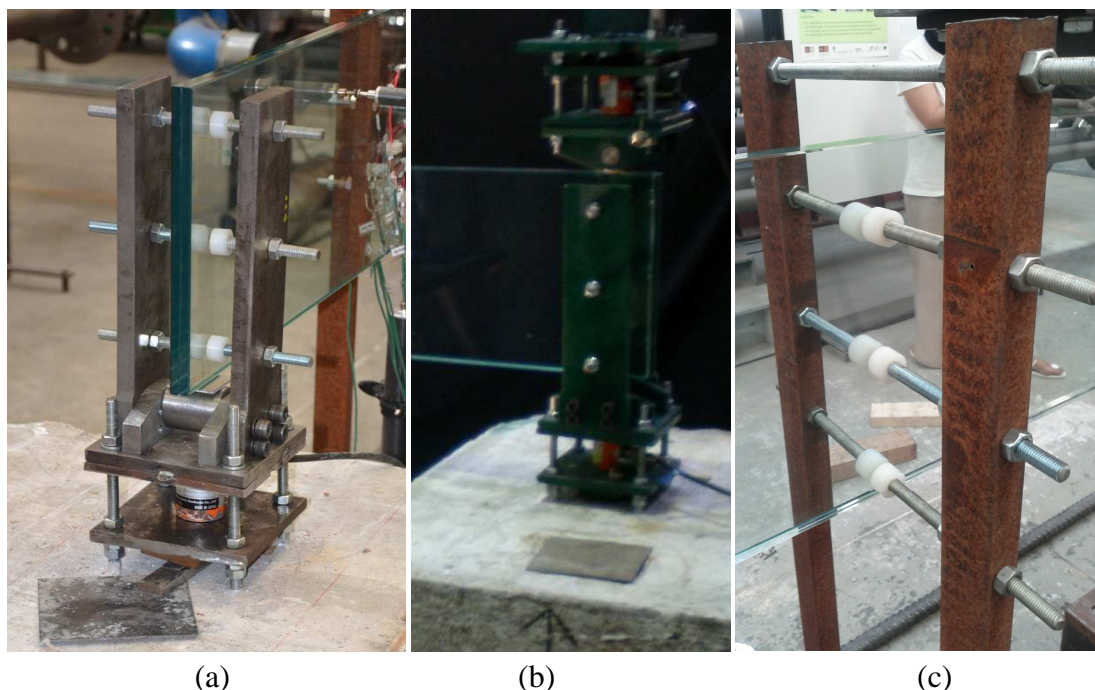


Figura 3.3 - Pormenores dos apoios e contraventamentos: (a) no ensaio simples, (b) no ensaio cíclico e (c) contraventamento junto a aplicação de carga.

Nos pontos de contacto, dos roletes de apoio e pontos de carregamento, foram colocadas chapas de alumínio (AW5454-H24) (Figura 3.4), minimizando assim os efeitos das pressões de contacto, que podem conduzir ao esmagamento e iniciação de fendas. O alumínio foi escolhido para o lugar das borrachas que, como observado anteriormente, devido à grande deformabilidade impediam uma correcta medição das deformações da viga.



Figura 3.4 - Pormenor do apoio e chapa de alumínio.

O carregamento é aplicado através de um actuador hidráulico, Dartec/Servosis de 20 ton com curso de 200 mm. Sob o actuador, e nos apoios, para uma medição mais rigorosa, foram instaladas células de carga da marca TML de 20ton e de 5ton, respectivamente.

Ligado ao actuador encontra-se ainda uma viga de carregamento, rotulada na direção do plano das vigas em ensaio e onde os pontos de contacto à viga são feitos por roletes. Como o mesmo sistema de ensaio terá de servir para ambos tipos de ensaio, monotónicos e cíclicos, foi necessário criar um mecanismo, preso por varões roscados, que “abraça” a viga para que durante o ensaio cíclico haja algo que a puxe para cima (Figura 3.5).

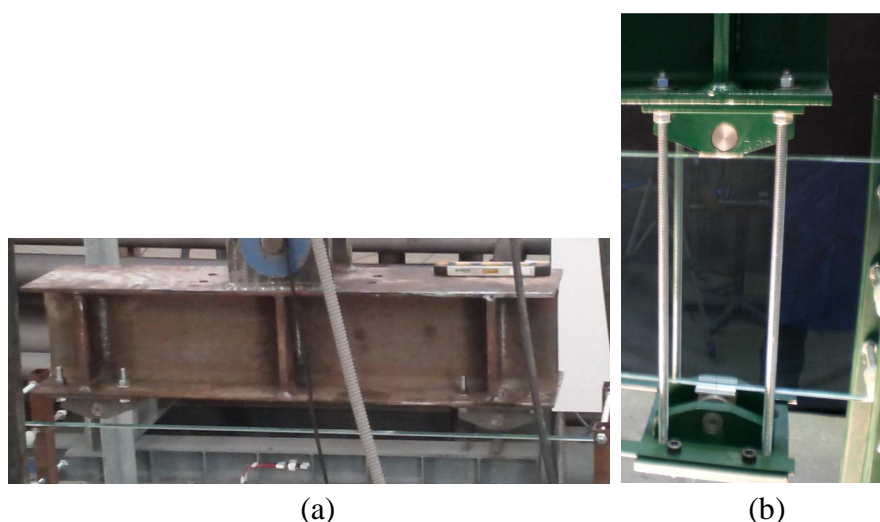


Figura 3.5 - Viga de carregamento (a) simples para ensaio monotónico e (b) sistema para ensaio cíclico.

3.1.2. Layout de Ensaio para Cargas Térmicas

No que diz respeito ao layout de ensaio térmico, este só difere do anterior pela câmara climática, esta foi idealizada e construída de raiz. A realização destes, às temperaturas de 40°C, 50°C e 70°C, implicou o desenvolvimento de uma câmara isolada termicamente que engloba o provete na totalidade.

A câmara teve como base um ‘esqueleto’ interior em aço para lhe conferir uma certa rigidez. Pois com as suas proporções e uma vez que não é viável a colocação interior de elementos que travem as suas faces, é extremamente necessário garantir que ao subir e desce-la durante os ensaios, para colocar e retirar as vigas, ela não sofra algum tipo de deformação que possa tocar e danificar quer as vigas quer parte do sistema de layout de ensaio. As suas faces foram constituídas por painéis acústicos que também fornecem bom isolamento térmico e para os

topos e tampo da câmara construiu-se sandwichts de gesso cartonado intercalado por lâ-de-rocha. Essas faces de sandwich têm também de possuir aberturas, que permitam a passagem de elementos metálicos de suporte aos apoios superiores dos ensaios de carregamento cíclico e a passagem do actuador de carregamento.

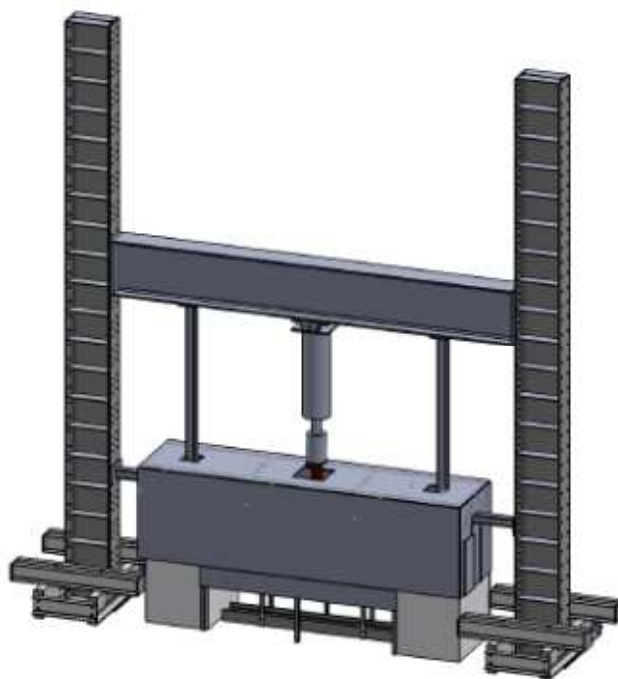


Figura 3.6 - Pórtico de ensaios com câmara térmica.

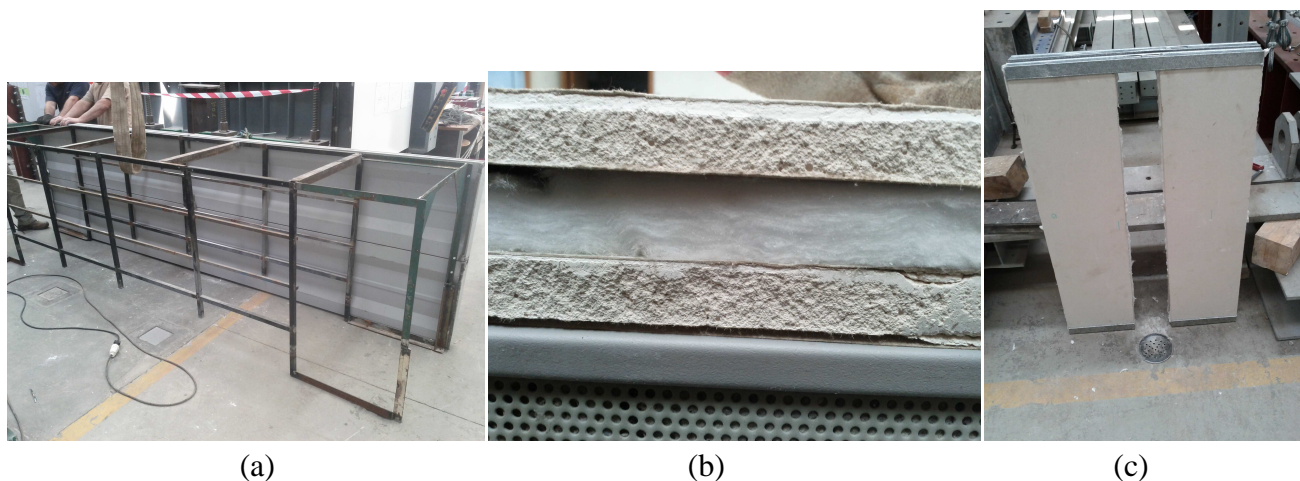


Figura 3.7 - (a) Esqueleto interior da câmara térmica, (b) pormenor do tampo sandwich, (c) um topo lateral da câmara.

Ao conceber a camara climática, previu-se ainda uma zona inferior mais baixa (Figura 3.8), entre os blocos de betão, de modo a possibilitar a deformação da viga sem que ela toque na

base, e aproveitando-se essa mesma zona rebaixada em forma de caixa para recolha de possíveis fragmentos de vidro, resultantes da ocorrência da rotura da viga.



Figura 3.8 - Caixa inferior da câmara térmica.

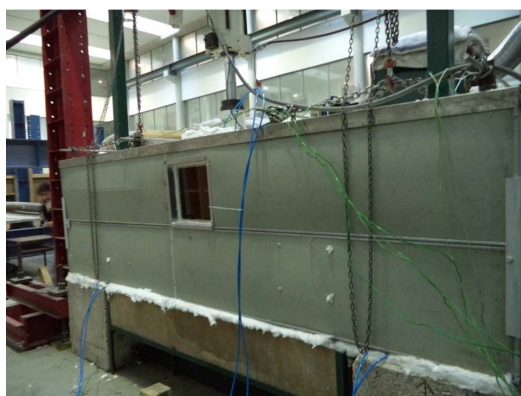


Figura 3.9 - Câmara Térmica.

As dimensões da câmara climática foram pensadas para ser possível a acomodação da viga de vidro, todos os mecanismos necessários de medição e ainda uma boa circulação do ar. Devido às aberturas nos topos e tampo e para que o calor não se disperse para fora da câmara, esses orifícios serão preenchidos com isolamento de lâ-de-rocha sempre que for necessário proceder-se aos ensaios térmicos. As dimensões da câmara encontram-se na Figura 3.10.

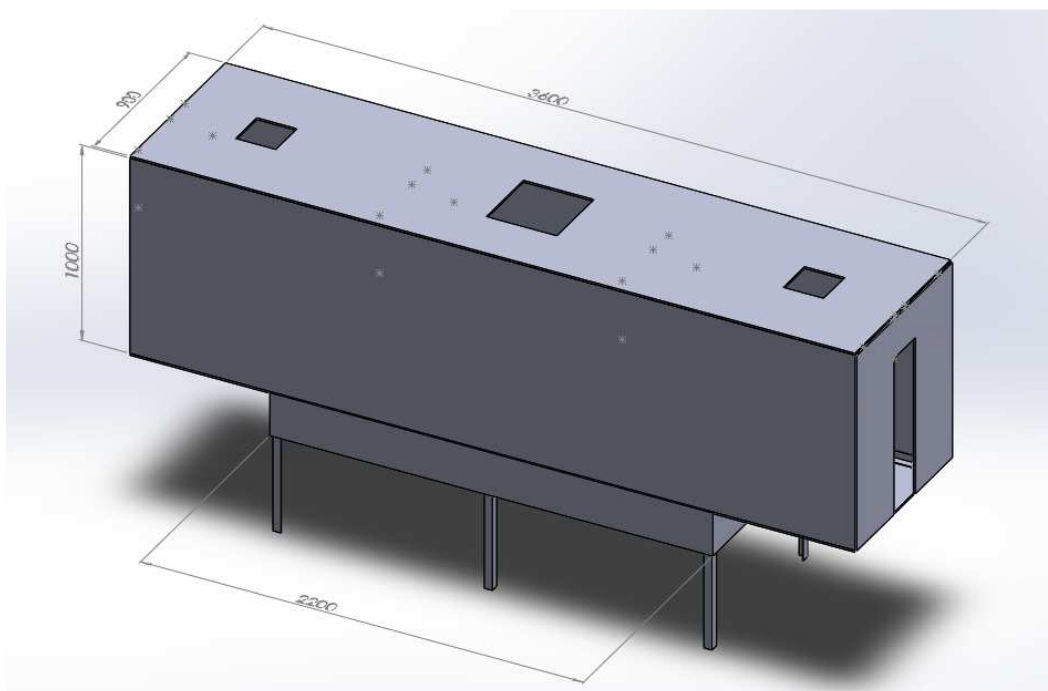


Figura 3.10 - Dimensões da câmara térmica.

A câmara, necessita de um sistema que faça o aquecimento do ar dentro da câmara. Esse sistema de aquecimento foi concebido através de um processo de circulação do ar, com recurso a um motor de exaustão e a um forno com resistências que foi construído para o efeito (Figura 3.11). Com o auxílio do exaustor, o ar é extraído por um dos topos da câmara, atravessa pelas resistências no forno e volta a entrar na câmara pelo topo oposto ao de extração. Por este método é retirado ar, é aquecido e novamente entra na câmara, proporcionando assim o aquecimento no interior desta.



Figura 3.11 - Sistema de circulação e aquecimento do ar, o exaustor (de cor azul) e forno.

3.2. Teste de ensaio à câmara climática

Para testar o isolamento da câmara térmica, afim de se verificar se esta permitia uma boa estabilização da temperatura e a necessidade de melhoramentos, procedeu-se a testes térmicos com o objectivo da estabilização da temperatura no seu interior, para 50°C e 80°C.

3.2.1. Ensaio para estabilização da temperatura a 50°C na câmara térmica

Os termopares utilizados para obter os valores de temperatura dentro da câmara, foram colocados de modo a aferir as temperaturas em pontos da localização da viga (Figura 3.12), um em cada ponto de localização das extremidades (na zona dos apoios) e um ao centro (meio da viga). Ainda foi aplicado um quarto termopar na saída do forno das resistências para controlo e registo da temperatura, uma vez que é necessário elevar a temperatura acima da desejada para a poder estabilizar dentro da câmara. O termopar indicado como '1' é o localizado junto ao topo por onde entra o ar e o indicado como '2' próximo da saída.

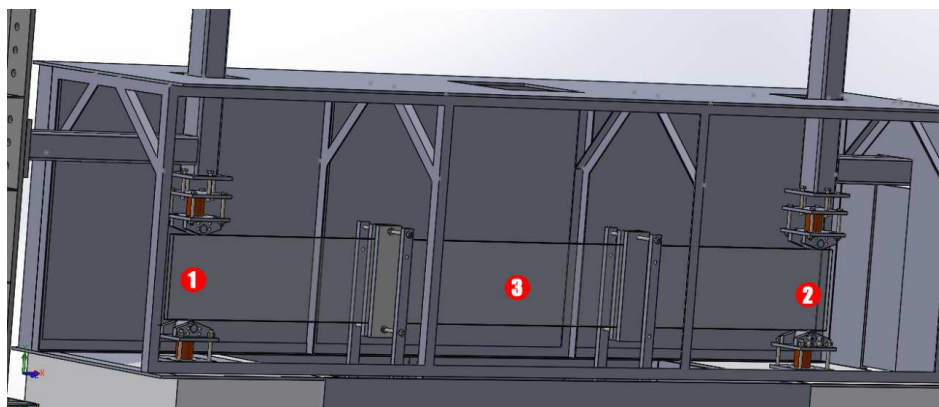


Figura 3.12 - Localização e indicação dos termopares dentro da câmara para o teste a 50°C.

Como observado no gráfico da Figura 3.13, a estabilização da temperatura no interior da câmara é perfeitamente exequível. Elevando as resistências com temperaturas a rondar os 70/75°C, consegue-se atingir a estabilização dos 50°C dentro da câmara. Nos dois termopares mais afastados da entrada do ar na câmara, a temperatura é atingida primeiro do que no mais próximo, que embora mostre sinais de convergência para valor pretendido o faz mais lentamente.

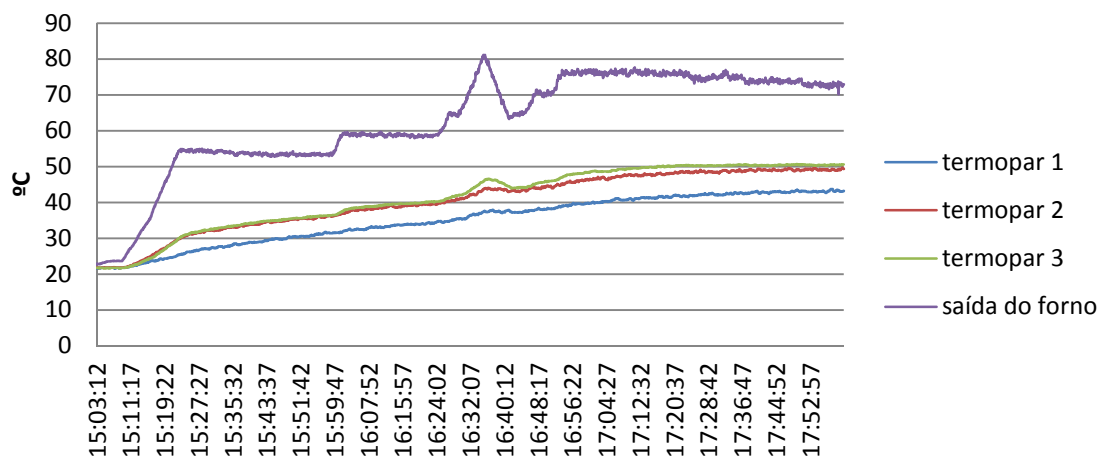


Figura 3.13 - Temperaturas do teste à camara climática a 50°C.

3.2.2. Ensaio para estabilização da temperatura a 80°C na câmara térmica

Este ensaio foi análogo ao ensaio anterior a 50°C, a localização dos termopares foi a mesma. Mas que o diferenciou do ensaio a 50°C não foi só a temperatura, neste ensaio juntamente com os termopares habituais, foram colocados termopares de vareta com o objectivo de verificar as temperaturas e se estes podem ser mais fiáveis. Foi ainda aproveitado este ensaio para testar o sistema de arrefecimento das células com a circulação de água ligado a um sistema de arrefecimento.

Na Figura 3.14 é apresentada a localização da instrumentação para este teste. À semelhança do ensaio anterior em cada ponto assinalado encontra-se um termopar normal e um termopar de vareta. Devido a uma troca na colocação dos termopares neste ensaio a entrada do ar quente faz-se pelo topo onde se encontra a marca (2).

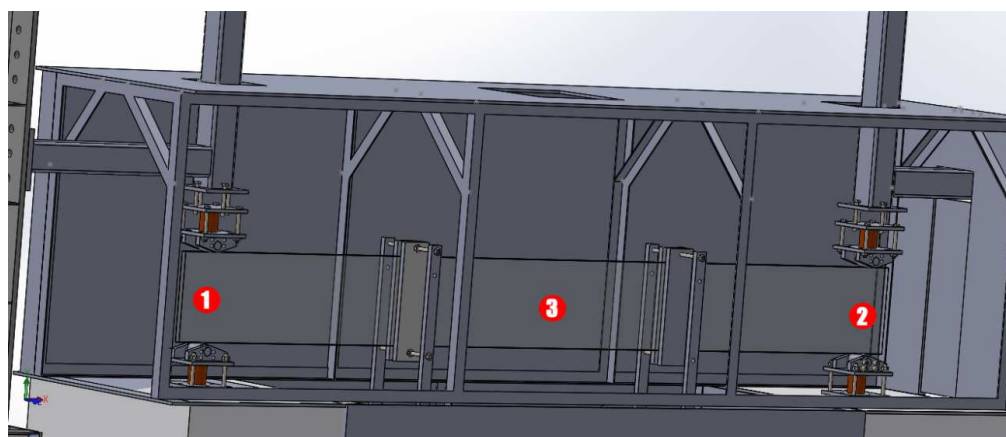


Figura 3.14 - Localização e indicação da instrumentação dentro da camara para o teste a 80°C.

Numa análise aos dados obtidos, observa-se as temperaturas atingidas no interior da câmara, a de saída do forno para aquecimento da câmara, e células de carga.

Dos dados dos termopares conclui-se em primeiro lugar que a estabilização da temperatura ocorre como previsto, apesar do reduzido tempo considerado 'estável' comparativamente com o tempo total do ensaio, tal demora deve-se principalmente com o tempo em que se demorou a elevar a temperatura das resistências do forno, visível na Figura 3.16. Comparando os termopares normais com os de vareta, registaram melhores valores de medição, pois nos 3 pontos diferentes da camara climática registaram temperaturas muito mais próximas uns dos outros, ao par que os de vareta registaram valores mais dispares. Este facto pode dever-se a uma provável deficiência ou avaria neste tipo de termopar, uma vez que antes do ensaio se verificou que muitos se encontravam danificados.

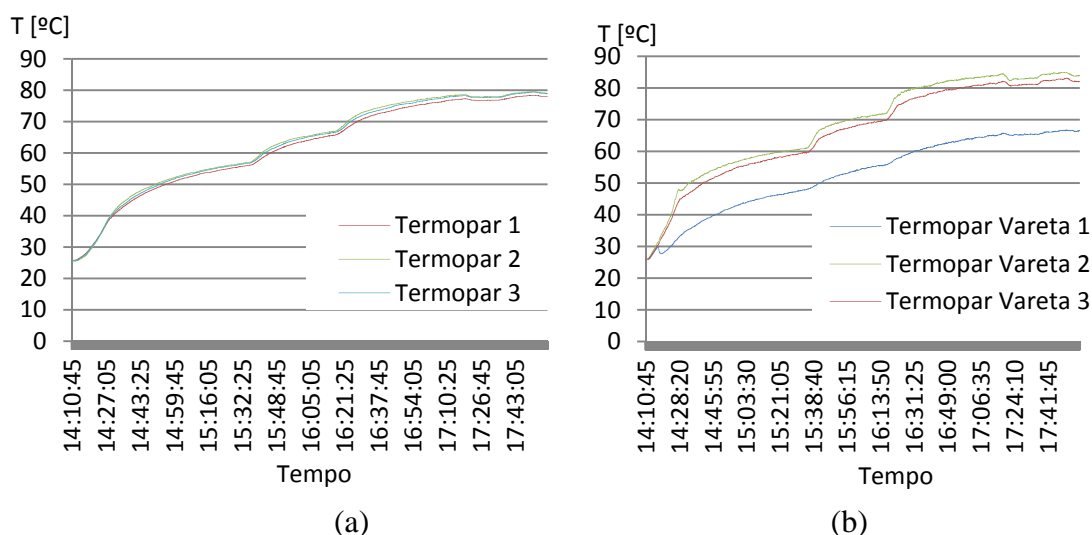


Figura 3.15 - Temperaturas medidas pelos termopares: (a) normais e (b) de vareta.

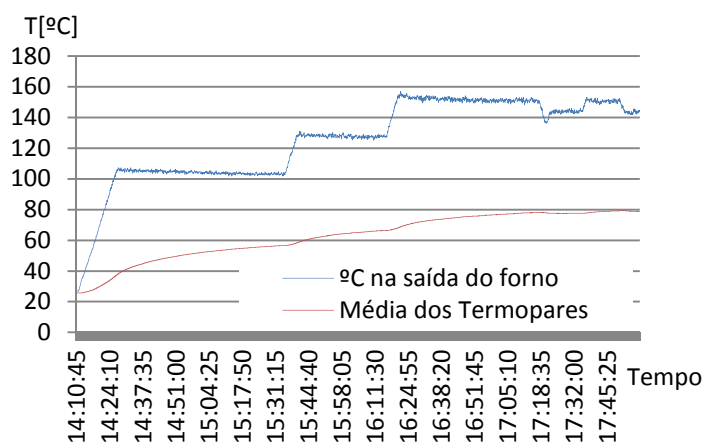


Figura 3.16 - Temperatura de saída do forno e média dos termopares.

Como se pode ainda observar, a temperatura no interior da câmara térmica, dada pelos termopares, consegue estabilizar bem pelos 80°C para uma temperatura no forno na ordem dos 150°C.

3.3. Testes de optimização ao isolamento para as células de carga

Uma vez que os ensaios de carga térmica apresentam temperaturas elevadas para o bom funcionamento das células de carga, é necessário proceder ao seu isolamento para que não se danifiquem nem tenham a sua leitura alterada. Estes ensaios, para o isolamento da célula de carga, foram idealizados para 6 horas de temperatura a 80°C à semelhança da temperatura máxima que será atingida nos ensaios térmicos das vigas de vidro. Este é um teste de interações até se atingir o pretendido, e para se chegar ao isolamento considerado, procedeu-se a 2 tipos de isolamento que são apresentados a seguir.

3.3.1. Caixa preenchida com isolamento

O primeiro esquema testado, para o isolamento da célula de carga, foi concebido de uma maneira muito simples. Resumiu-se simplesmente à construção de uma caixa de aglomerado em volta da célula, superior e inferiormente a célula encontra-se em contacto com chapas metálicas que farão parte do apoio do esquema de ensaio. O espaço vazio foi preenchido com isolamento de lã de rocha, assim como a zona de contacto entre as chapas e a célula, para evitar uma maior condução térmica.

Para leitura das temperaturas, foram instalados 3 termopares para o efeito. O primeiro junto da célula de carga, a fim de avaliar a temperatura desta, um no meio do isolamento da lã de rocha e um último dentro do forno para registo e controle de temperatura.

No gráfico da Figura 3.18 encontram-se os valores registados, apresentando a curva de cada termopar e da acção térmica.

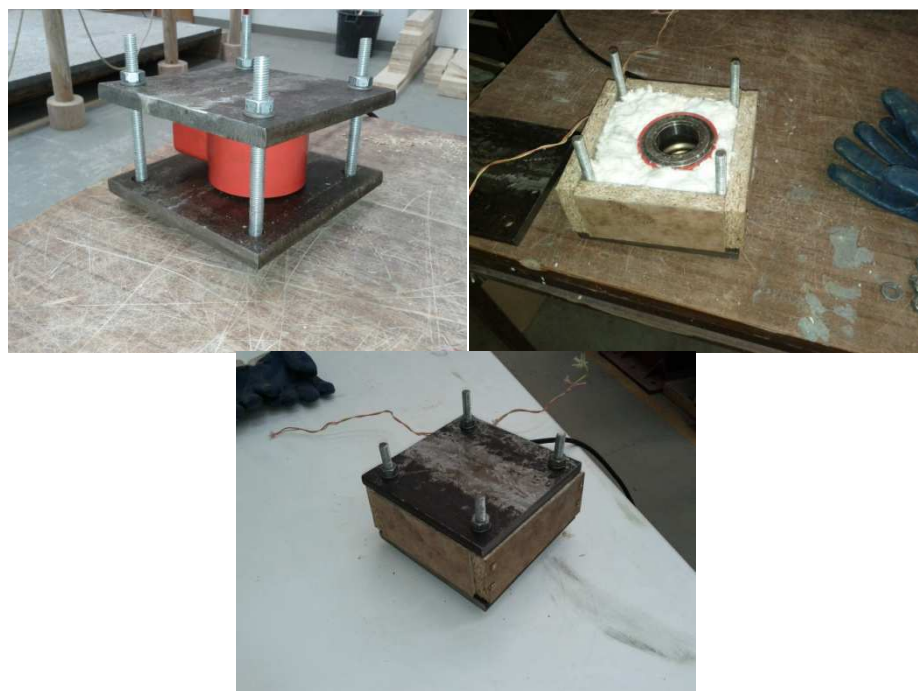


Figura 3.17 - Preparação da caixa de isolamento para célula de carga.

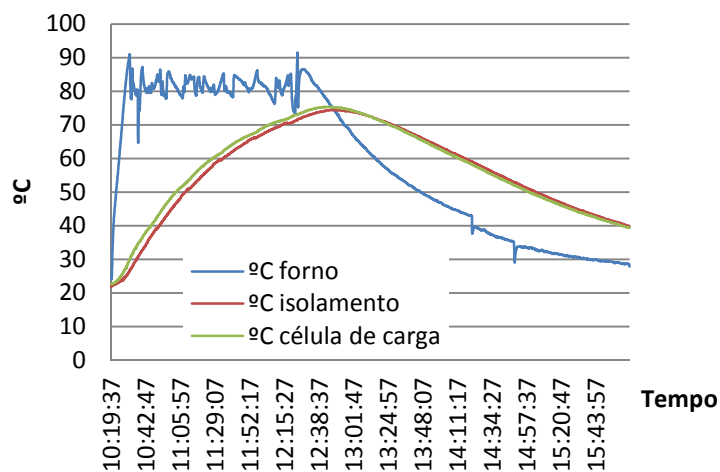


Figura 3.18 - Temperaturas do teste ao sistema de isolamento com lã-de-rocha.

Numa fácil análise ao gráfico, observa-se que a temperatura junto da célula de carga atingiu valores superiores aos 70°C ao fim de apenas duas horas de ensaio, e portanto este sistema para isolar a célula de carga falhou o seu objectivo, e o ensaio foi interrompido.

3.3.2. Sistema de Refrigeração a Água

Não sendo possível a utilização do método anterior, decidiu-se usar um método um pouco mais elaborado. Esta nova concepção desenvolveu-se com base num tubo ‘serpentina’ colocado em volta da célula de carga, por onde circula água que provoca o arrefecimento da célula. Para melhorar o isolamento térmico da célula e do tubo, este sistema foi ainda envolvido em lã de rocha.



Figura 3.19 - Preparação e Sistema de bombeamento de água para a célula de carga.

Neste teste foram usados dois termopares para registo medição das temperaturas atingidas. O primeiro entre a célula de carga e o tubo, que regista a temperatura junto da célula, o segundo foi colocado no interior forno para registar as temperaturas deste. A água para a refrigeração da célula encontra-se inicialmente à temperatura ambiente, uma vez que se trata de um teste preliminar, não houve o cuidado de arrefecer a água no circuito.

Analisando o gráfico das temperaturas registadas (Figura 3.20), observa-se que este método conduz a um bom arrefecimento da célula de carga, com temperaturas do meio envolvente a oscilar nos 80°C a célula atingiu uma temperatura máxima de 54°C, enquanto a água, devido às suas repetidas passagens, foi aquecendo e atingiu um valor de 48°C. Podemos então assumir que usando um método para arrefecer a água neste sistema, afim de não permitir ou

controlar o aumento da sua temperatura, podemos conduzir a um decréscimo das temperaturas atingidas junto das células de carga.

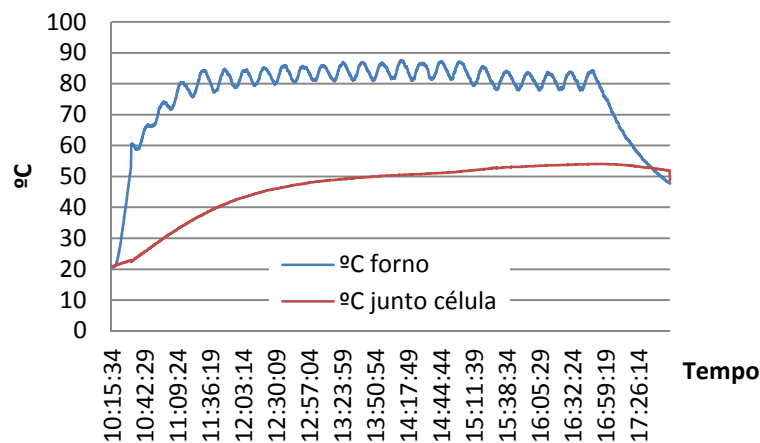


Figura 3.20 - Temperaturas do teste ao sistema de refrigeração com tubo de água.

3.3.3. Teste de temperatura a 80°C com sistema de arrefecimento

Como já foi indicado, durante o teste de estabilização da câmara à temperatura de 80°C, decidiu-se que seria testado em simultâneo este método de arrefecimento das células de carga com sistema de arrefecimento da água em circulação. Neste ensaio para simular as células de carga utilizaram-se parafusos, os quais foram envolvidos nas espirais dos tubos de circulação da água. Cada tubo apenas envolve uma célula, assim a água entra no sistema, refrigera a célula e sai, não passando por mais nenhuma, minimizamos o seu tempo dentro dos tubos expostos ao calor impedindo assim um aquecimento superior. É também colocado um termopar entre a serpentina de tubo para registo dos valores de temperatura (Figura 3.21).

Os cinco parafusos, que simulam as células de carga, encontram-se localizados segundo a Figura 3.22, em (1) encontram-se dois, em (2) igualmente dois, e em (3) na zona mais baixa da caixa inferior encontra-se o último.

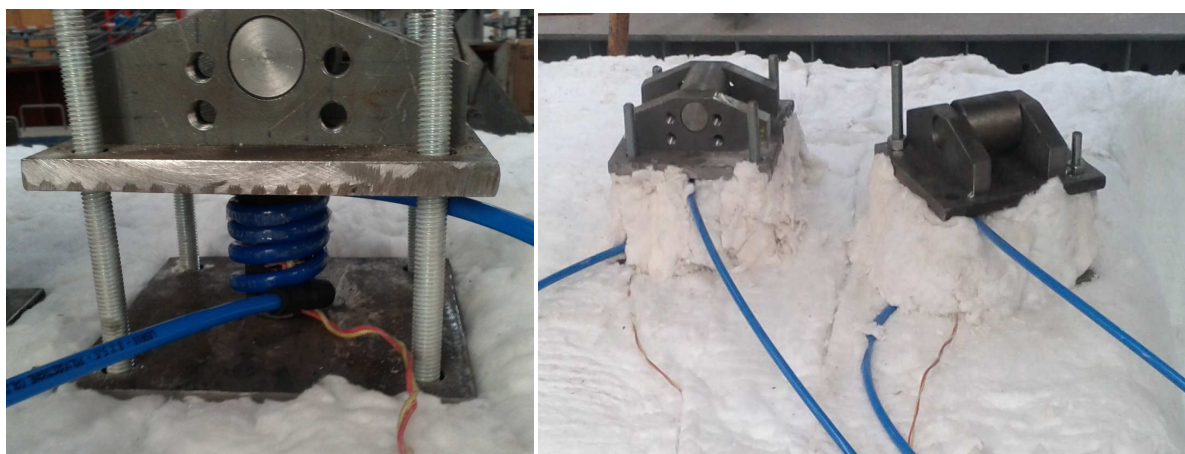


Figura 3.21 - Preparação do sistema de refrigeração e termopar para as células de carga.

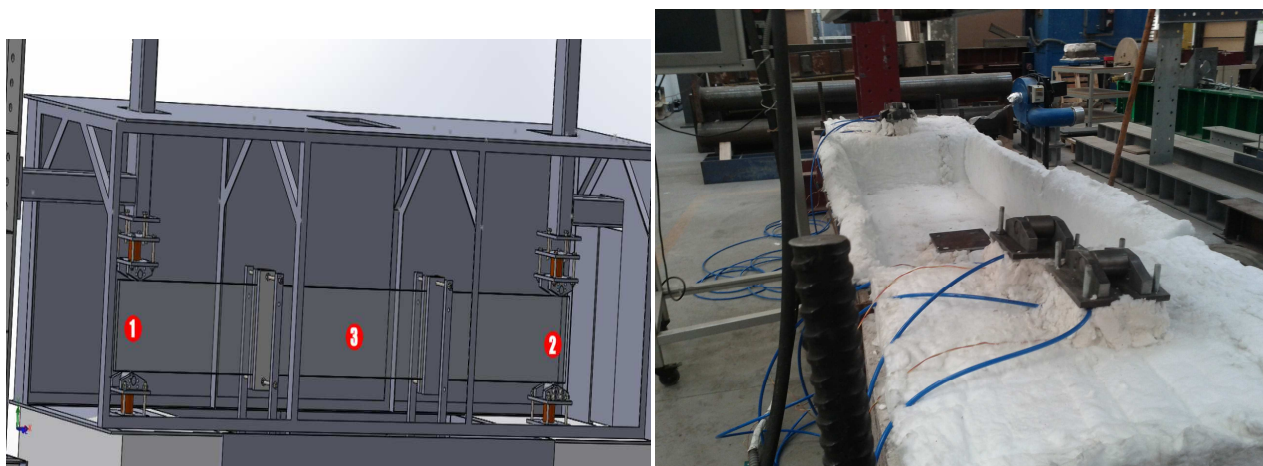


Figura 3.22 – Localização das células de carga, à frente na foto as que se encontram em (2) junto da entrada de ar.

No que diz respeito ao sistema de refrigeração da água, este foi feito com recurso a um refrigerador de ventoinha (Figura 3.23). A água depois de passar pelas serpentinas em volta das células de carga é encaminhada para a ventilação e arrefece antes de voltar ao depósito e ser novamente bombeada pelo sistema.



Figura 3.23 - Bomba e sistema de refrigeração a ventoinha.

Como é perceptível nos gráficos, a temperatura máxima obtida nas células de carga atinge valores entre os 30 e os 40°C, dependendo das células, quando a temperatura verificada na câmara é de 80°C. Traduzindo assim o bom funcionamento de todo o sistema de refrigeração. Observa-se também que as células de carga situadas em (2), por estarem mais próximas da entrada de ar quente, são as que apresentam os valores mais elevados, de 40°C, enquanto que as outras, por se encontrarem mais afastadas, apresentam os valores mais baixos.

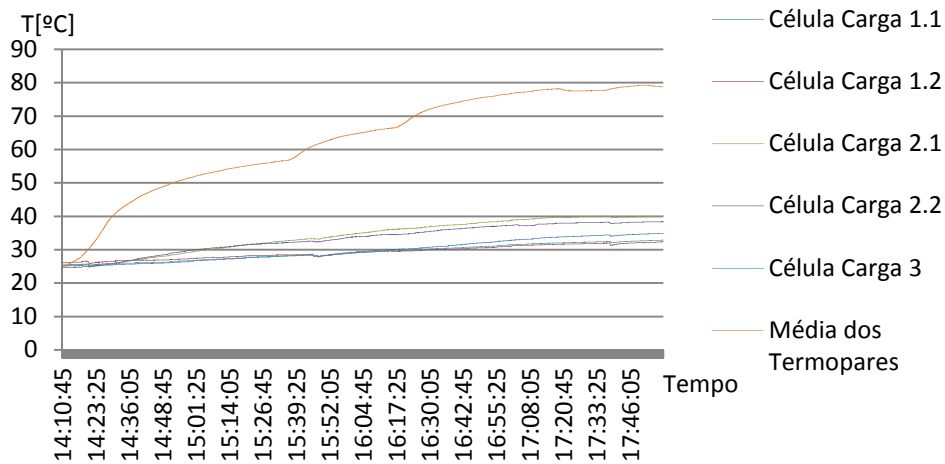


Figura 3.24 - Temperaturas no interior da câmara e das células de carga.

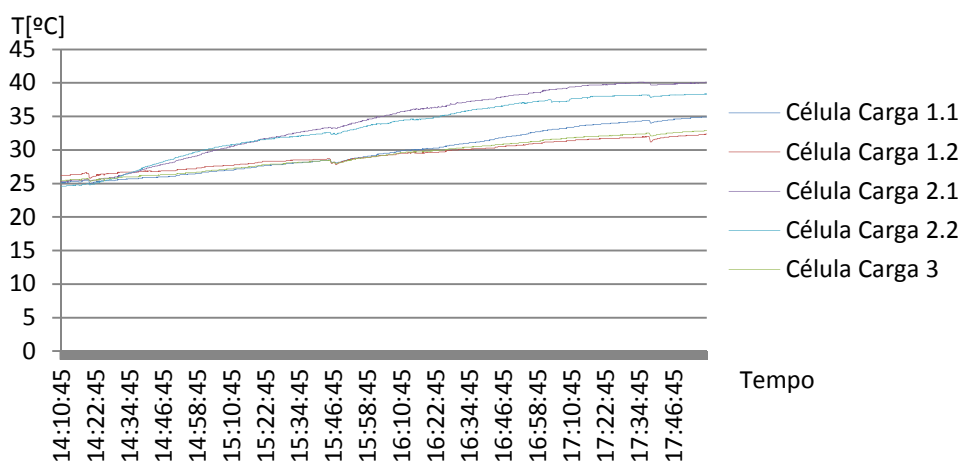


Figura 3.25 - Temperaturas atingidas nas células de carga.

3.4. Colagem de Termopar ao vidro

No ensaio das vigas sob solicitação térmica, o ar quente envolvente irá aquecer o vidro das vigas e será necessário obter a temperatura junto da superfície das vigas. Para isso as vigas terão de ser instrumentadas com termopares para possibilitar essa leitura. Para que a medição dessa temperatura não seja perturbada e o termopar leia apenas a temperatura do elemento vidro, será necessário cola-lo e isolar do ambiente. Para isso testou-se num provete de vidro 2 termopares cada um com um método diferente para o efeito de colar e isolar.

Num dos termopares foi colocada um pouco de fita-adesiva de alumínio e coberta por silicone de resistência térmica, no outro foi usado uma solução adesiva com uma resina de poliéster e peróxido orgânico (NP-50).

Ambos os métodos se mostraram fiáveis para o efeito pretendido. A escolha prendeu-se simplesmente pelo facto da solução através da NP-50 segurar melhor o termopar à superfície do vidro.



Figura 3.26 - Métodos de colagem dos termopares ao vidro e componentes.

3.5. Ensaio Térmico a provete com SentryGlass

Este ensaio tem a finalidade de observar o comportamento térmico e registo da temperatura no provete, em que este possui um termopar no interior entre o SentryGlass. Este ensaio é importante na medida em que nos permite saber a diferença entre a temperatura na superfície do vidro e no interior do laminado. Pois é importante garantir que o laminado se encontra, todo à mesma temperatura, de forma a saber a temperatura do SGP, uma vez que as suas propriedades dependem muito da temperatura. O ensaio decorrerá dentro dum forno mufla em que se elevará a temperatura a 80°C e proceder-se-á ao registo das temperaturas e suas variações. O provete usado tem as dimensões presentes na Figura 3.27.

Este provete já possui um termopar no interior do SentryGlass para medição das variações de temperatura no interior do vidro. Serão ainda colados 2 termopares na superfície do vidro, assim poderemos observar e relacionar as variações entre superfície e interior. No exterior, dentro da mufla, serão deixados ainda 2 termopares simples e 1 duplo para registo da temperatura ambiente envolvente do provete. Esse termopar, dito duplo, consiste em 2 termopares simples soldados numa pequena chapa metálica, assim comprovamos a calibração dos termopares ao apresentarem o mesmo valor.

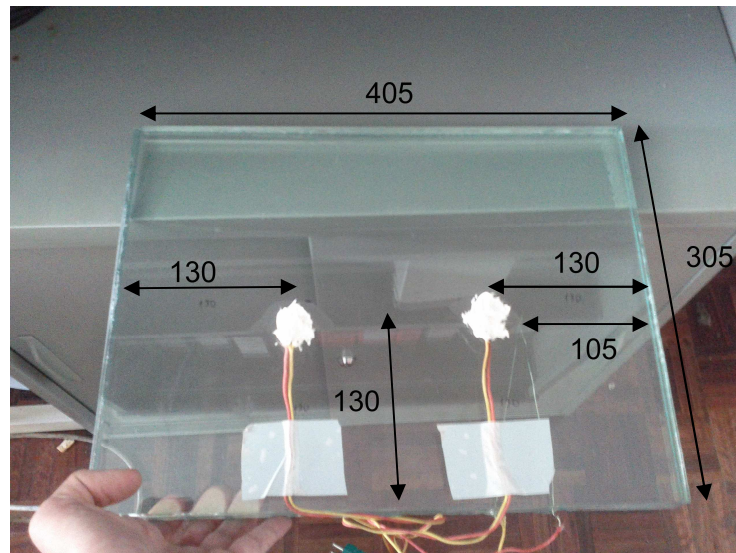


Figura 3.27 - Dimensões do provete em mm.

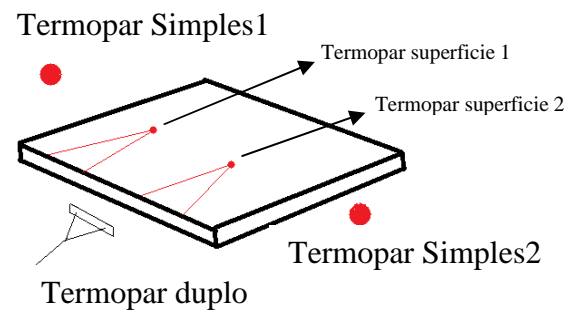
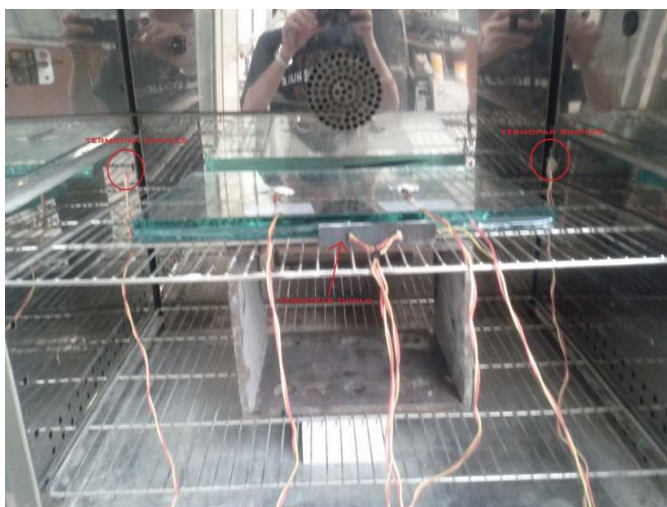


Figura 3.28 – Esquema de localização dos termopares.

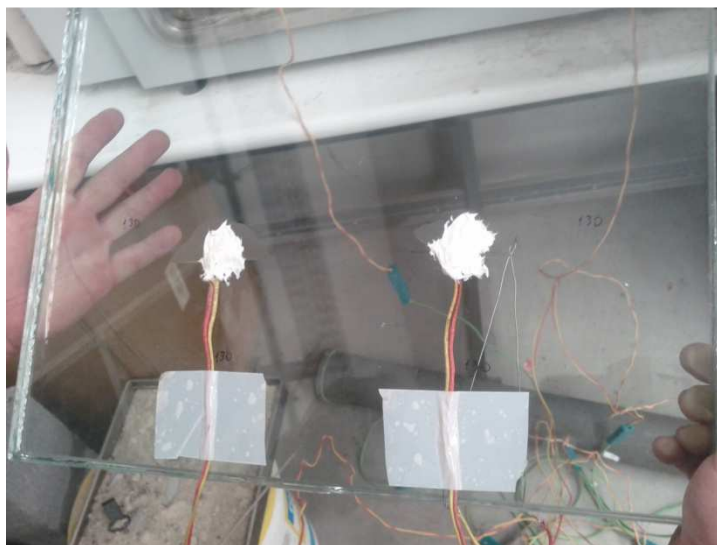


Figura 3.29 - Vista de termopares da superfície do vidro e do interior do SentryGlass.

Entre os termopares, o que leu com menor oscilações e diferenças entre os restantes, foi o termopar duplo, mas no patamar de estabilização todos registaram valores aproximados entre os 85 e 90°C.

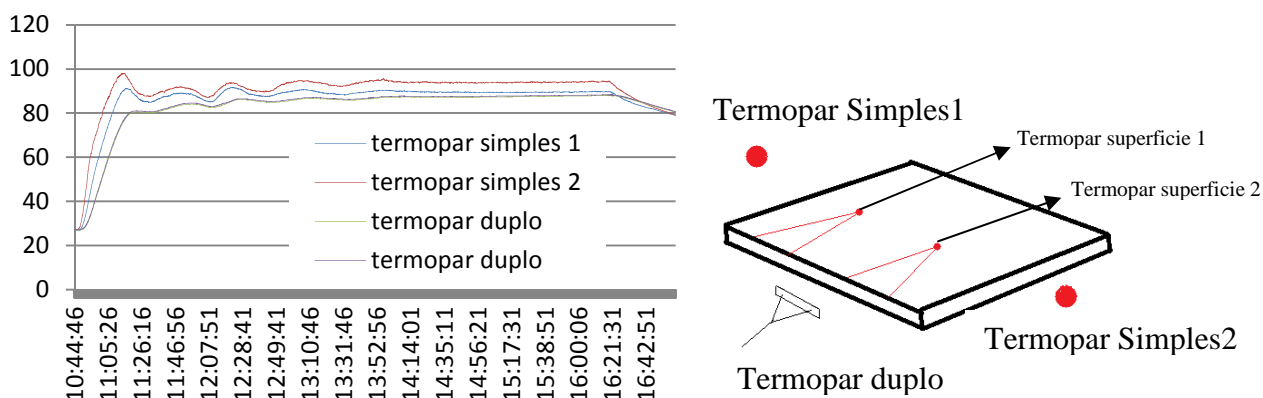


Figura 3.30 - Temperaturas do interior da mufla, medidas pelos termopares.

Uma das preocupações para este ensaio era a de averiguar se quer a superfície, quer o interior do vidro aqueciam ao mesmo ritmo e não apresentavam uma grande disparidade de valores durante o ensaio térmico. Observando o gráfico da evolução da temperatura no sandwich laminado (Figura 3.31), nota-se que não há uma grande diferença na variação da temperatura do interior do SentryGlass para a superfície. Como esperado no início do ensaio, o interior por

se encontrar mais protegido da fonte de calor possui uma temperatura inferior mas com o tempo sofre um aquecimento igual ao da superfície e atinge as mesmas temperaturas.

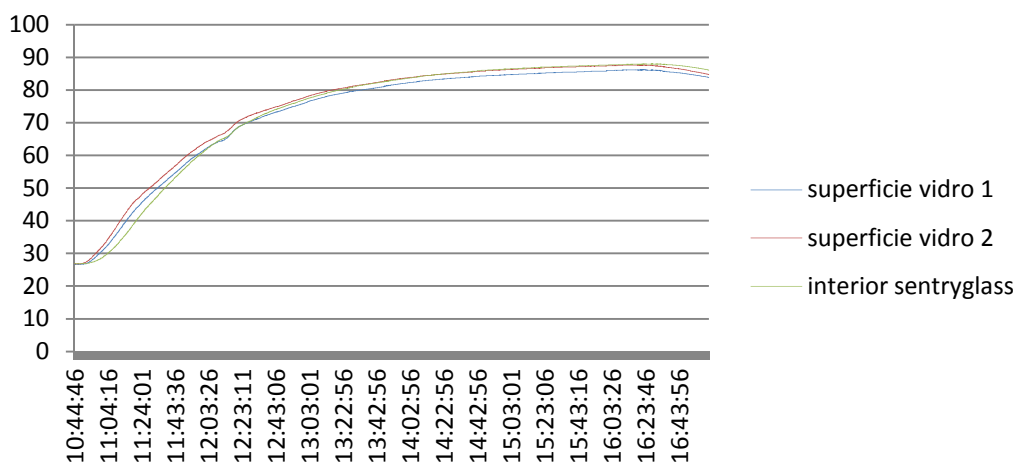


Figura 3.31 - Variação da temperatura na superfície do vidro e no interior do SentryGlass.

3.6. Ensaio de caracterização do comportamento reológico do vidro

Para caracterizar o comportamento de um elemento estrutural tem-se de conhecer o comportamento reológico do material que o constitui, pois é de extrema utilidade para a criação de modelos numéricos que conduzam a resultados fielmente próximos de uma análise experimental. Assim como objectivo deste teste procura-se perceber como os provetes de vidro, em ensaios monotónicos respondem à carga e deslocamento aplicados e determinar as suas propriedades, como por exemplo o módulo de elasticidade e a tensão de rotura.

O método de ensaio neste caso será o de 4PB com o provete deitado, de acordo com a EN 1288-3:2000, em que o carregamento é feito na perpendicular com o plano do provete. Este tipo de ensaio também podia ser executado em esquema de anéis duplos concêntricos, EN 1288-2:2000, mas escolheu-se o 4PB por facultar resultados próximos do verificado em modelos à escala real, tendo como motivo a verificação duma diminuição da resistência à flexão com o aumento da dimensão da área de ensaio, pois quanto maior a área de ensaio maior a probabilidade de esta conter defeitos superficiais.

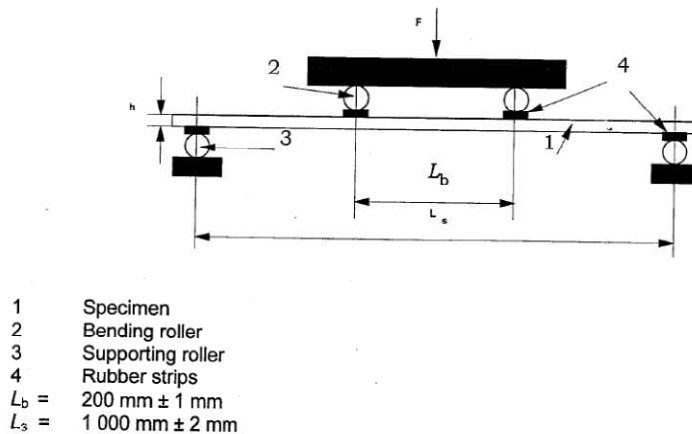


Figura 3.32 – Esquema de ensaio da norma EN 1288-3:2000

3.6.1. Geometria e instrumentação

Estes provetes, não possuem as dimensões de ensaio indicados na norma ($L=1000 \text{ mm}$ e $b=360 \text{ mm}$), pois tal era impedido devido ao equipamento disponível. Sendo impossível a realização dos ensaios com as dimensões indicadas na norma, realizou-se em provetes de menor dimensão (Figura 3.33-(a)), mas com uma relação L/b próxima.

Os provetes são instrumentados com extensómetros, da TML do tipo FLA 6-11, colocados a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da largura na face superior e a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ na face inferior e um defletómetro de 10mm de curso, igualmente da TML, colocado no centro para medir a deformação vertical a meio vão (Figura 3.33-(b)).

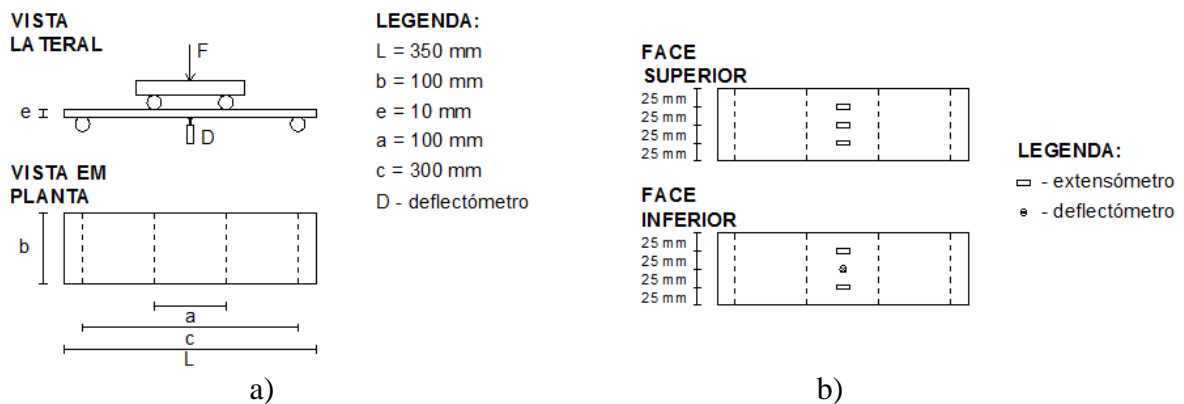


Figura 3.33 - Representação dos provetes: (a) Dimensões e esquema de ensaio; b) Localização da instrumentação. (retirado de (Jordão & Pinho, 2014))

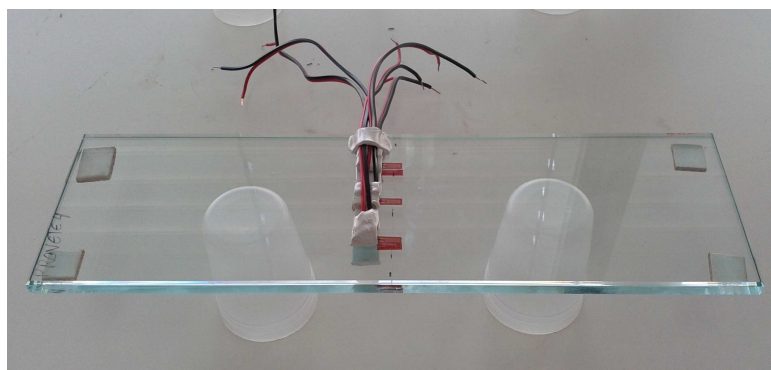


Figura 3.34 – Provete4 com extensómetros aplicados

3.6.2. Optimização do Layout de ensaio

O layout para estes ensaios foi alvo de sucessivos melhoramentos, de modo a delinear o alinhamento para a realização dos ensaios. A iteração inicial é baseada na informação contida na EN1288, como já observado. Dadas essas alterações e o elevado desvio padrão de outros autores neste tipo de ensaios, foi discutido a qualidade dos procedimentos e desenvolvidos alguns melhoramentos, nomeadamente a nível do elemento flexível aplicado nos pontos de contacto com os provetes e sistema do carro de carga com célula de carga.

3.6.2.1 Elementos de isolamento dos pontos de contacto

Pela EN1288, é aconselhado o uso de tiras de borracha nas zonas entre provetes e roletes de apoio e aplicação de carga. Os resultados verificam que a deformação sofrida pelas borrachas possui uma grande magnitude relativamente à do provete e procedeu-se a uma tentativa de avaliar a deformabilidade da borracha (Figura 3.35). Deste ensaio à borracha entendeu-se que seria impossível obter essa avaliação com o rigor pretendido.



Figura 3.35 – Ensaio à borracha.

Este problema não se coloca quando se segue a norma EN 1288 relativamente à geometria do provete e características das tiras de borracha, em que a flecha máxima no vidro é calculada através de uma expressão semi-empírica que toma em conta o efeito da referida deformabilidade associada às borrachas.

Se tal não for possível, e se estes elementos se encontrarem intercalados no sistema, não é possível avaliar a real deformação do provete. Uma grande dispersão de resultados é frequentemente atribuído à dificuldade de avaliar com rigor suficiente a resposta dos sistemas quando são intercalados elementos flexíveis. Assim, e tendo em conta que os pontos de contacto do carro de carga e apoios, são em forma de rolo, polidos e de largura superior ao provete, optou-se por não usar as borrachas.

Na Figura 3.36 são ilustradas as posições do início das fracturas dos provetes ensaiados. Assim observa-se que a fractura dos vários provetes iniciou-se maioritariamente na zona entre aplicação da carga e nunca junto aos apoios (Figura 3.36). Assim pode-se deduzir a razoabilidade da opção da não utilização das borrachas nos pontos de contacto.

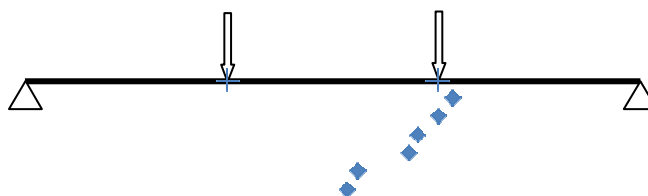


Figura 3.36 – Posições de início de fractura nos vários provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

3.6.2.2 Carro de carga

Para a realização destes ensaios requer-se a utilização de uma peça para a aplicação da carga (carro de carga). O carro de carga é constituído por duas partes; a parte superior que fica conectada ao cabeçote superior da máquina de ensaio, e a parte inferior que contacta com o provete. Entre estas duas partes está intercalada uma célula de carga. O uso dessa célula prende-se com o facto de que a máquina é de grande tonelagem, tendo menor precisão para as cargas mais baixas necessárias nestes ensaios. A simples justaposição dos 3 elementos não é viável, pois após a rotura o provete deixa de poder dar apoio à peça inferior do carro de carga. Para impedir que isso aconteça, as peças do carro de carga estão ligadas por um parafuso.

No primeiro esquema de ensaio foram utilizadas duas células de carga, colocadas simetricamente em relação ao eixo da máquina e plano longitudinal do provete (Figura 3.37-(a)). Esta configuração não foi a ideal pois o sistema não era suficientemente fixo, pelo que as células não permaneciam ortogonais em relação às restantes peças do carro de carga, conduzindo a imprecisões nas leituras. Tentando melhorar este aspecto, testou-se uma solução com apenas uma célula de carga centrada pelo eixo da máquina rodeada de parafusos equidistantes em relação à célula e entre eles para garantir a estabilidade do carro de carga (Figura 3.37-(b)). Em ambas estas situações verificou-se que existia transferência de carga pelos parafusos. Na Figura 3.38 é possível observar os resultados dos primeiros 3 provetes, que foram ensaiados com o primeiro esquema, (Figura 3.37-(a)), estes provetes confirmam a falha destes esquemas demonstrando uma rigidez de aproximadamente 50GPa, enquanto que a nominal, apresentada na EN572-1, é de 70GPa.

A solução final terminou pela existência de uma célula roscada em ambas as extremidades (Figura 3.37-(c)). Este sistema mostrou-se suficientemente fixo e em contrario às soluções anteriores garante que a força é totalmente transferida pela célula de carga.

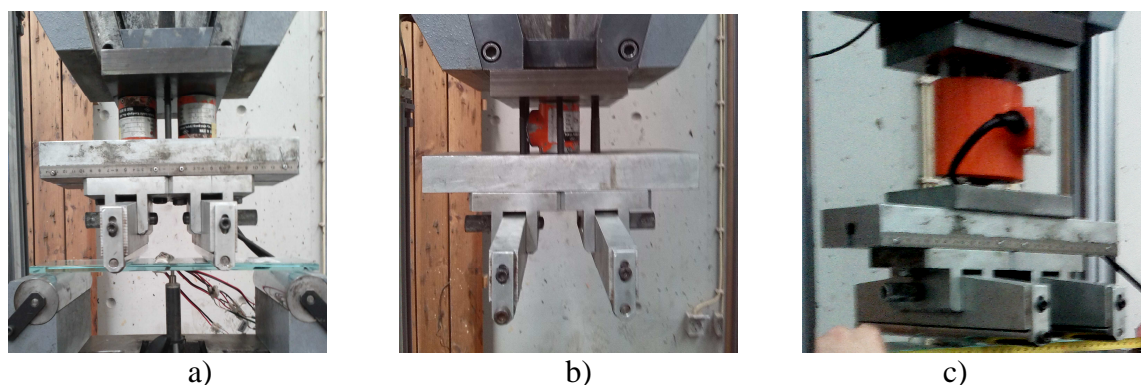


Figura 3.37 - Esquemas de instalação da célula entre as duas peças do carro de carga (a) Duas células e parafuso, (b) Apenas um célula e parafusos e (c) Célula roscada (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

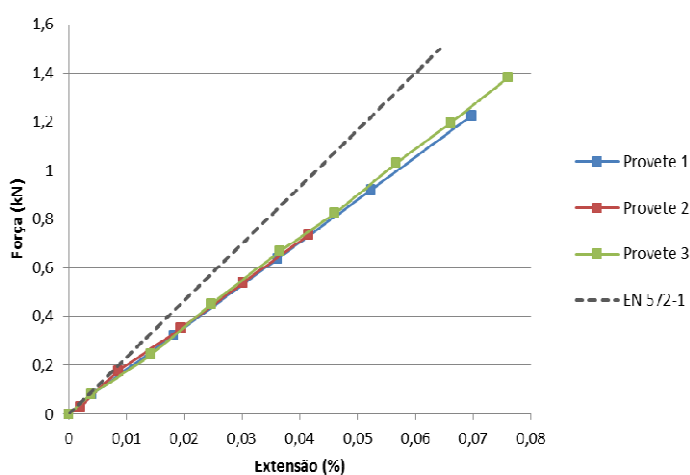


Figura 3.38 – Resultados dos primeiros 3 provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

3.6.3. Ensaio

A carga foi aplicada em controlo de deslocamento, a uma velocidade de 0,05mm/s, equivalente a $2\text{N/mm}^2\text{s}$, sendo o aconselhado na EN 1288-3 o valor de $(2\pm 0,4)\text{N/mm}^2\text{s}$.

Na Figura 3.40 e Tabela 3.1 são apresentados os resultados dos provetes. Os resultados apresentados são a força atingida na rotura ($F_{\text{máx}}$), deformação vertical ($\delta_{\text{máx}}$) relativa a essa força, média das extensões medidas ($\epsilon_{\text{méd}}$), tensões máximas ($\sigma_{\text{máx}}$) e módulos de elasticidade (E). Para o módulo de elasticidade é indicado 2 valores calculados por 2 métodos diferentes, pela Integração da linha elástica e pela Relação Tensão-Extensão, calculados pelas expressões:

Integração da linha elástica,

$$E = \frac{23}{648} \frac{F_{m\acute{a}x} c^3}{I \delta_{m\acute{a}x}}, \quad (4.1)$$

Relação Tensão-Extensão,

$$E = \left(\frac{F_{m\acute{a}x} a e}{I \frac{2}{2}} \right) \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \quad (4.2)$$

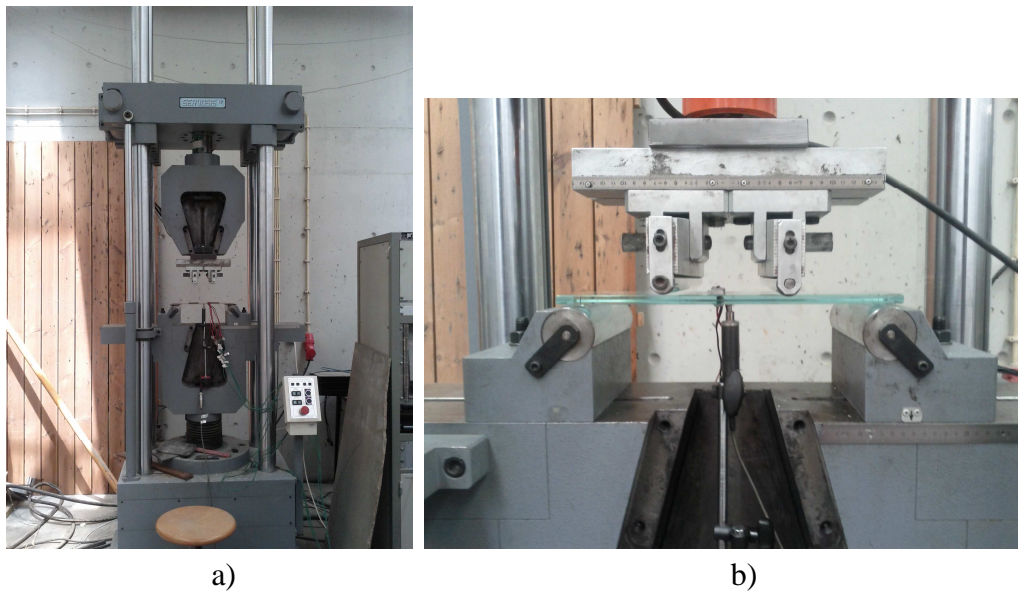


Figura 3.39 – Ensaio dos provetes: (a) Equipamento usado no ensaio: máquina universal Servosis de 60ton e (b) Pormenor do ensaio

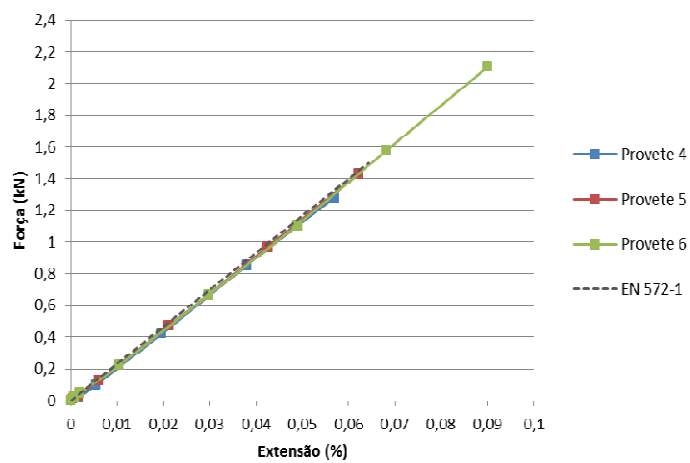


Figura 3.40 – Resultados dos provetes 4, 5 e 6 (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos provetes (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

Nº do Provede	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\epsilon_{m\acute{e}d}$ (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E (GPa)	
					Integração da linha elástica	Relação Tensão-Extensão
Provede 4	1,284	1,13	0,057	38.1	64,7	66,9
Provede 5	1,431	1,24	0,062	42.5	65,7	68,4
Provede 6	2,107	1,80	0,090	62.6	66,6	69,5

Sobre as tensões de rotura verifica-se que os vários provetes possuem diferenças, mostrando uma grande divergência entre si e do valor dado pela EN572-1, 45MPa.

O módulo de elasticidade pelo método da Integração da Linha Elástica conduz sempre a valores inferiores relativamente ao método da Relação Tensão-Extensão, e ambos inferiores aos 70GPa, indicados na norma. Considerando os valores obtidos pela lei de Hooke, têm-se uma média de 68,2GPa, valor mais baixo que os obtidos habitualmente, pelo que deverá proceder-se a um maior número de ensaios de modo a aumentar a segurança estatística destes resultados.



Figura 3.41 – Roturas dos vários provetes.

3.7. Sistema de Cabo de Pré-esforço

O sistema de pré-esforço foi igualmente idealizado e concebido de raiz, foi planeado de modo a que fosse possível o aproveitamento máximo de todos os seus componentes, desta maneira as peças são reutilizadas, baixa o custo das diversas vigas a serem ensaiadas e o sistema torna-se o mais idêntico possível em todos os ensaios futuros.

Na zona central é aplicado um sistema que consiste num esquema de roletes opostos entre si, ficando um em contacto com o vidro (que servirá também para os ensaios cíclicos) e outro em contacto com os cabos, estes roletes possuem sulcos de forma a permitir o encaixe dos cabos, mantendo-os sempre na mesma posição.

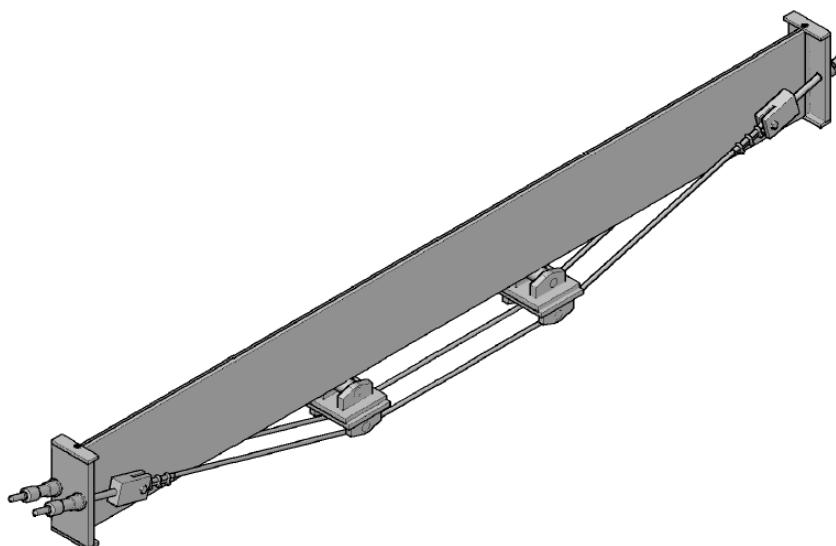


Figura 3.42 - Sistema de cabo de pré-esforço

Este sistema tem também como particularidade uma ligação por adesivo do sistema ao vidro, desta maneira cumpriu-se um objectivo de evitar furos no vidro que normalmente acompanham a outra opção de ligação, e que retirariam resistência à viga. Essa ligação é feita através de uma peça metálica muito simples, que é colada nos topos das vigas de vidro e, a única perda deste sistema. Na Figura 3.43 encontra-se o pormenor deste sistema com a identificação de todos os componentes incluindo essa tal peça, que é colada ao vidro e liga aparafusando-se ao resto do sistema por cima e em baixo.

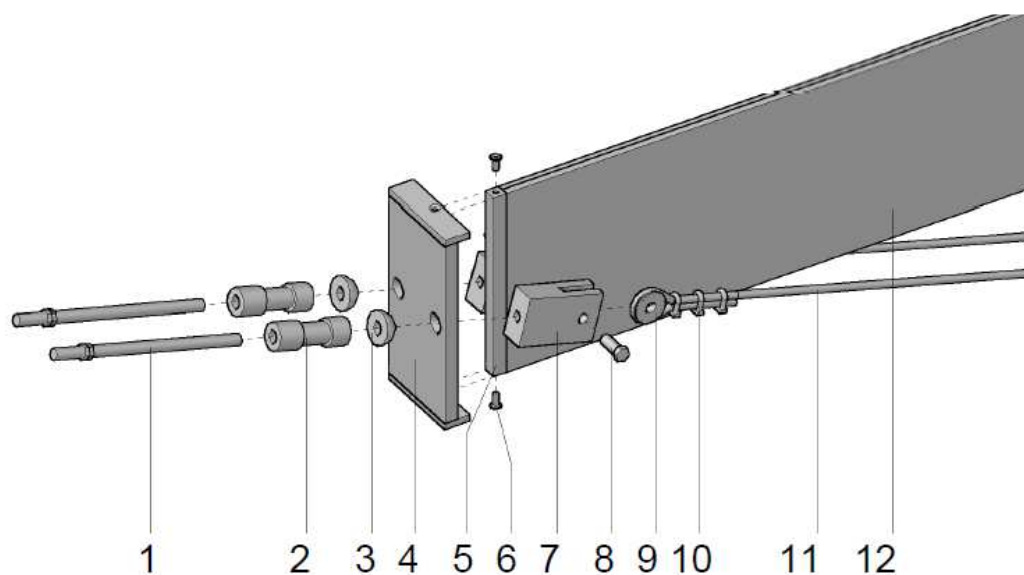


Figura 3.43 - Pormenor esquemático do sistema de união do cabo à viga de vidro.

Da Figura anterior tem-se:

- 1 - Varão roscado M16 com duas porcas M16;
- 2 - Células de carga;
- 3 - Semiesferas com furo de 20 mm;
- 4 - Chapa de aço;
- 5 - Perfil metálico para colagem ao vidro;
- 6 - Parafuso M12 com 20 mm de comprimento;
- 7 - Elemento metálico de ligação entre o varão e o cabo;
- 8 - Parafusos M16 com 40 mm de comprimento;
- 9 - Olhal com furação de 16 mm;
- 10 - Cerra-cabos de 10 mm;
- 11 - Cabo de pré-esforço de 10 mm;
- 12 - Vidro laminado de 10+1,52+10 com vidro simples e SentryGlas.

Identificado como peça 2, encontram-se duas células de carga feitas para registo do pré-esforço nos cabos, o qual é aplicado apertando umas porcas no elemento n.º1.

Este sistema de pré-esforço foi engendrado de forma a cumprir alguns objetivos ((Jordão & Pinho, 2014)):

(i) A já referida de evitar que haja ligações que conduzam a furos na viga, na medida em que reduziriam a sua resistência e robustez;

- (ii) Evitar ligações coladas à lateral da viga, por implicar processos de colagem que são sensíveis, dispendiosos e com demorados períodos de cura e por não permitirem a reutilização do sistema;
- (iii) Conseguir um sistema onde se permita a liberdade de rotação dos cabos na ancoragem, deste modo podem acomodar-se às deformações sofridas ao longo do carregamento da estrutura. Isto é conseguido com a ligação rotulada do cabo (peça 9 na Figura 3.43) ao seu terminal rígido (peças 1 e 7). Este efeito é reforçado com a peça 3, cujo formato em semi calote lhe permite liberdade de rotação na concavidade esférica da chapa de ancoragem (elemento 4).
- (iv) Conseguir um sistema o mais fácil e rápido possível de montar e que fosse reaproveitável ao máximo entre ensaios. Neste sistema todas as peças são reaproveitadas, excepto a peça 5, que é colada ao vidro, e portanto perdida em cada ensaio. Dadas as suas reduzidas dimensões, pode já vir colada de fábrica, implicando pouco desperdício de material, sendo muito simples de ligar ao sistema de ancoragem.
- (v) Conseguir um sistema que permita a monitorização das forças instaladas nos cabos. O varão 1 é passante (não roscado) nos furos da chapa 4 e da calote 3 e está aparafusado à rótula na extremidade do cabo. Ao intercalar uma célula neste sistema (peça 2), fazendo reacção contra a chapa 4, pode medir-se a força no cabo. As células foram concebidas e dimensionadas especificamente para este sistema.
- (vi) Conseguir um sistema de desviadores que interfira o menos possível com o cabo (deformabilidade e perdas de pré-esforço) e transfira de forma adequada a força vertical à viga (Figura 3.44/Figura 3.42). O sistema tem um rolete duplo: o superior para contacto com a viga, transmitindo forças na direcção vertical apenas, e outro inferior, com dois sulcos, para conduzir os cabos e mantê-los em posição, mas sem lhes causar restrição à sua deformação longitudinal. Este sistema encontra-se ligado ao carro de carga através de varões roscados. Estes varões são passantes na peça, com porca solta, pois se fossem roscados ficariam em carga (compressão) devido às forças opostas exercidas pelo actuador (para baixo) e pelo cabo (para cima).

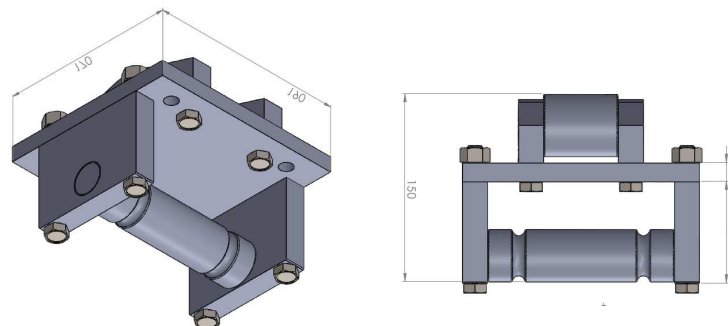


Figura 3.44 - Pormenor do desviador dos cabos

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS

4.1. Ensaio de Carregamento Monotónico sem cabo de Pré-esforço

Os ensaios de tamanho real, como já referido anteriormente, são também do tipo 4PB. Estes visam compreender o comportamento deste tipo de sistema estrutural em termo de resistência e deformabilidade. Pretende-se também que sejam fornecidos valores que permitam uma calibração rigorosa do modelo numérico, quer em termos de extensões quer deformações.

Por este ensaio ser o primeiro, terá também como importante objectivo o de verificar o seu funcionamento e procedimento de ensaio, para posteriormente se proceder às afinações necessárias. Pois este sistema é a base para as restantes variações de ensaios do estudo (sistema com cabo, sistema de carregamento cíclico e sistema com solicitação de temperatura) (Jordão & Pinho, 2014).



Figura 4.1 – Viga antes do ensaio.

4.1.1. Instrumentação

A viga foi instrumentada com extensómetros em ambas as faces e deflectómetros na face da frente para o deslocamento lateral e em baixo a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento.

Os deflectómetros aplicados nas posições indicadas com a referência “U2” (Figura 4.2) servem para medição das deformações verticais, enquanto os com a referência “U3” servem para medição das deformações horizontais, provenientes de instabilidades por flexão ou outras com origem no sistema. O deflectómetros usados em ‘U2’ são deflectómetros de 100mm de curso e nas posições ‘U3’ de 10mm de curso, todos os deflectómetros são da marca TML.

Os extensómetros, colocados de acordo com o indicado na Figura 4.3, são dispostos igualmente em ambas as faces e colocados na direcção horizontal, com excepção dos indicados em 1B e 3B, que são rosetas colocadas de modo a medir nas direcções horizontal, vertical e a 45°. Esses extensómetros servem para a caracterização do estado de tensões em pontos ao longo da viga, obtendo valores para a já referida calibração de modelos estruturais, posições de eixo neutro, detectar simetrias de carregamento e início de deformações fora do plano. Os extensómetros unidireccionais aplicados são do tipo FLA 6-11 e as rosetas FRA 5-11.

Vista frente

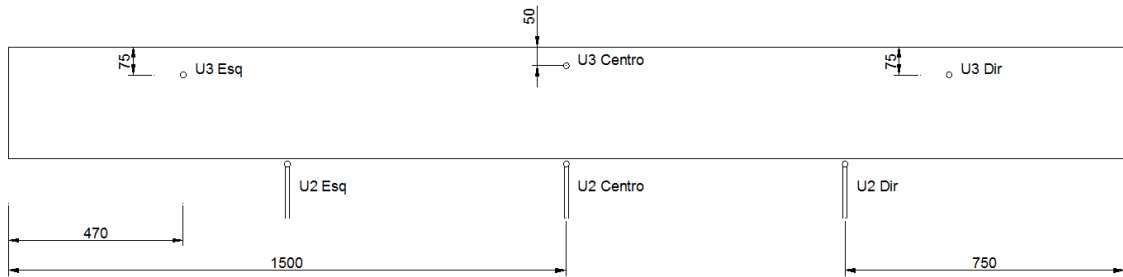
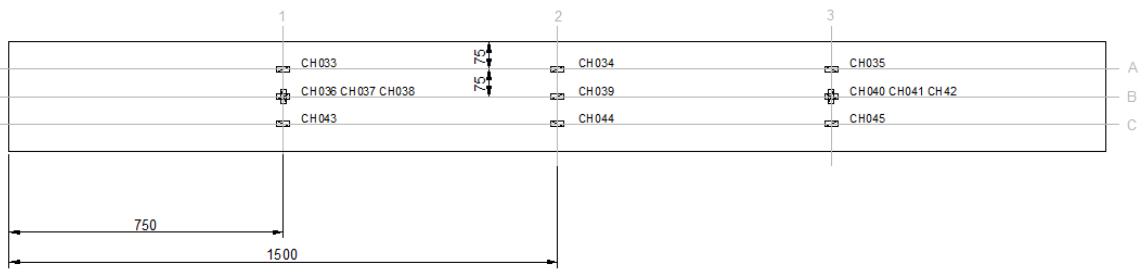


Figura 4.2 - Localização dos deflectómetros.

Vista trás



Vista frente

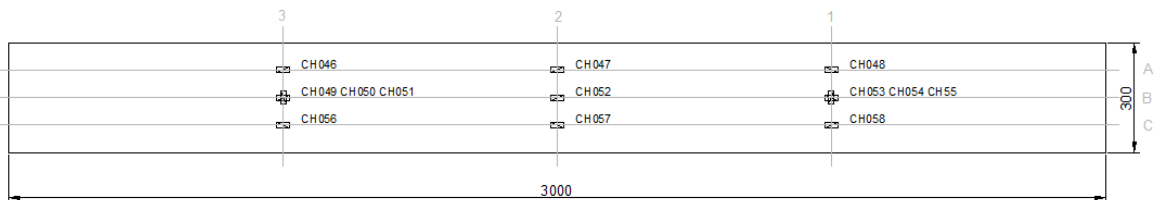


Figura 4.3 - Localização dos extensómetros.

Para uma fácil leitura e interpretação dos resultados dos extensómetros, os pontos são agrupados de forma a serem relacionados os pontos e os seus simétricos em relação ao eixo de simetria vertical e do seu simétrico na face oposta. Os pontos pertencentes a cada agrupamento encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.

Nome do Agrupamento	Pontos de leitura	Legenda nos gráficos	Parâmetro medido
P1	1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás	1AF 3AF 1AT 3AT	Extensão na horizontal
P2	1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás	1BHF 3BHF 1BHT 3BHT	Extensão na horizontal
P3	1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás	1CF 3CF 1CT 3CT	Extensão na horizontal
P4	2A-Frente 2A-Trás	2AF 2AT	Extensão na horizontal
P5	2B-Frente 2B-Trás	2BF 2BT	Extensão na horizontal
P6	2C-Frente 2C-Trás	2CF 2CT	Extensão na horizontal
P7	1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás	1BVF 3BVF 1BVT 3BVT	Extensão na vertical
P8	1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás	1BDF 3BDF 1BDT 3BDT	Extensão na diagonal
P9	U2 Esq U2 Dir	U2 Esq U2 Dir	Deformação vertical
P10	U2 Centro	U2 Centro	Deformação vertical

P11	U3 Esq U3 Dir U3 Centro	U3 Esq U3 Dir U3 Centro	Deformação horizontal
-----	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------

4.1.2. Ensaio e seus resultados

O ensaio é realizado em controlo de deslocamento e a uma velocidade de 0,05mm/s até ao esgotamento da capacidade de resistência à flexão da viga.

A viga ensaiada sofreu a rotura de tração por flexão, tendo a fractura ocorrido no centro da viga a uma carga de 14kN e apresentando uma flexa de 2,5mm. O valor de tensão máxima correspondeu a 24,5MPa. É um valor inferior ao valor nominal de 45MPa, pois tal deve-se à grande dispersão de resultados, por depender da distribuição das micro-fendas superficiais apresentadas neste tipo de material, e como as dimensões da viga é natural um aumento da probabilidade desses mesmos micro-defeitos.

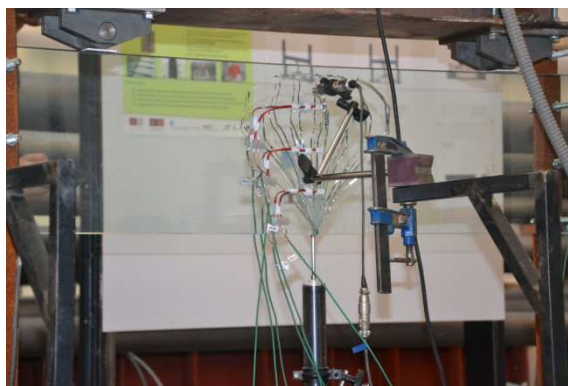


Figura 4.4 - Rotura da viga de vidro.

Verifica-se (Figura 4.5 e Figura 4.6) que a fractura da viga assume a tradicional forma de diamante, radiando de uma única posição na zona de momento flector máximo, claramente uma rotura em tração por flexão, como já referido anteriormente. A partir daqui, observa-se uma abrupta redução da sua resistência (troço AB), e a carga na zona da fractura passa a ser suportada num esquema estrutural distinto do que havia antes da fractura. Ainda assim é permitido o ganho de alguma resistência (troço BC), correspondente a: (i) na zona de tração, a força é resistida unicamente pela película de SGP; (ii) na zona de compressão existem ainda duas zonas distintas: a zona também fracturada, onde a força é resistida maioritariamente pelo arco estrutural criado pelas partículas fracturadas; e a zona não fracturada, funcionando como no esquema inicial. Quando a zona ainda intacta na parte superior atinge a rotura (Ponto C) a resistência vai diminuindo até que a película de laminação rasga (troço DE), fazendo

umentar significativamente o nível da tensão de compressão nessa zona o que leva ao esmagamento do vidro e ao completo esgotamento da capacidade resistente da viga (Ponto F) (Jordão & Pinho, 2014). Neste ponto, pertencente à carga última, observa-se que a deformação da viga é bastante significativa (Figura 4.7).

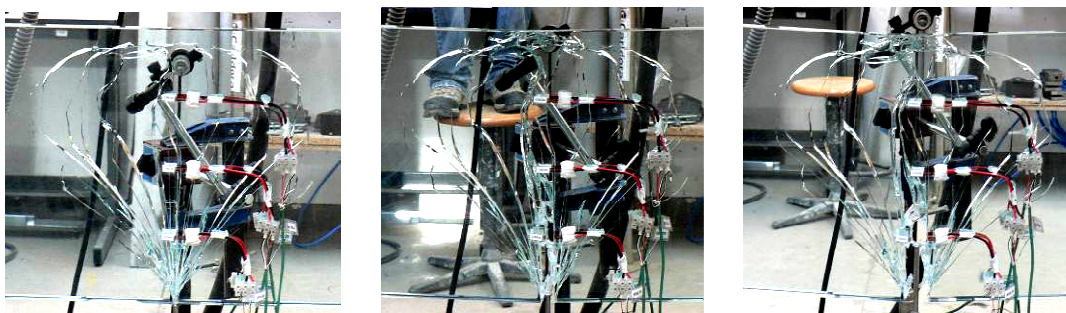


Figura 4.5 – Evolução do padrão da fractura (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

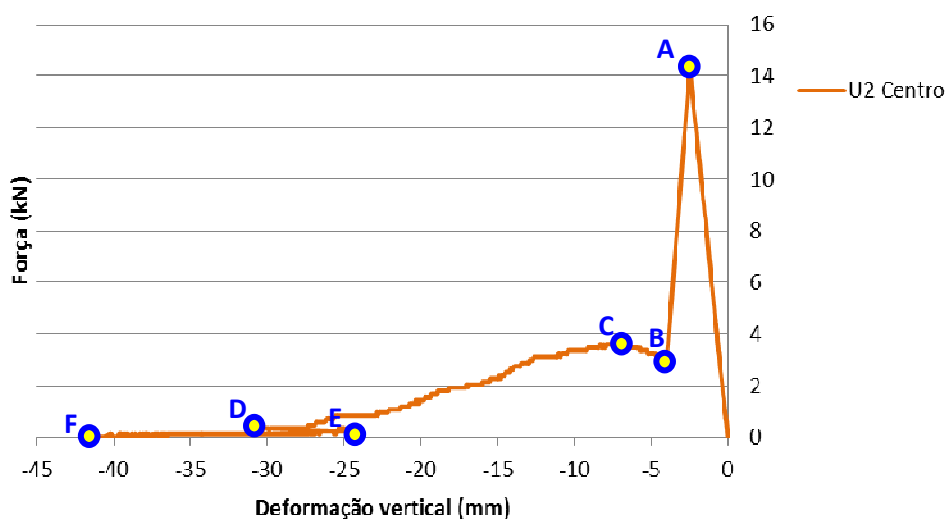


Figura 4.6 – Relação entre o deslocamento a meio-vão e a carga aplicada (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).



Figura 4.7 – Deformação final da viga a meio vão e nos apoios (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

Nos gráficos estão ilustrados os diagramas de Força-Extensão/Deformação dos diversos agrupamentos de pontos onde foram aplicados os extensómetros juntamente com o respectiva curva analítica calculada. O valor analítico das tensões é calculado com base na expressão (4.1)

$$\sigma_x = \frac{M y}{I}, \quad (4.1)$$

e para a diagonal das rosetas foi através da equação (4.2)

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta, \quad (4.2)$$

em que a orientação θ é de 45° .

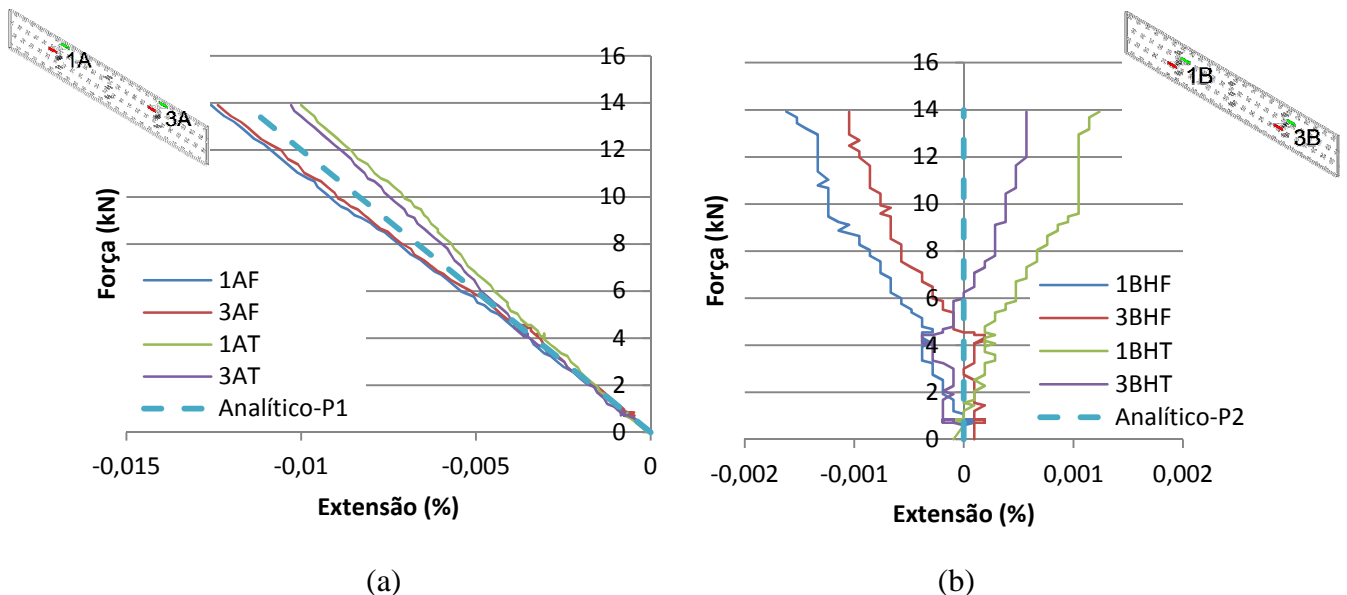


Figura 4.8 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P1, (b) Agrupamento P2.

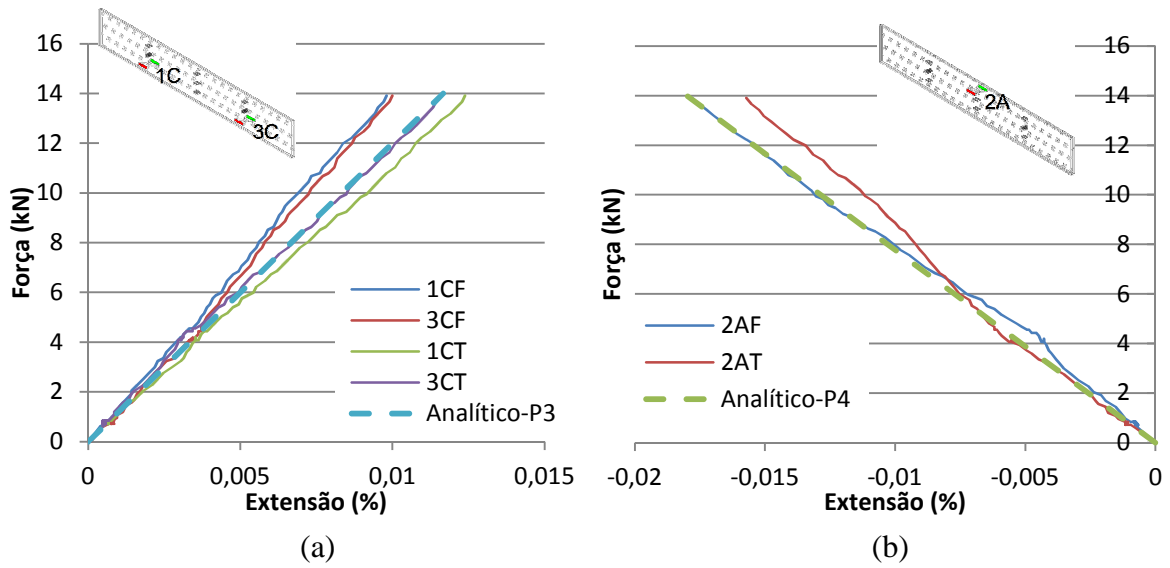


Figura 4.9 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P3, (b) Agrupamento P4.

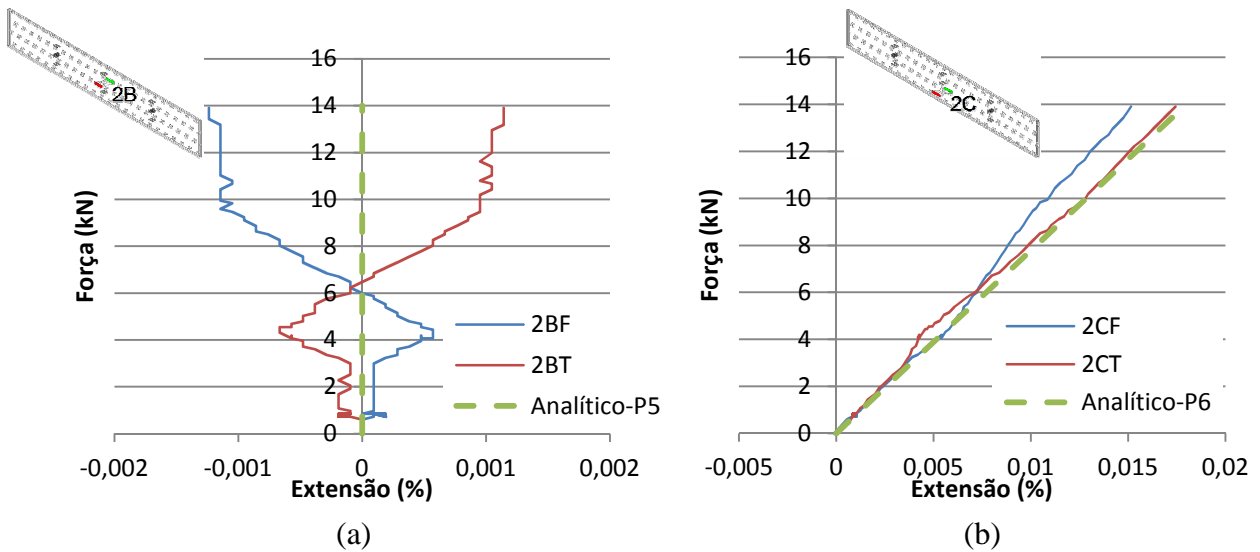


Figura 4.10 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P5, (b) Agrupamento P6.

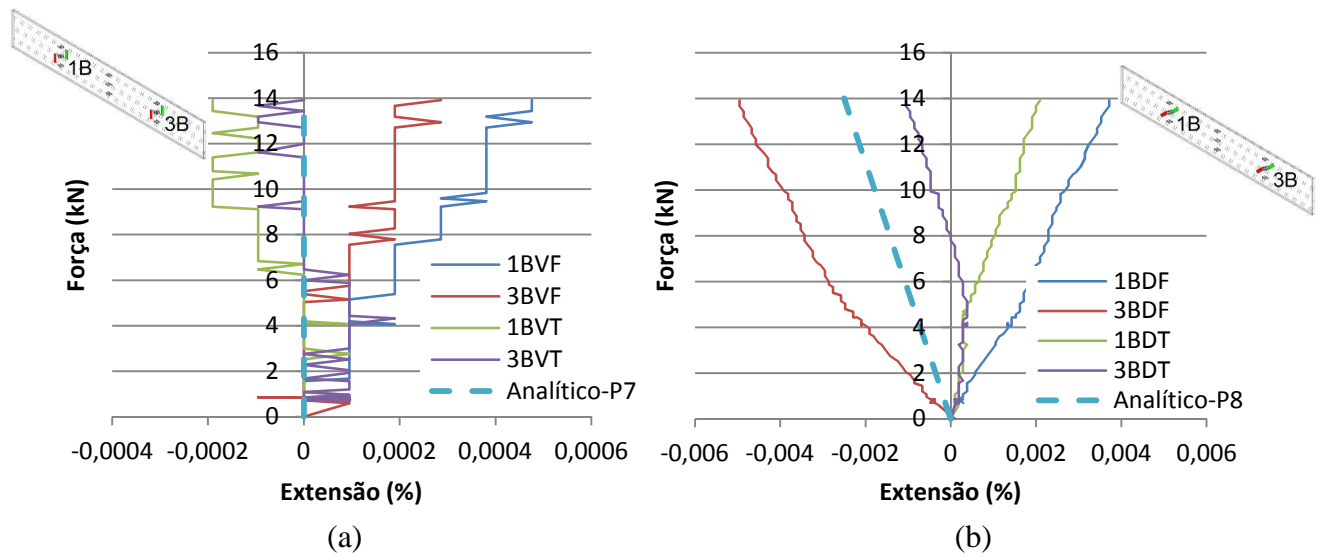


Figura 4.11 - Experimental vs. Analítico: (a) Agrupamento P7, (b) Agrupamento P8.

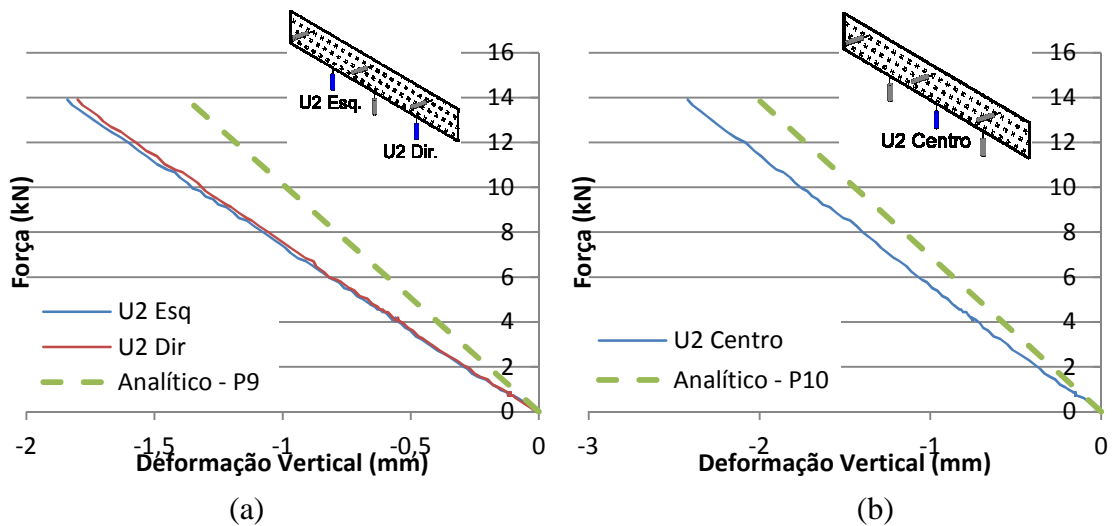


Figura 4.12 - Deformações: (a) Verticais – Agrupamento P9, (b) Horizontais – Agrupamento P10.

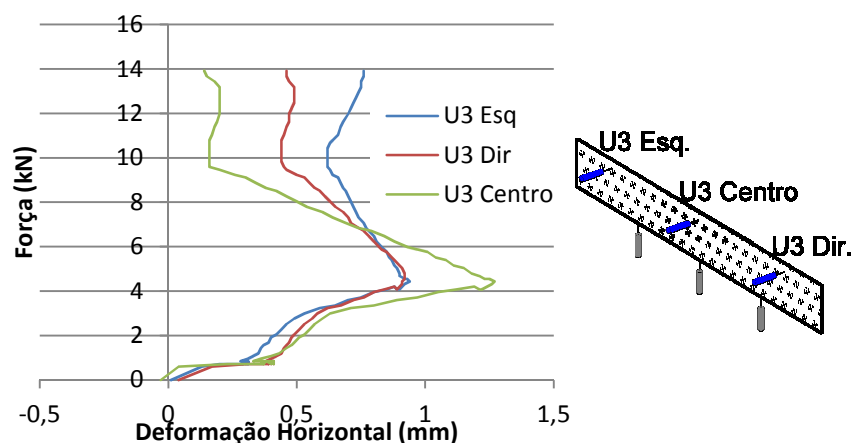


Figura 4.13 – Deformações Horizontais: Agrupamento P11.

Da análise dos resultados dos agrupamentos de extensómetros, verifica-se que em P1, P2, e P3, há uma semelhança entre os resultados das colunas 1 e 3, em ambas as faces da viga, comprovando assim uma simetria de esforços. Observa-se que a linha analítica passa entre resultados de faces opostas, os valores entre estes extensómetros opostos, embora não sendo coincidentes apresentam-se aproximadamente simétricos. No agrupamento P7 verifica-se que as tensões verticais não são nulas embora muito reduzidas.

As deformações verticais não nos mostram um bom ajuste com o esperado analiticamente, tal pode dever-se a vários ajustes e deformações ao longo do ensaio. Tratando-se de um deslocamento de corpo rígido, associado a ajuste das folgas dos apoios, o seu valor será constante ao longo da viga, e pode ser calculado pela diferença entre os valores experimentais e os valores analíticos, essa diferença sendo constante permite corrigir os valores experimentais (Figura 4.14).

Os resultados medidos pelos deflectómetros horizontais, revelam uma deformação fora do plano da viga, esse facto é bastante evidenciado no gráfico dos respectivos resultados. Tal facto fica a dever-se muito provavelmente à não total verticalidade da viga e a vários ajustes de folgas do sistema ao longo do ensaio.

Este ensaio permitiu ainda observar a necessidade de garantir o ajuste e a total verticalidade da viga no layout de ensaio, melhorando o alinhamento dos apoios e pontos de contacto com a viga, para evitar deslocamentos e flexões fora do plano da viga.

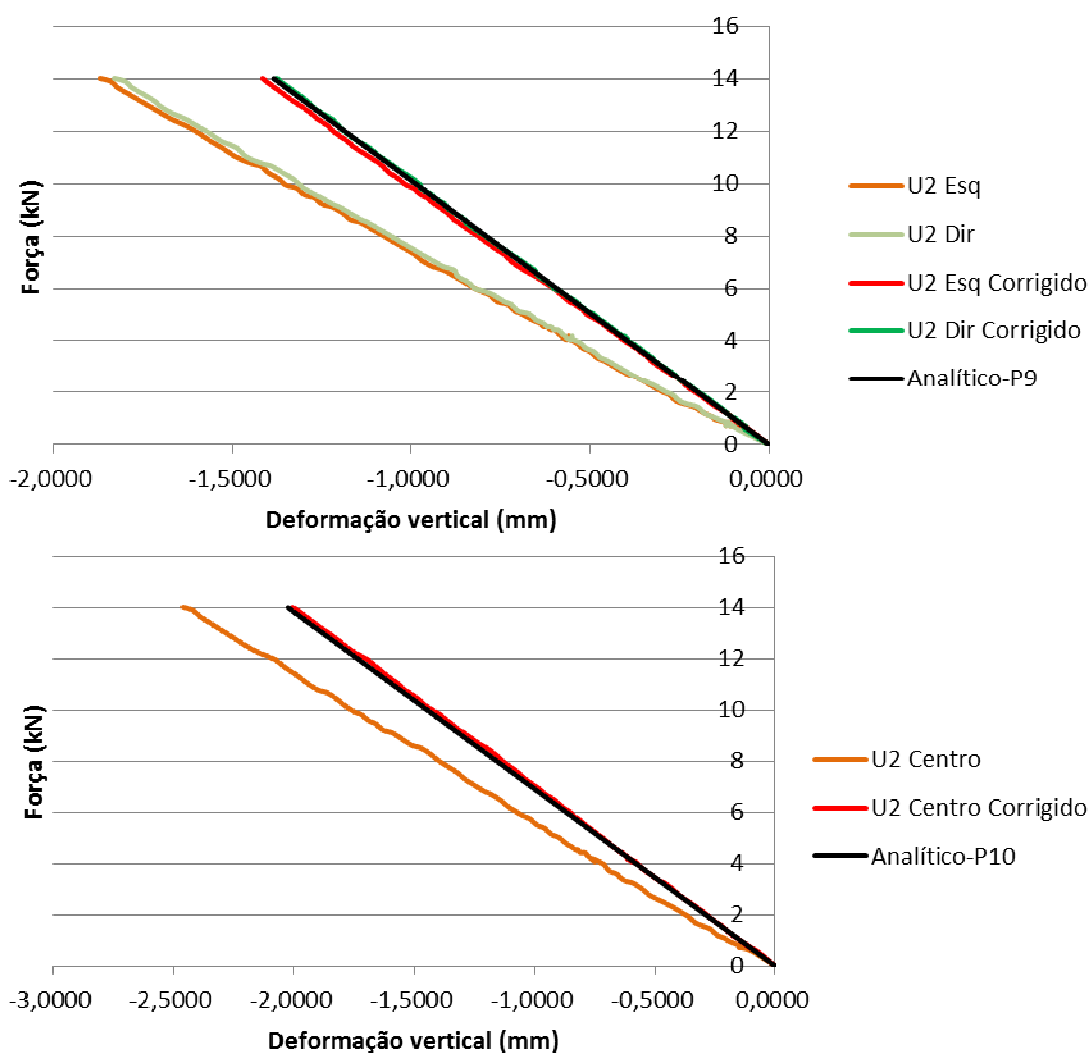


Figura 4.14 – Valores corrigidos das deformações verticais (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

4.2. Ensaio de Carregamento Monotónico com cabo de Pré-esforço

Este ensaio foi análogo ao ensaio monotónico simples, com excepção de possuir um sistema com dois cabos pré-esforçados de 10 mm de diâmetro de cada lado do provete de vidro. Os objectivos são idênticos ao ensaio anterior, mas devido à alteração introduzida pelo sistema de pré-esforço, há interesse em se perceber como esse facto interfere e que se pode aprender com este ensaio que venha a otimizar o layout e procedimentos de ensaio.

Neste ensaio é aplicado previamente o pré-esforço, o qual é feito através do aperto das porcas que se encontram no varão da ancoragem.

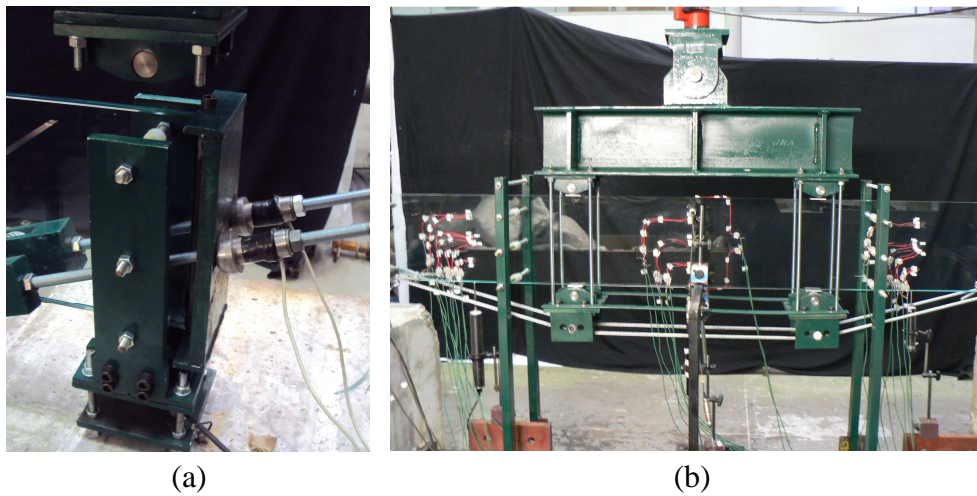


Figura 4.15 - (a) Pormenor da zona de ancoragem do pré-esforço e (b) viga antes do ensaio.

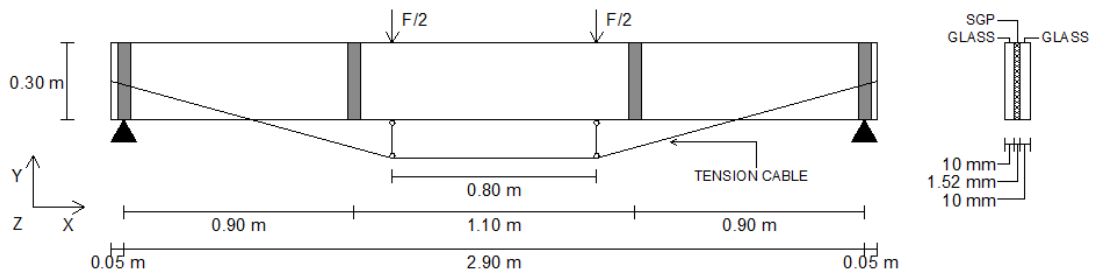


Figura 4.16 – Geometria da viga e traçado do cabo de pré-esforço (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

4.2.1. Instrumentação

A viga foi igualmente instrumentada com extensómetros em ambas as faces e nos mesmos pontos, mas neste ensaio foram acrescentados mais dois. Estes foram colados no vidro da frente mas uma nas fibras superiores e o outro na inferior, ambos na secção central. Quanto a deflectómetros a diferença para o ensaio anterior foi a colocação de mais três (TML de 10mm de curso) a medir na horizontal (Figura 4.17). Novamente os resultados obtidos são agrupados de forma a serem relacionados os pontos e os seus simétricos em relação ao eixo de simetria vertical e do seu simétrico na face oposta. Os pontos pertencentes a cada agrupamento encontram-se na Tabela 4.2.

Vista frente

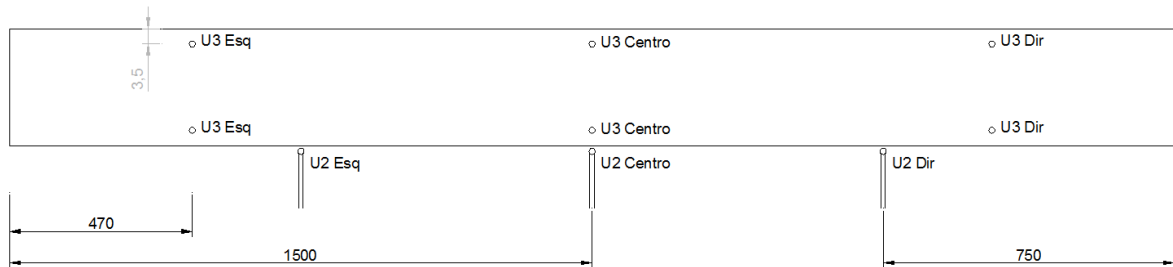
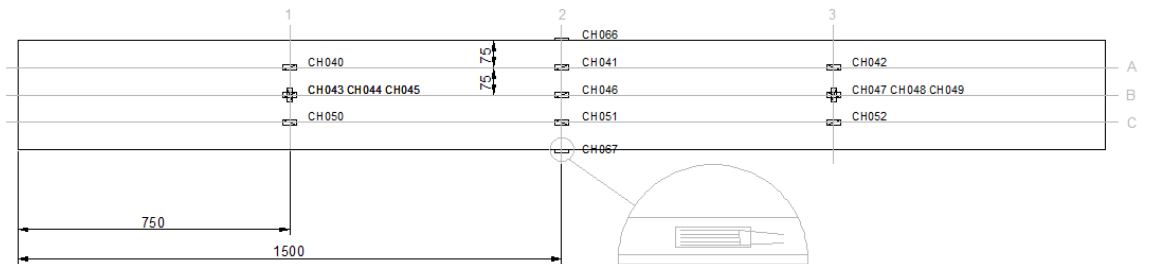


Figura 4.17 - Localização dos deflectómetros.

Vista frente



Vista trás

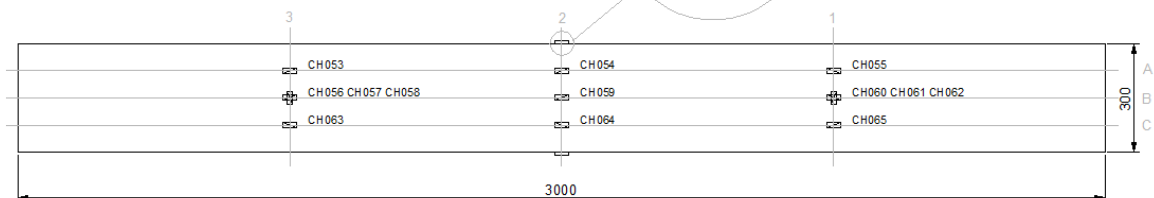


Figura 4.18 - Localização dos extensómetros.

Tabela 4.2 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.

Nome do Agrupamento	Pontos de leitura	Legenda nos gráficos	Parâmetro medido
P1	1A-Frente	1AF	Extensão na horizontal
	3A-Frente	3AF	
	1A-Trás	1AT	
	3A-Trás	3AT	
P2	1B-Horizontal-Frente	1BHF	Extensão na horizontal
	3B-Horizontal-Frente	3BHF	
	1B-Horizontal-Trás	1BHT	

	3B-Horizontal-Trás	3BHT	
P3	1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás	1CF 3CF 1CT 3CT	Extensão na horizontal
P4	2A-Frente 2A-Trás	2AF 2AT	Extensão na horizontal
P5	2B-Frente 2B-Trás	2BF 2BT	Extensão na horizontal
P6	2C-Frente 2C-Trás	2CF 2CT	Extensão na horizontal
P7	1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás	1BVF 3BVF 1BVT 3BVT	Extensão na vertical
P8	1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás	1BDF 3BDF 1BDT 3BDT	Extensão na diagonal
P9	Extensómetro face superior Extensómetro face inferior	2SUP 2INF	Extensão na horizontal
P10	U2 Esq U2 Dir U2 Centro	U2 Esq U2 Dir U2 Centro	Deformação vertical
P11	U3 Esq em Cima U3 Dir em Cima U3 Centro em Cima	U3C Esq U3C Dir U3C Centro	Deformação horizontal
P12	U3 Esq em Baixo U3 Dir em Baixo U3 Centro em Baixo	U3B Esq U3B Dir U3B Centro	Deformação horizontal

4.2.2. Ensaio e seus resultados

A primeira etapa deste ensaio correspondeu à aplicação do pré-esforço nos cabos, que corresponde à força necessária para ser atingida uma tensão de tracção (na fibra superior) de $2/3$ da tensão de tracção máxima do vidro. Como já foi dito, a tensão de rotura do vidro tem uma grande dispersão, assim optou-se por não assumir a tensão de rotura nominal (45 Mpa),

mas antes o valor registado na rotura do ensaio equivalente sem cabo (15,45 MPa). A aplicação do pré-esforço foi feita de modo a garantir que em ambos os cabos a força era o mais semelhantes possível ao longo de todo o aperto. O controlo foi feito com base na leitura do novo extensómetro colocado no topo da secção de $\frac{1}{2}$ vão (SUP).

A Figura 4.19 mostra a variação do pré-esforço em função da carga aplicada pelo actuador ao longo do ensaio. Observa-se uma perda do pré-esforço inicial após o aperto, e que se deve aos ajustes sofridos no sistema devido ao aperto dos cabos. Depois do actuador iniciar o carregamento, a variação do pré-esforço é linear com o aumento da força no actuador, traduzindo assim que a deformação do sistema altera a força nos cabos.

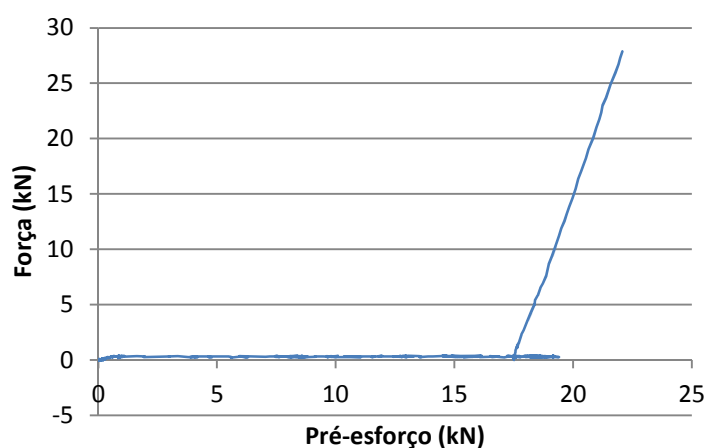


Figura 4.19 – Variação do pré-esforço com a carga aplicada no ensaio.

Na Figura 4.20 está representada a curva do comportamento global do ensaio e seus pontos indicadores dos danos estruturais surgidos ao longo do ensaio. Esses danos correspondem às fracturas e sua propagação, que causam respectivamente perdas súbitas e graduais na rigidez. A Figura 4.21 vem completar, indicando a posição dos referidos danos na viga ensaiada. A primeira rotura corresponde a uma fractura na zona de momento flector máximo, para uma carga de cerca de 20 kN (C), esta é linear e única, e só radia na forma de diamante mais tarde, para uma carga aproximada de 26 kN (D). Esta situação vem do facto de que para a carga correspondente ao nível (C), na zona da rotura, se verifica tracção na face da frente e compressão na face de trás. Assim a fenda iniciou-se no lado traccionado mas não radiou por estar limitada pela zona comprimida na face oposta e na parte superior da secção. A explicação para que haja extensões de sinais opostos em posições homólogas nas faces anterior e posterior deve-se certamente a deformações fora do plano da viga. Quando a força de carregamento aumenta, e apesar da força de pré-esforço também aumentar, a zona de extensões positivas chega a cotas mais elevadas ao longo da altura da viga. Este facto propicia

a radiação da linha de rotura única, o que se verifica a dois tempos imediatamente adjacentes, correspondentes aos níveis D e E. Dado que a zona da rotura se encontra no tramo central da viga e que a rotura é radiada em diamante tem-se uma perda significativa de rigidez. A irregularidade verificada no gráfico entre o nível E' e o nível F corresponde ao aumento da zona de fractura em diamante formado atrás. No nível F verifica-se a formação de uma fenda única sobre o apoio à esquerda. O seu efeito sobre a rigidez da estrutura é visível ainda que reduzido dada a sua localização. No nível G dá-se uma rotura sobre o apoio da direita, desta feita em diamante. Imediatamente a seguir verifica-se uma fenda a 1/2 distância entre o rolete da esquerda e o meio vão (H). Para o mesmo nível de carga dá-se um aumento da deformação da viga fora do plano o que conduz a esmagamentos localizados do vidro contra os roletes centrais de apoio aos cabos. Esta deformação fora do plano pode dever-se à diferença entre a força de pré-esforço entre os cabos (Figura 4.23). Com esta situação ocorreu uma rotura explosiva nas secções dos apoios com aumento das ramificações em diamante já ai existente, e projecção do vidro junto aos roletes (Figura 4.22). (Jordão & Pinho, 2014).

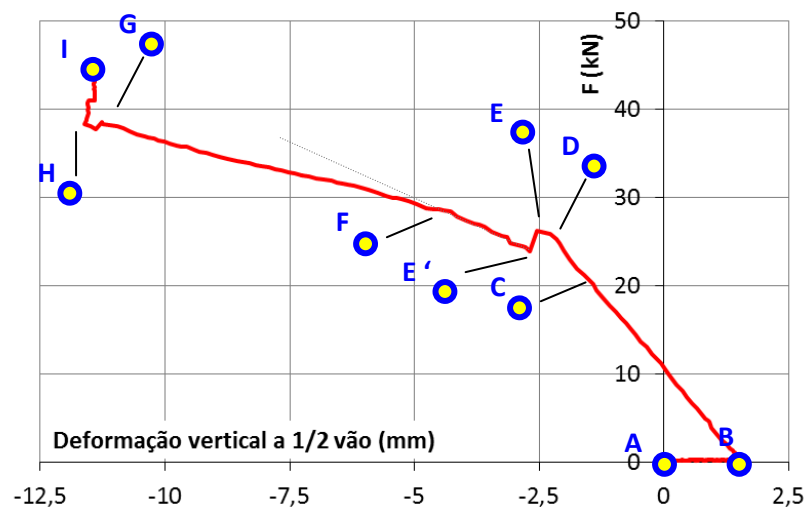


Figura 4.20 – Curva de comportamento global e respectivos pontos notáveis (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

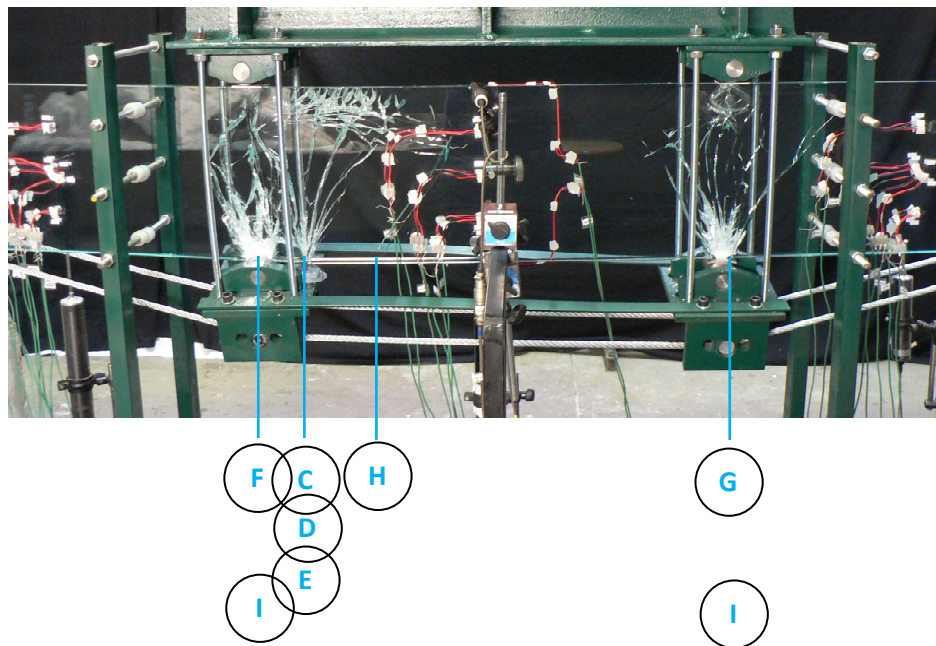


Figura 4.21 – Localização dos danos estruturais sofridos ao longo do ensaio (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

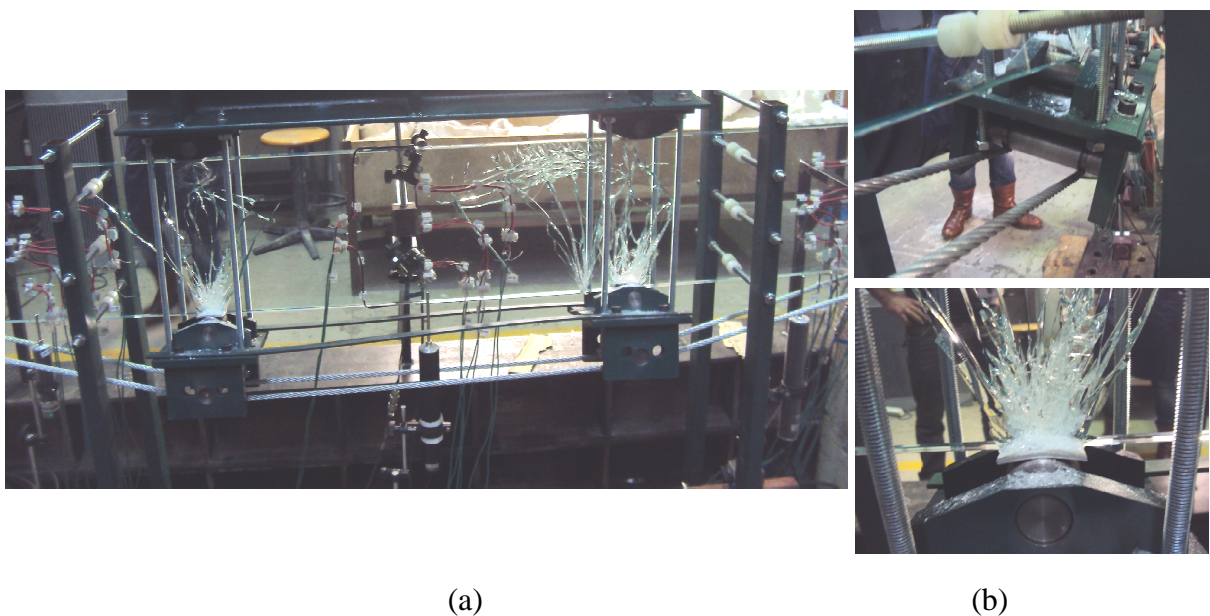


Figura 4.22 – Rotura nos apoios e deformação fora do plano. (a) Vista geral; (b) Pormenores da rotação (em cima) e esmagamento do vidro contra o rolete (em baixo).

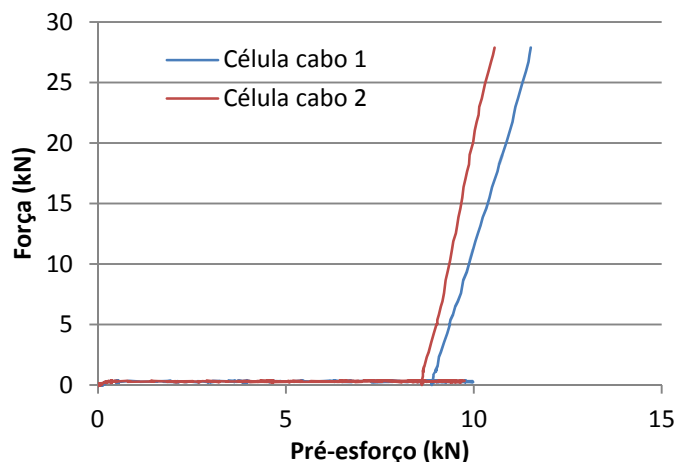


Figura 4.23 – Diferença entre valores de pré-esforço dos cabos durante o carregamento.

A Figura 4.24 mostra como a força se distribui de forma aproximadamente simétrica entre os dois apoios até à ocorrência da primeira rotura, embora sendo ligeiramente superior no apoio do lado direito. A diferença vai-se acentuando com o decorrer do ensaio, esta assimetria é devido à forma como o pré-esforço está aplicado à estrutura e se vai alterando ao longo do tempo de ensaio.

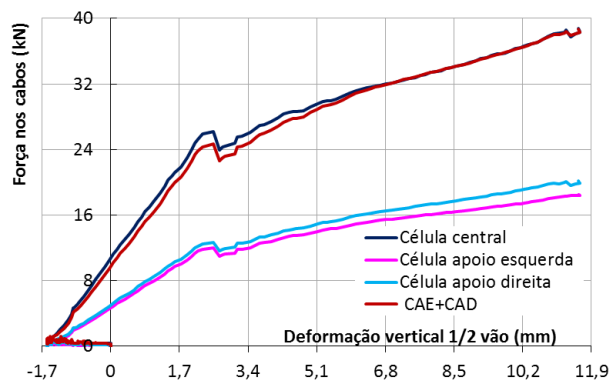


Figura 4.24 – Avaliação da simetria da carga durante o ensaio (retirado de (Jordão & Pinho, 2014)).

Nos gráficos estão ilustrados lado a lado os diagramas de Força-Extensão/Deformação e Pré-esforço-Extensão/Deformação do mesmo grupo dos diversos agrupamentos de pontos onde foram aplicados os extensómetros e deflectómetros.

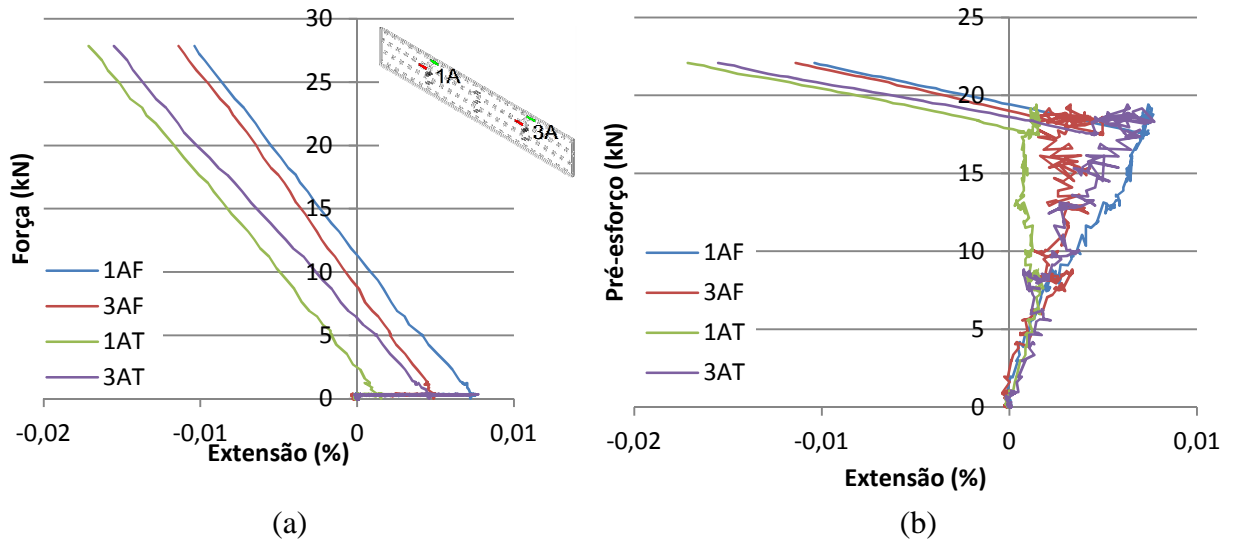


Figura 4.25 - Resultado Experimental do Agrupamento P1.

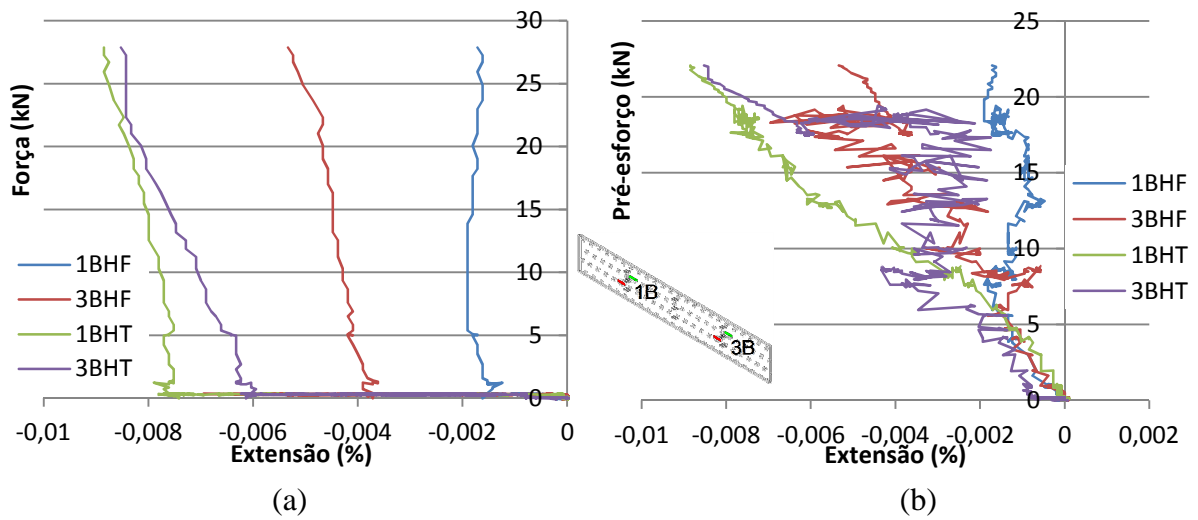


Figura 4.26 - Resultado Experimental do Agrupamento P2.

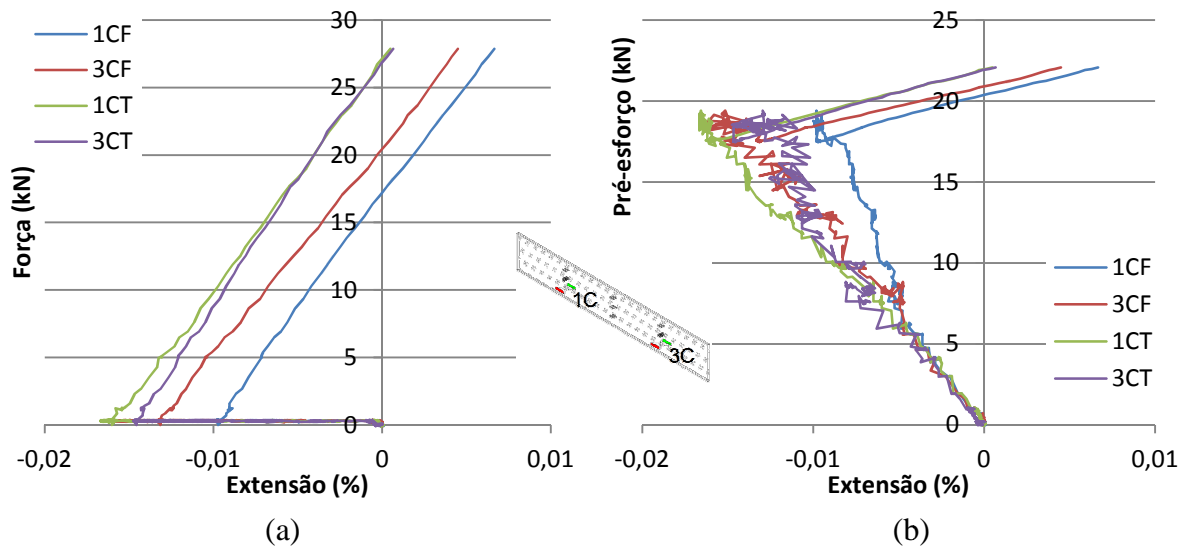


Figura 4.27 - Resultado Experimental do Agrupamento P3.

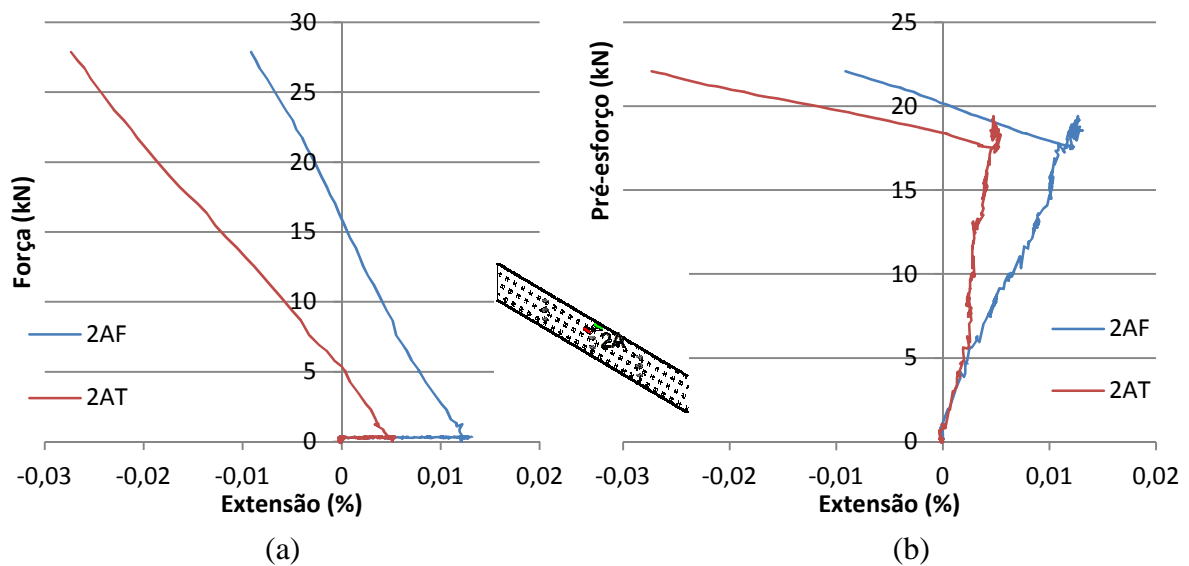


Figura 4.28 - Resultado Experimental do Agrupamento P4.

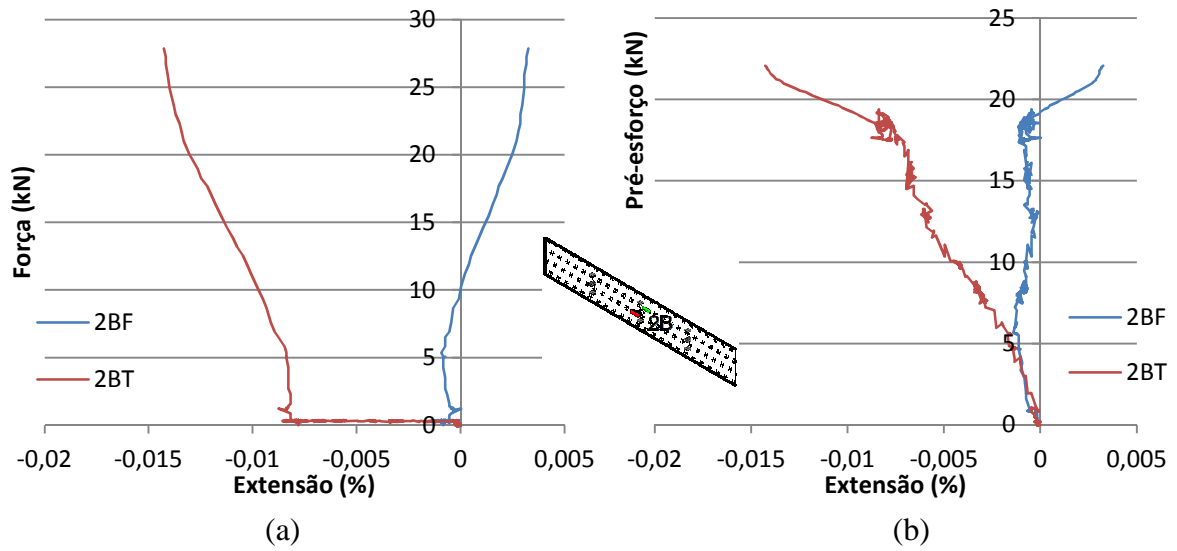


Figura 4.29 - Resultado Experimental do Agrupamento P5.

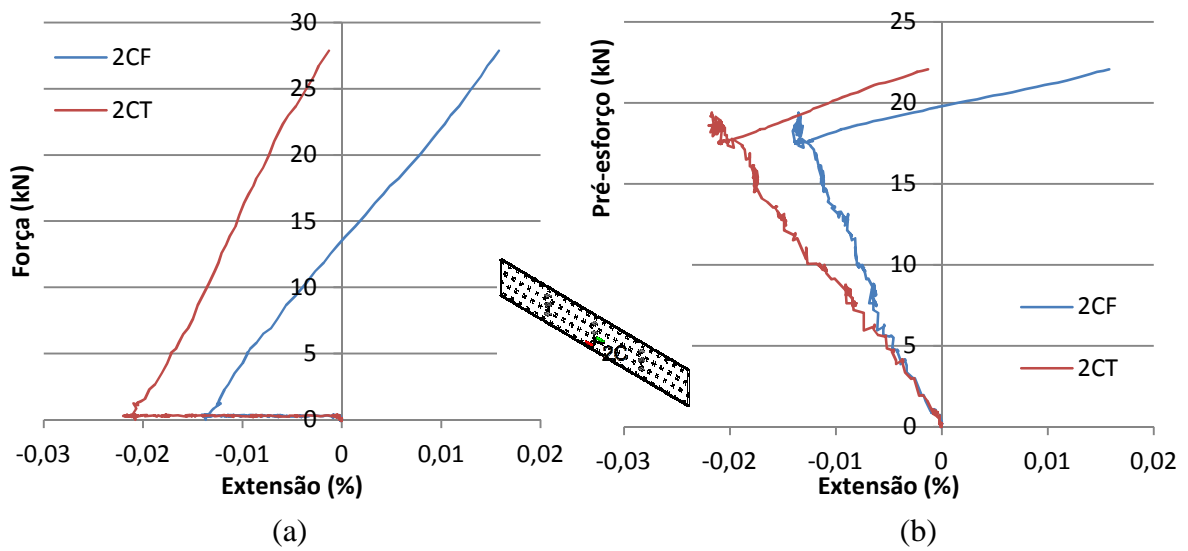


Figura 4.30 - Resultado Experimental do Agrupamento P6.

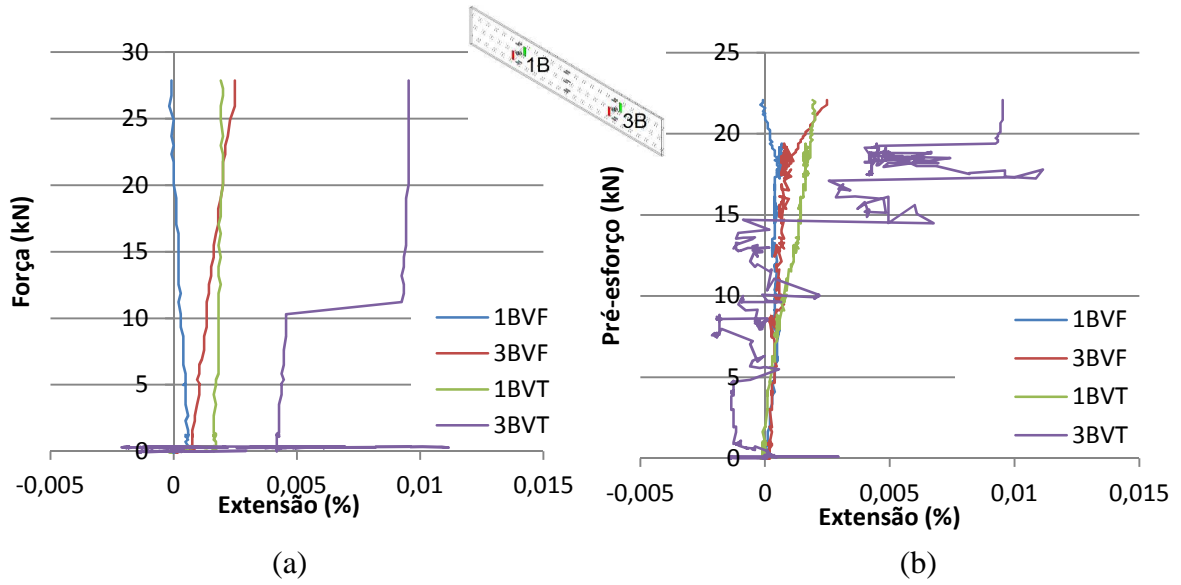


Figura 4.31 - Resultado Experimental do Agrupamento P7.

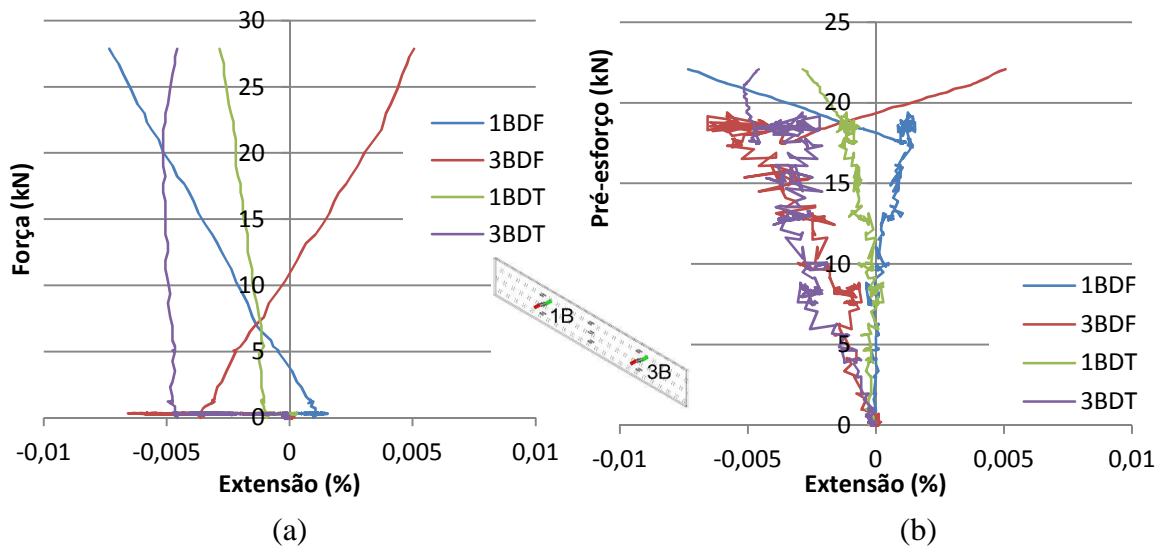


Figura 4.32 - Resultado Experimental do Agrupamento P8.

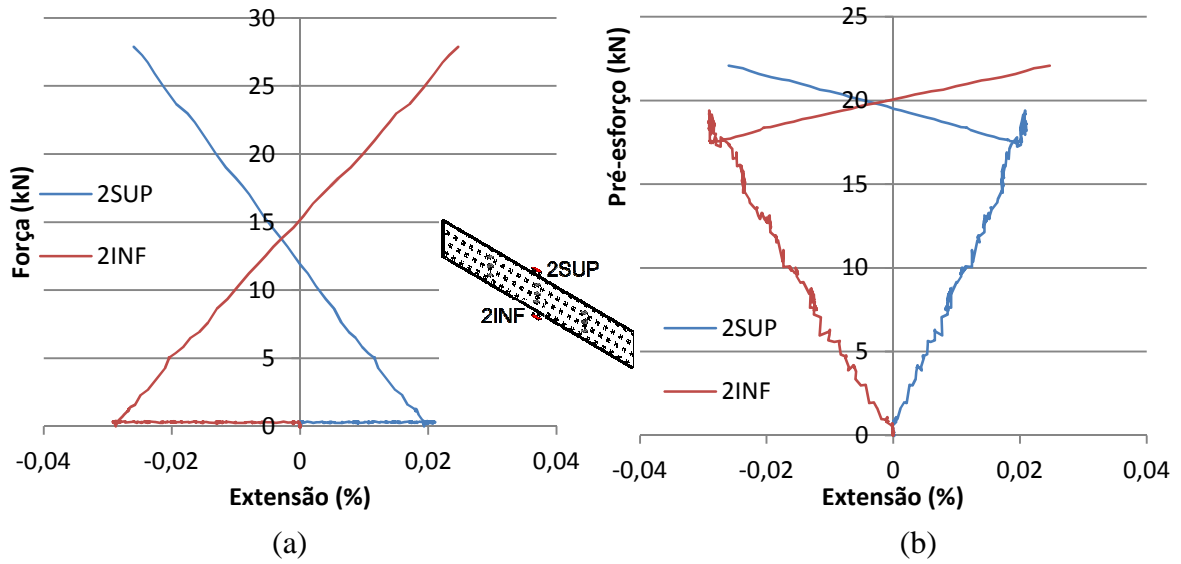


Figura 4.33 - Resultado Experimental do Agrupamento P9.

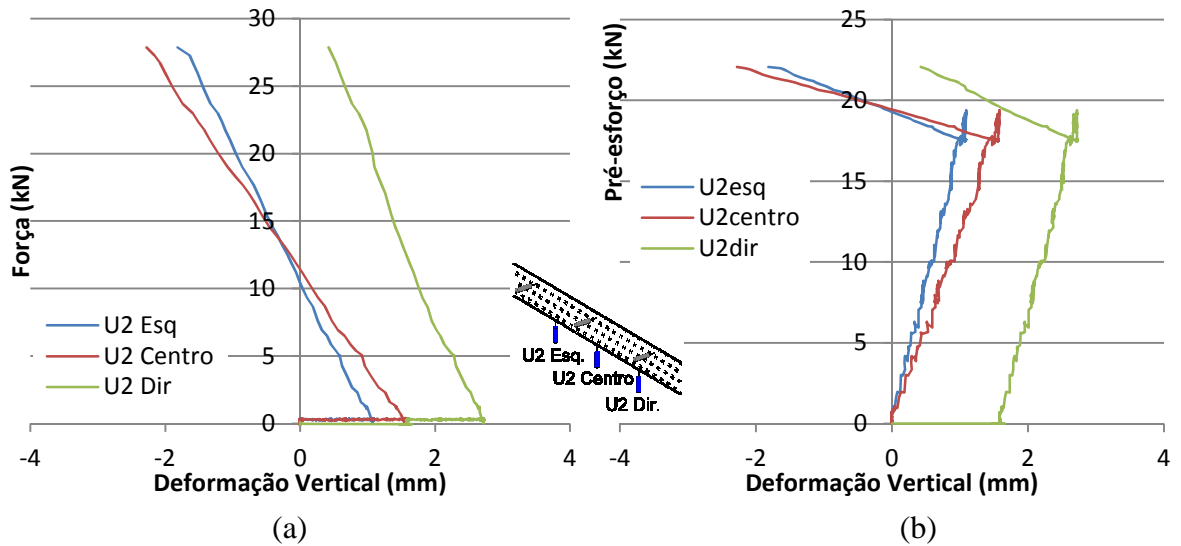


Figura 4.34 - Resultado Experimental do Agrupamento P10.

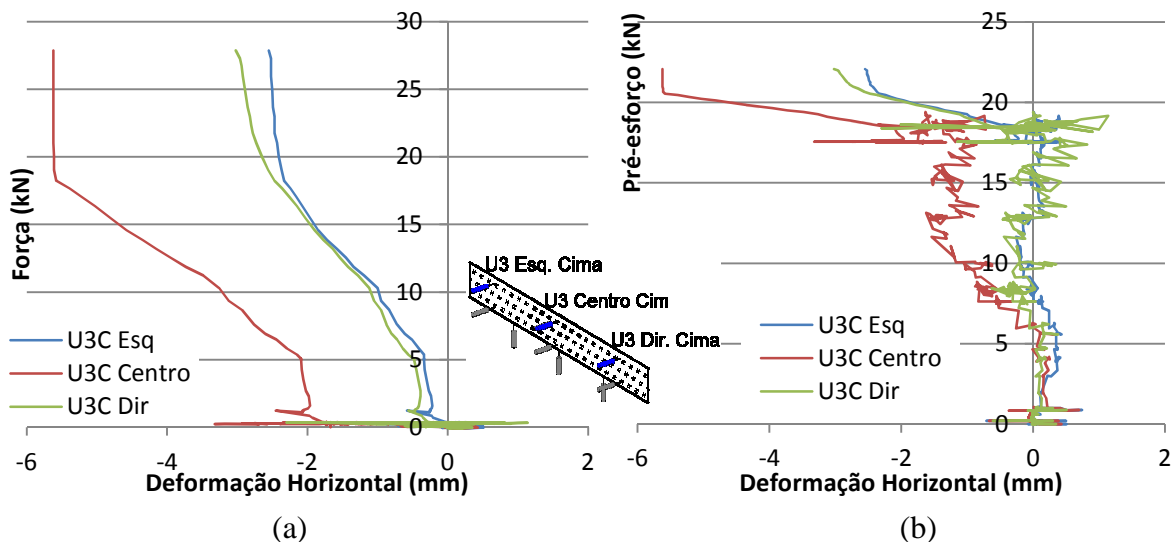


Figura 4.35 - Resultado Experimental do Agrupamento P11.

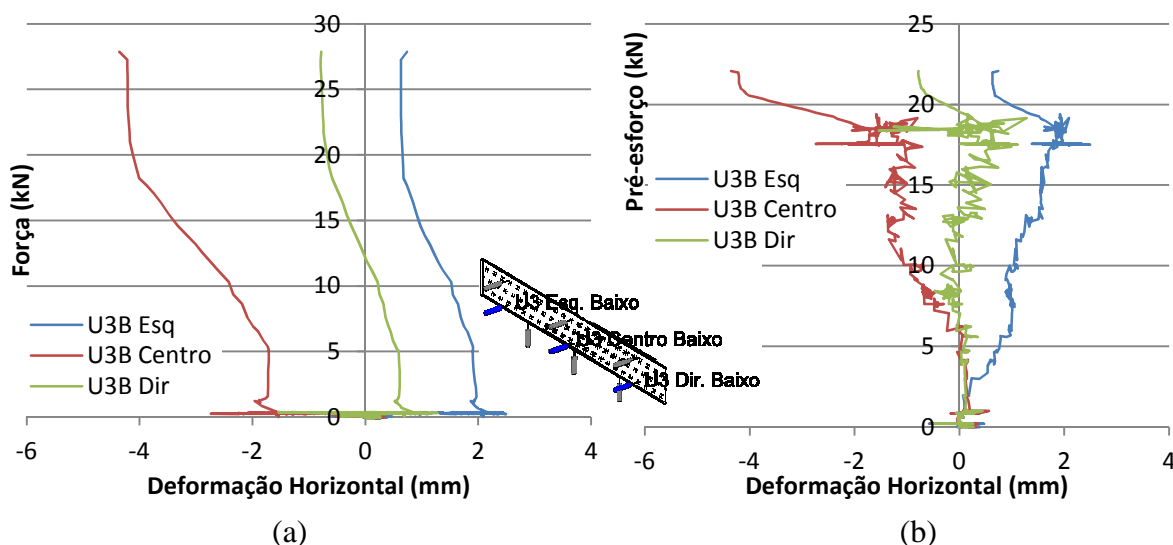


Figura 4.36 - Resultado Experimental do Agrupamento P12.

Durante a etapa de aplicação de pré-esforço verifica-se que não há simetria perfeita entre os esforços à esquerda e à direita da viga, para posições homólogas. Este facto deve-se as perdas de pré-esforço que se verificam ao longo do cabo, mais especificamente no contacto com os desviadores que não é tão mínimo como o desejável, podendo-se verificar esta situação ao observar que os extensómetros da linha 1 estão mais comprimidos dos que os da linha 3, o que configura esforço axial variável ao longo da viga. Além disso, as barras metálicas que unem os desviadores, e os varões que ligam os desviadores ao carro de carga, sofrem uma

deformação significativa após o aperto dos cabos, demonstrando que ao contrário do que era previsto, os desviadores estão sujeitos a forças horizontais.

Verifica-se ainda que não existe uma simetria perfeita entre os esforços na face anterior e posterior da viga, para posições homólogas. A referida diferença torna-se notória durante a fase de aplicação de pré-esforço, para um valor de carga aproximadamente de 5 kN. A partir deste ponto os gráficos dos extensómetros de uma face e dos seus homólogos, deixam de estar sobrepostos. Este cenário representa deformação de flexão fora do plano da viga. Esta situação é mais notória na secção 1 do que na 3 e mais ao nível A do que ao nível C. Este fenómeno poderá ser provocado pelas diferenças entre as forças dos cabos de pré-esforço, ou por imperfeições no alinhamento nos pontos de contacto da viga (Figura 4.37), ou ainda pela viga não se encontrar perfeitamente vertical no início do ensaio, ou ainda pela combinação de todas juntas.

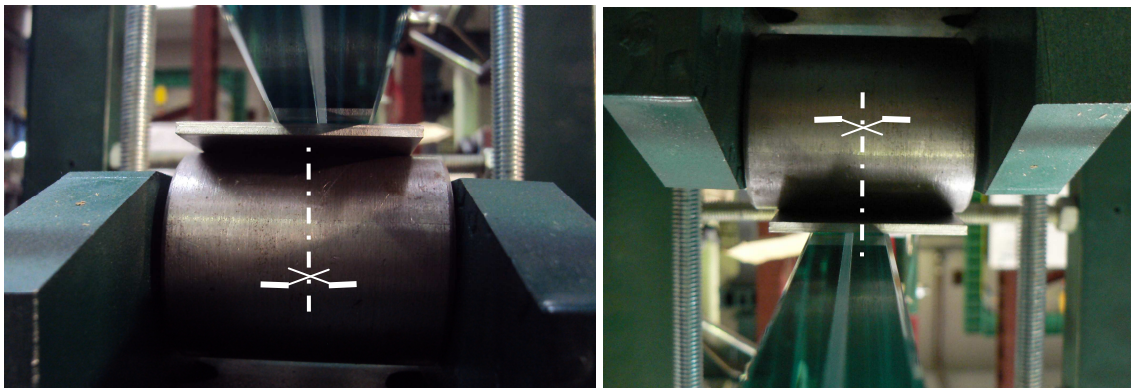


Figura 4.37 - Desalinhamento da viga em relação ao carro de carga

4.3. Ensaio de Carregamento Cíclico

Este ensaio consiste no mesmo sistema de aplicação de carga dos ensaios anteriores, com a diferença do carregamento ser cíclico, havendo lugar à inversão do sentido da carga. Os objectivos também são idênticos aos ensaios anteriores, com foco no sistema de apoios que elevam a viga na carga ascensional, havendo o interesse de perceber o que se pode aprender e quiçá vir a melhorar.

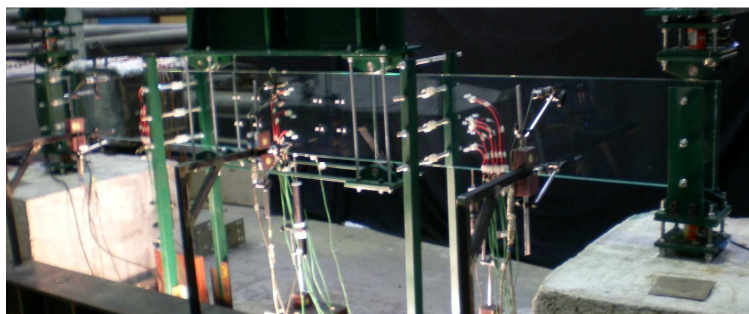


Figura 4.38 – Viga antes do ensaio.

4.3.1. Instrumentação

A instrumentação é feita igualmente ao ensaio anterior com algumas alterações. Os deflectómetros são aplicados nos mesmos sítios sem sofrerem qualquer alteração (Figura 4.39). A diferença prende-se nos extensómetros na face anterior, nos pontos 1B e 3B (Figura 4.40), que em 1B em vez de estar a habitual roseta, esta viga possui um extensómetro normal a medir na horizontal e em 3B a roseta foi colocada rodada a 45° fazendo uma medição na horizontal e duas a 45°. Este ensaio difere ainda do ensaio com cabo por não conter as células de carga nos cabos, devido a este ensaio não possuir cabos, mas inclui duas células de carga na parte superior dos apoios de modo a medir a transferência de carga quando o sentido da carga inverte (sentido ascendente). Os pontos pertencentes a cada agrupamento encontram-se na Tabela 4.3.

Vista frente

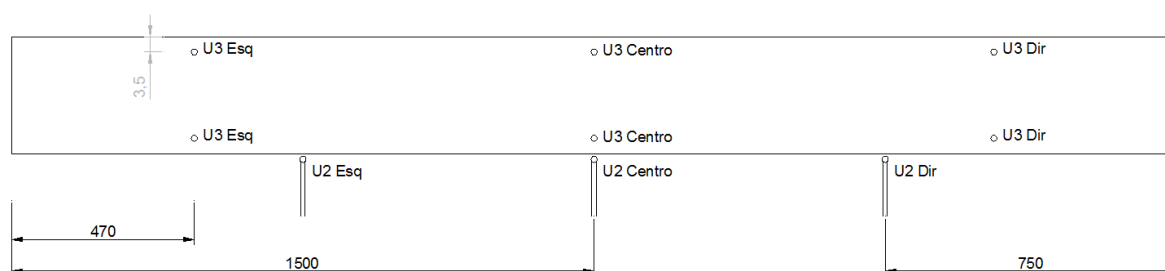
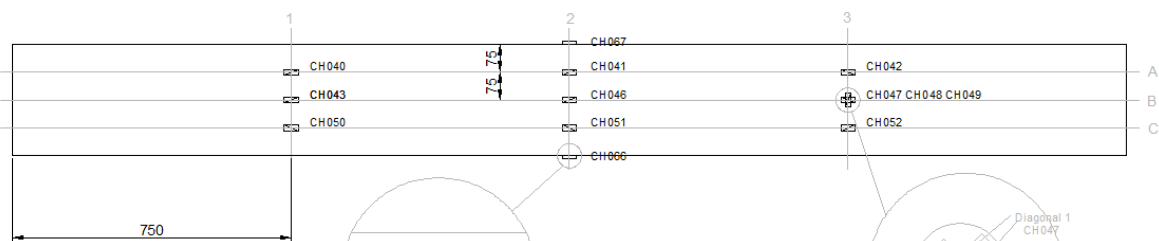


Figura 4.39 - Localização dos deflectómetros.

Vista frente



Vista trás

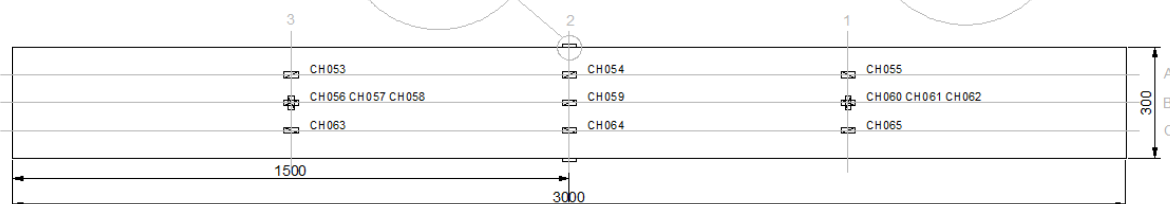


Figura 4.40 - Localização dos extensômetros.

Tabela 4.3 - Pontos pertencentes a cada agrupamento e parâmetros medidos.

Nome do Agrupamento	Pontos de leitura	Legenda nos gráficos	Parâmetro medido
P1	1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás	1AF 3AF 1AT 3AT	Extensão na horizontal
P2	1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás	1BHF 3BHF 1BHT 3BHT	Extensão na horizontal
P3	1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás	1CF 3CF 1CT 3CT	Extensão na horizontal
P4	2A-Frente 2A-Trás	2AF 2AT	Extensão na horizontal
P5	2B-Frente 2B-Trás	2BF 2BT	Extensão na horizontal
P6	2C-Frente 2C-Trás	2CF 2CT	Extensão na horizontal

P7	1B-Vertical-Trás 3B-Vertical-Trás	1BVT 3BVT	Extensão na vertical
P8	3B-Diagonal1-Frente 3B-Diagonal2-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás	3BD1F 3BD2F 1BDT 3BDT	Extensão na diagonal
P9	Extensómetro face superior Extensómetro face inferior	2SUP 2INF	Extensão na horizontal
P10	U2 Esq U2 Dir U2 Centro	U2 Esq U2 Dir U2 Centro	Deformação vertical
P11	U3 Esq em Cima U3 Dir em Cima U3 Centro em Cima	U3C Esq U3C Dir U3C Centro	Deformação horizontal
P12	U3 Esq em Baixo U3 Dir em Baixo U3 Centro em Baixo	U3B Esq U3B Dir U3B Centro	Deformação horizontal

4.3.2. Ensaio e seus resultados

O procedimento do presente ensaio, para além das já referidas alterações a nível de layout e mecanismos de ensaio, prendeu-se também com a escolha de uma estratégia de carga cíclica. Devido à pouca e quase inexistente matéria na área do vidro, esta carga foi definida tendo o deslocamento do ensaio monotónico, 2,5mm, como base para estabelecer as amplitudes, começando com uma amplitude correspondente a $\frac{1}{4}$ e indo até duas vezes o valor desse deslocamento. Na Tabela 4.4 encontra-se a estratégia de carga usada, como as amplitudes e número de ciclos usado em cada uma delas assim como os tempos para cada ciclo de cada amplitude.

Tabela 4.4 - Estratégia de carga para carregamento cíclico.

N.º de ciclos	Amplitude (mm)	T (s)
3	$\pm 0,625$	125
3	$\pm 1,250$	250
3	$\pm 1,875$	375
3	$\pm 2,187$	437,4
3	$\pm 2,500$	500
3	$\pm 2,8125$	562,5

3	$\pm 3,125$	625
3	$\pm 3,4378$	687,56
3	$\pm 3,750$	750
5	$\pm 5,000$	750

Na Figura 4.41 é possível observar também a estratégia de carga do ensaio, e juntamente encontra-se marcado os momentos em que houve fracturas na viga ensaiada. A primeira ocorre no último ciclo de amplitude 3,125mm (A), inicialmente vindo do rolete esquerdo de baixo, da viga de carregamento, até meio da viga sensivelmente (Figura 4.42-(a)), e no último ciclo da amplitude seguinte, de 3,4378mm (B) esta prolonga-se até ao cimo da viga (Figura 4.42-(b)). A última e grande rotura deu-se assim que atingiu o primeiro máximo do primeiro ciclo da amplitude de 3,75mm (C) (Figura 4.42-(c)).

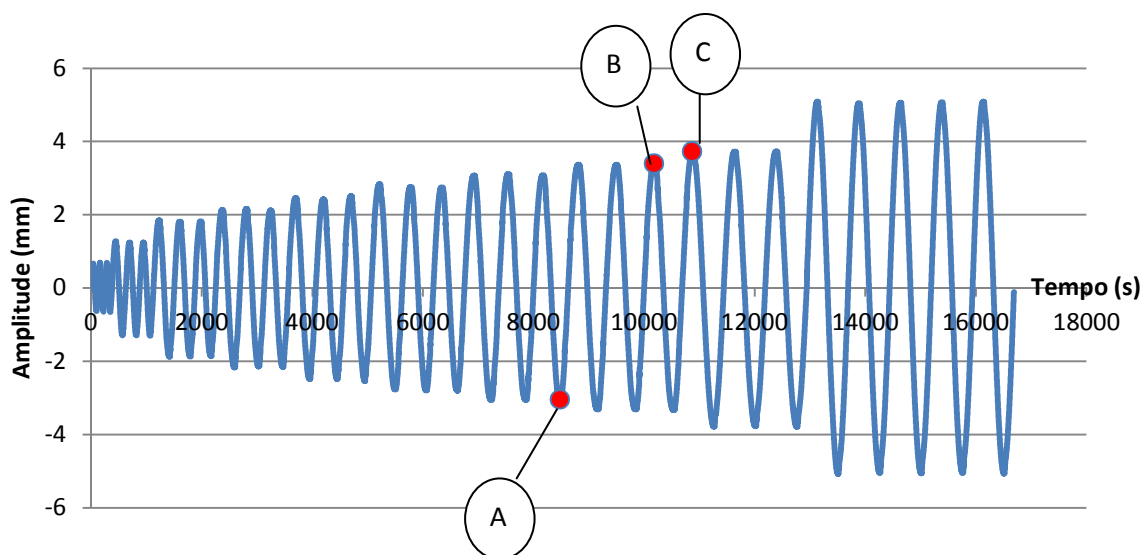


Figura 4.41 - Estratégia de carga cíclica.

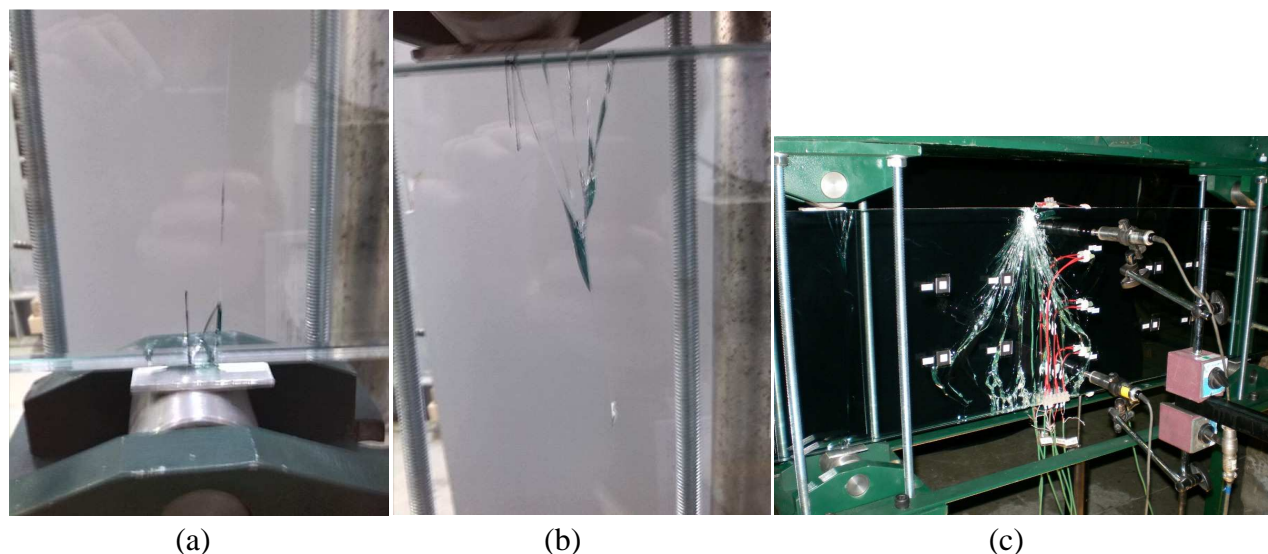


Figura 4.42 - Fracturas da viga ao longo do tempo de carregamento: (a) primeira, ocorrida sobre rolete (b) segunda, que é a continuação da anterior até ao cimo da viga e (c) última fractura ocorrida a meio da viga.

Quanto à primeira fractura que se deu em (a), após observar o ponto de contacto entre o apoio e a viga observou-se que a fenda se originou devido ao deslocamento, ou até mesmo uma má colocação, do alumínio que faz o contacto entre a viga e o rolete (Figura 4.43). Assim, devido a esse facto, a viga tendo ficado mal apoiada poderá ter originado a fratura observada.



Figura 4.43 - Pormenor do apoio da primeira fractura.

Na Figura 4.44 está representada a curva do comportamento global do ensaio. Correlacionando a força da carga aplicada pelo actuador com o seu deslocamento. Observa-se ainda uma assimetria em relação às cargas máximas atingidas, de carregamento e descarregamento.

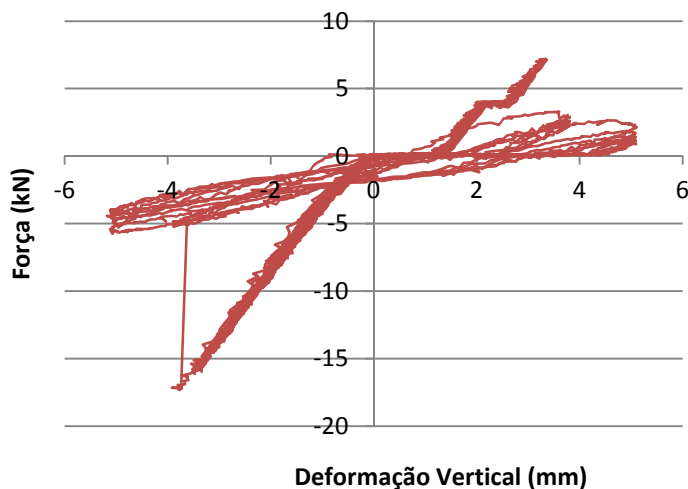


Figura 4.44 – Curva do comportamento global.

Graficamente são representados os resultados obtidos para os diagramas de Força-Extensão/Deformação dos diversos agrupamentos de pontos onde foram aplicados os extensómetros e deflectómetros.

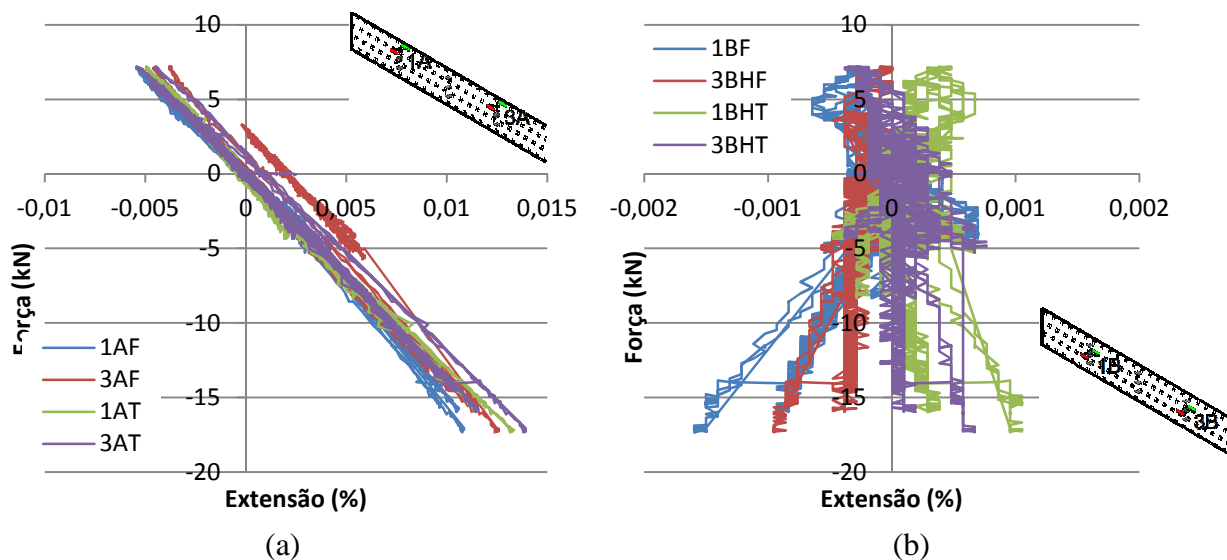


Figura 4.45 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P1, (b) Agrupamento P2.

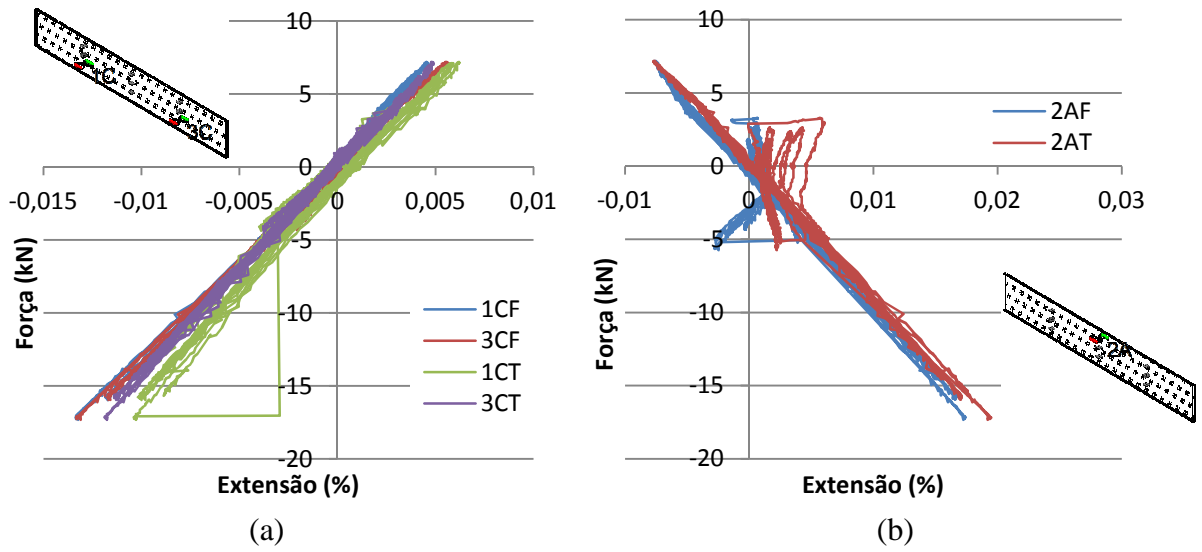


Figura 4.46 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P3, (b) Agrupamento P4.

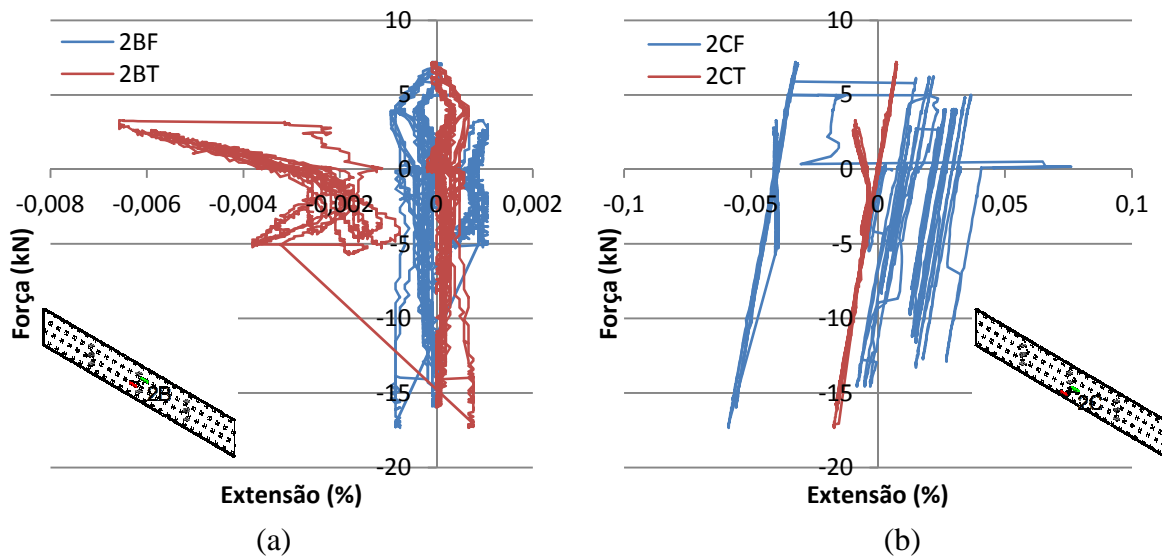


Figura 4.47 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P5, (b) Agrupamento P6.

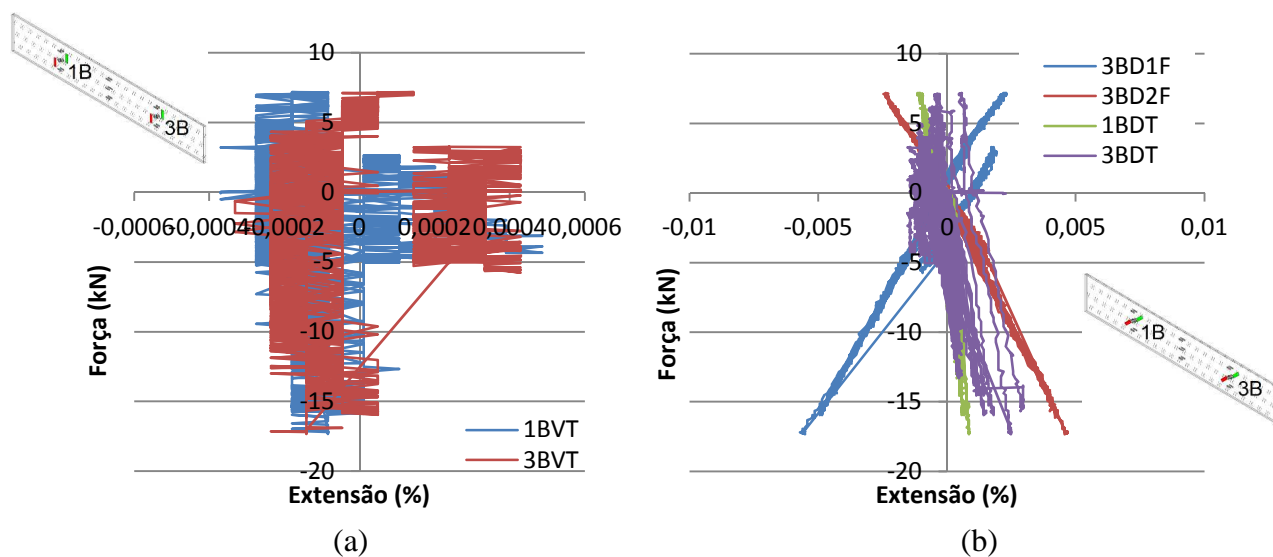


Figura 4.48 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P7, (b) Agrupamento P8.

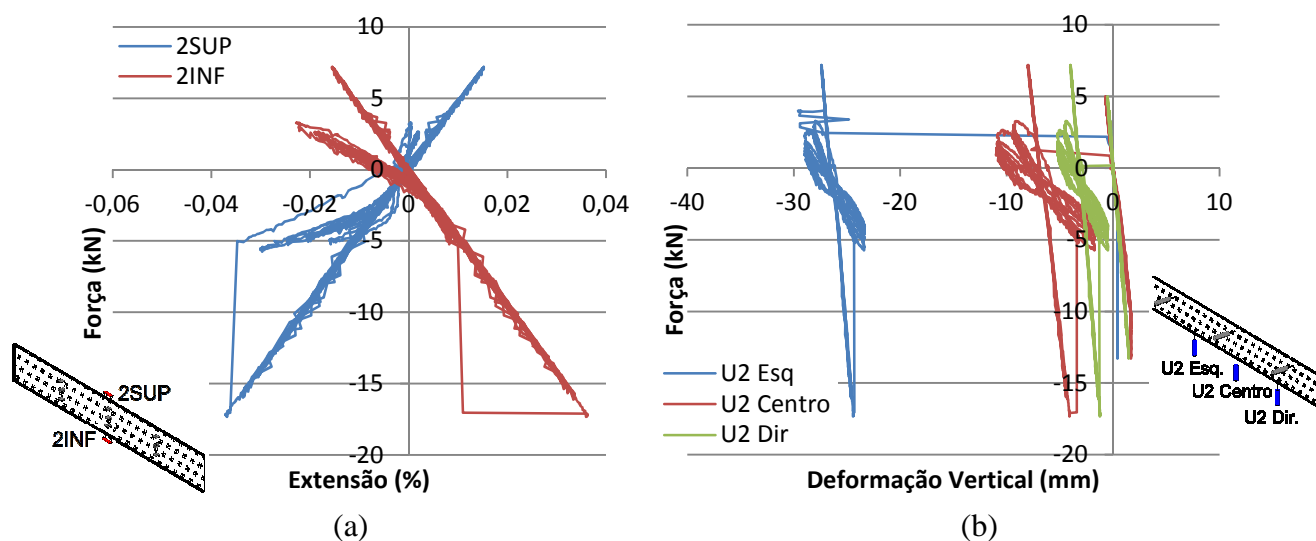


Figura 4.49 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P9, (b) Agrupamento P10.

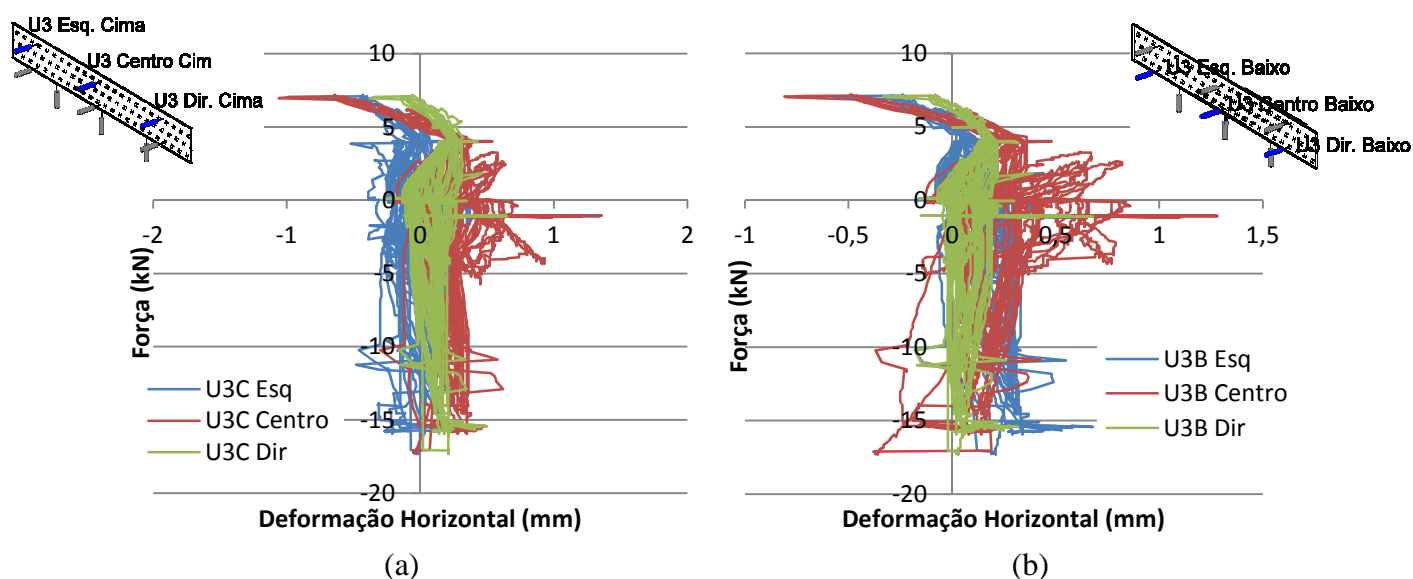


Figura 4.50 - Resultado Experimental: (a) Agrupamento P11, (b) Agrupamento P12.

Nos resultados verifica-se que nos agrupamentos P1, P2 e P3, existe uma semelhança assinalável entre os resultados das linhas 1 e 3, quer na parte da frente quer da parte de trás da viga, o que nos mostra uma simetria de esforços. Pode verificar-se também que os resultados são muito semelhantes quase que coincidentes.

Durante este ensaio foi notado uma irregularidade na colocação dos deflectómetros. Estes em vez de terem iniciado a leitura a metade do curso, para poderem abranger as leituras descendentes e ascendentes, o êmbolo encontrava-se muito perto do fim de curso e quando a viga subia devido aos ciclos ascendentes, estes já não tinham curso para acompanhar o deslocamento, não podendo registar esses valores.

Verificando os resultados das deformações horizontais notamos uma grande semelhança entre os gráficos dos dois agrupamentos de deflectómetros horizontais, superiores e inferiores, ambos nos indicam também uma deformação para fora do plano da viga.

5. CONCLUSÕES

No nosso país praticamente não existe bibliografia sobre o tema do vidro estrutural. Tal se deve, sobretudo, à falta de regulamentos e recomendações nacionais e internacionais, para os procedimentos de ensaio, uso e dimensionamento de elementos de vidro. O desenvolvimento e avanço na área deste tipo de material requerem mais tempo e dedicação ao estudo desta área da engenharia, só assim se poderá tornar realidade o total desenvolvimento da aplicabilidade do vidro estrutural.

Ao longo da análise efectuada aos ensaios das vigas (solicitação monotónica sem cabo, solicitação monotónica com cabo e solicitação cíclica), notaram-se vários aspectos a otimizar e melhorar nos layouts:

Com o ensaio monotónico sem cabo concluiu-se que nos próximos ensaios, durante a colocação da viga é necessário ajustar e garantir a sua verticalidade. De modo a evitar ao máximo o fenómeno da flexão fora do plano é necessário melhorar o alinhamento entre apoios e pontos de contacto com o carro de carregamento. Levar a cabo a redução máxima de folgas para evitar deformações e deslocamentos de corpo rígido não associados às vigas, para que os deflectómetros registem apenas as deformações por flexão;

Para os próximos ensaios com cabo de pré-esforço é necessário otimizar a passagem dos cabos nos desviadores para que estes não sejam sujeitos a esforços na direcção do cabo nem provoquem perda de pré-esforço, é proposto alargar os sulco e diminuir o atrito com um lubrificante. Colocar células nos cabos de pré-esforço junto do outro apoio e pré-esforçar os cabos de ambos os lados o mais simetricamente possível. O alinhamento dos eixos dos roletes de apoio e carros de carga para evitar a deformação por flexão fora do plano da viga. Nos apoios e pontos de contacto intercalar acetato sobre o alumínio para reduzir danos superficiais no contacto do vidro com elementos exteriores do layout. Também se pode esquematizar e conceber um sistema que contravente e/ou segure melhor o bloco dos roletes desviadores dos cabos de pré-esforço, de modo a constituírem mais um auxilio a que impeça de sofrerem deslocamentos por esforços indesejáveis.

No ensaio cíclico, como foi referido, a estratégia de carga foi concebida tendo em conta apenas os dados de um ensaio monotónico simples. Para melhorar e otimizar a estratégia de carga cíclica seria indicado um maior número de ensaios a fim de ter uma maior amostra de resultados.

Comum a todos os ensaios, os contraventamentos, como são ajustáveis, não se encostaram totalmente ao vidro e foram deixados com uma folga mínima para não originar algum tipo de atrito. Há ainda a possibilidade de existirem também várias folgas na sua fixação e de possuírem pouca rigidez, uma melhoria ao nível dos contraventamentos para aumentar a sua rigidez levaria possivelmente a um melhor controlo das deformações horizontais das vigas.

Neste trabalho não se chegou a ensaiar a temperaturas elevadas, pois ao fazer mais testes de verificação da estabilidade da temperatura chegou-se à conclusão de ser necessário proceder a mais optimizações uma vez que a variação de temperatura era gradual com a altura da câmara. Uma vez que o ar quente sobe, no cimo mantinha-se mais quente que junto à base. Esses vários ensaios e processos de interação de melhorias sucessivas também acabaram por não constar neste documento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arquitetonico@. (s.d.). Obtido em 27 de Janeiro de 2014, de <http://www.arquitetonico.ufsc.br/o-vidro-e-sua-aplicacao-na-construcao-civil>.

Arquitetura em Vidro@. (s.d.). Obtido em 2013, de <https://sites.google.com/site/arquiteturaemvidro/>.

Belis, J., Depauw, J., Callewaert, D., Delincé, D., & Van Impe, R. (2009). Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature. *Engineering Failure Analysis*.

Bogas, J. P. (2011). *Fachadas de Vidro: Explorar os limites da utilização do vidro na construção*. Universidade do Minho.

Cebrace@. (s.d.). Obtido em 27 de Janeiro de 2014, de <http://www.cebrace.com.br/v2/>.

Correia, A. (2013). *Glass panes under cyclic and thermal loads - Testing and characterization*. Coimbra: FCTUC.

Cruz, P., Valente, I., Carvalho, P., Alves, L., Silva, L. S., Jordão, S., et al. (2012). *Projeto S-GLASS – Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente - Marco 1 – BASIC-GLASS: Regras básicas para o projeto estrutural de vigas de vidro*.

DuPont@. (s.d.). Obtido em 28 de Janeiro de 2014, de http://www2.dupont.com/Building_Innovations/zh_CN/assets/downloads/SGPintro_E.pdf.

European Committee for Standardization. (2000). *EN 1288-1:2000 Glass in building - determination of the bending strength of glass - Part 1: Fundamentals of testing glass*. Brussels: CEN.

European Committee for Standardization. (2000). *EN 1288-2:2000 Glass in building - determination of the bending strength of glass - Part 2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas*. Brussels: CEN.

European Committee for Standardization. (2000). *EN 1288-3:2000 Glass in building - determination of the bending strength of glass - Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending)*. Brussels: CEN.

European Committee for Standardization. (2004). *EN 572-1 Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties*. Brussels: CEN.

Giacomini, E. *Material o vidro*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Haldimann, M., Luible, A., & Overend, M. (2008). *Structural Use of Glass*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering.

Jordão, S., & Pinho, M. (2014). *Modelação de Vigas de Vidro por Elementos Finitos - S-GLASS: Structural Performance and Design Rules of Glass Beams Externally Reinforced*.

Marinho, B. (2012). *Caracterização Experimental do Vidro Laminado como Material Estrutural - Avaliação da Influência dos Elementos Intercalares e da Temperatura*. Universidade do Minho.

Martins, J. G., & Pinto, E. L. (2004). *Materiais de Construção I - O Vidro*. Universidade Fernando Pessoa.

Nielsen, J. H. (2009). *Tempered Glass – Bolted connections and related problems*. Technical University of Denmark.

Pinho, M. (2013). *Modelação de Vigas de Vidro por Elementos Finitos e Resultados Experimentais - S-GLASS: Structural Performance and Design Rules of Glass Beams Externally Reinforced*.

Schittich, C., Stab, G., Balkow, D., Schuler, M., & Sobek, W. (1999). *Glass construction manual*. Basel: Birkhauser.

T2G@. (s.d.). Obtido em 29 de Janeiro de 2014, de <http://www.t2g.com.br/new/projetos.php>.

Valarinho, L. G. (2010). *Construção em Vidro Estrutural - Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP*. IST.

Vicar@. (s.d.). Obtido em 28 de Janeiro de 2014, de <http://www.vicar.pt/produtosvidrotemperado.html>.