



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

Caracterização do Comportamento de Vigas de Vidro Estrutural Sujeitas a Solicitação Térmica

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

Autor

Carla Filipa Neves Lopes

Orientador

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 correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Fevereiro, 2016

AGRADECIMENTOS

Nesta fase final da minha vida académica gostaria de expressar o meu sincero agradecimento não só às pessoas que participaram diretamente no desenvolvimento deste trabalho, mas também aos que sempre me foram acompanhando e apoiando ao longo destes últimos anos.

De entre todos, destaco a Professora Doutora Sandra Jordão e Professora Doutora Aldina Santiago, não só pelo incansável empenho e disponibilidade com que acompanharam este trabalho, mas também por todos os conhecimentos transmitidos e desafios propostos, que tanto contribuíram para o meu crescimento académico e pessoal.

Ao Marco Pinho não só pelo seu grande contributo na realização dos ensaios experimentais, como pelo apoio e paciência inqualificáveis. Ao Rui Ferreira, e aos funcionários do Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural, gostaria também de deixar aqui uma palavra de apreço pela sua colaboração neste projeto.

Aos meus familiares, avós, madrinha, primas, não só pelo apoio ao longo dos últimos anos, mas por tudo aquilo que representam. Particularmente aos meus pais, Lina e Acilino, um muito sincero OBRIGADA, como reconhecimento de todo o esforço que fizeram para que eu chegasse aqui, mas sobretudo pelo amor, confiança e apoio incondicional. Ao Rui, que apesar das picardias típicas de irmãos, foi bom tê-lo também como colega e amigo ao longo do percurso académico. Ao João, sempre presente tanto nos bons como nos maus momentos, um agradecimento especial pelas constantes palavras de incentivo, carinho e companheirismo.

Aos meus amigos de Coimbra, por toda a ajuda direta e indireta, pelo convívio e pelos bons momentos que levo comigo para a viga. Em particular ao Tomé pela sua constante amizade e disponibilidade. À “Patucha” pelos bons momentos diários e o forte apoio nesta etapa final. Às amigas e colegas de casa durante grande parte dos anos, Vanessa, Elva e Ritinha, por toda a força; e aos colegas de Mecânica Estrutural pela ajuda e troca de ideias nesta jornada.

Não poderia deixar de agradecer também aos meus amigos de Tomar, pelos bons momentos.

A autora agradece à Fundação da Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro através do programa PTDC/ECM/116609/2010 relativo ao projeto de investigação S-GLASS e ao ISISE; também à empresa Sosoares pelo fornecimento das vigas de vidro usadas nos ensaios experimentais.



RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento significativo da utilização do vidro na arquitetura. Este aumento deve-se não só às suas extraordinárias vantagens estéticas e arquitetónicas, ao seu potencial em termos de eficiência energética, como também aos diversos avanços tecnológicos, que têm permitido a utilização deste material, com um aproveitamento cada vez mais eficaz, das suas propriedades resistentes. De entre os referidos avanços tecnológicos destaca-se o tratamento térmico e a técnica de laminação. Esta última consiste em unir dois ou mais painéis de vidro por intermédio de uma película intercalar adesiva.

A película de laminação mais recente e com melhor comportamento estrutural é o SentryGlas®. No entanto, dadas as propriedades viscoelásticas da referida película, o seu comportamento é significativamente afetado pela temperatura. A gama de temperaturas onde se verifica redução da sua capacidade resistente corresponde a valores facilmente atingíveis em zonas de clima temperado, numa posição não ventilada de uma fachada de um edifício corrente. Apesar da importância deste facto, até à data, ainda não existe formulação de dimensionamento ou disposições regulamentares para ter em conta este efeito explicitamente no cálculo de elementos de vidro estrutural. Por esta razão é necessário estudar não só a influência da temperatura no comportamento deste tipo de elementos, como também investigar métodos de reforço, que minimizem este efeito penalizador. Exemplo de tal é a introdução de sistemas de pré-esforço.

A presente dissertação enquadra-se nesta problemática, pretendendo avaliar e caracterizar o comportamento de vigas de vidro estrutural, laminadas com SentryGlas®, quando sujeitas a ações térmicas. A caracterização é feita à custa de ensaios experimentais, à escala real, com e sem sistema de pré-esforço, em esquema de flexão em quatro pontos. As temperaturas estudadas foram 50°C e 80°C, para além da temperatura ambiente que serviu de referência. Deste modo foi possível avaliar não só o efeito da temperatura, como quais as vantagens da introdução de um sistema de pré-esforço neste tipo de elementos estruturais.

As conclusões foram estabelecidas com base na comparação dos resultados obtidos experimentalmente, onde se comprovou a eficácia do sistema de pré-esforço e o dano devido à ação térmica, em particular na fase pós-rotura.

O trabalho efetuado encontra-se no âmbito do projeto S-Glass: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente; PTDC/ECM/116609/2010; relativamente às tarefas realizadas na Universidade de Coimbra

Palavras-chave: Vidro laminado; SentryGlas®; Temperatura; Vigas; Sistema de pré-esforço; Ensaios experimentais; Flexão em quatro pontos; Ação termomecânica

ABSTRACT

In recent years, there has been a significant increase in the use of glass in contemporary architecture. This is due not only to its extraordinary architectural and aesthetic advantages, its potential in terms of energy, as well as due to several technological developments that allowed the use of glass as a load bearing material. Among those technological advances stands out the heat treatment and the lamination technique. The latter consists of two or more glass panes that are bonded by means of an interlayer.

One of the latest developed interlayer material that features a better mechanical behaviour is the SentryGlas®. Although since the interlayer is a viscoelastic material its characteristics are significantly affected by temperature. The referred downgrading due to temperature is noticeable at relatively low temperatures easily attainable due to light exposure, in temperate climate, and on an unventilated position of a façade on an ordinary building. In spite of that, the effect of temperature on the laminated compound is not yet fully characterized and there are no code guidelines concerning this aspect. For this reason further studies on the effect of temperature are needed as well as the investigation of reinforcement techniques for structural glass elements that may minimize the negative effects of the temperature on the interlayer. Example of such is pre stressed solution.

The present study addresses those topics on an experimental approach, considering full-scale beams with SentryGlas®, with and without pre-stressed system, on an upright position, at a four point bending layout, and subjected to different temperatures. The temperatures considered were 50°C, 80°C and room temperature as reference. The thermal load was applied by mean of a thermal chamber especially built and optimized for this purpose. It was thus possible to evaluate not only temperature effects but also the advantages of a pre-stress system, in particular in the post-breakage regime.

Conclusions are based on a comparison established between experimental results, which proved the effectiveness of the pre-stressed system and the damage due to thermal load, in particular in post-breakage regime.

The research is within the framework of the research project S -Glass: Performance and Structural Beam Draft Rules of Glass Reinforced Externally; PTDC/ECM/116609/2010; concerning the tasks carried out at the University of Coimbra.

Keywords: Laminated glass; SentryGlas®; Temperature; Beams; Pre-stress system; Experimental tests; Four point bending; Thermomechanical action

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
SIMBOLOGIA	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento Geral	1
1.2. O Projeto S-Glass	2
1.3. Objetivos e Metodologias	3
1.4. Organização e Conteúdo	3
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	4
2.1. Vidro estrutural	4
2.1.1 Perspetiva histórica.....	4
2.1.2 Propriedades químicas e físicas.....	6
2.1.3 Resistência do material.....	7
2.1.4 Métodos de reforço	8
2.1.4.1 Tratamento térmico	8
2.1.4.2 Laminação	9
2.2 Os adesivos de laminação em vidro estrutural	10
2.2.1 Propriedades mecânicas e físicas	10
2.2.2 Efeito da ação térmica	11
2.3 Comportamento estrutural do vidro laminado.....	12
2.4 O vidro estrutural face à solicitação térmica	13
2.5 Sistemas de Pré-esforço	15
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	17
3.1 Introdução	17
3.2 Geometria e esquema de ensaio.....	18
3.3 Sistema de pré-esforço.....	20
3.4 Preparação e otimização da câmara térmica	21
3.5 Instrumentação.....	23
3.6 Aspetos tecnológicos	26
3.7 Ensaio de pré-condicionamento térmico	27
3.7.1 Ensaio a escala reduzida.....	27
3.7.2 Ensaio a escala real, T75_0	29
3.8 Ensaio experimental sem sistema de pré-esforço	31
3.8.1 Introdução.....	31
3.8.2 Ensaio piloto	31
3.8.2.1 Ensaio piloto, TA_0	32
3.8.2.2 Ensaio piloto, T75_0	37
3.8.3 Ensaio à temperatura ambiente, TA_1 e TA_2.....	41
3.8.4 Ensaio termomecânicos	45
3.8.4.1 Temperatura de 50°C, T50_1 e T50_2.....	45
3.8.4.2 Temperatura de 80°C, T80_1 e T80_2.....	50
3.8.5 Comparação e discussão de resultados.....	54
3.9 Ensaio experimental com sistema de pré-esforço.....	57
3.9.1 Introdução.....	57

3.9.2	Estratégia de carga.....	57
3.9.3	Ensaio piloto, PS_TA_0.....	57
3.9.4	Ensaio à temperatura ambiente, PS_TA_1 e PS_TA_2.....	61
3.9.5	Ensaio termomecânicos	66
3.9.5.1	Temperatura de 50°C, PS_T50_1 e PS_T50_2.....	66
3.9.5.2	Temperatura de 80°C, PS_T80_0, PS_T80_1 e PS_T80_2.....	72
3.9.6	Comparação e discussão de resultados.....	79
3.10	Comparação dos ensaios com e sem sistema de pré-esforço.....	81
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
4.1	Conclusões.....	83
4.2	Propostas para desenvolvimentos futuros.....	84
4.3	Publicações	84
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

SIMBOLOGIA

f_i	Tensão de tração em flexão
E	Módulo de elasticidade ou de <i>Young</i>
F	Força aplicada num ensaio de flexão de 4 pontos
L	Comprimento do fio
K	Rigidez
T_g	Temperatura de transição vítrea
α_t	Coefficiente de dilatação térmica
δ_i	Deformação no provete
ε	Extensão axial
ε_t	Alongamento na rotura
λ	Condutividade térmica
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Peso específico
σ	Tensão
σ_n	Tensão de tração nominal normal ao plano da fenda
Δ	Variação do parâmetro
ΔL	Deformação sofrida no fio
ΔT	Variação da temperatura

ABREVIATURAS

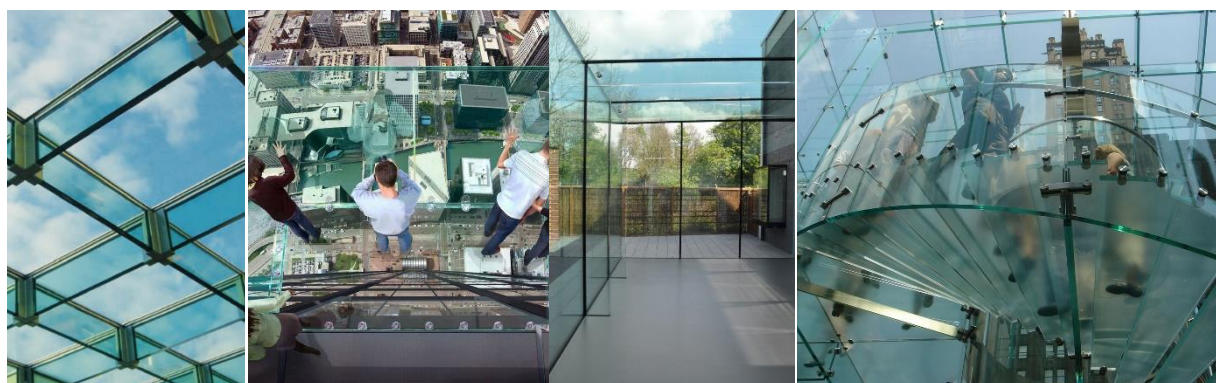
AS	Australian Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
a.C.	Antes de Cristo
BSG	Vidros de boro-silicatos (do inglês: <i>boro silicate glass</i>)
DIN	Instituto Alemão de Normalização (do alemão: <i>Deutsches Institut für Normung</i>)
d. C.	Depois de Cristo
EN	Norma Europeia
PE	Pré-esforço
prEN	Pré-Norma Europeia
PVB	Polivinil butiral
SG	SentryGlas®
SLSG	Vidro de silicatos soda cálcio (do inglês: <i>soda lime silicate glass</i>)
TML	Marca de extensómetros (Empresa Tokyo Sokki Kenkyujo)
3PB	Ensaio à flexão em 3 pontos (do inglês: <i>Three Point Bending</i>)
4PB	Ensaio à flexão em 4 pontos (do inglês: <i>Four Point Bending</i>)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Geral

Durante muitos anos, quando se falava em vidro, as primeiras características que permitiam descrever este material, são que este era transparente e quebrava facilmente. Na verdade devido a estas características, apesar de se tratar de um material milenar, até recentemente as suas funções limitavam-se a meros utensílios ou objetos decorativos, ou quando utilizado na arquitetura apenas cumpria funções sem capacidade resistente.

Contudo, com as crescentes exigências estéticas e arquitetónicas, são cada vez mais os estudos efetuados, numa incansável busca pelo equilíbrio perfeito entre transparência e capacidade estrutural. Deste modo, os avanços tecnológicos alcançados ao longo dos últimos anos, tem permitido superar as limitações associadas à fragilidade do vidro, aumentando a sua capacidade de carga, e melhorando o seu comportamento pós-rotura, sem comprometer a sua transparência e luminosidade. Neste enquadramento, hoje em dia quando se descreve o material vidro, cada vez mais, este deverá ser referido como um material com capacidade estrutural. Exemplos da sua aplicabilidade que demonstram esta mais recente característica do vidro, são as fachadas, coberturas, pavimentos, escadas, vigas ou até mesmo pilares (Figura 1.1).



a) *Refectory*, TU
Dresden

b) *Skydeck*, Chicago

c) *Broadfield
Glass Museum*,
Kingswinford,
UK

d) *Apple Store*, 5th Avenue, NY

Figura 1.1 – Fotografias exemplificativas da aplicação do vidro estrutural: [Imagem 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4]

No entanto, apesar de todo o trabalho científico que tem vindo a ser desenvolvido, ainda são muitas as lacunas, no que respeita às regulamentações e disposições construtivas, disponíveis

no mercado, relativamente ao projeto de vidro estrutural. Existem diferentes abordagens e documentos normativos, como o caso das abordagens Americana (ASTM, 2010) ou Australiana (AS, 2006), que apesar de serem muito utilizadas atualmente, são essencialmente dedicadas ao vidro para aplicações secundárias, com poucos princípios dedicados ao projeto de vidro estrutural. Ao nível Europeu, os primeiros passos foram dados na consideração do vidro como um material com capacidade resistente. A norma Alemã, DIN 18100, ou a pré-norma Europeia (prEN 13474) já possuem algum alinhamento nesse sentido, existindo também um documento pré-normativo (JRC Scientific and Policy Reports, 2014) que representa a base para o novo Eurocódigo 10 dedicado ao projeto de vidro estrutural, atualmente em desenvolvimento. Apesar disso, ainda diversos aspetos continuam em aberto. Exemplo disso é a ausência de normas que permitam ter em conta de uma forma explícita a influência da temperatura, sobre vigas de vidro laminado, com película de SG. Este aspeto reveste-se de grande importância, na medida em que, sendo a película de laminação um material viscoelástico, as suas propriedades são extremamente influenciadas tanto pela duração da ação como pela temperatura. Uma vez que a gama de temperaturas, em que o SG sofre degradação das suas propriedades e consequentemente afeta a capacidade estrutural da secção compósita, é facilmente atingível (50-60°C), este aspeto torna-se particularmente penalizador. Por este motivo, são necessários estudos adicionais sobre a influência desta no comportamento estrutural destes elementos, bem como investigação de alternativas de *layout* ou reforço, que minimizem este efeito. Exemplo de tal é a introdução de sistemas de pré-esforço, que não comprometendo a estética e transparência, têm provas dadas em termos de melhoria de comportamento estrutural, particularmente ao nível da resistência, robustez e segurança pós-rotura.

A presente dissertação enquadra-se nesta problemática, pretendendo avaliar e caracterizar o comportamento de vigas de vidro com SG, com e sem sistema de pré-esforço, quando sujeitas à ação térmica. Pretende-se assim avaliar não só a influência da temperatura, como quais as vantagens da introdução deste sistema de reforço, permitindo deste modo fornecer algumas bases, para o estado atual do conhecimento nesta área.

1.2. O Projeto S-Glass

A presente dissertação está inserida no âmbito do projeto S-Glass: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente, com a referência PTDC/ECM/116609/2010, relativamente às tarefas WT4 e WT5, desenvolvidas no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Este projeto teve como objetivo a caracterização do comportamento estrutural de vigas de vidro à escala real, com e sem cabo de pré-esforço, e com ou não reforços, sujeitas a solicitação monotónica, térmica e cíclica.

1.3. Objetivos e Metodologias

A presente dissertação tem como principal objetivo não só avaliar e caracterizar o comportamento de vigas de vidro estrutural com SG, sujeitas à ação térmica, como também analisar quais os benefícios da introdução do sistema de pré-esforço, na capacidade resistente da viga à flexão. Pretende-se ainda a obtenção de valores para uma futura calibração de modelos numéricos.

De acordo com o objetivo principal que esta dissertação se propõe, foi definida uma campanha experimental, composta por ensaios à escala real:

- Ensaios de pré-condicionamento térmico, a fim de determinar qual o período mínimo de tempo necessário para aquecer uniformemente os provetes.
- Ensaios monotónicos de flexão em quatro pontos (4PB) à escala real, com e sem sistema de PE, como ensaios de referência
- Ensaios 4PB, com solicitação térmica de 50°C, com e sem cabo de pré-esforço.
- Ensaios 4PB, com solicitação térmica de 80°C, com e sem cabo de pré-esforço.

1.4. Organização e Conteúdo

A presente dissertação encontra-se estruturada em 4 capítulos.

No primeiro e presente capítulo, é apresentado uma breve introdução à temática abordada no documento, bem como os principais objetivos a que esta dissertação se propõe.

No segundo capítulo são expostos conceitos introdutórios sobre o vidro estrutural. Inicia-se pela apresentação das principais propriedades e tecnologias tanto do vidro, como das películas de laminação, terminando com o estado do conhecimento relativo ao vidro estrutural face à solicitação térmica, bem como os diversos mecanismos de pré-esforço já estudados.

O terceiro capítulo engloba toda a campanha experimental, desde a geometria, esquema de ensaio e instrumentação consideradas, preparação e otimização da câmara térmica, à apresentação e discussão de resultados relativos a cada um dos ensaios efetuados. Por último é efetuada uma análise crítica e comparativa dos resultados.

No quarto e último capítulo para além da apresentação das principais conclusões relativas ao trabalho realizado, são ainda referidas propostas para desenvolvimentos futuros.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

O presente capítulo tem como objetivo fornecer não só um nível de informação adequada, relativamente ao material vidro e sua aplicabilidade como material estrutural, bem como informações base relativas às películas de laminação. Além disso, será fornecida informação geral, sobre o estado do conhecimento, relativo ao vidro estrutural face às solicitações térmicas, bem como relativo a sistemas de pré-esforço em vigas de vidro já estudados.

2.1. Vidro estrutural

Serão aqui expostos os principais conceitos associados a este material, nomeadamente, a sua história, os tipos de vidro e sua composição, principais propriedades físicas e mecânicas, e métodos de reforço, que tem possibilitado a utilização deste material, como material estrutural.

2.1.1 Perspetiva histórica

Desde sempre que existe o vidro natural (obsidiana) formado espontaneamente na natureza, que apesar de não ser transparente é translúcido (Figura 2.1 a)). Não existe um consenso acerca da descoberta do fabrico de vidro, no entanto os povos que disputam a primazia desta invenção são os egípcios e os fenícios. As primeiras oficinas deste material têm registo no Egipto e na Mesopotâmia, cerca de 1500 a.C.. O processo de fabrico denominado por “*core forming*”, consistia em envolver um núcleo de areia ou argila, por um líquido viscoso (vidro macio). Após o arrefecimento, o referido núcleo era removido, e o material era cortado e polido. Na época o vidro ainda não apresentava a sua tão característica transparência (Figura 2.1 b)). A primeira grande evolução, no processo de fabrico de vidro ocorreu na Síria (300 a.C.), com a invenção do processo de sopro, e a criação de moldes que possibilitaram a sua produção em série.



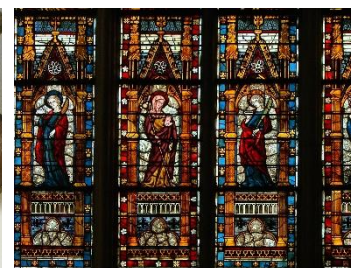
a) Obsidiana, vidro natural



b) Vaso Egípcio, 1400-1300 a.C.



c) Vasos transparentes, Romanos, século II d.C.



d) Vítal, Cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul, França, século XIV

Figura 2.1 – Objetos antigos de vidro ao longo do tempo [Imagem 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4]

No início do século I d.C., os Romanos revolucionaram a produção vidreira e contribuíram para a sua expansão por toda a moldura mediterrânea. Introduziram novos processos, que para além de permitirem a criação do primeiro vidro transparente e de uma grande diversidade de formas (Figura 2.1 c)), permitiram ainda desenvolver o vidro plano e os primeiros espelhos.

Com a queda do império o desenvolvimento dos processos de produção de vidro estagnou, e só na idade média é que este voltou a ganhar dimensão, um pouco por toda a Europa, e em particular na França, com o aparecimento do “*crown process*”. Este processo consistia em formar um orifício, em uma bolha de vidro derretido (previamente soprada) e posteriormente girá-la até á forma de disco (Figura 2.2). Nesta altura o vidro passou a ser muito utilizado em janelas de igrejas medievais (Figura 2.1d)).

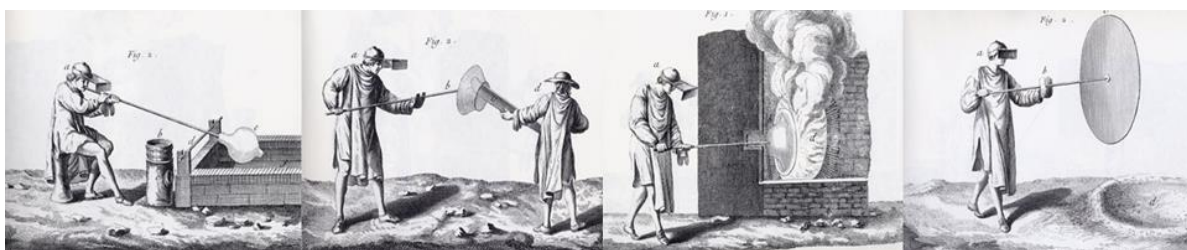


Figura 2.2 - Faseamento na produção de vidro, através do "crown process"; [Imagem 2.5]

No final do século XIX, com a revolução industrial, foi possível pela primeira vez a produção automatizada deste material. Em 1871 através do método do cilindro, por William Pilkington, e mais tarde através do desenvolvimento de novos processos de vidro plano, como o processo de Fourcault, o de Pittsburgh e o de Libbey-Owens. Nos anos 50, face às cada vez mais exigentes utilizações, Alastair Pilkington, desenvolveu o “*float process*”, que permitia produzir vidro plano de alta qualidade e espessura constante (Figura 2.3), sendo que hoje em dia este ainda é o processo utilizado por mais de 90% da produção mundial de vidro. Este processo consiste na fusão de matérias-primas, com posterior escoamento até um tanque de estanho fundido, que dado o seu peso específico superior ao do vidro, permite a flutuação deste, criando uma camada uniforme. Posteriormente, passa por um forno de recozimento onde é arrefecido de forma controlada evitando a criação de tensões internas.

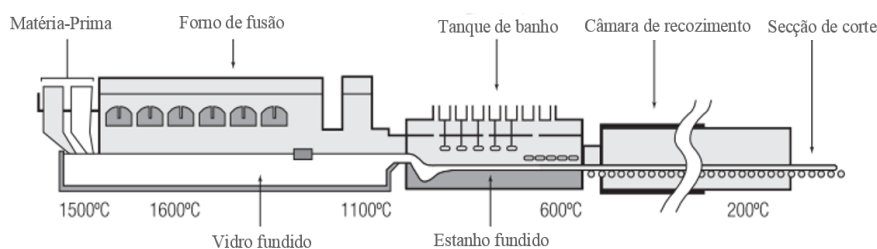


Figura 2.3 - Esquema de fabrico de vidro, "float process" (adaptado de O'Regan, 2014).

No início do século XX, a descoberta dos processos de têmpera e laminação permitiram uma melhoria significativa das suas propriedades. Por este motivo este material começou a ser aplicado em larga escala tanto na indústria automóvel, como na aeroespacial e construção.

Presentemente o vidro é objeto de estudo, em todo o mundo, encontrando-se em franco desenvolvimento.

2.1.2 Propriedades químicas e físicas

O vidro é um material sólido, inorgânico, resultante do rápido arrefecimento de uma massa fundida homogénea, sem que ocorra cristalização. Por este motivo, o vidro não apresenta uma estrutura atômica definida, sendo designado por um sólido amorfo.

São produzidos fundamentalmente dois tipos de vidro, o vidro silicato soda cálcio (SLSG) e em menor escala o vidro boro-silicatos (BSG). Este último é utilizado apenas em situações especiais, como proteção ao fogo ou quando sujeitos a grandes amplitudes térmicas (Haldimann et al, 2008). Por este motivo, uma vez que os vidros silicatos são os mais utilizados na construção, as vigas do presente estudo, são constituídas por esse material.

As mais importantes propriedades químicas e físicas do vidro silicato encontram-se expostas no Quadro 2.1. A densidade deste material aproxima-se da densidade do betão e o módulo de elasticidade é similar ao do alumínio.

Quadro 2.1 – Propriedades químicas e físicas do vidro silicato (de acordo com Louter, 2011 e Haldimann *et al.*, 2008)

Propriedades químicas			Propriedades físicas			
Material	Fórmula	Composição	Propriedade	Símbolo	Unidades	Valor
Sílica	SiO ₂	69-74%	Densidade	ρ	kg/m ³	2500
Cal	CaO	5-14%	Dureza	HK _{0,1/20}	GPa	6
Sódio	Na ₂ O	10-16%	Módulo de Elasticidade	E	GPa	70
Magnésio	MgO	0-6%	Módulo de distorção	γ	GPa	28
Alumina	AL ₂ O ₃	0-3%	Coefficiente de Poisson	ν	-	0.2
Outros	-	0-5%	Calor específico	c_p	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	720
			Coefficiente de expansão	α	K ⁻¹	9*10 ⁻⁶
			Resistência à flexão(*)	σ_{vidro}	MPa	45

(*)A resistência do vidro não é uma propriedade constate, ver seção 2.1.3.

Mecanicamente o vidro apresenta um comportamento isotrópico e elástico-linear, possuindo uma rotura frágil. Por este motivo, quebra imediatamente, sem aviso prévio. Dada a sua estrutura química irregular, não possui capacidade plástica e aptidão para efetuar redistribuição de esforços, e como tal é um material extremamente sensível a concentração de tensões. Uma vez que a resistência do vidro à compressão é muito superior à de tração, é difícil tirar o máximo

partido deste material à flexão. No entanto como se verá mais a frente, a resistência do vidro não é uma constante.

Para um estudo mais aprofundado da composição, estrutura e características químicas do vidro, consulte-se Shelby (2005).

2.1.3 Resistência do material

Embora a tensão teórica de rotura do vidro silicato, resultante das propriedades intrínsecas do material (associadas às forças moleculares), seja bastante elevada, na ordem dos 32 GPa, a norma prEN 13474, define um valor característico de 45 MPa. Esta consideração resulta do facto de que sendo o vidro um material frágil, a sua resistência está diretamente relacionada com a existência de defeitos (fendas microscópicas) na sua superfície. Estes pequenos defeitos podem resultar, do processo de fabrico, do manuseamento do material, ou até mesmo durante o período de serviço. Ainda devido aos processos de corte, normalmente a resistência do painel de vidro é inferior junto às arestas. A resistência das arestas depende fortemente do acabamento aplicado. Por este motivo considera-se que a tensão de rotura não é uma constante (Haldimann *et al.*, 2008) e que está diretamente relacionada não só com o estado da superfície e dimensão do elemento, como também pelas condições ambientais, carregamento e existência de tensões residuais, que no caso de existência de pequenos defeitos, contribuem para o seu agravamento. A dimensão do elemento tem uma influência estatística, já que, quanto maior for a amostra de vidro analisado, mais elevada é a probabilidade de se encontrar um defeito. A Figura 2.4 representa uma relação estatística, da resistência à tração do vidro, de acordo com o estado da sua superfície, ao longo da sua vida útil.

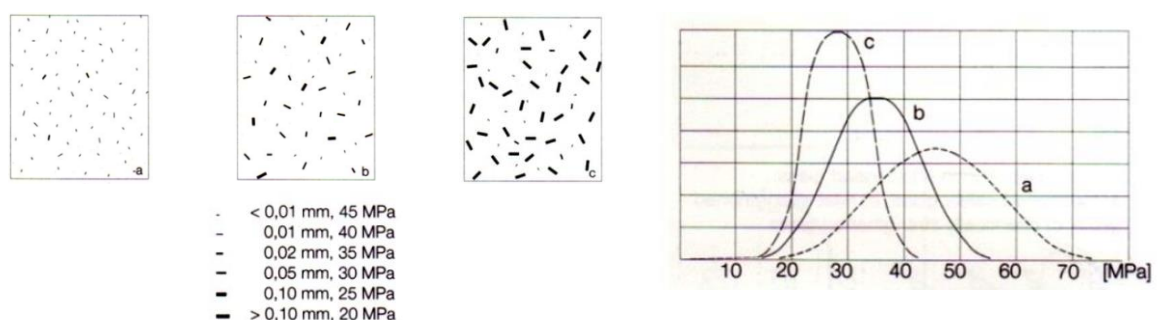


Figura 2.4 - Distribuição estatística da tensão de rotura do vidro devido ao aumento do dano à sua superfície: a - superfície de um vidro novo; b - superfície do vidro depois de sujeito a ações climáticas; c- superfície do vidro com dano inerente à sua utilização no tempo (Valarinho, 2010)

Relativamente à resistência à compressão (cerca de 800MPa) o vidro apresenta um valor bastante superior ao da resistência à tração. No entanto acaba por não ter influência a nível estrutural, uma vez que em elementos sujeitos unicamente à compressão, devido aos fenómenos

de instabilidade e ao efeito do coeficiente de Poisson, desenvolvem-se tensões de tração. Desta forma, o vidro atinge sempre o seu limite de tração, muito antes de esgotar a sua resistência à compressão. Sugere-se a consulta de Bos (2009) para um estudo mais aprofundado do tema.

2.1.4 Métodos de reforço

A reduzida resistência à tração do vidro recozido, bem como o seu comportamento frágil, limita a sua aplicabilidade, especialmente a nível estrutural. A fim de contornar estas desvantagens estruturais, surgiram os tratamentos de reforço, onde se destacam os tratamentos térmicos ou a técnica de laminação.

2.1.4.1 Tratamento térmico

O tratamento térmico, ou têmpera, é um processo utilizado para melhorar a resistência do vidro recozido, à tração. O processo consiste em aquecer o vidro recozido, até uma temperatura superior a 575°C , e de seguida proceder ao seu rápido arrefecimento a uma taxa controlada, através de jatos de ar (Figura 2.5). Como a superfície exterior do vidro arrefece e solidifica mais rapidamente que o interior do mesmo, é criado um campo de tensões. Tensões de compressão na superfície e de tração no seu interior (Figura 2.6), que impedem o desenvolvimento de possíveis defeitos existentes, ou contribuem até mesmo para o seu fecho. Deste modo, a têmpera conduz a um aumento da tensão resistente, na medida em que, enquanto as tensões de tração na superfície do elemento, resultantes de diversas ações aplicadas, não forem superiores, à tensão de compressão resultante do tratamento térmico, não haverá nem crescimento nem aparecimento de novas fendas.

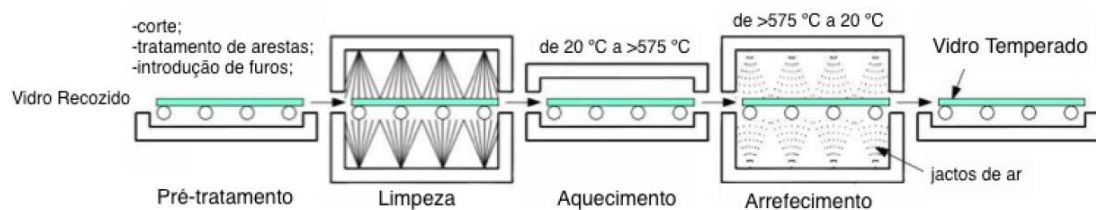


Figura 2.5 - Processo de obtenção do vidro temperado (Firmo, 2015)

Dependendo da velocidade de arrefecimento do vidro durante a têmpera, resultam dois diferentes tipos de vidro. O vidro temperado e o vidro termo-endurecido. O último, uma vez que é arrefecido mais lentamente, origina um campo de tensões residuais inferior, constituindo deste modo uma solução intermédia, entre o vidro recozido e o vidro temperado.

Uma vez que o padrão de fratura do vidro depende da energia armazenada pelo material (tensões residuais resultantes da têmpera e devido a ações aplicadas), os padrões de fratura do vidro são

bastante distintos de acordo com a aplicação ou não de tratamento térmico (Figura 2.7). O vidro temperado fratura-se em pedaços mais pequenos que o vidro termo-endurecido, que por sua vez fratura-se em pedaços menores que o vidro recozido. Como tal, dado o seu padrão de fratura, o vidro temperado é considerado “vidro de segurança”, uma vez que ao fraturar em pequenos estilhaços pouco afiados, minimiza o risco de acidentes. Contudo, por este motivo, embora em fase pré-rotura apresente claras vantagens a nível de resistência, em fase pós-fratura o seu comportamento é pior que o do vidro recozido.

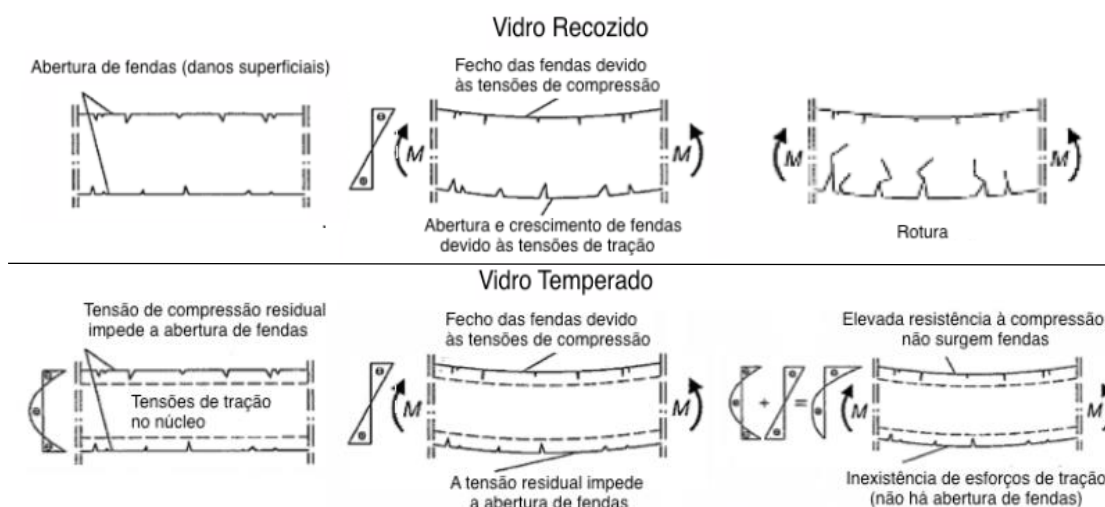


Figura 2.6 - Princípio do tratamento térmico do vidro (adaptado de Haldimann *et al.*, 2008)



Figura 2.7 - Padrão de fratura e capacidade de resistência à flexão, para o vidro recozido, o vidro termo endurecido e o vidro temperado, (adaptado de Louter, 2011)

Para uma consulta mais detalhada do tema, sugere-se a consulta de Nielsen (2009) e Haldimann *et al.*, (2008), onde este processo de tratamento é abordado de uma forma mais pormenorizada.

2.1.4.2 Laminação

A laminação é um processo que consiste em agregar dois ou mais painéis de vidro, por via de uma película viscoelástica, formando um elemento compósito com comportamento *sandwich*.

Com este processo pretende-se não só melhorar a resistência, como o comportamento pós-rotura do vidro, conseguindo-se uma rotura dúctil e uma maior previsibilidade no

comportamento estrutural. De facto, mesmo após rotura, o funcionamento da secção compósita permite, que no caso da quebra dos painéis de vidro, a integridade do outro painel, seja assegurada (Delincé, 2008a). Para além disso a película aderente permite que o vidro fraturado permaneça no lugar, garantindo um aumento da segurança para os utilizadores, bem como um aumento da capacidade residual estrutural, obtida através do imbricamento dos diversos fragmentos de vidro. Neste cenário o comportamento estrutural deste tipo de secções compósitas depende tanto do vidro como da película de laminação.

2.2 Os adesivos de laminação em vidro estrutural

A rigidez do composto laminado depende em grande escala da rigidez da camada intermédia. Nas últimas décadas tem existido procura e desenvolvimento de películas intermédias com propriedades estruturais mais adequadas. Atualmente de entre as películas disponíveis no mercado, as mais utilizadas são o SentryGlas®¹ (SG) e o Polivinil Butiral (PVB). De seguida serão descritas as principais propriedades e comportamento destes *interlayers*, em particular o SG, que é o adesivo considerado no presente estudo.

2.2.1 Propriedades mecânicas e físicas

O SentryGlas® é um material adesivo polimérico, que foi desenvolvido pela empresa DuPont. Este é cerca de 100 vezes mais rígido e 5 vezes mais resistente que a película de laminação atualmente mais utilizada, o PVB. A sua espessura comercial é de 0,38 mm, podendo ser utilizado em agrupamentos de lâminas. A Figura 2.8 apresenta as principais propriedades das películas.

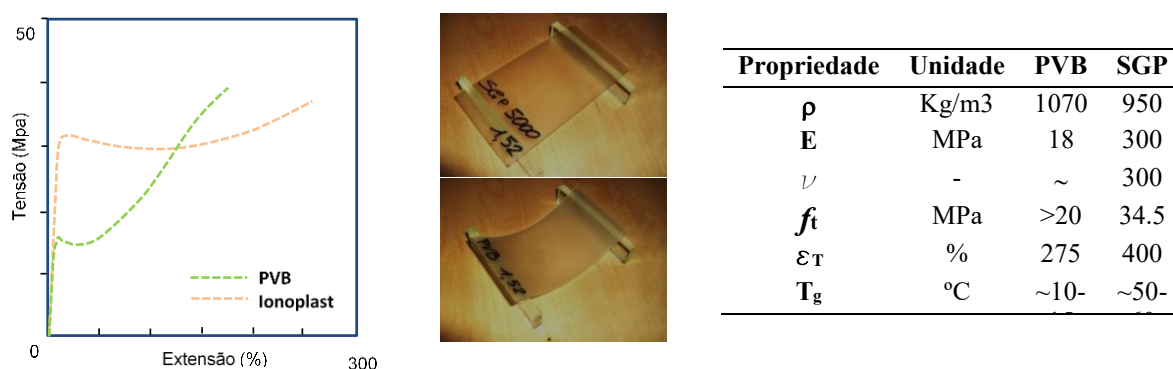


Figura 2.8 – Caraterísticas estruturais das películas à temperatura ambiente (Jordão *et al.*, 2015 e de acordo com Delincé *et al.*, 2008a)

¹ Esta película ionomérica foi introduzida inicialmente no mercado com o nome SentryGlas®, que mais tarde após sofrer aperfeiçoamento das suas características foi renomeada para SentryGlas® Plus. Hoje em dia o nome atribuído à referida película é novamente SentryGlas® (de acordo com Louter, 2011).

2.2.2 Efeito da ação térmica

Uma vez que, as películas de laminação são materiais poliméricos, com propriedades viscoelásticas, o seu comportamento para além de ser afetado pela humidade e duração de carregamento, é ainda extremamente afetado pela temperatura (absoluta e ciclos). A Figura 2.9 pretende ilustrar este facto. Em a) é comparada a variação da rigidez no SG e no PVB, de acordo com um aumento de temperatura. Em b) encontra-se representado o comportamento do SG, para vários cenários de temperatura e duração da ação obtido a partir de ensaios realizados (Stelzar, 2010) segundo procedimentos normativos próprios (ASTM 4065).

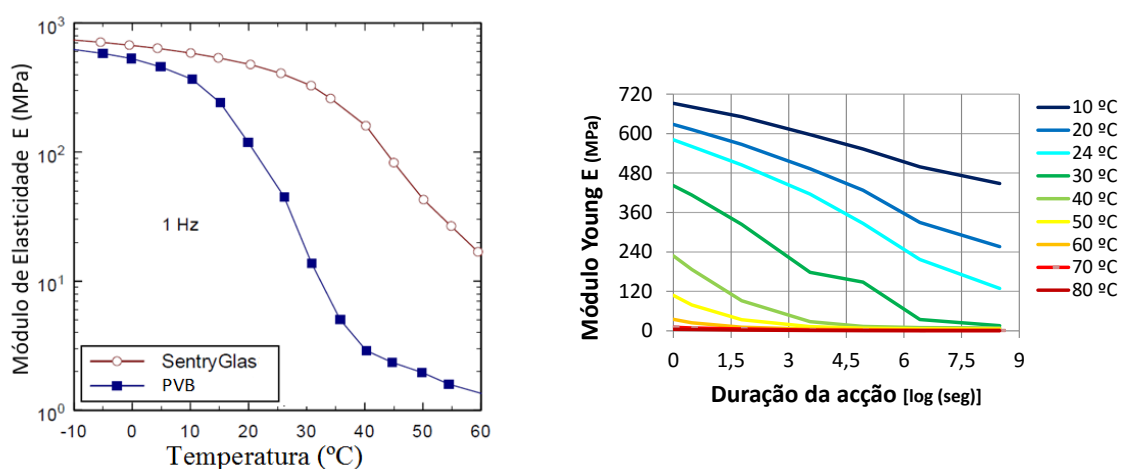


Figura 2.9 – Propriedades estruturais: a) comparação entre o SG e o PVB de acordo com a temperatura (adaptado de DuPont, 2010); b) degradação das propriedades do SG de acordo com a temperatura e duração da ação

A Figura 2.9 a), mostra inequivocamente que o aumento de temperatura é um aspeto fundamental no comportamento estrutural de ambas as películas, embora naquela gama de temperaturas o SG seja menos penalizado (temperatura de transição vítrea superior). Este facto é comprovado por estudos recentes (Bennison *et al.*, 2002, Bennison *et al.*, 2008, Colvin, 2007 e Stelzer, 2010) onde se demonstra que o PVB no caso de solicitação térmica ou cíclica apresenta maior tendência à delaminação, o que compromete o funcionamento do laminado.

Como a temperatura de transição vítrea do SG é relativamente baixa (50-60°C), a nível estrutural este facto é particularmente penalizador, na medida em que corresponde a uma gama de temperaturas facilmente atingíveis, numa zona de clima temperado, em uma posição não ventilada, na fachada de um edifício corrente.

Neste enquadramento, é necessário alocar um esforço significativo, na caracterização do comportamento de elementos estruturais laminados quando sujeitos a variações de temperatura.

2.3 Comportamento estrutural do vidro laminado

Diferentes esquemas estruturais de um elemento de vidro laminado conduzem a diferentes sollicitações da sua película de laminação. Por este motivo, para uma correta caracterização do comportamento estrutural de um elemento de vidro laminado é necessária, não só a caracterização dos materiais de que são constituídos, como também a caracterização do funcionamento da secção compósita. Efetua-se assim para um elemento linear, diferenciação em dois esquemas de funcionamento (Figura 2.10): placa (a-b) ou viga (c-d).

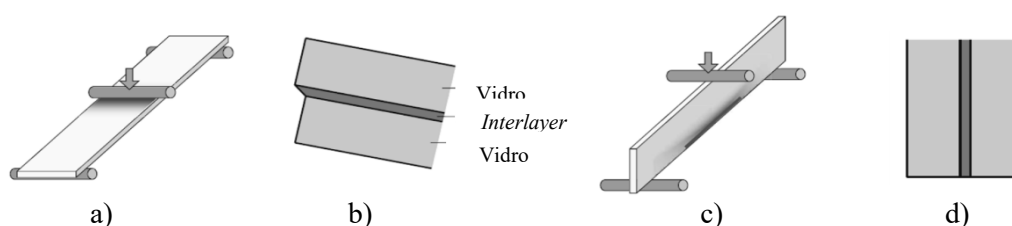


Figura 2.10 - Esquema estrutural do elemento viga e respetiva deformação da secção transversal: (a-b) posição ao baixo; (c-d) posição ao alto (adaptado de Belis *et al.*, 2009)

Os primeiros estudos efetuados foram como elemento placa. Destaca-se o estudo conduzido por Hooper em 1973 (Hooper, 1973) e Behr e coautores em 1985 (Behr *et al.*, 1985) que demonstraram que em regime pré-fratura, a película de laminação tem um papel muito importante, tanto na rigidez como na resistência da secção compósita, sofrendo alterações quando a rigidez de corte da película diminui. Para tal verificaram que à temperatura ambiente, os painéis de vidro apresentavam uma boa conexão e por isso, a secção laminada comportava-se de forma idêntica a um vidro monolítico com igual espessura. No entanto quando a película sofria degradação (resultante de aumentos de temperatura), os painéis de vidro funcionavam separadamente, comprometendo assim a resistência e rigidez do laminado. Esta influência da película de laminação, neste esquema estrutural, foi mais tarde confirmado também para o regime pós-rotura, tanto em laminados por PVB (Bennison *et al.*, 1999), como mais recentemente em laminados com SG (Delincé *et al.*, 2008b).

Relativamente ao esquema estrutural que considera o elemento linear como placa, o seu estudo é mais recente, destacando-se o trabalho levado a cabo por Belis e coautores (Belis *et al.*, 2009) em que foram analisados os mecanismos de rotura e a capacidade residual, de vigas laminadas com SG, à temperatura ambiente. Verificou-se que para este esquema estrutural, em regime pré-fratura, se apenas existir flexão no plano da estrutura, a resistência e rigidez do laminado dependem apenas dos painéis de vidro, e não da película de laminação. No entanto em regime pré-fratura, com a viga já parcialmente fraturada, existe deformações fora do plano e a rigidez da película de laminação já não é desprezável, influenciando a resistência residual do laminado.

2.4 O vidro estrutural face à solicitação térmica

Nos últimos anos, vários estudos têm sido realizados, a fim de avaliar e caracterizar a influência da temperatura no comportamento estrutural dos laminados. Os estudos têm sido levados a cabo, tanto no esquema estrutural em placa, como em viga, e para as diversas películas existentes no mercado.

Uma vez que o presente estudo considera o esquema estrutural do elemento linear composto como viga (embora sejam feitas aqui algumas referências a estudos como elemento placa) será dada mais importância aos realizados em elementos viga e em especial aos que consideram SG como película de laminação.

Belis e coautores (Belis *et al.*, 2007) solicitaram termicamente (55°C) e mecanicamente, num esquema de flexão em três pontos (3PB), elementos compostos de vidro laminado com SG, no esquema estrutural de placa. Pretendiam não só avaliar a influência da temperatura na planicidade das placas, como também avaliar a encurvadura destas, quando solicitadas à flexão segundo o seu eixo fraco. Os autores demonstraram que o SG sofria degradações das suas propriedades, influenciando a sua forma inicial, e reduzindo drasticamente a resistência à encurvadura.

Callewaert e coautores (Callewaert *et al.*, 2008) realizaram ensaios não-destrutivos em elementos laminados com SG: ensaios de flexão (3PB) no esquema estrutural de placas (Figura 2.11 a)) e ensaios de torção (Figura 2.11 b)), ambos às temperaturas de 5°C e 65°C. Os autores verificaram que para ensaios a temperatura superior (65°C) a película sofreu uma diminuição da sua rigidez, e que esta teve um impacto negativo muito superior na rigidez de torção das vigas, do que na rigidez de flexão. Esta diminuição da rigidez de torção das vigas foi notória para uma temperatura próxima da temperatura de transição vítrea do SG.

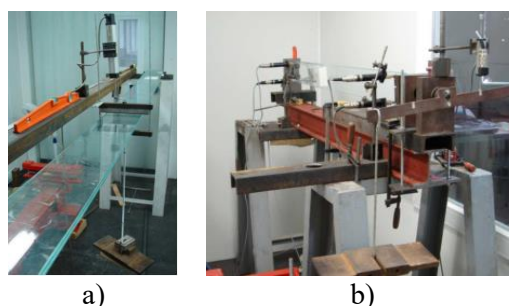


Figura 2.11 – Ensaios considerados por Callewaert et al. (2008)

Delincé e seus coautores (Delincé *et al.*, 2010), efetuaram um estudo, em vigas previamente fendilhadas (efetuada fratura regular em ambos os painéis. a meio vão), a fim de avaliar a influência da temperatura no comportamento pós-rotura de uma viga de vidro laminada com SG. As vigas foram ensaiadas num esquema de flexão de quatro pontos (4PB), às temperaturas

ambiente (23°C), 45°C e 60°C (Figura 2.12 a)). Para além disso a viga foi devidamente contraventada a fim de evitar encurvadura. Verificou-se que existiu uma significativa influência da temperatura, na resistência das vigas já fraturadas, uma vez que por exemplo o valor máximo suportado para as vigas a 23°C foi cerca de 3 vezes superior ao valor suportado pelas vigas homólogas a 60°C (Figura 2.12 b)).

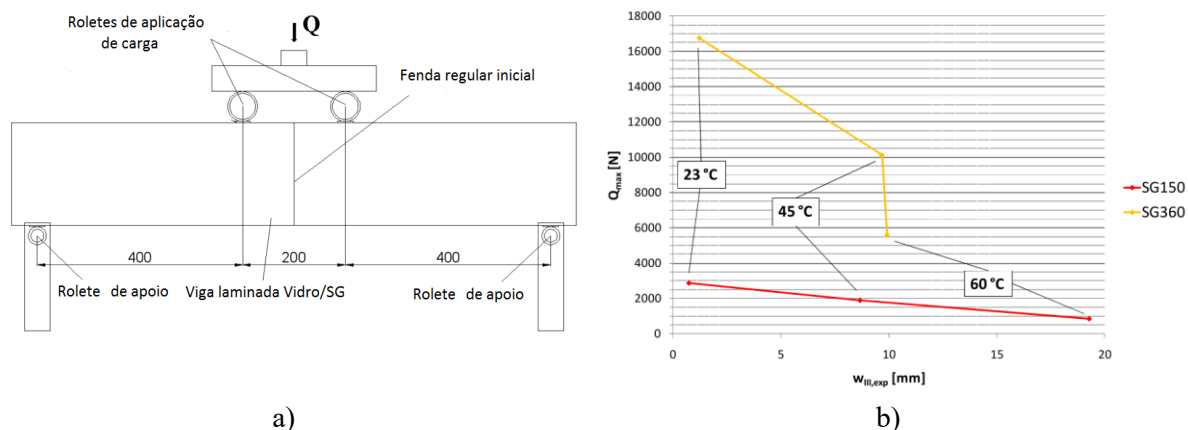


Figura 2.12- Estudo realizado por Delincé *et al.*, (2010): a) Esquema de ensaio considerado; b) resultados relativos à máxima carga (média) atingida por temperatura

Louter (2009) e Louter e coautores (Louter *et al.*, 2010 e Louter *et al.*, 2012) estudaram tanto a influência da temperatura (absoluta e em ciclos) como da humidade e duração da aplicação de carga, em amostras de vidro estrutural com SG. Para tal consideraram tanto pequenas amostras reforçadas com uma pequena inserção de aço (Figura 2.13 a)), em ensaios de puxar (*pull-out*), como vigas reforçadas pelo mesmo material (Figura 2.13 b)), em ensaios 4PB. Os níveis de temperatura analisados foram -20°C, 20°C, 60°C e 80°C.

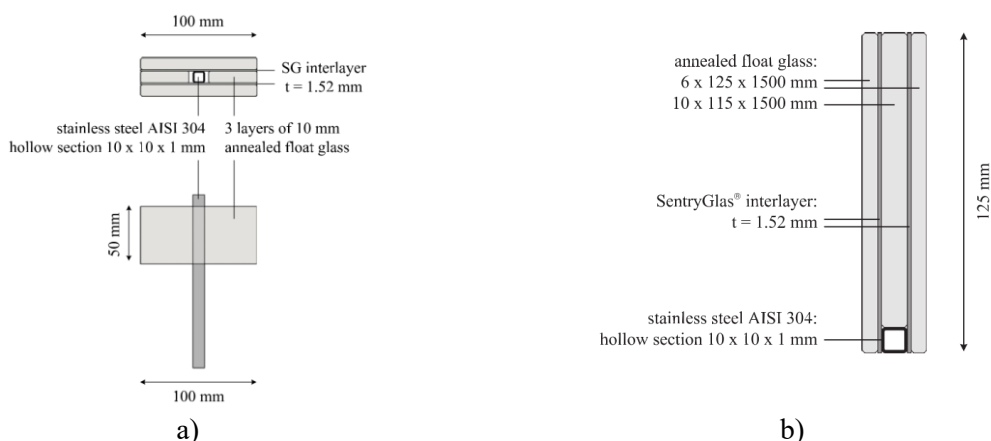


Figura 2.13 - Esquemas das amostras ensaiadas: a) pequena amostra com inserção de aço; b) viga reforçada com inserção de aço (Louter *et al.*, 2012)

Nos ensaios de puxe, verificou-se que a redução da rigidez da película provocou uma diminuição na capacidade de transferência de esforços (de -20°C para 80°C) entre o vidro e a inserção de metal, ocorrendo delaminação desta. Nos ensaios de flexão das vigas, verificou-se também uma clara influência da temperatura, uma vez que a 60°C existiu diminuição da capacidade pós-rotura destes elementos, resultante da descolagem do reforço de metal e consequentemente da diminuição da contribuição deste na capacidade residual das vigas.

2.5 Sistemas de Pré-esforço

Apesar do desenvolvimento de tratamentos de reforço do vidro (como a têmpera e a laminação), a natureza frágil deste material e a sua reduzida resistência à tração têm limitado a sua aplicabilidade a nível estrutural. Na verdade apesar dos tratamentos de reforço minimizarem a probabilidade do colapso de um elemento de vidro estrutural, ainda assim ele poderá ocorrer, devido a fenómenos imprevistos, como por exemplo vandalismo, ou erros de montagem que conduzam a dano local por concentrações de tensões (por exemplo nas ligações). Por este motivo, tem surgido estudos relativos à implementação de sistemas de pré-esforço, como medida de segurança adicional.

Bos e coautores (Bos *et al.*, 2004) desenvolveram um protótipo de uma viga parabólica, com secção transversal em T, reforçada e pré-esforçada (Figura 2.14). O cabo de pré-esforço foi introduzido, no reforço de secção quadrada oca, em aço inox.

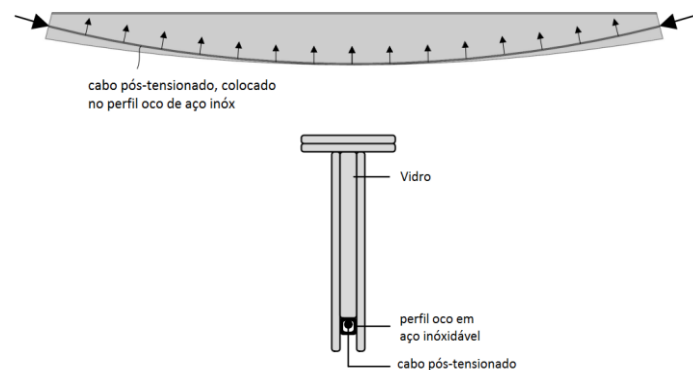


Figura 2.14 – Viga em T, parabólica, reforçada e pré-tensionada (Louter, 2011)

A viga demonstrou uma boa resistência inicial, e um bom comportamento pós rotura, com existência de resistência residual. No entanto, devido à força persistente de pós-tensionamento, a viga acabou por revelar uma rotura final explosiva, na zona de compressão, provocando o colapso da mesma.

Froli e Lani (2010) desenvolveram um sistema híbrido pré-esforçado de vidro-aço, em forma de treliça. O vidro consistia em vidro triangular temperado, laminado com PVB, com nós em

aço inox e por cabos de pré-esforço (Figura 2.15). Contrariamente aos outros sistemas, a ligação entre os elementos não era garantida nem por parafusos nem por adesivos, mas sim por fricção.



Figura 2.15 – Vigas de vidro pré-esforçadas em forma de treliça, (Froli e Lani, 2010)

Para além do protótipo ter demonstrado resultados interessantes, conseguindo-se uma rotura dúctil, salienta-se o facto de a solução permitir vencer vãos superiores aos tradicionais.

No âmbito do projeto S-Glass, Jordão e coautores (Jordão *et al.*, 2014) iniciaram o estudo em vigas de vidro laminadas, reforçadas externamente por sistema de 2 cabos idênticos de pré-esforço, cuja continuação do estudo é apresentado e debatido na presente dissertação. Foram realizados modelos numéricos que permitiram obter um traçado otimizado do cabo de pré-esforço, e posteriormente efetuado um ensaio à escala real (ensaio piloto, PS_TA_0, na presente dissertação). Os resultados demonstraram ganhos notáveis em termos de resistência e ductilidade.

Weller e Engelmann (2014) adotaram um sistema de pré-esforço denominado por "*Spannglass beams*", que consiste na colocação de um cabo (ou dois) embebido entre duas vigas de vidro laminado temperado (ou vidro termo endurecido), tendo sido consideradas quatro geometrias distintas (Figura 2.16). A ligação entre os elementos foi garantida por um desviador que, para além de suportar a viga, garante também uma maior rigidez de torsão ao sistema. As vigas foram ensaiadas à flexão (4PB).

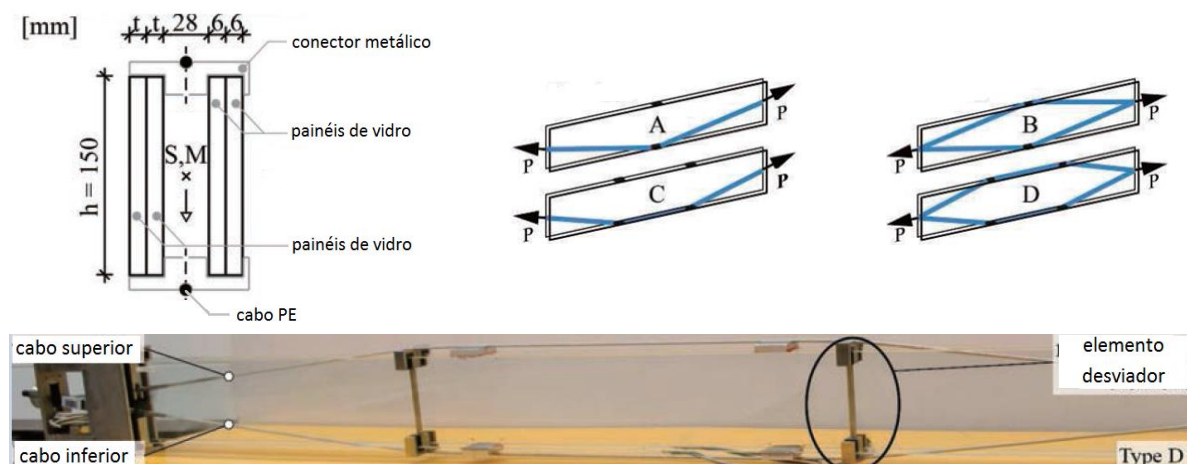


Figura 2.16 - Esquemas das geometrias consideradas e fotografia do Tipo D, "*Spannglass beams*" (Weller e Engelmann, 2015)

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Apesar da crescente utilização do vidro estrutural na arquitetura contemporânea, até à data ainda não existe formulação de dimensionamento, ou disposições regulamentares exaustivas, para o cálculo de elementos constituídos por este material. Sendo o vidro estrutural habitualmente laminado, constituído por películas intercalares poliméricas, a temperatura influencia as características das referidas películas, e conseqüentemente o comportamento estrutural da secção compósita.

A presente dissertação tem como principal objetivo não só avaliar o comportamento de vigas de vidro estrutural sujeitas à ação térmica, como também analisar quais os benefícios da introdução do sistema de pré-esforço na capacidade resistente da viga à flexão. Pretende-se compreender o comportamento destes elementos em termos de resistência e deformabilidade, e identificar quais os parâmetros que mais o influenciam. Pretende-se, ainda, a obtenção de valores para uma futura calibração de modelos numéricos.

Foi definida uma campanha experimental, constituída por ensaios realizados à escala real com carregamento térmico, em câmara térmica, bem como ensaios de referência à temperatura ambiente, com e sem sistema de pré-esforço. Foram ainda realizados na mesma escala ensaios de pré-condicionamento térmico, a fim de caracterizar o período de tempo necessário para a estabilização da temperatura ao longo da viga. Foram previstos também ensaios piloto a fim de detetar eventuais lacunas no ensaio, permitindo proceder ao seu afinamento. No Quadro 3.1 constam os ensaios realizados à escala real.

Foram também realizados ensaios de pré-condicionamento térmico, mas a escala reduzida.

Quadro 3.1 - Ensaios realizados à escala real

Nomenclatura	Temperatura	Cabo de PE	Nº provetes
TA_0 (Ensaio piloto)	T. Ambiente	Não	1
T75_0 (Ensaio Piloto)	T. Ambiente, 50°C, 75°C	Não	1
TA_1 ; TA_2	T. Ambiente	Não	2
T50_1 ; T50_2	50°C	Não	2
T80_1 ; T80_2	80°C	Não	2
PS_TA_0 (Ensaio Piloto)	T. Ambiente	Sim	1
PS_TA_1 ; PS_TA_2	T. Ambiente	Sim	2
PS_T50_1 ; PS_T50_2	50°C	Sim	2
PS_T80_0 ; PS_T80_1 ; PS_T80_2	80°C	Sim	3

3.2 Geometria e esquema de ensaio

As amostras ensaiadas foram vigas de vidro laminado de dimensão 3000×300 mm, cuja secção transversal era composta por dois painéis de vidro recozido de 10 mm cada, unidos entre si por uma película de SentryGlas® com 1,52 mm. As vigas apresentavam aresta biselada e polida após laminagem, com perfeito nivelamento entre vidros, sendo ensaiadas numa posição vertical, em esquema de flexão de quatro pontos (4PB), de acordo com o esquema da Figura 3.1. Os sistemas de ensaio utilizados tanto para ensaios com solicitação térmica, como ensaios à temperatura ambiente são os ilustrados na Figura 3.2.

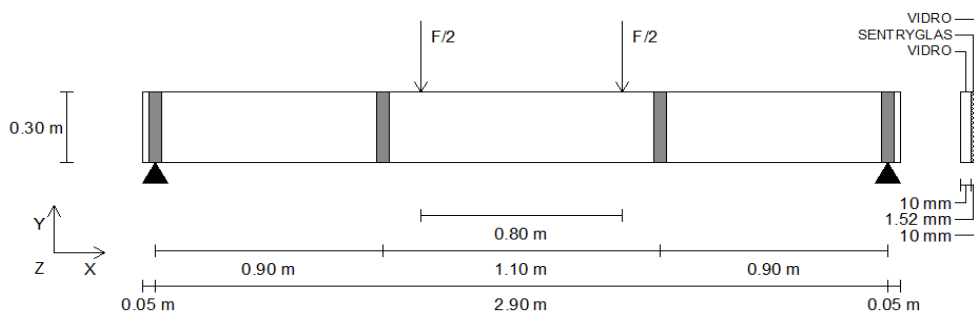


Figura 3.1 - Esquemática da geometria e esquema de ensaio (Jordão *et al.*, 2015)

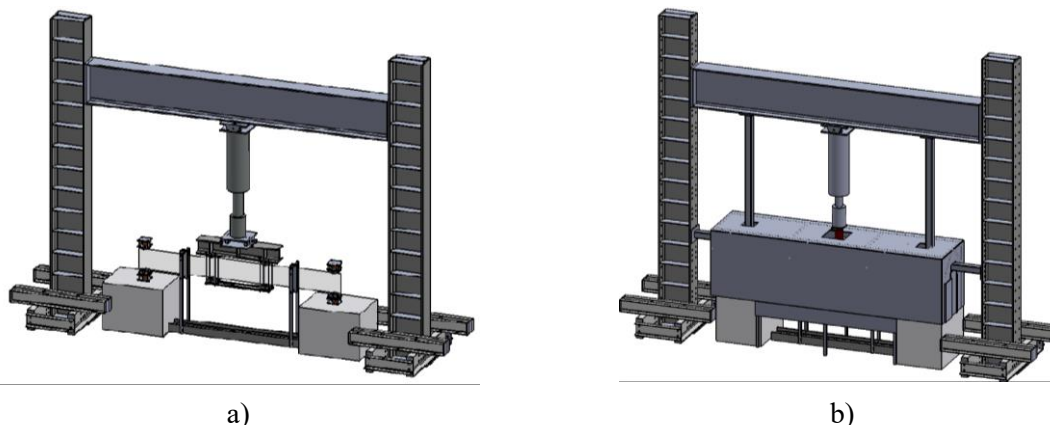


Figura 3.2 - Esquema de ensaio para vigas à escala real: a) ensaios à temperatura ambiente; b) ensaios termomecânicos (Jordão *et al.*, 2015)

Na construção do sistema exterior de ensaio, uma vez que a deformação elástica neste tipo de vigas é muito reduzida, foi necessário construir um sistema o mais indeformável e robusto possível. Como tal o sistema era constituído por um pórtico de elevada rigidez e dois blocos de betão, unidos entre si, por vigas de rigidez. Deste modo foi possível a determinação da deformação efetiva da viga em estudo.

Na Figura 3.3 encontra-se uma perspetiva global do sistema de ensaio, bem como o respetivo provete já devidamente preparado.

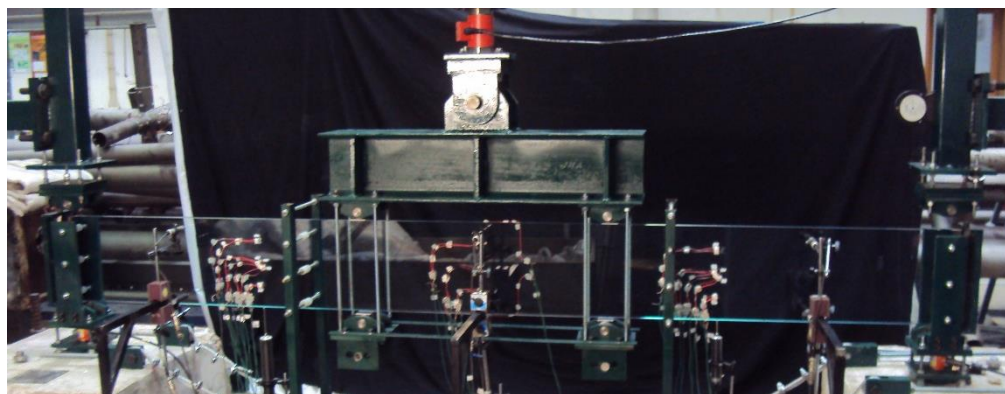


Figura 3.3 – Perspetiva do sistema de ensaio

A viga foi contraventada lateralmente em quatro locais, junto aos apoios, e na zona de aplicação da carga, por meio de parafusos sem fim, capeados com círculos de nylon, a fim de reduzir o atrito entre o sistema e as vigas (Figura 3.4 (a-b)). Este sistema de contraventamento possuía a vantagem de ser de fácil montagem e desmontagem, e ser reutilizável de ensaio para ensaio. Para a aplicação do carregamento mecânico foi utilizado um atuador hidráulico, *Dartec/Servosis* de 20 toneladas com curso de 200 mm, que transmitia ao carro de carga (Figura 3.4 c)) a força a aplicar na viga. Os apoios da viga eram rotulados, materializados por roletes de aço. A fim de minimizar o esmagamento e potenciação de danos superficiais, foram colocadas placas de alumínio (AW5454-H24) nos pontos de contacto, entre a viga e os roletes de aplicação de carga e de apoio (Figura 3.4 (d-e)). A escolha na utilização do alumínio, resultou de uma avaliação efetuada (Jordão *et al.*, 2015), onde se concluiu que não deveriam ser utilizados elementos flexíveis intercalados no sistema, uma vez que estes dificultavam a avaliação real da deformação do provete de vidro.

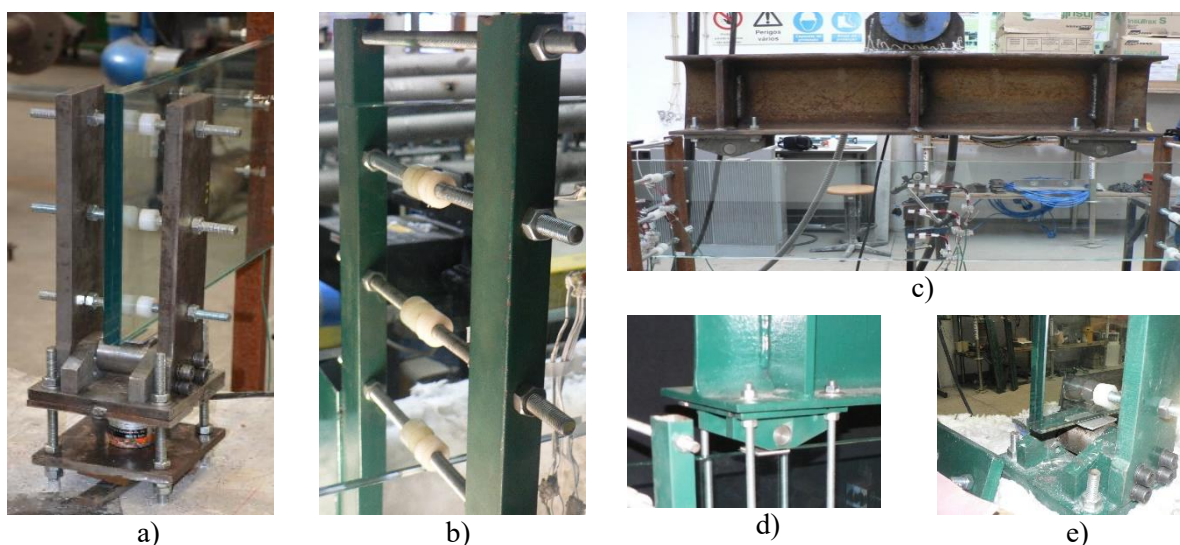


Figura 3.4 - Pormenores de sistema de ensaio: a) apoio simples contraventado; b) contraventamento na zona de aplicação da carga; c) carro de carga; d) rolete de carro de carga munido de chapa de alumínio; e) rolete de um apoio munido de chapa de alumínio

3.3 Sistema de pré-esforço

O esquema de ensaio considerado foi o mesmo dos ensaios sem pré-esforço. O sistema é constituído por dois cabos de aço exteriores, com 10 mm de diâmetro.

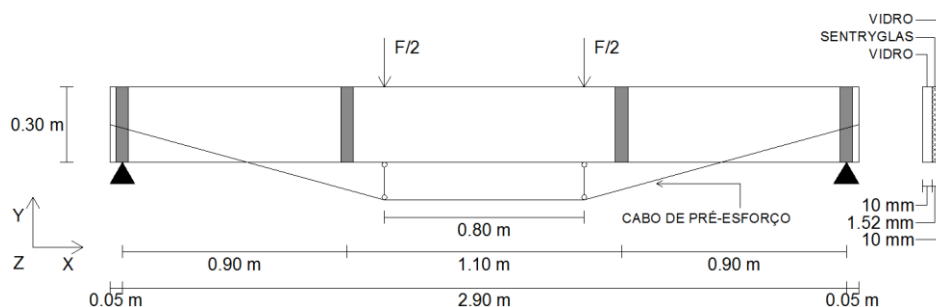


Figura 3.5 – Esquemática e geometria do esquema de ensaio com pré-esforço (Jordão *et al.*,2015)

A escolha da tipologia considerada prendeu-se com o facto deste sistema estrutural ser bastante comum em projeto e a técnica de pré-esforço utilizada ter-se mostrado muito eficaz neste tipo de estruturas (Firmo, 2015 e Jordão *et al.*, 2014). O posicionamento dos cabos (Figura 3.6) foi definido através de um estudo efetuado de otimização do traçado, com vista a garantir a máxima capacidade estrutural e viabilidade construtiva (Jordão *et al.*,2014). Os cabos apresentavam um traçado excêntrico, implementado por meio de um sistema de desviadores (Figura 3.7) e foram ancorados nas extremidades da viga, de acordo com a Figura 3.8.

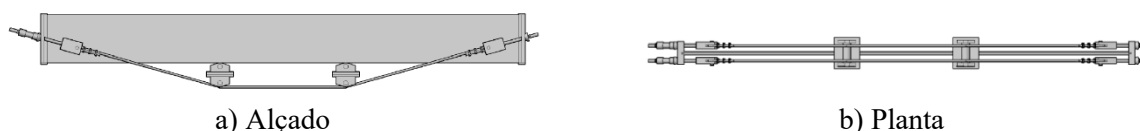


Figura 3.6 - Representação esquemática do Sistema de PE (Jordão *et al.*, 2015)

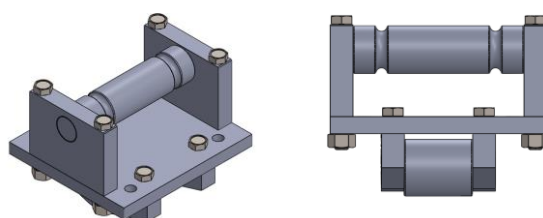


Figura 3.7 – Esquema de um pormenor do rolete do cabo de PE – desviador (Jordão *et al.*, 2015)

O sistema de desviadores é constituído por um rolete duplo, e foi concebido de forma a interferir o menos possível com os cabos (em termos de deformabilidade e perdas de PE) e transferir adequadamente a força vertical à viga. Na zona superior um rolete transmite a força vertical à viga, e na zona inferior o outro rolete, com dois sulcos, conduz e mantém os cabos em posição. Este sistema encontra-se ligado ao carro de carga através de varões roscados. Estes varões são

passantes na peça, com porca solta, uma vez que se fossem roscados ficaram sujeitos a cargas de compressão (devidas às força opostas exercidas pelo atuador, sentido descendente, e pelo cabo, sentido ascendente)

A ancoragem do sistema de cabos (Figura 3.8) foi concebida de forma a conferir liberdade de rotação aos cabos (ligação rotulada) a fim de possibilitar a acompanhar as deformações dos provetes ao longo do ensaio.

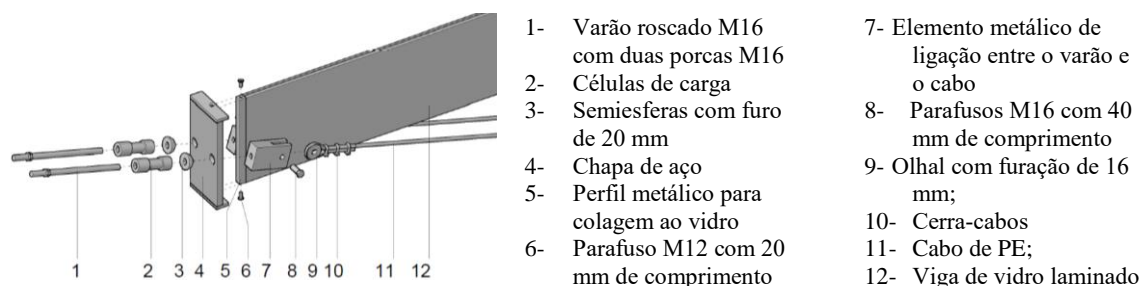


Figura 3.8 - Pormenor de ancoragem do cabo de PE à viga (adaptado de Jordão *et al.* 2015)

O pré-esforço foi aplicado nos cabos de forma gradual através do aperto das porcas e monitorizada através das células de carga, concebidas e dimensionadas especificamente para este sistema.

Para além da sua facilidade e rapidez de montagem, e da possibilidade de reaproveitamento de todos os elementos (com exceção do elemento 5, previamente colado em fábrica), este sistema possui a vantagem de evitar furos no vidro, reduções de resistência e rigidez e a introdução de dano potenciador de fenda.

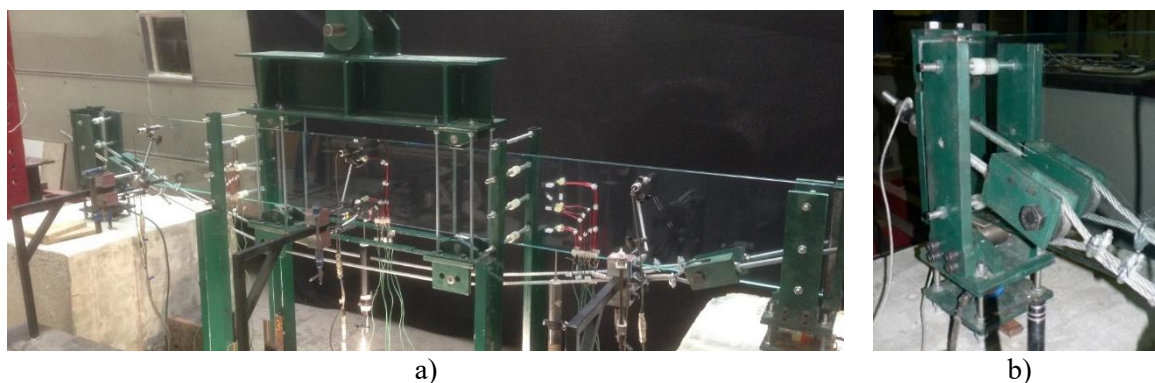


Figura 3.9 – Sistema de ensaio com pré-esforço: a) vista global; b) pormenor de ancoragem

3.4 Preparação e otimização da câmara térmica

O condicionamento térmico dos provetes, nos ensaios termomecânicos, foi implementado por meio de uma câmara térmica especialmente construída e otimizada para o efeito (Figura 3.10). As dimensões desta foram idealizadas para permitir a acomodação do provete de vidro, bem como

toda a instrumentação e dispositivos internos para condicionar a circulação do ar aquecido (Figura 3.11 a)).

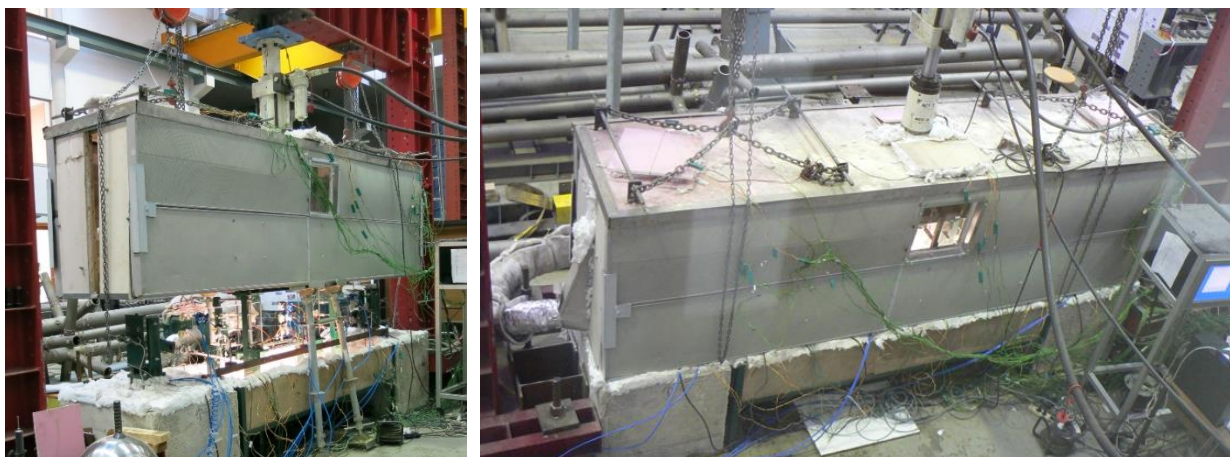
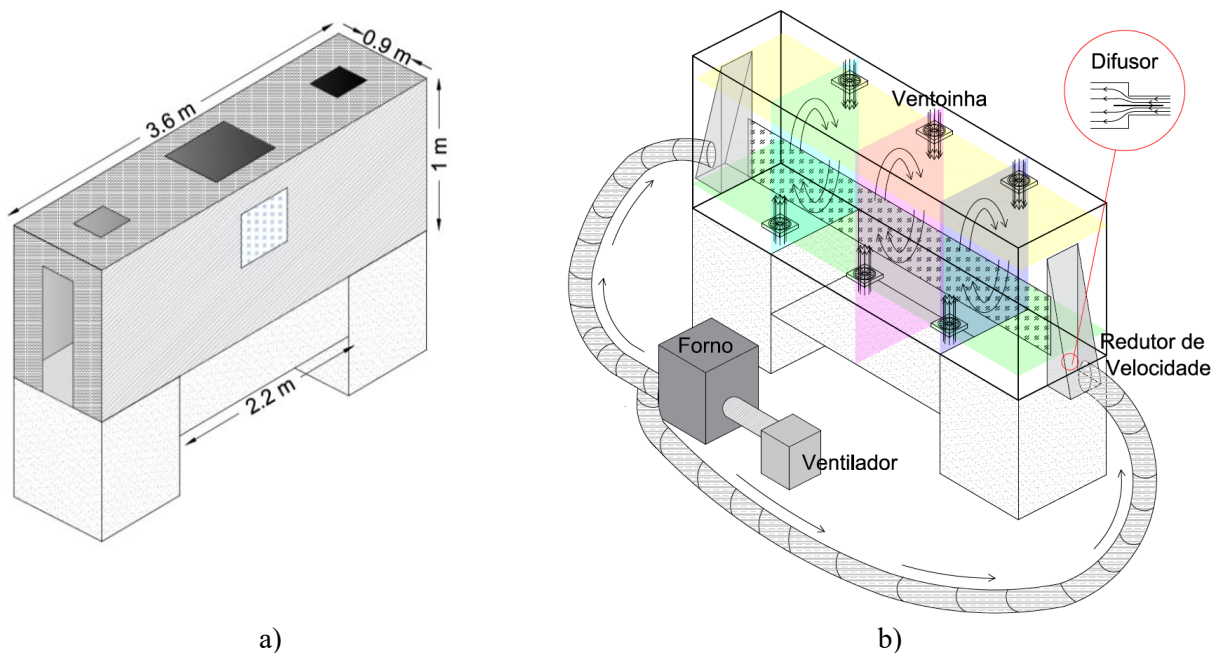


Figura 3.10 - Câmara Térmica

Todo o esqueleto sólido foi constituído por aço, para lhe conferir rigidez e foi revestido por painéis acústicos (uma vez que estes também conferem um bom isolamento térmico), à exceção do tampo e das laterais na direção transversal que foram constituídos por painéis de gesso cartonado intercalados por lâ-de-rocha. Na frente foi introduzida uma pequena abertura em vidro duplo, para a possível observação do provete durante o ensaio. Foi ainda prevista, uma zona rebaixada, também ela isolada com lâ-de-rocha, com o intuito de, para além de possibilitar a deformação vertical da viga, permitir a recolha de fragmentos de vidro resultantes da rotura da mesma, e ainda para a instalação da instrumentação adequada (Figura 3.12 a)).



a) b)
Figura 3.11 – Esquemas da câmara térmica: a) dimensões; b) circulação do ar

O aquecimento da câmara térmica foi efetuado por meio de um esquema de circulação de ar (Figura 3.11 b)). O ar foi aquecido através de um forno provido com resistências cerâmicas, também ele especialmente construído para o efeito (Figura 3.12 b)). A temperatura gerada pelas resistências cerâmicas foi regulada por um termopar colocado na saída do forno. A entrada do ar aquecido na câmara foi forçada por meio de um ventilador (Figura 3.12 b)), e a saída foi feita através das fugas da própria câmara. A fim de homogeneizar a temperatura no interior da câmara, procedeu-se à colocação de um redutor de velocidade, composto por um difusor plano, entre a tubagem de admissão de ar quente e a entrada da câmara (Figura 3.12 c)), dispersando assim o fluxo de ar. Foi ainda colocado um sistema de ventilação secundária, composto por seis ventoinhas, distribuídas por três secções e em dois níveis, que promoveram uma adequada circulação de ar no interior (Figura 3.12 d)).

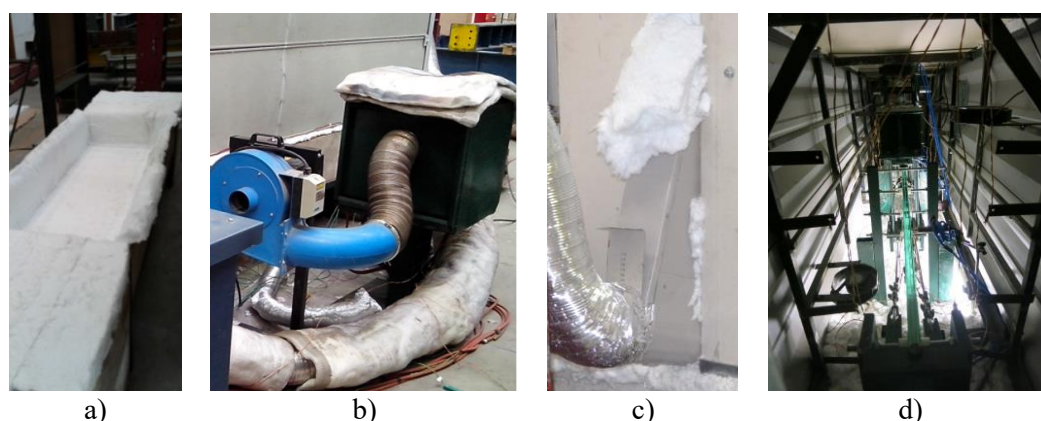


Figura 3.12 – Pormenores da câmara térmica: a) parte inferior (com zona rebaixada); b) Sistema de aquecimento de ar (forno) e ventilador (azul); c) redutor de velocidade na entrada de ar da câmara, com difusor plano d) interior, com ventoinhas e dispositivos de medição;

O desenvolvimento da câmara foi um processo moroso, e iterativo de otimização, que apenas foi considerado completo quando foi possível obter uma distribuição uniforme das temperaturas no interior da câmara e sobre a viga. A fim de avaliar a evolução da temperatura tanto no interior da câmara como na superfície dos provetes, foram considerados termopares, de acordo com o exposto futuramente na secção 3.5 Instrumentação. Para informações mais detalhadas sobre todos os testes de otimização efetuados, e respetivas alterações no *layout* da câmara consulte-se o Anexo A e Rolo (2014).

3.5 Instrumentação

A instrumentação englobou vários tipos de dispositivos de medição, comuns a todos os ensaios efetuados, cujos objetivos eram: 1) caracterizar o comportamento estrutural da viga e determinar quais os parâmetros mais decisivos na sua resposta experimental; 2) detetar e monitorizar eventuais efeitos não desejáveis (assimetrias e deformações fora do plano), e para poder tê-los em

conta na análise dos resultados; 2) obter valores para uma futura calibração detalhada de modelos numéricos; 4) redundância de medições.

De acordo com os objetivos requeridos foi definido o seguinte conjunto de instrumentação:

- Extensómetros unidireccionais e rosetas, para a caracterização do estado de tensão em pontos representativos, a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da altura da viga, em ambas as faces (Figura 3.14 a)). Foram da marca TML, da série F, uma vez que é a série constituída por extensómetros com auto compensação de temperaturas próprias para o material vidro (coeficiente de dilatação térmica de 8 ppm/°C). FLA 5-8 (extensómetros unidireccionais) e FRA-5-8 (rosetas) de acordo com a Figura 3.13. A cola utilizada na sua colagem foi a CN (cianoacrilato) e o material de revestimento aplicado para proteção foi o N-1, ambos da mesma marca, TML.



GLASS/CERAMIC MATERIALS						
Gauge pattern	Type	Gauge length (mm)	Gauge width (mm)	Backing length (mm)	Backing width (mm)	Resistance (Ω)
Single-element (G.F. 2.1 approx.)  FLA-5-8	FLA-2-8	2	1.5	6.5	3	120
	FLA-5-8	5	1.5	10	3	120
45°/90° 3-element Rosette (G.F. 2.1 approx.) Stacked type  FRA-5-8	FRA-2-8	2	0.9	ø7		120
	FRA-5-8	5	1.9	ø12		120

Figura 3.13 - Tabela do fabricante dos extensómetros recomendados para o vidro (TML, 2015)

- Defletómetros. Os verticais “U2” com 100 mm de curso da marca HBM, para avaliar as deformações verticais. Os horizontais “U3” com 10 mm de curso da marca TML, para avaliar o início e evolução de eventual deformação fora do plano. Colocados em apenas uma das faces (Figura 3.14 b)).
- Células de carga da marca TML, a fim de avaliar a simetria e confirmar a carga efetivamente transmitida à viga, localizadas sob o atuador e nos apoios. Nos ensaios em que foi adicionado o sistema de pré-esforço foram ainda colocadas células de carga em ambas as extremidades dos cabos para monitorizar a aplicação e evolução do pré-esforço nestes.

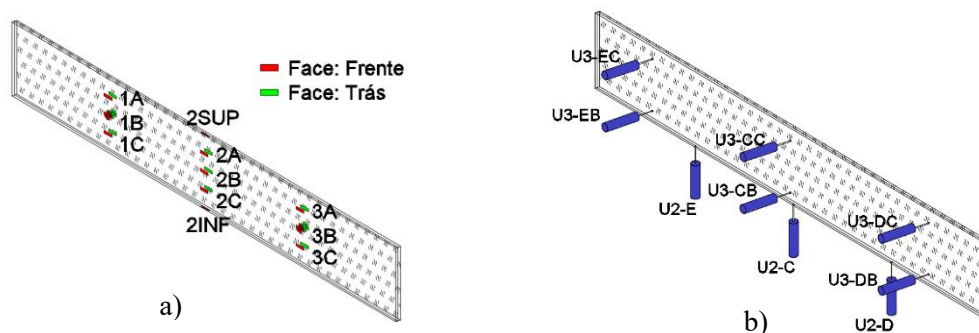


Figura 3.14 - Localização de a) extensómetros e b) defletómetros (Jordão *et al.*, 2015)

Nos ensaios termomecânicos a instrumentação compreendeu ainda termopares do tipo K, a fim de avaliar com precisão a temperatura na superfície dos provetes (Figura 3.15 (a-b)), e no interior da câmara: 18 termopares, dispostos em 3 diferentes secções e em 3 diferentes níveis (Figura 3.15 c)). A fim de verificar qual o melhor método para colagem e isolamento dos termopares nas vigas, foram testados dois métodos. Num o termopar foi colado com recurso a uma resina adesiva NP-50 da TML, no outro a colagem foi feita por via de fita-adesiva de alumínio coberta por silicone. Ambos os métodos se mostraram fiáveis relativamente ao isolamento do termopar ao ar envolvente, permitindo a medição efetiva da temperatura na superfície do vidro. No entanto a resina NP-50 foi a mais eficaz a manter o termopar corretamente colado, pelo que foi o material escolhido para a colagem destes elementos.

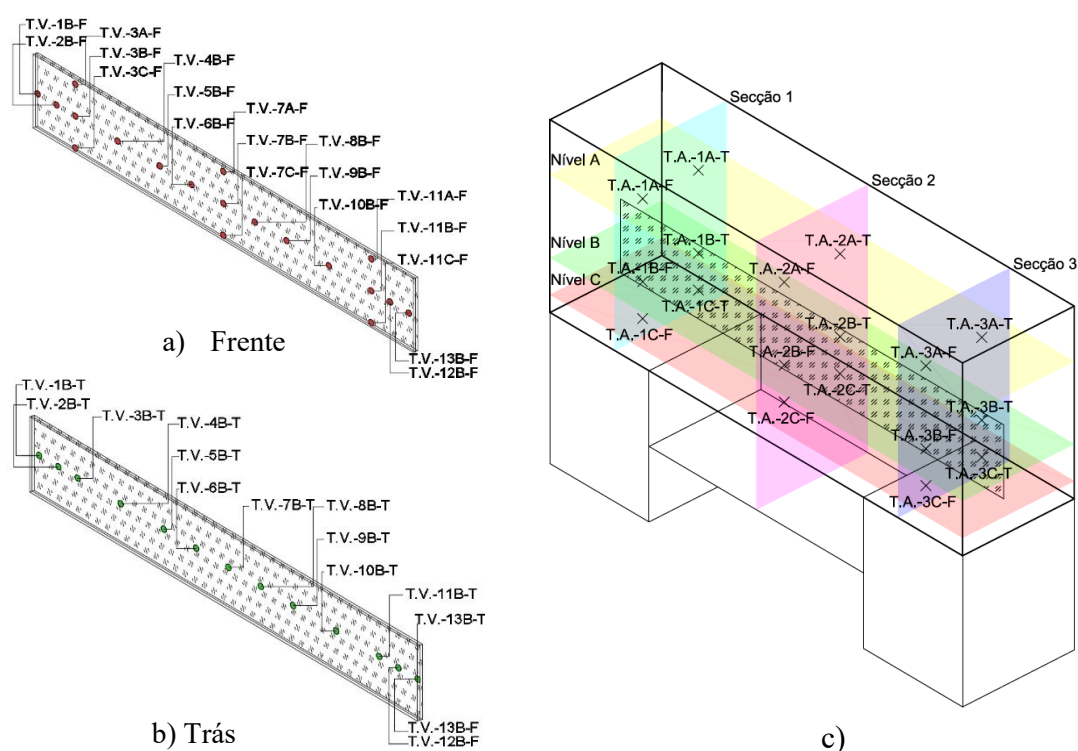


Figura 3.15 - Localização dos termopares: (a-b) na superfície da viga; c) no interior da câmara térmica (Jordão *et al.*, 2015)

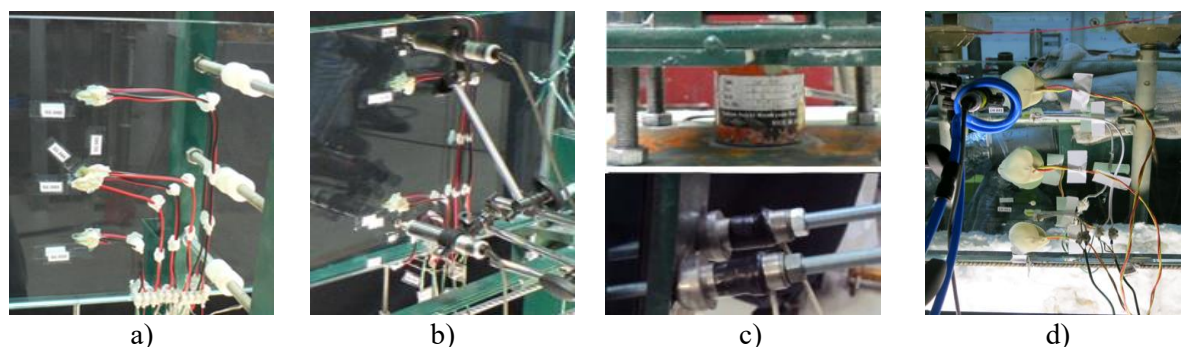


Figura 3.16 - Instrumentação: a) Extensómetros unidireccionais e rosetas; b) defletómetros; c) células de carga; d) termopares

No Anexo B encontra-se discriminada toda a instrumentação considerada em cada um dos ensaios. Para uma consulta mais detalhada sobre a instrumentação consulte-se Ferreira, 2014

3.6 Aspetos tecnológicos

Para os ensaios termomecânicos foi particularmente importante proceder-se ao isolamento das células de carga (Figura 3.17 a)), para que estas não fossem afetadas pelas variações de temperatura. Foram assim efetuados dois testes de isolamento/refrigeração destes elementos, idealizados para uma duração de cerca de 6 horas a 80°C (tempo máximo previsto para o condicionamento térmico dos provetes).

O primeiro sistema de isolamento considerado era constituído por uma caixa de madeira, revestida a lâ-de-rocha. A célula de carga ficaria no seu interior (Figura 3.17 b)). Para a medição e registo de temperaturas foram instalados 3 termopares, um junto à célula de carga, outro no meio do isolamento em lâ-de-rocha, e o último dentro do forno, para controlo da temperatura. Como ao fim de 2 horas a temperatura registada nos termopares, tanto junto à célula de carga como no interior do isolamento, já registavam 70 °C, o ensaio deu-se por concluído, mostrando que o método testado não era o ideal.

No segundo teste foi concebido um sistema de refrigeração. Para tal recorreu-se ao uso de serpentinas, por onde se dava a circulação de água, colocadas à volta das células de carga (Figura 3.17 c)). Foi ainda colocado isolamento em lâ-de-rocha a envolver o sistema (Figura 3.17 d)). A água para refrigeração (à temperatura ambiente) foi colocada dentro de um recipiente, com um termómetro para avaliar a evolução da sua temperatura após várias passagens em todo o circuito de refrigeração. Fazem ainda parte deste esquema, uma bomba e um termo ventilador para arrefecimento da água. Foram considerados dois termopares, um entre a célula de carga e a serpentina, e o outro no forno. Observou-se que para temperaturas no forno a oscilar em torno de 80 °C, a temperatura atingida junto à célula de carga foi de apenas 54 °C, e que a temperatura da água sofreu um aquecimento até aos 48 °C. Conclui-se assim que este método se mostrou eficaz no controle de temperatura junto às células de carga, e que deveria ser implementado em todos nos ensaios termomecânicos (Figura 3.18 a)).

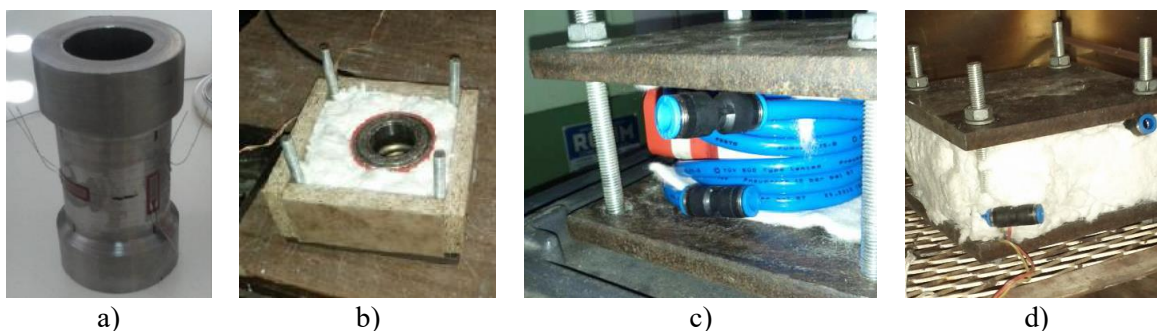


Figura 3.17 - (a) corpo da célula de carga; (b) 1º teste, caixa de isolamento para a célula de carga; (c-d) 2º teste, preparação do sistema de refrigeração para a célula de carga

Nos ensaios termomecânicos, foi ainda aplicado este sistema de refrigeração aos defletómetros, a fim de prevenir a sua danificação (Figura 3.18 b)).

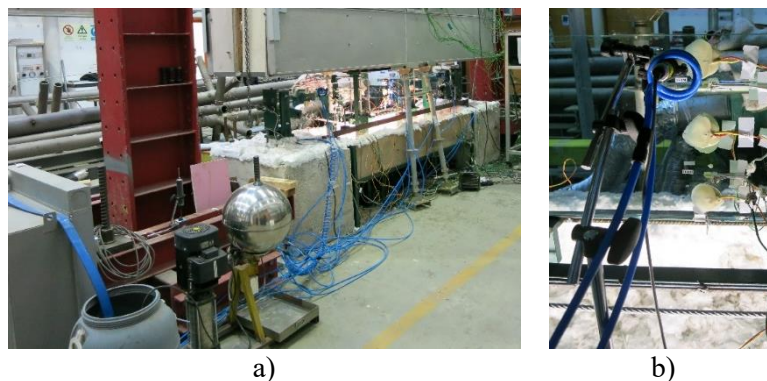


Figura 3.18 – a) Preparação de ensaio termomecânico com sistema de refrigeração; b) Pormenor de defletómetro com serpentina para refrigeração.

3.7 Ensaios de pré-condicionamento térmico

A temperatura tem um efeito significativo sobre o comportamento do vidro laminado. Por este motivo, quando se realiza um ensaio com solicitação térmica é fundamental que toda a estrutura esteja à mesma temperatura. No entanto, como o vidro tem má condutibilidade térmica, é necessário um período de tempo relativamente longo para que a viga adquira uma temperatura uniforme ao longo da espessura.

Define-se como período de pré-condicionamento térmico, o intervalo de tempo anterior ao ensaio, durante o qual deve ser mantida a temperatura do ensaio, até que a viga adquira uma temperatura uniforme ao longo da espessura.

A fim de estabelecer qual o período de pré-condicionamento térmico, foram efetuados dois ensaios, um a escala reduzida, outro a escala real. Em ambos os ensaios, foram colocados termopares tanto na superfície como no interior dos provetes, na película de SG, incluídos durante a laminação. Estes ensaios revestem-se de particular importância, uma vez que dadas as características viscoelásticas do SG, é importante verificar se este se encontra à mesma temperatura da restante secção compósita, a fim de efetuar uma avaliação o mais correta possível da influência da temperatura sobre este tipo de elementos estruturais.

Nesta secção são descritos os procedimentos, bem como discutidos os resultados relativos a cada um dos ensaios de pré-condicionamento térmico.

3.7.1 Ensaio a escala reduzida

A amostra considerada na realização deste ensaio apresenta as dimensões expostas na Figura 3.19 a), possuindo a mesma secção transversal que as amostras ensaiadas a escala real (Figura 3.1). O

ensaio foi efetuado numa pequena mufla industrial, considerando-se uma temperatura alvo de 80°C. Para o registo de temperaturas para além dos já referidos termopares, colocados na superfície e no interior do SG (Figura 3.19 b)), foram ainda colocados dois termopares simples e um duplo no interior da mufla (Figura 3.19 b)). Os termopares simples servem para monitorizar a temperatura do ar no interior da câmara térmica. O termopar duplo consiste numa associação de dois termopares simples soldados numa pequena chapa metálica, para se verificar a correcta calibração destes elementos (verificar se dois termopares no mesmo ponto liam o mesmo).

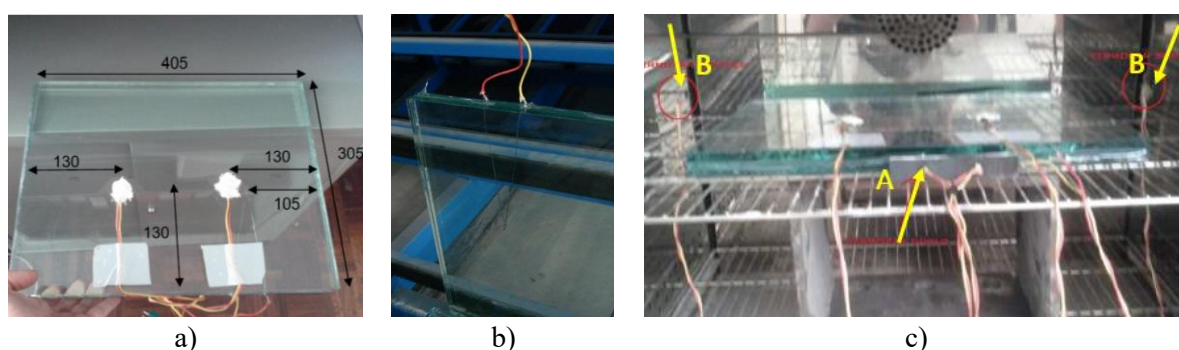


Figura 3.19 - (a) Amostra com respetivas dimensões (mm) e termopares na superfície e no SG; b) pormenor dos termopares no SG c) interior da mufla, com localizações dos termopares: A – duplos, B-Simples

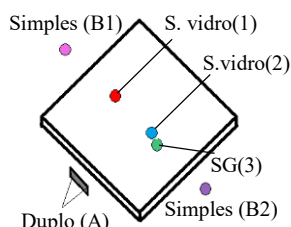
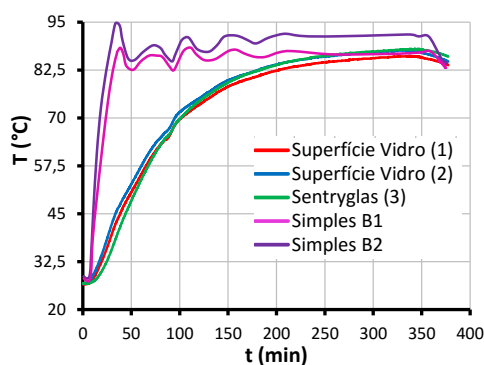


Figura 3.20 - Esquema com localização e identificação dos termopares

Apresentam-se de seguida, na Figura 3.21, os resultados relativos a este ensaio.



	(1)	(2)	(3)	(4)	
t (min)	SV 1	SV 2	SG	Média (1)(2)	Δ(%)
100	69.7	71.5	69.8	70.60	-1.1
200	82.4	83.9	83.8	83.15	0.8
300	85.6	87.1	87.4	86.35	1.2
377	83.8	84.7	86.0	84.25	2.1

$\Delta = ((3)-(4))/(3) \times 100$

Figura 3.21 - Resultados do ensaio de pré-condicionamento térmico a escala reduzida

Da observação dos resultados constata-se que no início do ensaio a temperatura é inferior no SG relativamente à da superfície, como esperado, pelo facto deste se encontrar mais protegido da fonte de calor. No entanto a partir de cerca de 80 minutos a temperatura no interior da película acaba por igualar da superfície, sendo este o período mínimo necessário para garantir que a temperatura se encontra uniforme ao longo de toda a espessura do provete.

Através das leituras do termopar duplo concluiu-se que a sua leitura era adequada, uma vez que ambos os termopares apresentaram aos mesmos valores ao longo de todo o ensaio.

3.7.2 Ensaio a escala real, T75_0

A amostra considerada na realização deste ensaio, possui as características geométricas comuns a todos os ensaios à escala real (Figura 3.1). Este ensaio foi realizado com uma viga idêntica e com o mesmo sistema de ensaio previamente apresentado para ensaios termomecânicos à escala real (Figura 3.2 b)). Foram considerados 3 conjuntos de termopares: 18 no interior da câmara, a fim de avaliar a temperatura do ar, 32 na superfície do vidro, em ambos os lados, e 2 termopares no SG no interior do provete. A posição dos termopares referidos é ilustrado na Figura 3.15 c), Figura 3.22 e na Figura 3.23.

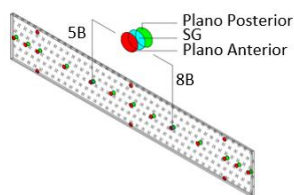


Figura 3.22 – Posicionamento dos termopares na superfície do vidro e na película de SG

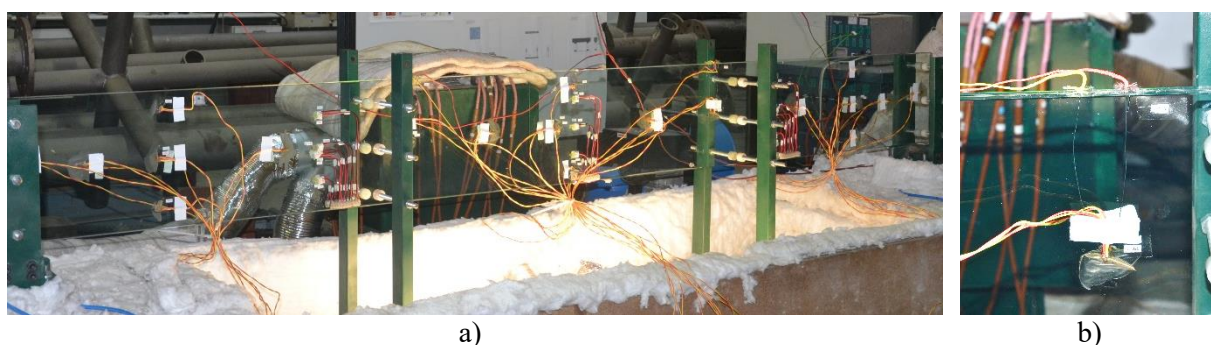


Figura 3.23 – Viga devidamente instrumentada: a) visão global; b) pormenor dos termopares no SG

Neste ensaio foi considerada uma estratégia de solicitação térmica que compreendeu 2 diferentes patamares de temperatura, 50°C e 75°C. O gráfico da Figura 3.24 a) ilustra a média da temperatura nos termopares no plano anterior (A) e posterior (B) da viga ao longo do ensaio. O mesmo gráfico ilustra também a evolução da temperatura registada nos termopares embebidos na película de SG, ao longo do ensaio. O gráfico da Figura 3.24 b) demonstra a evolução da temperatura ao longo de

toda a viga, em ambas as superfícies e na película de SG, para nove instantes ao longo do ensaio. O Quadro 3.2 apresenta os valores relativos aos gráficos referidos.

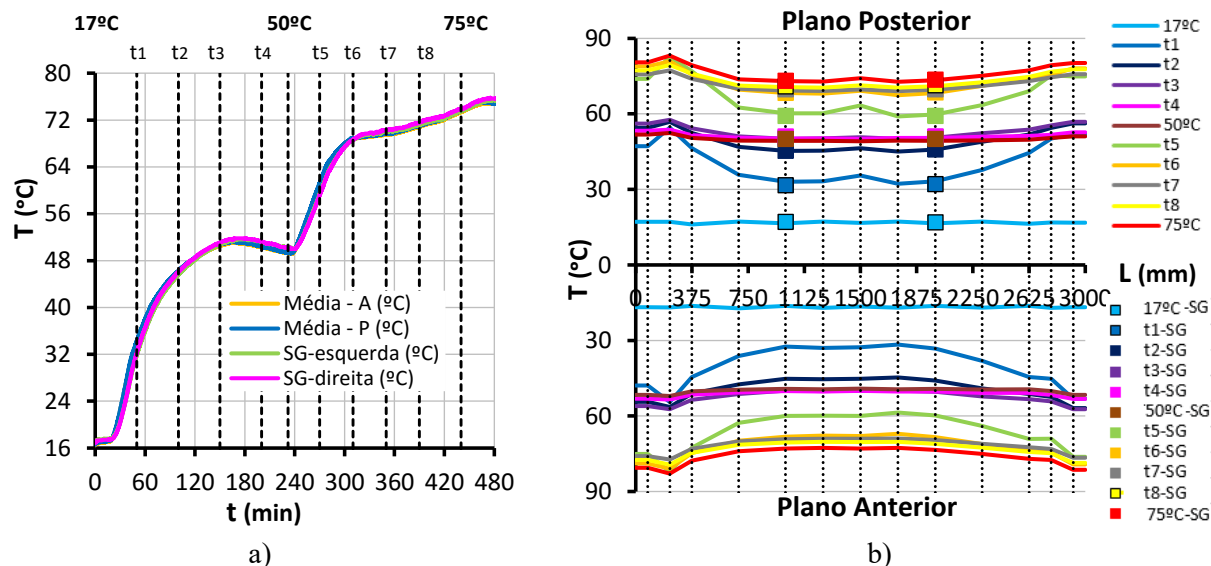


Figura 3.24 - a) Estratégia de carregamento térmico considerado; b) Resultados: evolução da temperatura nos termopares tanto na superfície como no SG ao longo do ensaio

Quadro 3.2 - Resultados do ensaio de pré-condicionamento térmico a escala real, nos termopares da película, e na superfície em posições adjacentes

t (min)	Termopares Esquerda (5B)					Termopares Direita (8B)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(%)	(5)	(6)	(7)	(8)	(%)
0 - 17°C	16,3	16,5	17,3	16,4	5,20	17	17,2	17,1	17,1	0,00
50 - t1	32,4	33	31,9	32,7	-2,51	31,6	32,2	32,3	31,9	1,24
100 - t2	45,2	45,3	45,6	45,25	0,77	44,7	45	46,1	44,85	2,71
150- t3	49,9	50,1	50,8	50	1,57	49,9	50,1	51,1	50	2,15
200 - t4	50,1	50,2	51,2	50,15	2,05	50,3	50,4	51,2	50,35	1,66
230 - 50°C	49,2	49,3	50,3	49,25	2,09	49,4	49,4	50,3	49,4	1,79
270 - t5	60	60,2	59,4	60,1	-1,18	58,6	59	59,4	58,8	1,01
310- t6	68,2	68,3	68,6	68,25	0,51	67,1	67,4	68,7	67,25	2,11
350- t7	69,2	69,3	70	69,25	1,07	68,9	69	70	68,95	1,50
390 - t8	70,5	70,6	71,1	70,55	0,77	70,3	70,4	71,6	70,35	1,75
440 -75°C	72,9	73	73,4	72,95	0,61	72,7	72,7	73,8	72,7	1,49

$$\Delta_{Esquerda} = \frac{(3)-(4)}{(3)} \times 100 \quad | \quad \Delta_{direita} = \frac{(7)-(8)}{(7)} \times 100$$

Considerando os resultados obtidos em ambos os ensaios de pré-condicionamento térmico, verifica-se que a diferença de temperatura entre as superfícies de vidro e a película de SG é reduzida, na ordem dos 2% praticamente desde o início do ensaio. Isto indica que a película de laminação adquire a temperatura do vidro num intervalo de tempo relativamente curto, sendo portanto o período de pré-condicionamento térmico bastante reduzido.

3.8 Ensaios experimentais sem sistema de pré-esforço

3.8.1 Introdução

Na realização dos ensaios experimentais sem pré-esforço foram efetuados ensaios em três diferentes níveis de temperatura: temperatura ambiente, 50 °C e 80 °C. Os ensaios à temperatura ambiente serviram de referência para os restantes ensaios, permitindo tirar elações sobre o efeito da temperatura no sistema estrutural em estudo.

Relativamente à estratégia de carga considerada, para além do carregamento térmico, foi ainda aplicado um carregamento mecânico em controlo de deslocamento, a uma velocidade de 0,05 mm/seg., até ao completo esgotamento da capacidade resistente da viga à flexão. A instrumentação considerada foi a apresentada previamente (secção 3.5).

São apresentados resultados sobre diferentes ângulos a fim de ilustrarem todos os aspetos relevantes, em relação ao total de oito ensaios: 2 ensaios piloto e 2 ensaios para cada nível de temperatura considerada (ambiente, 50°C e 80°C).

Inicialmente é feita uma análise em termos de comportamento global, descrevendo o mecanismo de rotura e analisando os principais pontos notáveis, indicadores dos danos estruturais e respetivas perdas de rigidez ao longo dos ensaios, bem como o respetivo padrão de fratura. Em seguida é realizada uma análise mais detalhada sobre aspetos fundamentais, nomeadamente é avaliada a existência ou não de efeitos não desejáveis, como deformações fora do plano (rotação de corpo rígido, flexão ou instabilidade) e se existe simetria nos resultados. Esta avaliação é de extrema importância, uma vez que os referidos aspetos têm implicações significativas na qualidade dos resultados e como tal o seu conhecimento é incontornável para uma correta interpretação dos mesmos. Nos gráficos com os resultados são também apresentadas as respetivas curvas analíticas truncadas no valor da carga de fissuração do vidro. Com exceção das curvas de comportamento global, a fim de facilitar uma maior compreensão, todos os resultados são truncados nesse mesmo valor de carga de fissuração do vidro, no entanto no Anexo C poderão ser consultados os gráficos completos para cada um dos ensaios. Por fim será efetuada uma breve comparação e discussão de resultados a fim de tirar conclusões sobre o efeito que as diferentes cargas térmicas têm no comportamento estrutural de uma viga de vidro laminado.

É ainda de referir que em alguns dos ensaios um ou outro resultado não é apresentado pelo facto de terem ocorrido erros de medição ou mesmo a danificação do próprio dispositivo.

3.8.2 Ensaios piloto

Para cada tipo diferente de ensaio realizado foi previsto um ensaio piloto. Este serviu para testar, afinar e avaliar o *layout*, instrumentação e procedimentos de ensaio, num processo iterativo de otimização. Serão aqui descritos e analisados cada um dos ensaios piloto.

3.8.2.1 Ensaio piloto, TA_0

De acordo com a instrumentação, geometria e o esquema de ensaio previamente apresentados, este ensaio foi efetuado à temperatura ambiente considerando unicamente o carregamento mecânico a uma velocidade de 0,05 mm/seg., até ao completo esgotamento da capacidade resistente da viga à flexão.

a) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

De seguida é apresentado o gráfico com o comportamento global da viga (deslocamento a meio vão vs força aplicada) onde se localizam os principais pontos notáveis, indicadores dos danos estruturais e respetivas perdas de rigidez, no decorrer do ensaio (Figura 3.25). No gráfico é também representada a respetiva curva analítica, obtida de acordo com a lei de Hooke e calculada com um módulo de elasticidade de 70GPa. São ainda apresentadas fotografias relativas à evolução do padrão de fratura (Figura 3.26).

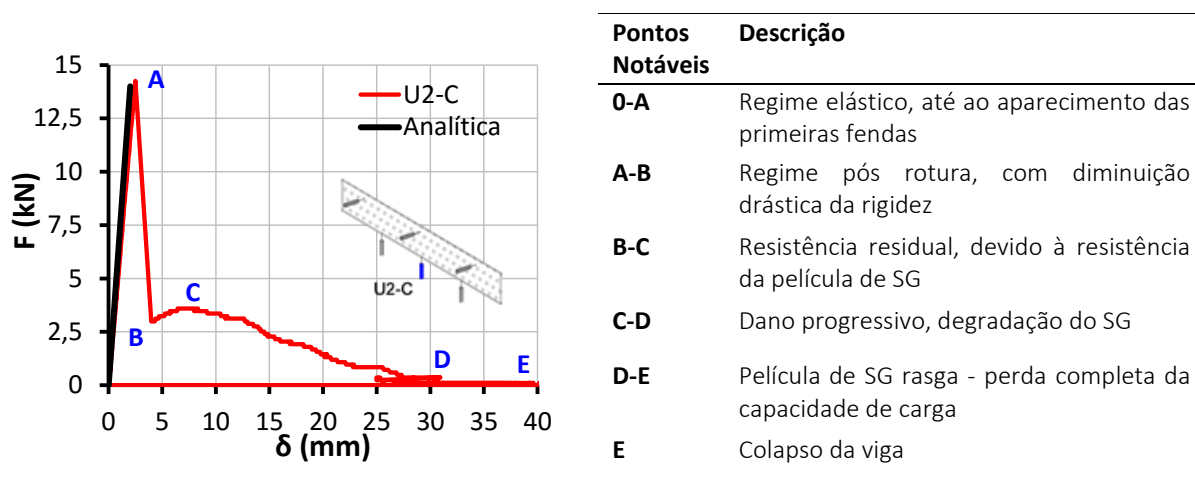


Figura 3.25 – Curva de comportamento global e respetivos pontos notáveis (δ a 1/2 vão)

É efetuada uma correspondência entre os diversos pontos notáveis ocorridos ao longo do ensaio (Figura 3.25) com o padrão de fratura resultante (Figura 3.26). Verifica-se que o padrão de fratura inicial (Ponto A) resultou de tensões de tração por flexão, que se formaram na zona de momento máximo, com a forma de diamante, radiando a partir de um único ponto na secção inferior da viga. Apesar da fratura ainda foi possível mobilizar algum ganho de resistência (B-C), pois dada a resistência da película de laminação, na zona fendilhada a carga passou a ser resistida num esquema estrutural distinto do que existia anteriormente: i) na zona tracionada a força de tração passou a ser suportada exclusivamente pelo SG; ii) na zona de compressão existiam duas zonas distintas, a já fraturada, onde a força de compressão passou a ser resistida maioritariamente pelo arco estrutural criado pelas partículas fraturadas, e a zona ainda intacta que continuou a funcionar no esquema laminado inicial. Com a continuação da aplicação da carga, a zona ainda intacta na parte superior da secção acabou também por ceder (Ponto C). Aos poucos, com o dano

progressivo, a película foi perdendo resistência, até que acabou efetivamente por rasgar (Ponto D). Depois deste momento, o nível de tensão de compressão no topo da secção provocou o esmagamento localizado do vidro o que conduziu ao esgotamento da capacidade resistente da viga (D-E), acabando mesmo por ocorrer o colapso, com uma quase completa separação da viga em duas partes distintas (Ponto E).

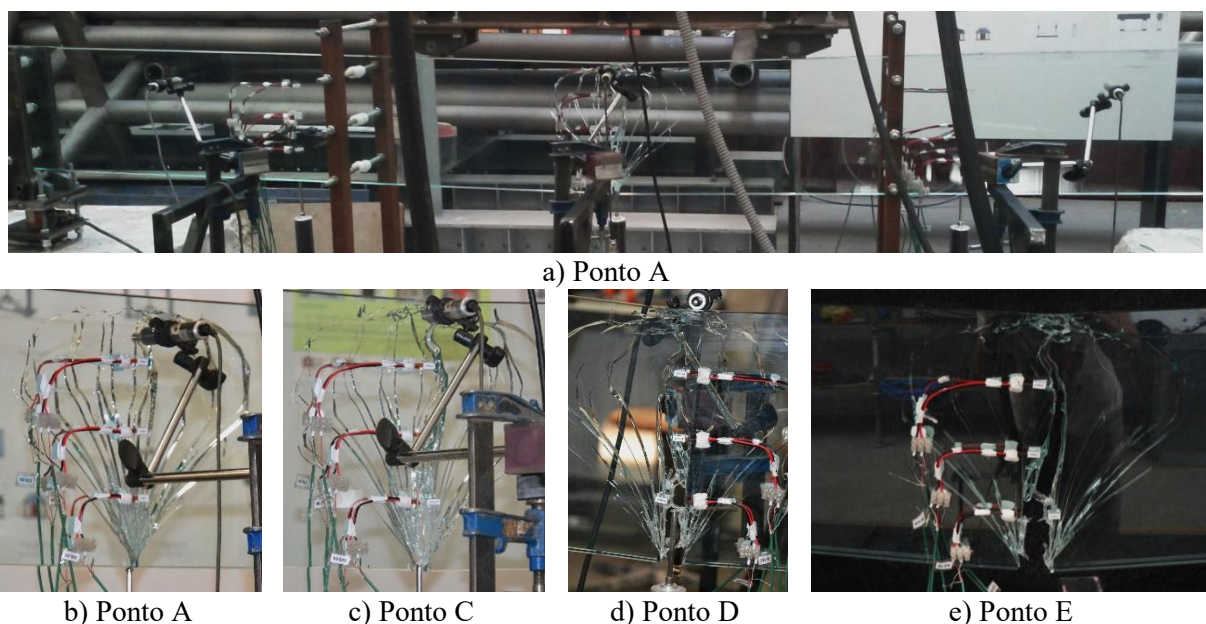


Figura 3.26 – Padrão de fratura nos instantes correspondentes aos pontos notáveis: a) vista global; (b-e) pormenores da evolução

b) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

A avaliação da simetria e de deformações fora do plano reveste-se de grande importância na medida em que se existirem desalinhamentos no sistema de ensaio, que conduzam a uma distribuição assimétrica de carregamento e conseqüente deformação fora do plano é necessário ter esse efeito em conta na análise de resultados. Para aferir da existência ou não destes efeitos são de seguida apresentados os gráficos com os resultados experimentais dos extensómetros e dos defletómetros. Comparam-se leituras que deveriam apresentar valores idênticos se esses efeitos não existissem, a saber:

- Os extensómetros, defletómetros e as células de carga em posições simétricas, devem registar valores idênticos. Se assim não for estamos em presença de assimetria na distribuição do carregamento (exemplo: Figura 3.27 a) extensões; Figura 3.29 a) e b) células de carga nos apoios e deslocamento verticais respetivamente)
- Os extensómetros na mesma localização nas duas faces da viga devem apresentar valores idênticos. Se assim não for estamos na presença de deformações fora do plano (Figura 3.27 b)). Este efeito também é visível nos gráficos que mostram o deslocamento no plano perpendicular à viga (Figura 3.29 c)).

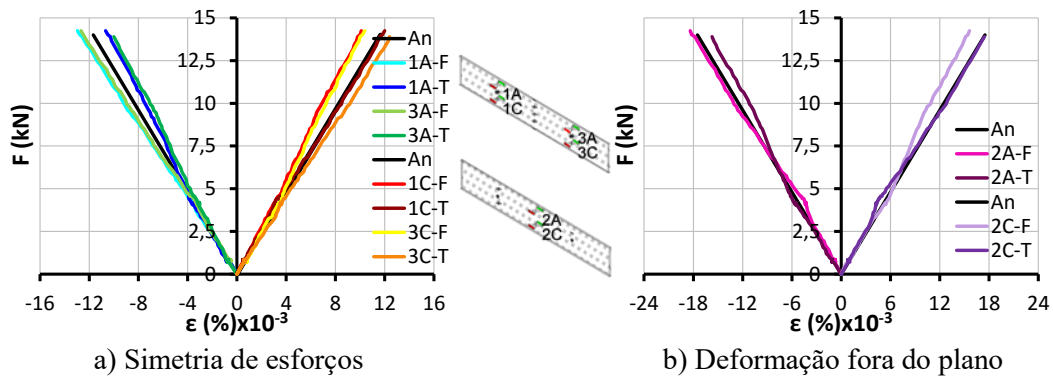


Figura 3.27 - Avaliação preliminar de resultados, força-extensão

Analisando os resultados da Figura 3.27, verifica-se que entre as extremidades esquerda (1) e direita (3), em posições homólogas, existe uma semelhança apreciável, tanto na face anterior como na face posterior, o que mostra existência de simetria de esforços. No entanto os resultados em posições homólogas na face anterior e posterior, embora simétricos em relação à curva analítica, não são completamente coincidentes, o que sugere existência de deformação fora do plano. Efetuando o mesmo tipo de leitura para os extensómetros colocados a meia altura da secção transversal (B) (Figura 3.28) verifica-se que o eixo neutro não passa exatamente lá, e que as tensões na direcção vertical c) embora muito reduzidas não são nulas. Estes factos confirmam que existe alguma flexão fora do plano.

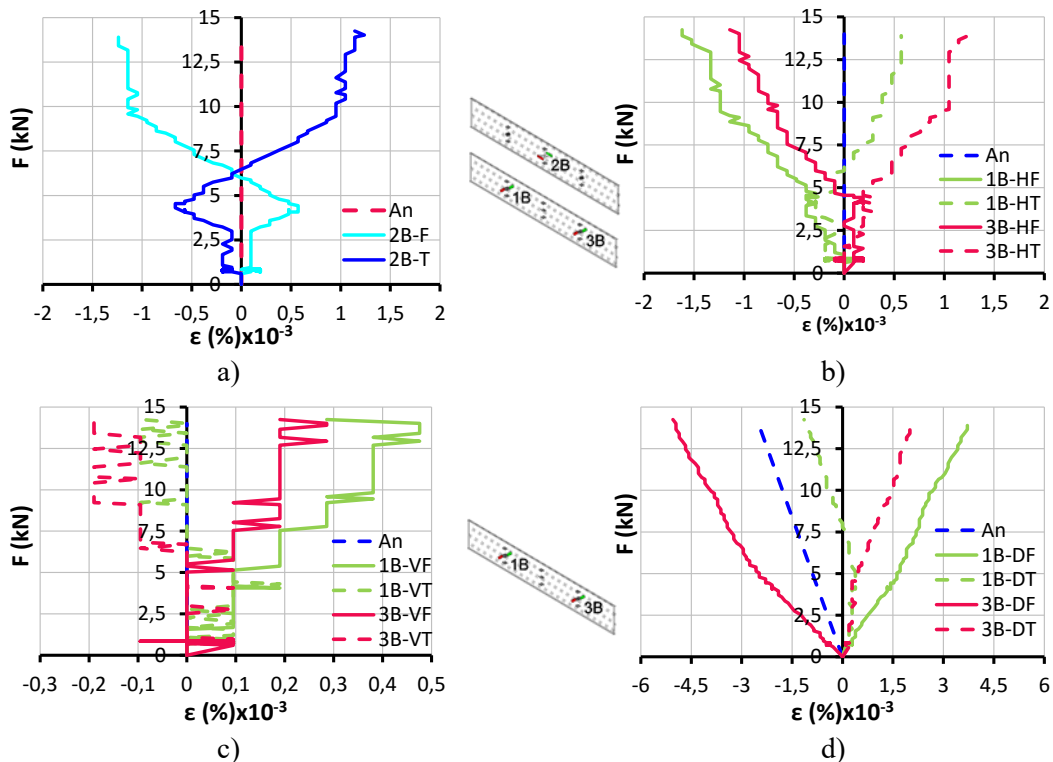


Figura 3.28 – Avaliação preliminar de resultados, força-extensão (1/2 altura da secção transversal)

Os resultados das células de carga (Figura 3.29 a)) e as leituras dos defletómetros verticais (Figura 3.29 b)) são simétricas e coincidentes o que confirma a simetria na distribuição de esforços na viga, já observada através dos resultados dos extensómetros. Já os resultados dos defletómetros horizontais (Figura 3.29 c)) permitem confirmar a existência de deformação fora do plano.

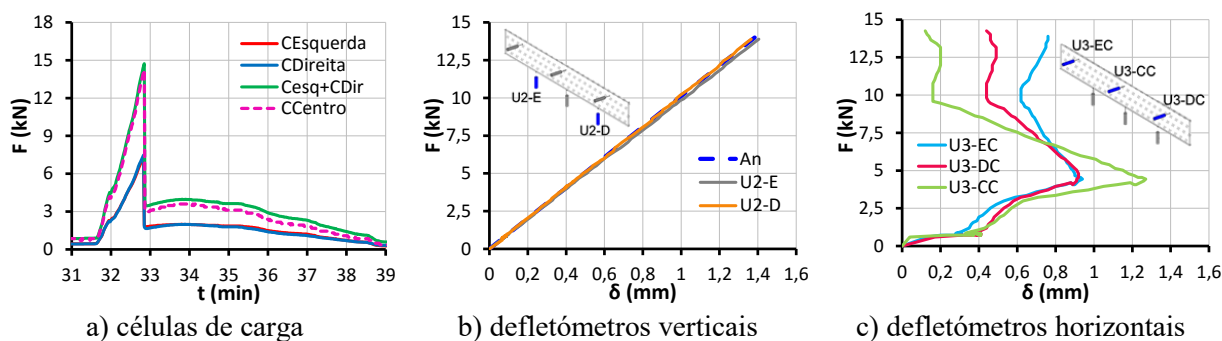


Figura 3.29 – Avaliação preliminar de resultados

Na Figura 3.29 c) observa-se também que a partir de uma carga de cerca de 4,5 kN, a deformação fora do plano da viga, muda de concavidade, facto que também é visível nos resultados gráficos dos extensómetros junto ao eixo neutro (Figura 3.28). Este facto deve-se a ajustes no sistema durante o ensaio, que conduzem a pequenas deformações de corpo rígido.

Conclui-se que apesar da distribuição das cargas ser suficientemente simétrica, existe alguma deformação fora do plano. Esta pode dever-se a imperfeições da própria viga ou ao posicionamento inicial do *layout*. De facto se existirem desalinhamentos do sistema, nomeadamente se a viga não estiver perfeitamente na vertical, se o carro de carga estiver ligeiramente descentrado ou se não estiver totalmente alinhado com os apoios (Figura 3.31), haverá flexão desde o momento inicial. A deformação fora do plano é no entanto muito reduzida, sendo que conduz a deformações máximas horizontais na ordem dos 6% da espessura da viga (Figura 3.31 (1)) e tensões (Figura 3.31 (2)) na ordem dos 3,20 MPa. Ambos os valores são suficientemente reduzidos para se considerar que não afetam a qualidade dos resultados finais. No Anexo E encontram-se os restantes resultados relativos à quantificação da deformação fora do plano em pontos representativos em todos os ensaios (diferença de tensões em posições homólogas em ambos os planos da viga) de acordo com a Figura 3.31.

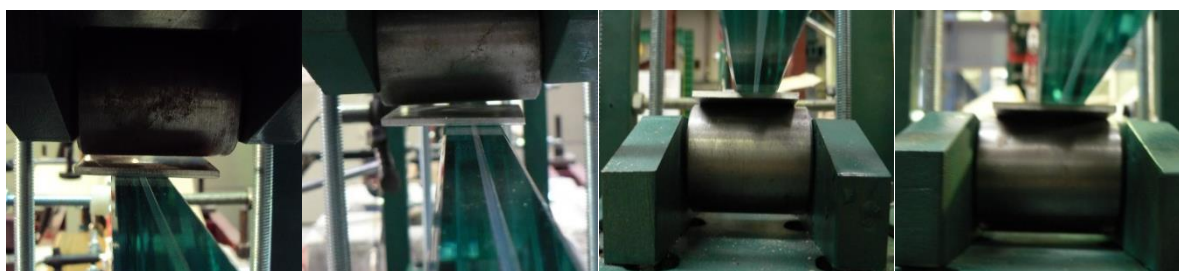


Figura 3.30 – Exemplos de desalinhamento da viga em relação ao carro de carga e aos roletes

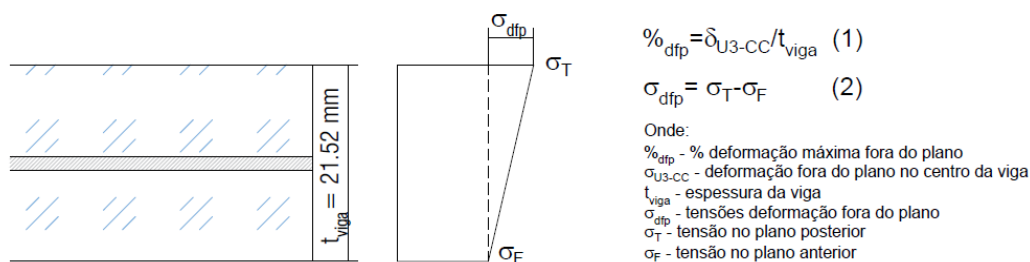


Figura 3.31 – Esquema para quantificação da deformação fora do plano

c) Otimização do procedimento de ensaio

Dos resultados do ensaio, foi possível retirar conclusões, sobre quais os aspetos a melhorar no sistema de ensaios.

No caso dos resultados experimentais dos defletómetros verticais (Figura 3.32 (a-b)), foi necessário proceder a algumas correções, uma vez o ajuste à curva analítica, determinada pela lei de Hooke não era bom. Foram inicialmente consideradas várias hipóteses para este desajuste nos resultados. Uma delas era a eventual deformabilidade dos elementos de alumínio nos apoios (secção 3.2). No entanto esta hipótese foi descartada, uma vez que a deformação destes elementos para a carga máxima aplicada era apenas de 0,003 mm. A outra era tratar-se de um próprio erro de medição, no entanto a simetria das leituras dos defletómetros simétricos (Figura 3.32 a)) indicava o contrário, como tal esta hipótese foi também ela descartada. Sendo assim atribui-se este desajuste ao deslocamento do corpo rígido, associado à deformabilidade dos aparelhos de apoio. Sendo esta a causa, o seu valor era constante ao longo da viga, e então foi possível a sua determinação, pela diferença entre os valores experimentais e os valores analíticos (Figura 3.32 c)). Essa diferença constante permitiu a correção gráfica dos valores.

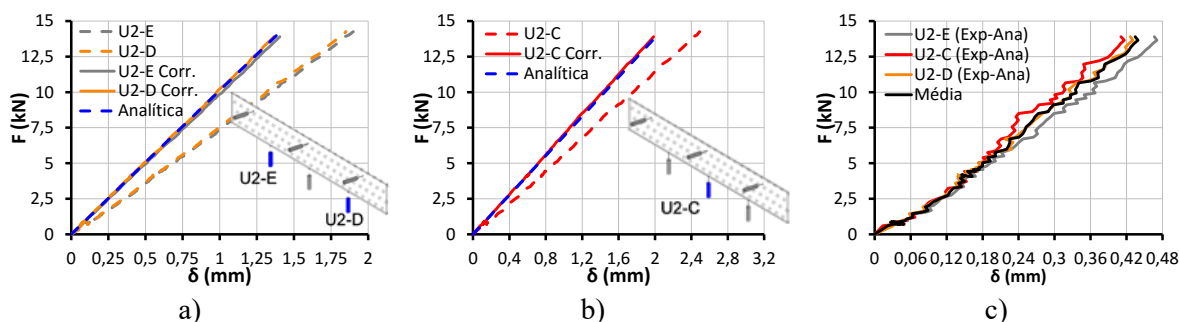


Figura 3.32 - Correção das leituras dos defletómetros verticais: a) U2-E e U2-D; b) U2-C; c) diferenças entre os resultados experimentais e os valores analíticos e respetiva média

Para além das correções acima referidas a efetuar nos resultados dos defletómetros verticais em ordem a uma correta interpretação dos resultados experimentais, deveriam ainda ser introduzidas as seguintes alterações no *layout* de ensaio:

- Melhorar o processo de colocação e ajuste da viga no *layout* de ensaio, para garantir a sua completa verticalidade;

- Melhorar o alinhamento, tanto dos apoios como dos pontos de contacto da viga com o carro de carga, para se evitar flexão fora do plano;
- Eliminar ou reduzir ao máximo as folgas nos aparelhos de apoio, de modo a evitar o deslocamento vertical do corpo rígido, que aparece nas leituras dos defletómetros, onde apenas deveria aparecer a deformação por flexão.

3.8.2.2 Ensaio piloto, T75_0

O objetivo deste ensaio piloto, para além da determinação do já mencionado período de pré-condicionamento térmico (secção 3.7.2), e tendo como referência o ensaio piloto (TA_0), foi a obtenção de informações genéricas sobre o comportamento estrutural do provete quando sujeito a solicitações térmicas e solicitações mecânicas em simultâneo. Possibilitou também aferir sobre a necessidade de introduzir eventuais melhorias no *layout* de ensaio constituído pela câmara térmica. A instrumentação considerada para além dos anteriormente referidos termopares, tanto na superfície como na película, inclui também extensómetros e defletómetros de acordo com a Secção 3.5. Em relação aos defletómetros uma vez que a realização deste ensaio envolvia temperaturas próximas do limite referenciado pelo fornecedor, e o sistema de refrigeração (secção 3.6) ainda não tinha sido desenvolvido, para estes elementos, foi imperativo a colocação destes no exterior da câmara a fim de evitar a sua danificação. Desta forma para se vencer a distância entre eles e a viga, foi necessário considerar outro tipo de defletómetros, com um curso superior ao utilizado no outro ensaio piloto (TML SDP 200, com um curso de 200 mm) e recorrer ao uso de um fio metálico tencionado a ligá-los à viga (Figura 3.33). No caso dos defletómetros que liam a deformação vertical (U2), não existia espaço disponível para os colocar por baixo da câmara e fora dela. Por este motivo, estes foram colocados na posição horizontal, no entanto foi feita a necessária mudança de direção, através do fio metálico, com recurso a uma roldana.

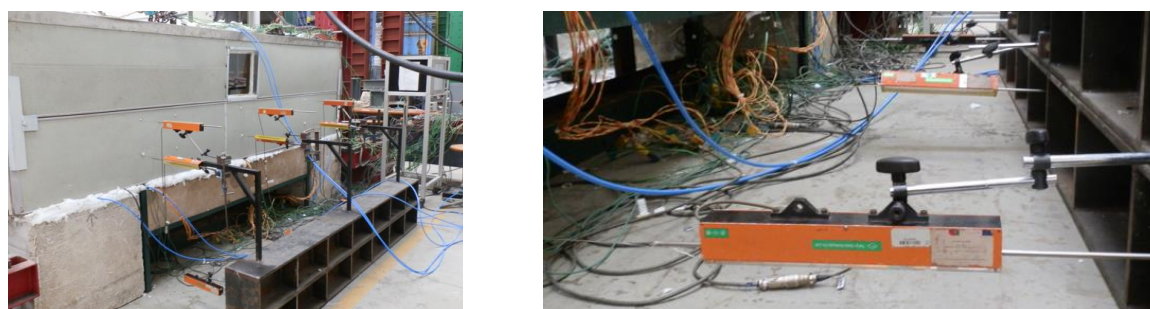


Figura 3.33 – Defletómetros considerados no exterior da câmara térmica

A estratégia de carga compreendeu três fases distintas de acordo com a Figura 3.34. A primeira englobou apenas o carregamento mecânico com posterior descarga, no qual foi aplicado apenas 60% da carga até ao aparecimento da primeira fenda relativo ao ensaio piloto TA_0, para não se provocar danos significativos na viga, pois pretendia-se efetuar carregamentos adicionais. A

segunda fase englobou a aplicação de carregamento térmico até aos 50°C, seguido de aplicação de um carregamento mecânico e respetiva descarga. Nesta fase, considerando a simultaneidade do carregamento térmico com o mecânico, o nível de carregamento mecânico aplicado foi inferior (30%) pelo mesmo motivo da fase anterior. Na terceira e última fase o carregamento térmico foi aplicado até aos 75°C seguindo de um carregamento mecânico até à rotura da viga.

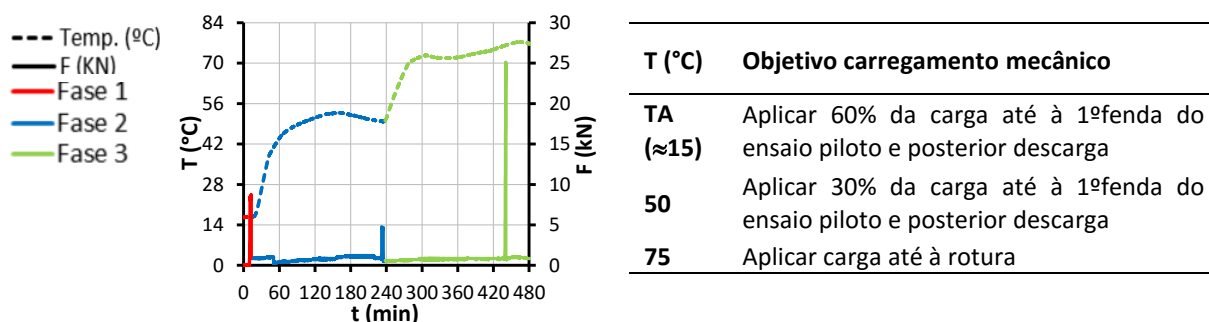


Figura 3.34 – Estratégia de carga considerada

a) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

É de seguida apresentado o gráfico com o comportamento global da viga (deslocamento a meio vão vs. força aplicada) com diferentes fases de carregamento (Figura 3.35), bem como respetivo o padrão de fratura (Figura 3.36).

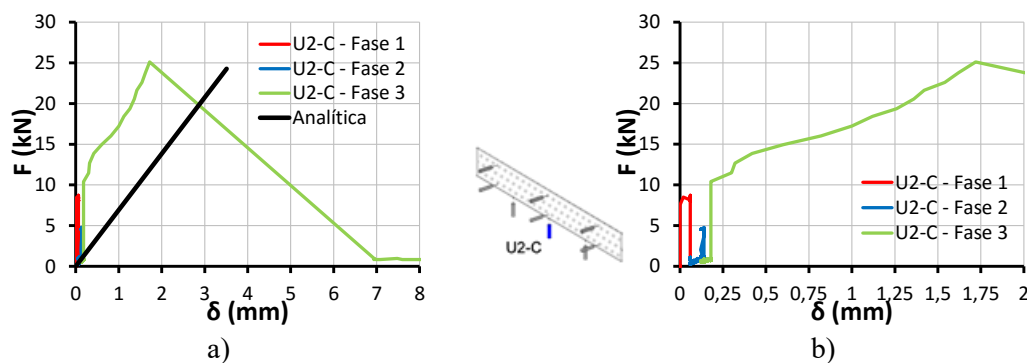


Figura 3.35 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão): a) curva total; b) pormenorização da fase inicial da curva

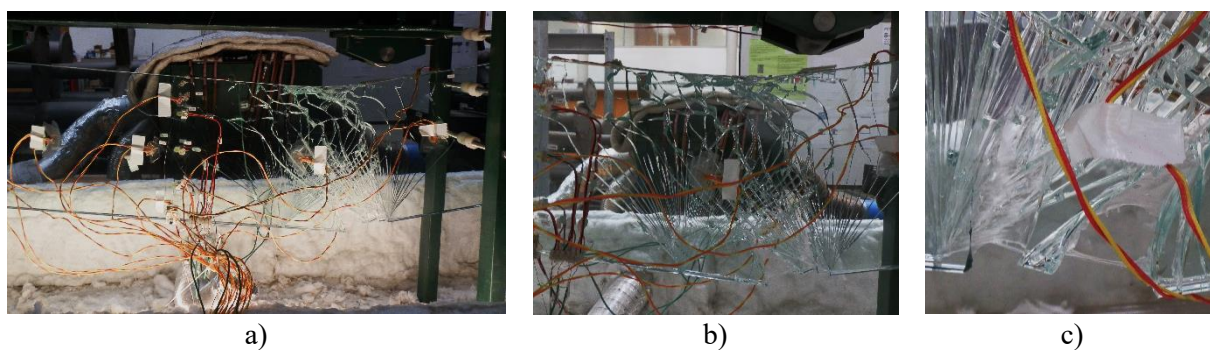


Figura 3.36- (a-b) Padrão de fratura; c) Pormenorização da fratura

Constatou-se que os fios metálicos utilizados no sistema dos defletómetros, para a colocação destes no exterior da câmara, deveriam ser mais esticados, a fim de possibilitar uma medição mais assertiva dos deslocamentos. Também as aberturas na câmara térmica para a passagem destes fios, apenas foram preparadas para medições até à rotura, não sendo possível obter informações precisas no comportamento pós-rotura dos provetes.

Verificou-se que com o aumento da temperatura existiu degradação das propriedades da película, apresentando um comportamento mais fluído (Figura 3.36 (c)), perdendo a capacidade de manter os painéis de vidro unidos num conjunto monolítico, provocando fendilhação em momentos diferentes dos 2 painéis (frente e trás). No entanto esta degradação do SG e a consequente descolagem dos painéis de vidro, não influenciaram a resistência em termos de primeira fratura. Na verdade a carga é apenas suportada pelos painéis de vidro (contribuição da película é negligenciável), e como tal apenas depende da existência ou não de pequenos defeitos superficiais resultantes do manuseamento e processos de fabrico

b) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

São de seguida apresentados os resultados gráficos relativos aos extensómetros e defletómetros e as respetivas curvas analíticas. Uma vez que este ensaio englobou diversas etapas de solicitação, a fim de facilitar a interpretação dos efeitos de cada um dos carregamentos aplicados, na Figura 3.37 e na Figura 3.39 encontram-se identificadas em separado cada uma dessas etapas (num ponto representativo), para as extensões e deformações horizontais respetivamente.

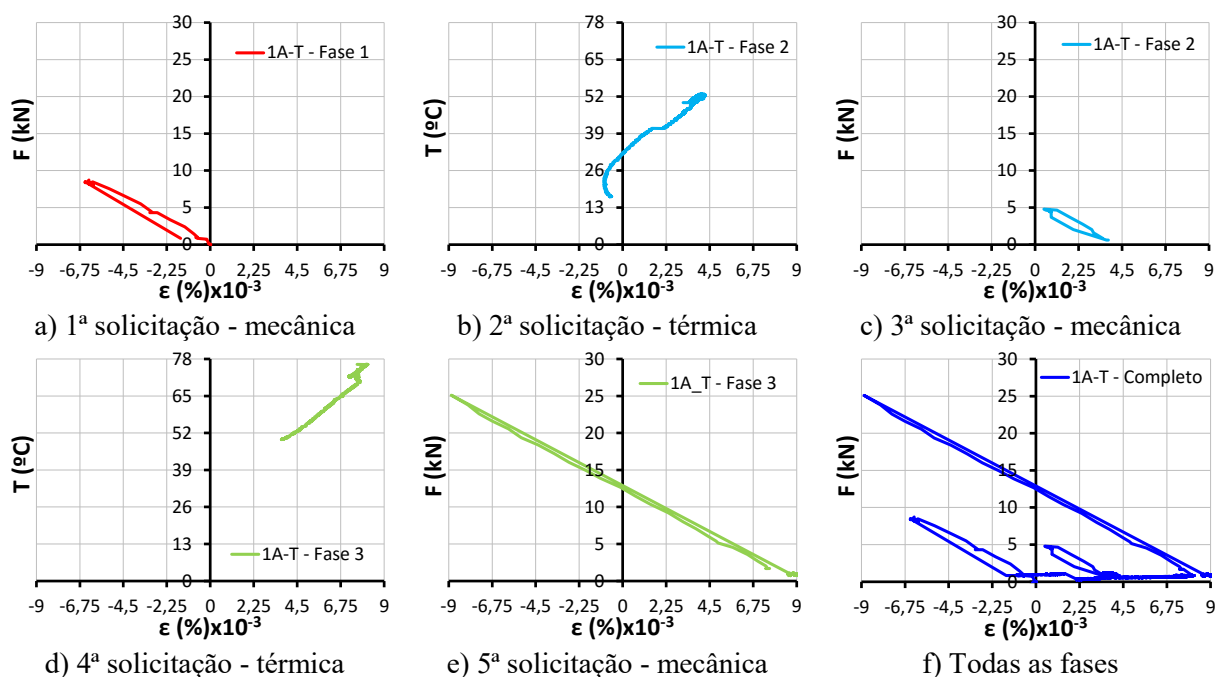


Figura 3.37 – Avaliação das extensões num ponto representativo ao longo das diversas fases do ensaio

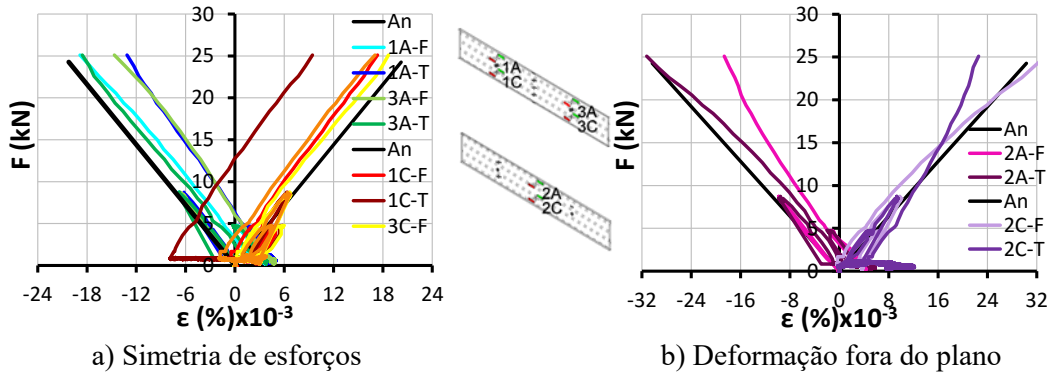


Figura 3.38- Avaliação preliminar de resultados, força-extensão

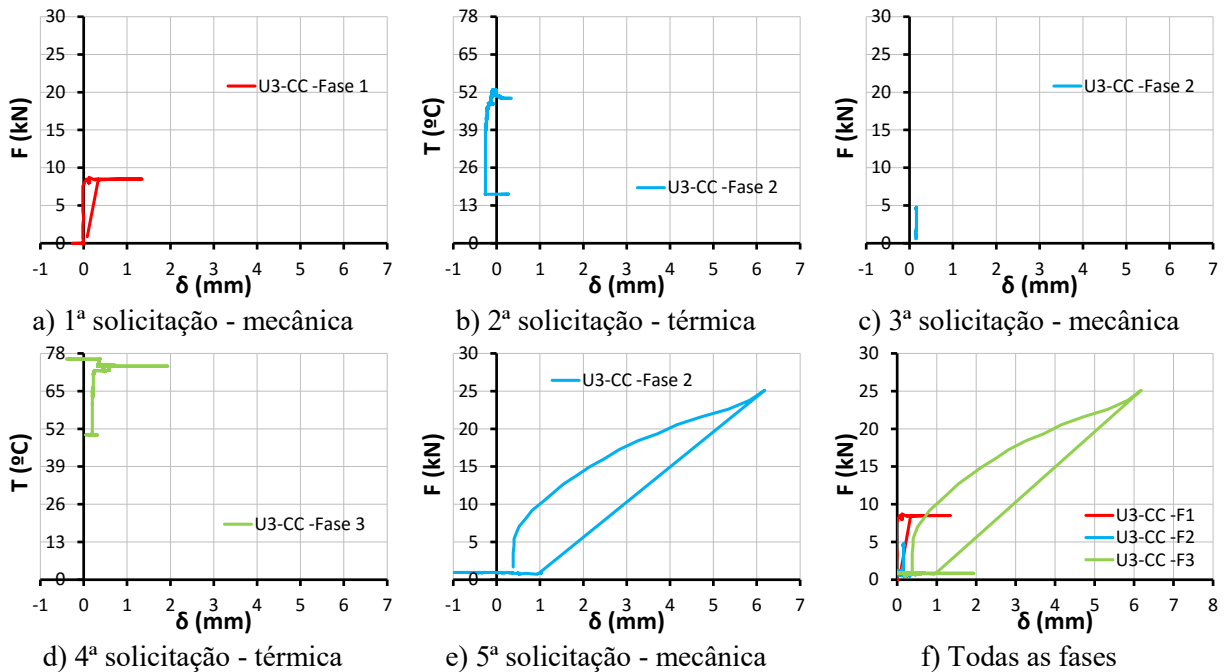


Figura 3.39 - Avaliação das deformações horizontais na zona superior central da viga, ao longo do ensaio

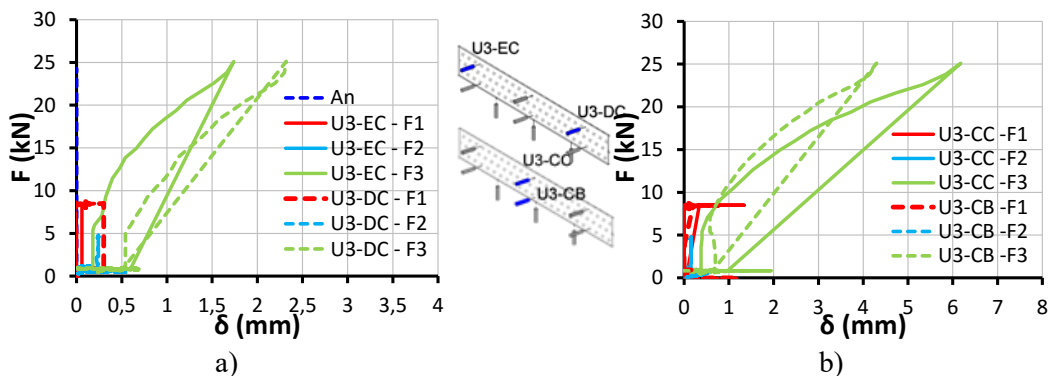


Figura 3.40 - Avaliação preliminar de resultados, força-deslocamento

Analisando a Figura 3.38 verifica-se a existência de simetria de esforços nas extremidades da secção. No entanto a análise dos valores medidos nas duas faces da viga, bem como a existência

de tensões verticais ao nível do eixo neutro (Anexo C), sugerem existência flexão fora do plano. Os resultados dos defletómetros (Figura 3.40) permitem confirmar a existência de deformação fora do plano da estrutura.

c) Otimização do procedimento de ensaio

Tendo em conta a informação retida na realização deste ensaio piloto, a fim de otimizar a qualidade dos ensaios posteriores, conclui-se que:

- Os erros introduzidos pelo sistema dos fios metálicos e dos defletómetros colocados no exterior, eram significativos, e como tal optou-se por utilizar nos ensaios termomecânicos posteriores os mesmos defletómetros considerados nos ensaios à temperatura ambiente, mas com a introdução do mesmo sistema de refrigeração composto por uma serpentina, que tinha sido previamente estudado para a refrigeração das células de carga (secção 3.6), a fim de evitar a sua danificação com a temperatura.
- Os defletómetros verticais estão ligados à viga através de um fio de cobre que deforma com a temperatura. A correção foi efetuada subtraindo aos resultados dos defletómetros verticais a seguinte parcela:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T \quad (3)$$

Sendo ΔL a deformação sofrida no fio, α o coeficiente de dilatação térmica do fio de cobre ($17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), L o comprimento total do fio (0,5m) e ΔT a variação de temperatura.

- Nos extensómetros foi também necessário efetuar correções devido à temperatura, através da expressão da correção da não linearidade da temperatura fornecida pelo fabricante destes elementos. A correção foi efetuada subtraindo aos resultados dos extensómetros a seguinte parcela:

$$\varepsilon = -6,46 \times 10^{-6} + 4,92 \times 10^{-6} \times T - 9,30 \times 10^{-8} \times T^2 + 4,39 \times 10^{-10} \times T^3 - 3,86 \times 10^{-12} \times T^4 \quad (4)$$

Sendo T a temperatura.

- Ao longo do ensaio, para uma detalhada observação e recolha de imagens da evolução do padrão de fratura do provete, a abertura em vidro duplo colocada na frente da câmara, deveria ter dimensões superiores, ou até mesmo a frente ser toda ela constituída em vidro duplo com isolamento. No entanto esta alteração acabou por não ser implementada.

3.8.3 Ensaios à temperatura ambiente, TA_1 e TA_2

Os ensaios à temperatura ambiente serviram como referência aos ensaios termomecânicos, permitindo avaliar qual a influência da temperatura no comportamento estrutural dos provetes. Foi efetuado o estudo de dois provetes. O esquema de ensaio e a instrumentação são os apresentados anteriormente. A estratégia de carga considerada, compreendeu apenas o carregamento mecânico. São de seguida apresentados os resultados relativos a estes ensaios.

a) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Apresenta-se de seguida a curva de comportamento global dos ensaios (carga vs. deslocamento a 1/2 vão) e correspondentes pontos notáveis (Figura 3.41), assim como o padrão de fratura resultante (Figura 3.42 e Figura 3.44).

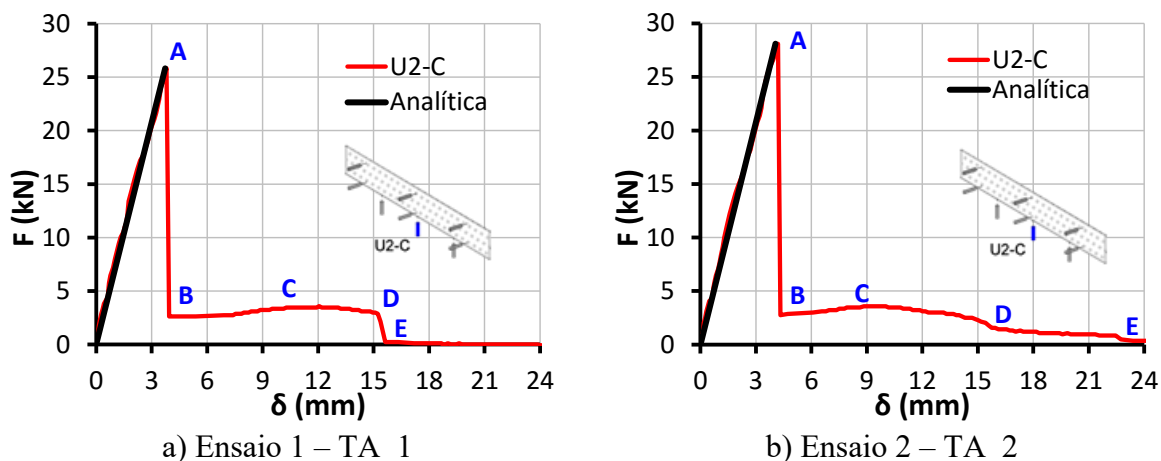


Figura 3.41 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

Verifica-se que o comportamento global, os correspondentes pontos notáveis e padrões de fratura, são idênticos entre si e verificados no ensaio piloto.



Figura 3.42 – Padrão de fratura do ensaio TA_1: Ponto E – Colapso



Figura 3.43 – Vista global do padrão de fratura do ensaio TA_2

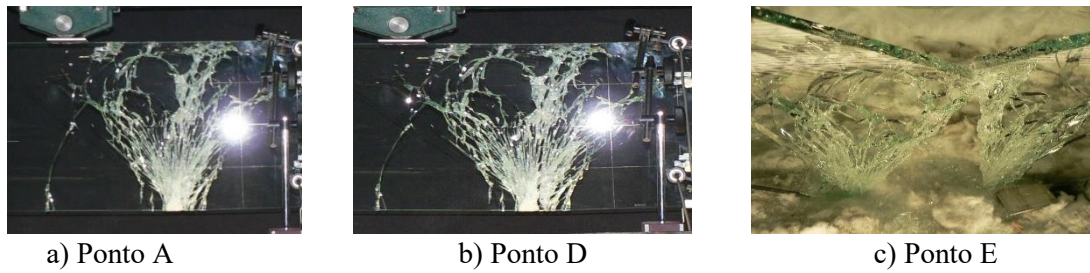


Figura 3.44 – Evolução do padrão de fratura no ensaio TA_2

b) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

São de seguida apresentados os principais resultados experimentais destes dois ensaios, para que se possa aferir sobre a existência ou não de simetria de carregamento e de deformação fora do plano de flexão. Os dois gráficos são truncados no valor carga de rotura. No entanto no Anexo C encontram-se todos os gráficos completos correspondentes a cada um dos ensaios. Em cada gráfico são ainda representadas as respetivas curvas analíticas determinadas pela lei de Hooke.

Analisando a evolução das extensões em ambos os ensaios (Figura 3.45), verificou-se que existe simetria de esforços ao longo do ensaio 2. No entanto para o ensaio 1, à medida que é aplicado o carregamento, os resultados dos extensómetros sugerem a existência de uma ligeira assimetria. Comparando os resultados em posições homólogas na face anterior e posterior, embora simétricos em relação à curva analítica, não são completamente coincidentes, o que sugere existência de deformação fora do plano.

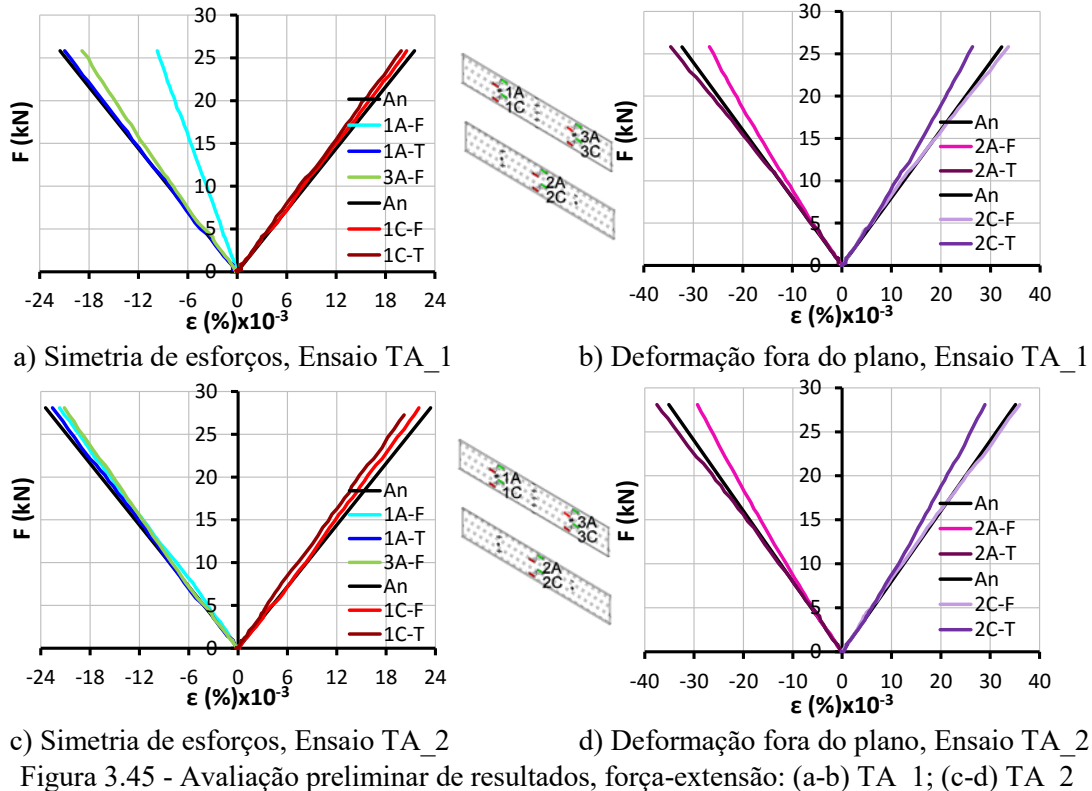
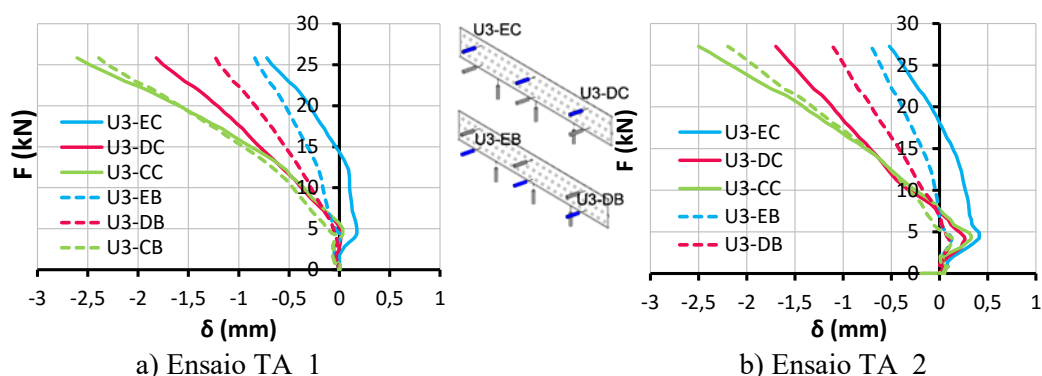
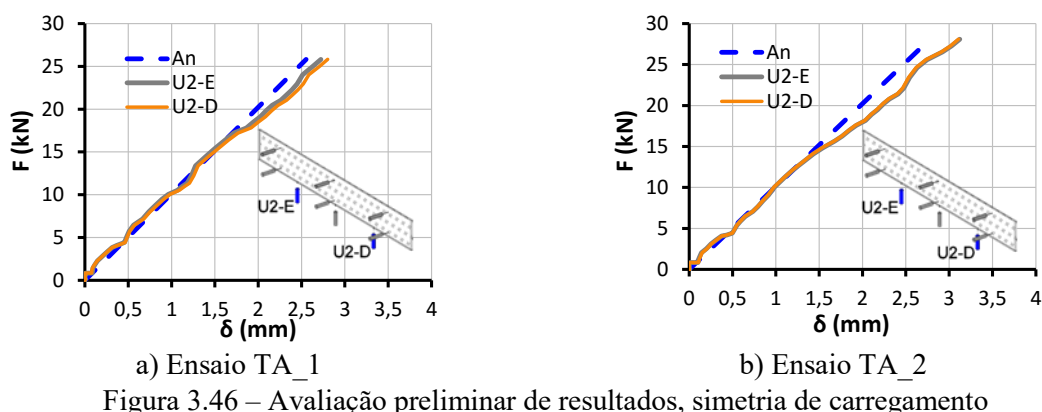


Figura 3.45 - Avaliação preliminar de resultados, força-extensão: (a-b) TA_1; (c-d) TA_2

Os resultados dos defletómetros verticais (Figura 3.46) e das células de carga (Anexo C) permitem confirmar a simetria na distribuição de esforços. O que levou a concluir que no caso do ensaio 1 a ligeira assimetria detetada nos extensómetros (Figura 3.45 a)) poderá ser desprezável. Relativamente aos defletómetros horizontais (Figura 3.47) estes confirmam a existência de deformação fora do plano da estrutura, e que a mesma varia ao longo dos ensaios.



A deformação fora do plano de flexão identificada, poderá dever-se a um carregamento ligeiramente excêntrico e o facto de a deformação mudar de concavidade deve-se a pequenos ajustes iniciais do sistema de ensaio. No entanto em regime elástico, esta deformação não constitui uma parcela muito significativa, em ambos os ensaios deformações na ordem dos 12% da espessura da viga, e tensões (Anexo E) de 10,5 MPa e 11,1 MPa nos ensaios 1 e 2 respetivamente.

c) Sumário

O Quadro 3.3 apresenta os resultados mais relevantes para os ensaios à temperatura ambiente. Em ambos os ensaios, a viga demonstrou comportamento elástico linear até ao aparecimento da primeira fratura, sendo que esta ocorreu próximo da zona de momento máximo, resultante de tensões de tração por flexão, com a tradicional forma de diamante, à semelhança do que já tinha sido verificado para o ensaio piloto (TA_0). No entanto para o ensaio 1 essa fratura inicial ocorreu

para um nível de aplicação de carga de aproximadamente 25,8 KN, que corresponde a uma tensão máxima no vidro de 42 MPa, e no ensaio 2 ocorreu para cerca de 28,1 KN correspondente a 45,5 MPa. No ensaio piloto apenas foi atingida carga de 14,3 KN, o que equivale a uma tensão máxima de 21,9 MPa, bastante inferior ao valor nominal do vidro recozido (45 MPa). Tal facto pode ser explicado pela possível existência de micro danos superficiais excepcionais no caso do ensaio piloto. Sabe-se que a dispersão de resultados é significativamente dependente da existência de defeitos, fendas microscópicas na sua superfície, e dadas as dimensões consideráveis do elemento, a probabilidade de existir uma fenda microscópica é maior.

Ao nível de comportamento pós-rotura, para as 3 vigas, verificou-se ser possível ainda mobilizar alguma resistência, embora bastante inferior, devido à contribuição da película intercalar.

Quadro 3.3 - Comparação dos resultados à temperatura ambiente

Ensaio	$F1^{fenda}$ (KN)	K (rad)	$\sigma_{vidro, max.}$ (MPa)	$\delta1^{fenda}$ (mm)
Piloto TA_0	14,3	1,40	21,9	2,49
TA_1	25,8	1,42	42,0	3,81
TA_2	28,1	1,42	45,5	4,20
Média ^(*)	27,0	1,42	43,8	4,01

^(*) apenas (TA_1 + TA_2)/2

3.8.4 Ensaio termomecânicos

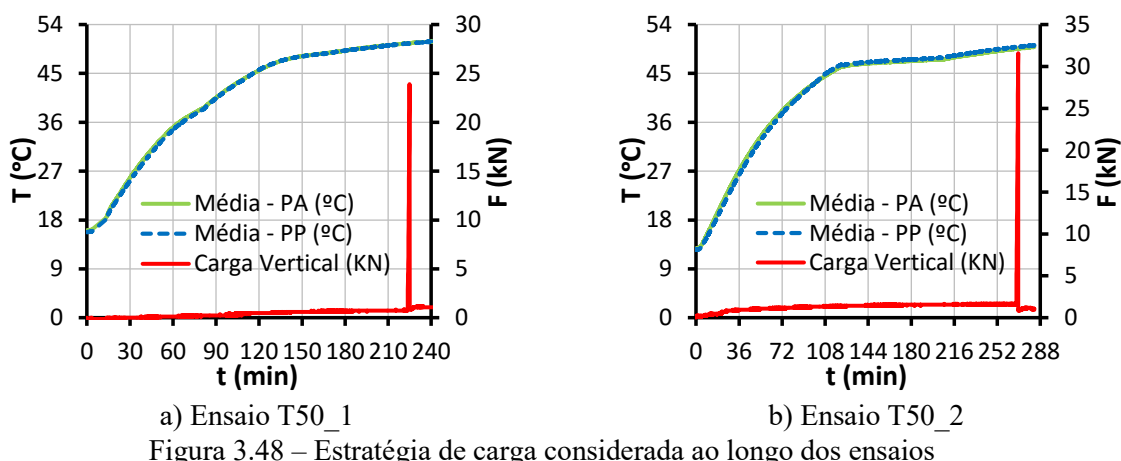
Nos ensaios com solicitação térmica foram estudados dois níveis de temperatura, 50°C e 80°C. O sistema de ensaio, instrumentação, bem como a câmara térmica utilizada no pré-condicionamento térmico dos provetes são os referidos anteriormente. Os resultados são divididos em estratégia de carga, comportamento global e padrão de fratura, simetria e deformação fora do plano e por último uma síntese dos resultados.

Os resultados de ensaios realizados à mesma temperatura são bastante consistentes entre si, à semelhança do que foi verificado nos ensaios à temperatura ambiente. Como tal a fim de facilitar uma melhor compreensão e comparação, os resultados de cada temperatura testada são apresentados e discutidos simultaneamente.

3.8.4.1 Temperatura de 50°C, T50_1 e T50_2

a) Estratégia de carga

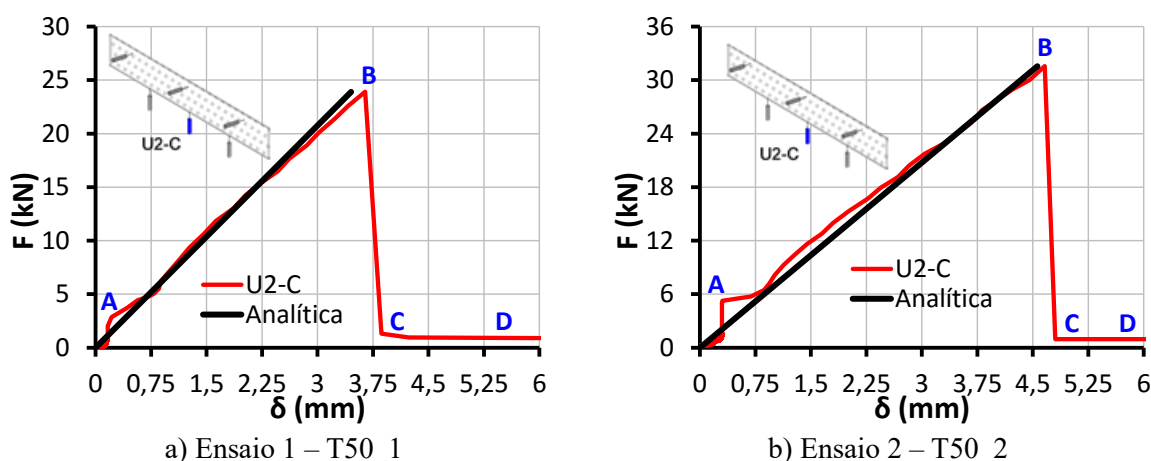
A estratégia de carga engloba duas etapas diferentes de carregamento. A primeira corresponde à aplicação do carregamento térmico, até se atingir a estabilização térmica (50°C). A segunda etapa corresponde à aplicação do carregamento mecânico. Na Figura 3.48 está representada a estratégia de carga para cada um dos ensaios em função do tempo de ensaio. Esta corresponde à evolução da temperatura em ambos os planos laterais das vigas, bem como o instante e a amplitude de carregamento mecânico aplicado.



De acordo com os resultados da estratégia de carga (Figura 3.48), verifica-se que em ambos os ensaios, tal como pretendido, a evolução da temperatura no provete, foi feita de forma similar em ambos os lados da viga. No Anexo C, poderão ser consultados os gráficos com a evolução da temperatura ao longo do comprimento das mesmas, em ambos os lados, para vários níveis de temperatura ao longo do ensaio. Nos dois ensaios também é perceptível a existência de uma força residual praticamente desde o início do ensaio. No entanto esta força não corresponde a um carregamento mecânico, mas sim a uma resposta do sistema à aplicação do carregamento térmico.

b) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

É de seguida apresentada a curva de comportamento global (carga vs. deslocamento a 1/2 vão) com os principais pontos notáveis e a respetiva curva analítica (fase elástica), segundo a lei de Hooke (Figura 3.49). São ainda apresentados os respetivos padrões de fratura (Figura 3.50 e Figura 3.51).



De acordo com as curvas de comportamento global e respetivos pontos notáveis (Figura 3.49), verifica-se que em regime pré-fratura (0-B), o comportamento de ambos os ensaios é muito similar ao já demonstrado para os ensaios à temperatura ambiente (comportamento elástico). A principal

diferença reside numa ligeira irregularidade inicial (A) que estes ensaios apresentam e que está relacionada com a deformação elástica resultante da aplicação do carregamento térmico. Como tal verifica-se que a temperatura só por si, já introduz deformações, tanto no provete, como no sistema, e por este motivo quando se dá início à aplicação do carregamento mecânico os valores medidos pelos diversos dispositivos de instrumentação não são nulos, ao contrário do que se verifica nos ensaios à temperatura ambiente.

Após o aparecimento das primeiras fendas (B) deu-se uma brusca queda da rigidez (B-C). É nesta fase pós-rotura que a influência da temperatura se torna mais evidente, levando as vigas a apresentarem um comportamento diferente do demonstrado nos ensaios à temperatura ambiente. De facto após a formação das primeiras fendas, SG apresentou um comportamento mais fluído, e conseqüentemente degradação das suas propriedades. Como tal, este perdeu a capacidade de manter os painéis de vidro unidos num conjunto monolítico. Conseqüentemente a rigidez lateral das vigas diminuiu, e aumentaram as deformações fora do plano.

Relativamente ao padrão de fratura (Figura 3.50 e Figura 3.51), este é bastante idêntico nas duas vigas, e até mesmo em relação ao ensaio piloto. Corresponde a uma rotura por tração em flexão, na zona de momento máximo, com a forma de diamante, com múltiplas fendas a radiar de uma única posição na extremidade inferior da viga.

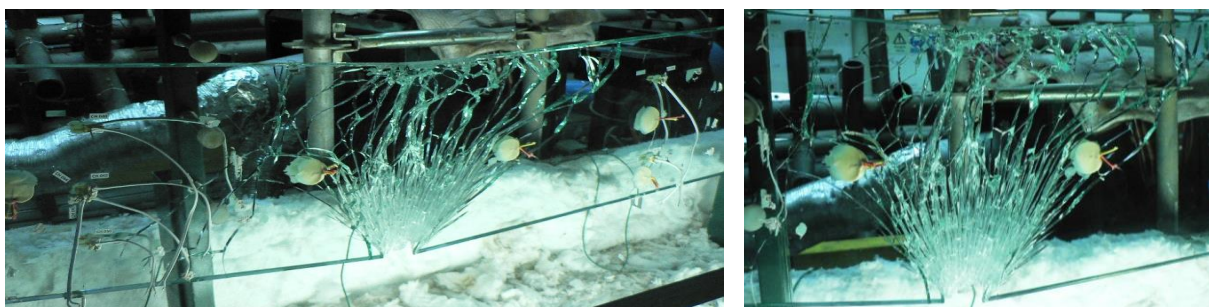


Figura 3.50 – Pormenorização do padrão de fratura (Ponto C) - Ensaio T50_1

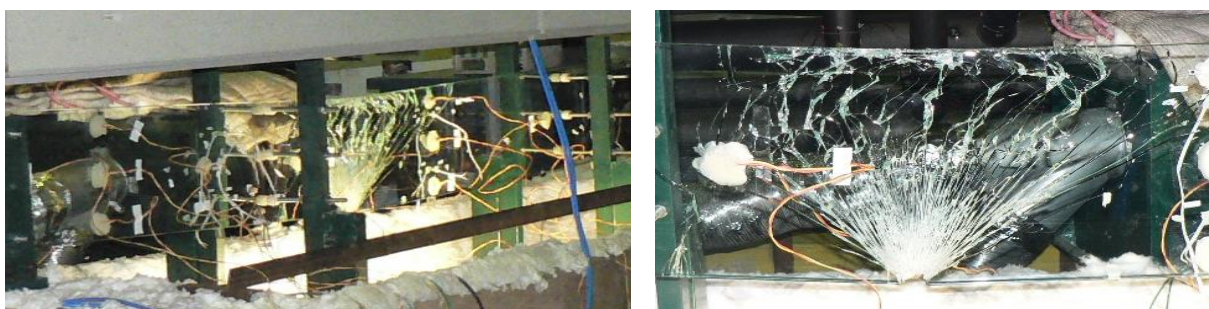


Figura 3.51 - Pormenorização do padrão de fratura (Ponto C) - Ensaio T50_2

c) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

Para permitir visualização mais detalhada, a representação das deformações e extensões é estabelecida em duas fases, antes e depois da aplicação do carregamento mecânico. Aqui apenas serão apresentados os resultados mais ilustrativos, os restantes encontram-se no Anexo C.

Começando por analisar a fase anterior à aplicação do carregamento mecânico, são representados os resultados relativos às extensões e deformações verticais e horizontais para ambos os ensaios (Figura 3.52). Confirma-se que a temperatura só por si já introduz deformações.

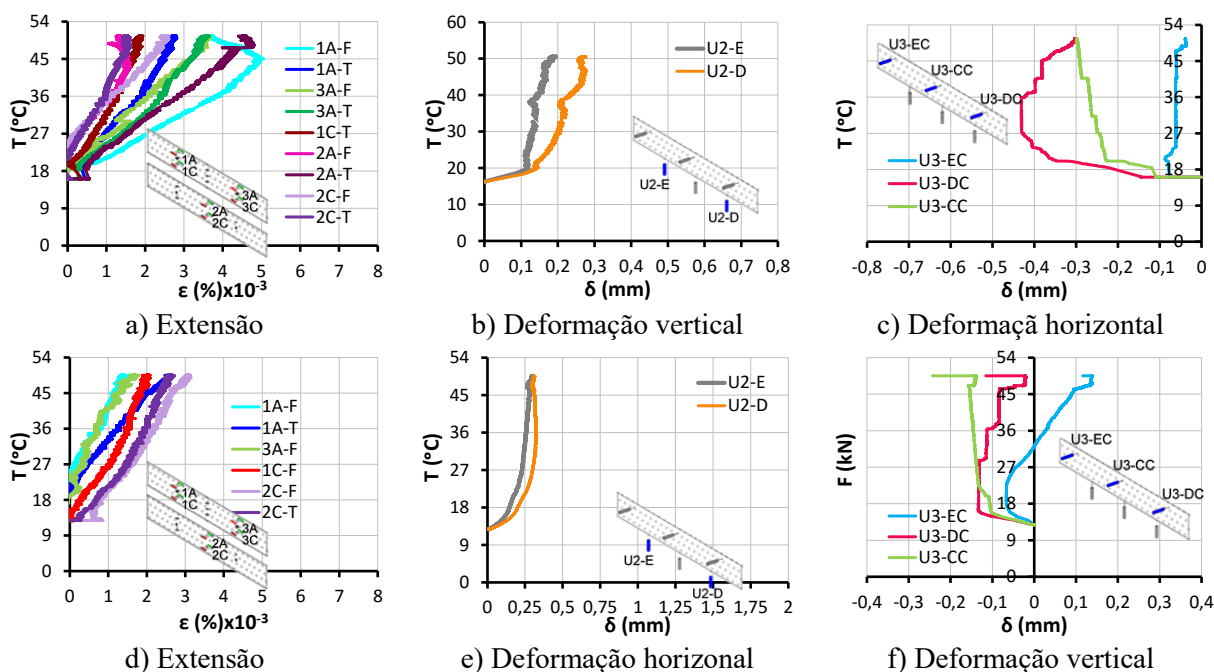


Figura 3.52 - Avaliação preliminar de resultados, em função da temperatura: (a-c) T50_1; (d-f) T50_2

Efetua-se agora a uma análise dos principais resultados, relativos à fase posterior de aplicação do carregamento mecânico. Relativamente ao ensaio 1 (Figura 3.53 (a-b)), comparando os extensómetros entre as extremidades em posições homólogas, verifica-se uma simetria de esforços razoável ao longo dos ensaios. Na verdade, no início da aplicação do carregamento mecânico, apesar de os resultados dos extensómetros não serem coincidentes com a curva analítica (devido às deformações já introduzidas pela temperatura), estes são simétricos. Comparando os resultados dos extensómetros em posições homólogas, mas na face anterior e posterior da viga, verifica-se que embora exista deformação fora do plano, esta é reduzida, e apenas se torna evidente a partir de determinado nível de carregamento. Repare-se por exemplo, nos extensómetros na posição (1C), onde a partir de cerca de 5KN, o extensómetro na face posterior encontra-se mais tracionado que o da face anterior. De uma maneira geral, os resultados dos extensómetros relativos ao ensaio 2 (Figura 3.53 (c-d)) são muito similares aos demonstrados para o ensaio 1.

Em ambos os provetes, os resultados dos defletómetros verticais (Figura 3.54), bem como das células de carga (Anexo C), confirmam a existência de simetria de esforços. Já os resultados dos defletómetros horizontais, (Figura 3.55) identificam a existência de deformação perpendicular ao plano da estrutura. No entanto, uma vez que esta é muito reduzida (deformações máximas na ordem dos 12% da espessura da viga em ambos os ensaios e tensões na ordem dos 2,8 MPa e 5,3 MPa no ensaio 1 e 2 respetivamente) considerou-se que esta poderia ser desprezável.

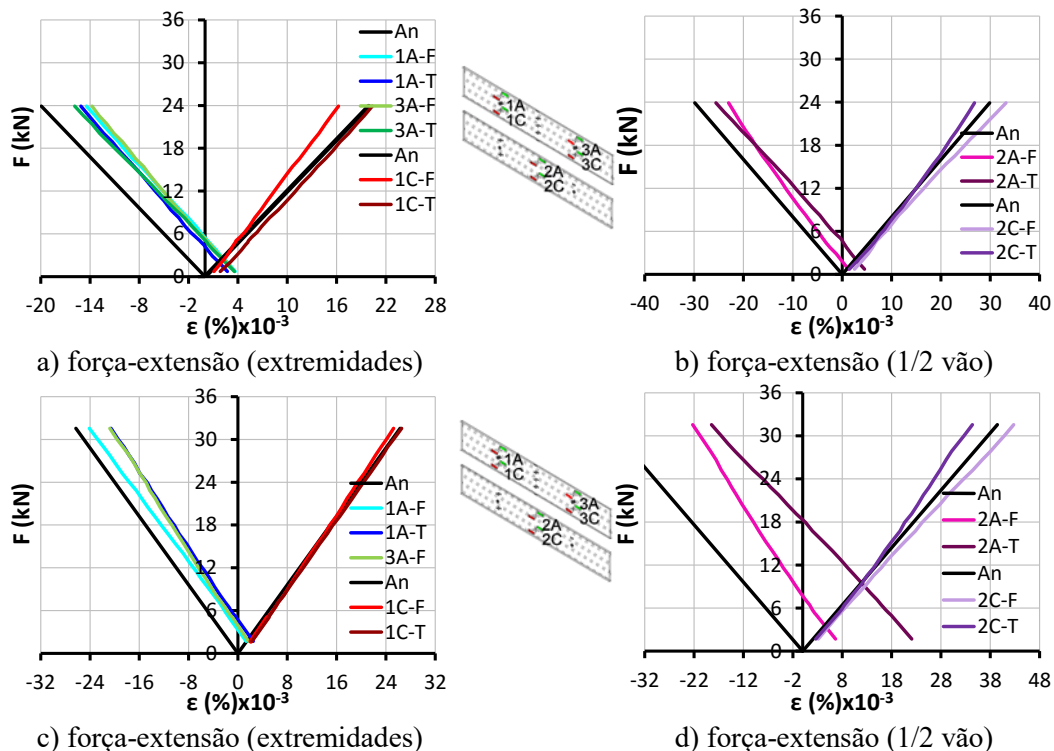


Figura 3.53 – Avaliação preliminar de resultados, (carregamento mecânico): (a-b) T50_2; (c-d) T50_1

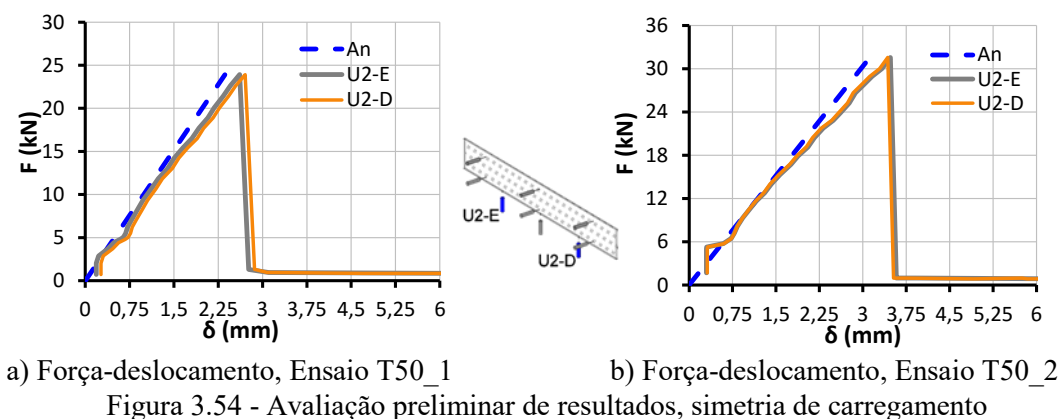


Figura 3.54 - Avaliação preliminar de resultados, simetria de carregamento

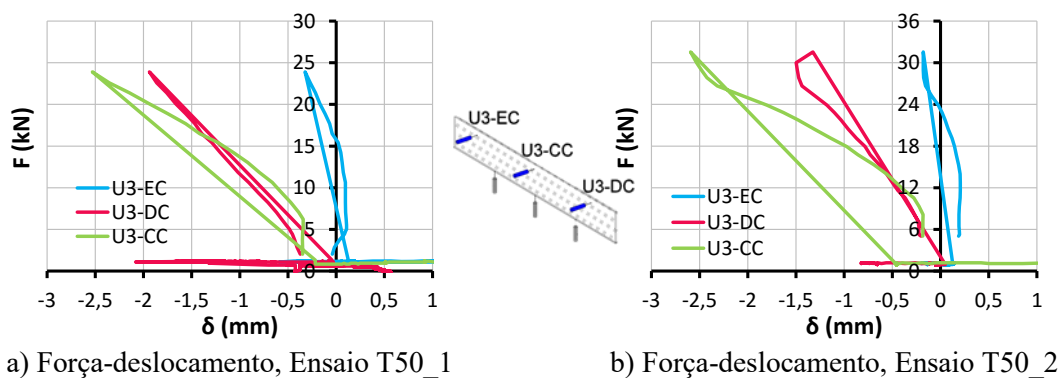


Figura 3.55 - Avaliação preliminar de resultados, deformação fora do plano

d) Sumário

O Quadro 3.4 apresenta os principais resultados, para ambos os provetes. Os resultados dos dois ensaios termomecânicos a 50°C foram bastante consistentes entre si tanto em regime pré como pós-rotura. Em regime pré-rotura, ambas as vigas apresentaram comportamento elástico linear, sendo que a rigidez foi determinada através de ajuste por mínimos quadrados à parte linear da curva. No ensaio 1 as primeiras fendas ocorreram para um nível de aplicação de carga de aproximadamente 23,9 kN, que corresponde a uma tensão máxima no vidro de 43,3 MPa, já no ensaio 2, ocorreu para cerca de 31,6 kN que corresponde a uma tensão máxima de 55,7 MPa.

Em regime pré-fratura, dada a degradação da capacidade resistente do SG, ambas as vigas perderam qualquer tipo de resistência residual. Por este motivo, para um carregamento térmico de 50°C é possível afirmar que o instante da formação das primeiras fendas também poderá ser considerado como o instante em que ocorreu o esgotamento da capacidade resistente da viga.

Quadro 3.4 - Comparação dos resultados nos ensaios termomecânicos a 50°C

Ensaio	$F_{1^{\text{a}}\text{fenda}}$ (kN)	K (rad)	$\sigma_{\text{vidro, max}}$ (Mpa)	$\delta_{1^{\text{a}}\text{ fratura}}$ (mm)
T50_1	23,9	1,41	43,3	3,94
T50_2	31,6	1,42	55,7	4,97
Média	27,8	1,42	49,5	4,46

3.8.4.2 Temperatura de 80°C, T80_1 e T80_2

a) Estratégia de carga

A estratégia de carga aplicada nestes ensaios (Figura 3.56) é em tudo similar à considerada para os ensaios anteriormente apresentados a 50°C. A única diferença reside no nível de carregamento térmico aplicado, 80°C no presente caso.

Tal como nos ensaios a 50°C, verificou-se a existência de uma força residual, praticamente desde o início do ensaio, associada a uma resposta do sistema, à aplicação do carregamento térmico.

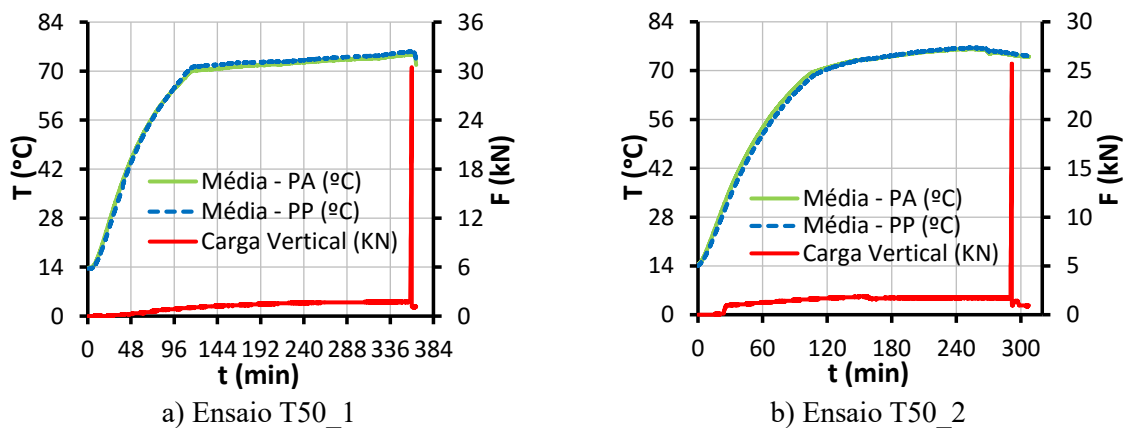


Figura 3.56 – Estratégia de carga considerada ao longo dos ensaios

b) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Na Figura 3.57, é representada a curva de comportamento global e respetiva curva analítica (fase elástica), assim como a identificação dos principais pontos notáveis.

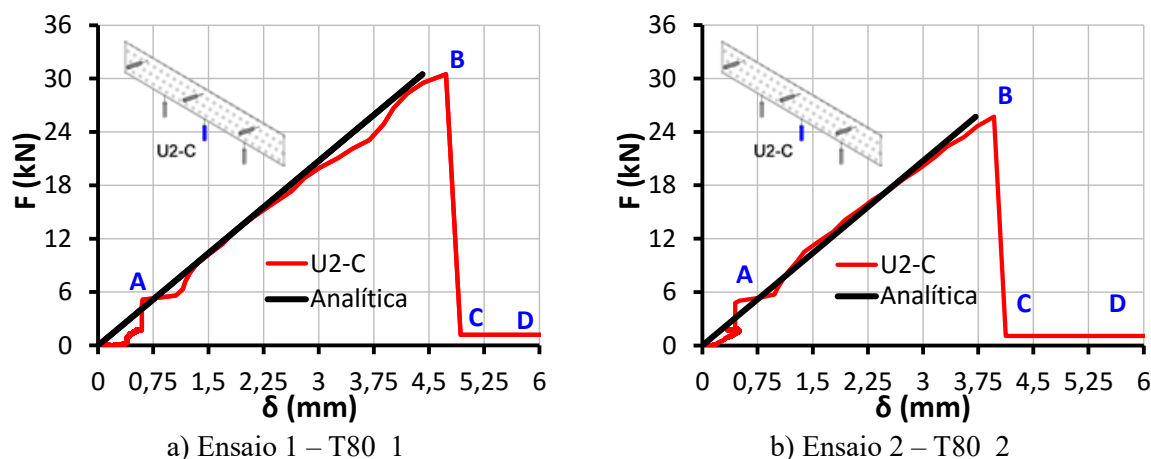


Figura 3.57 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

Globalmente estes provetes apresentaram um comportamento global e respetivos pontos notáveis, muito consistentes entre si e em relação ao verificado nos ensaios a 50°C.

Como seria de esperar, nestes ensaios a irregularidade inicial (A) na curva de comportamento, proveniente das deformações sofridas tanto na viga como no sistema na fase de aquecimento é mais notória, uma vez que o carregamento térmico também é superior.

Relativamente ao padrão de fratura (Figura 3.58 e Figura 3.59) apesar das fendas iniciais, apresentarem a mesma forma e a mesma localização dos ensaios anteriormente apresentados, nestes ensaios a 80°C os provetes acabaram por colapsar (separação da viga em duas partes distintas). Este facto resultada da elevada maleabilidade do SG a 80°C, que deixa de conseguir manter a adesão entre ambas as partes da viga.



Figura 3.58 – Pormenorização do padrão de fratura do ensaio T80_1, Ponto C – colapso da viga



Figura 3.59 - Pormenorização do padrão de fratura do ensaio T80_2: Ponto C – colapso da viga

c) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

Efetua-se aqui uma avaliação preliminar de resultados, tanto na fase antes como após o carregamento mecânico. Os restantes resultados encontram-se no Anexo C.

Apresentam-se os principais resultados relativos à fase de aplicação do carregamento térmico (Figura 3.60), onde naturalmente a temperatura introduz deformações iniciais mais significativas, quando comparado com os ensaios de 50°C.

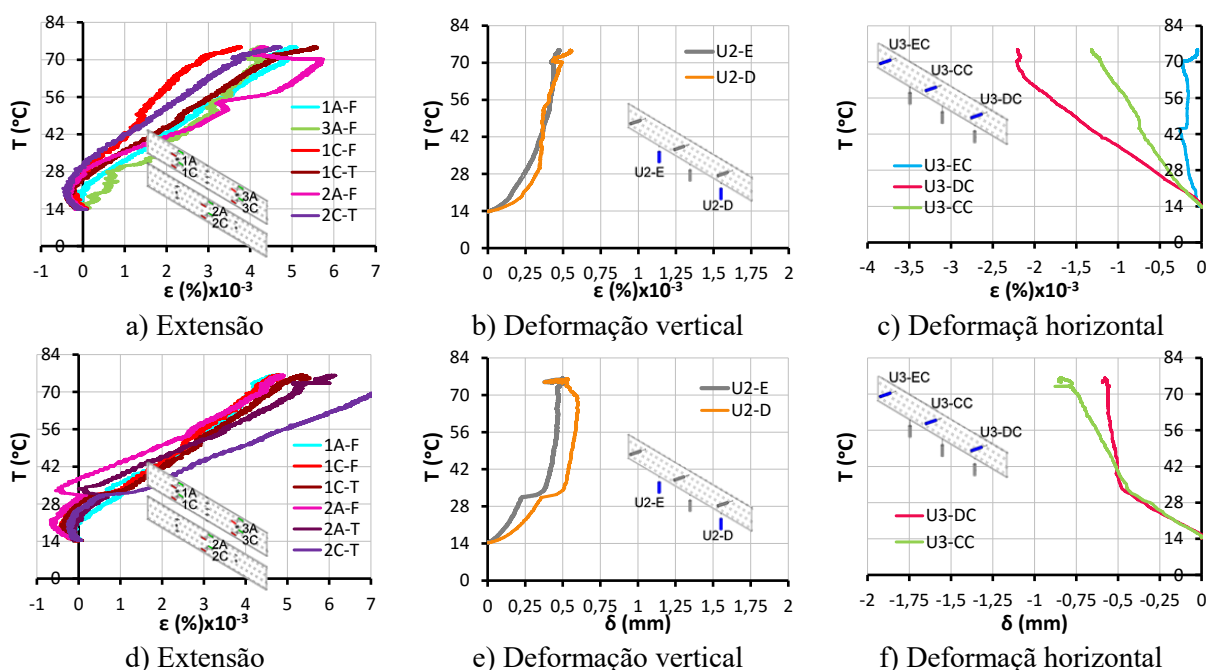


Figura 3.60 - Avaliação preliminar de resultados, em função da temperatura: (a-c) T80_1; (d-f) T80_2

Os resultados dos extensómetros, correspondentes à fase de aplicação do carregamento mecânico, em pontos representativos, em fase elástica, em ambos os ensaios (Figura 3.61) são de uma maneira geral bastante similares aos dos ensaios a 50°C. Verifica-se que a distribuição de esforços é suficientemente simétrica, e que embora exista deformação fora do plano, esta é reduzida. O facto dos resultados não se demonstrarem coincidentes com a curva analítica, no início da

aplicação do carregamento mecânico, deve-se às deformações iniciais resultantes da solicitação térmica.

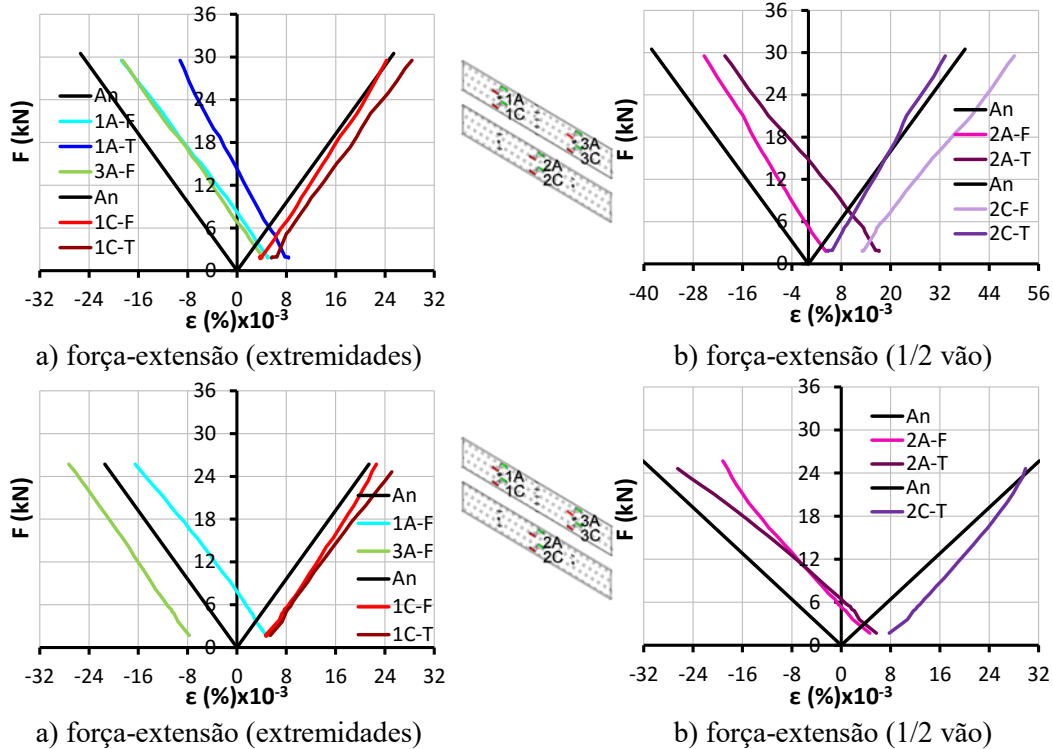
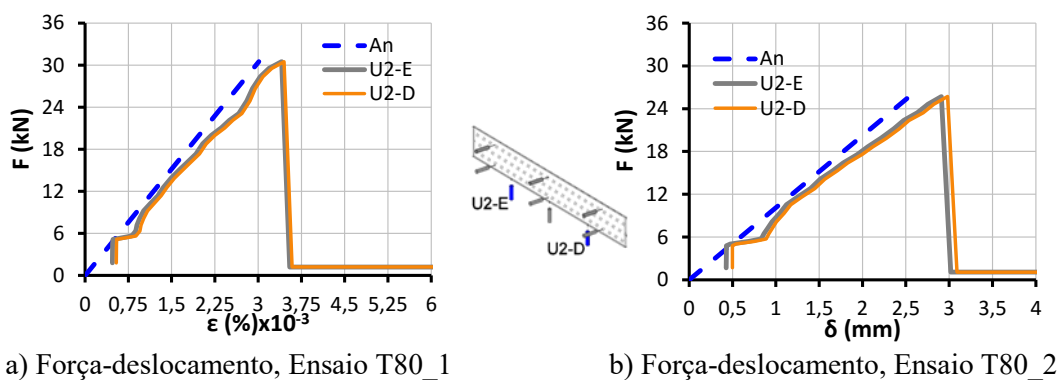


Figura 3.61 – Avaliação preliminar de resultados (carregamento mecânico): (a-b) T50_1; (c-d) T50_2

Os resultados dos defletómetros verticais (Figura 3.62) confirmam a existência de simetria de esforços (consulte-se também no Anexo C com os resultados relativos às células de carga).

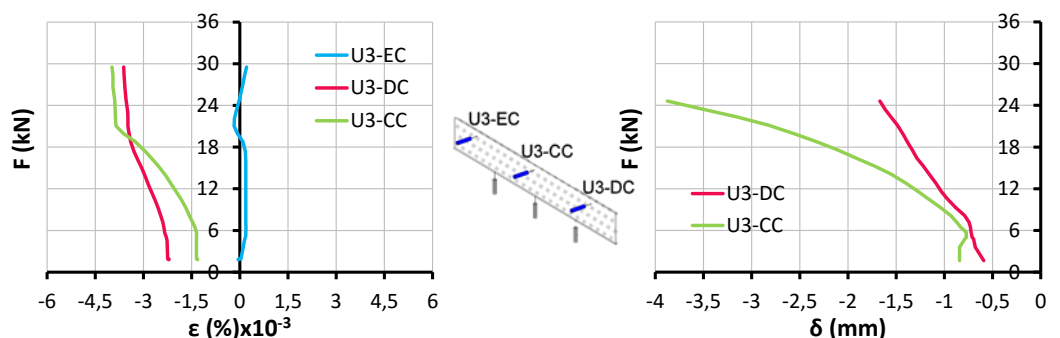


a) Força-deslocamento, Ensaio T80_1

b) Força-deslocamento, Ensaio T80_2

Figura 3.62 - Avaliação preliminar de resultados, simetria de carregamento

Os defletómetros horizontais, na zona superior da viga (Figura 3.63) confirmam a existência de alguma deformação fora do plano. Esta apresenta deformações máximas na ordem dos 18% da espessura da viga em ambos os ensaios, e tensões na ordem dos 7,1 MPa no ensaio 1, e de cerca de 11,3 MPa no ensaio 2.



a) Força-deslocamento, Ensaio T50_1

b) Força-deslocamento, Ensaio T50_2

Figura 3.63 - Avaliação preliminar de resultados, deformação fora do plano

d) Sumário

Os resultados mais relevantes para cada uma das vigas encontra-se no Quadro 3.5.

À semelhança do já observado para ensaios a outras temperaturas, ambos os provetes apresentaram um comportamento elástico linear até ao aparecimento das primeiras fendas, que correspondeu a uma força vertical de intensidade 30,5 kN no ensaio T80_1 e uma força de intensidade 25,7 kN no ensaio T80_2 (tensão máxima no vidro de 42,0 MPa e 37,2 MPa respetivamente).

Nos presentes ensaios, dado que o SG apresentava um comportamento muito fluído acabou por ocorrer o colapso das vigas imediatamente após o aparecimento das primeiras fissuras.

Quadro 3.5 – Comparação dos resultados dos ensaios a 50°C

Ensaio	$F_{1^{\text{fenda}}}$ (kN)	K (rad)	$\sigma_{\text{vidro, max}}$ (Mpa)	$\delta_{1^{\text{fenda}}}$ (mm)
T80_1	30,5	1,42	42,0	5,26
T80_2	25,7	1,41	37,2	4,48
Média	28,1	1,42	39,6	4,87

3.8.5 Comparação e discussão de resultados

É aqui efetuada uma comparação e discussão dos resultados obtidos para os ensaios realizados à escala real, em vigas de vidro laminado com SG, em posição ao alto, quando sujeitas simultaneamente a solicitação térmica e mecânica, até à sua rotura. São comparados dois níveis de carregamento térmico, 50°C e 80°C, bem com temperatura ambiente, que serviu como referência.

A Figura 3.64 permite efetuar a comparação entre todos os ensaios, em termos de comportamento global e respetivos pontos notáveis, e o Quadro 3.6 apresenta uma síntese dos principais resultados.

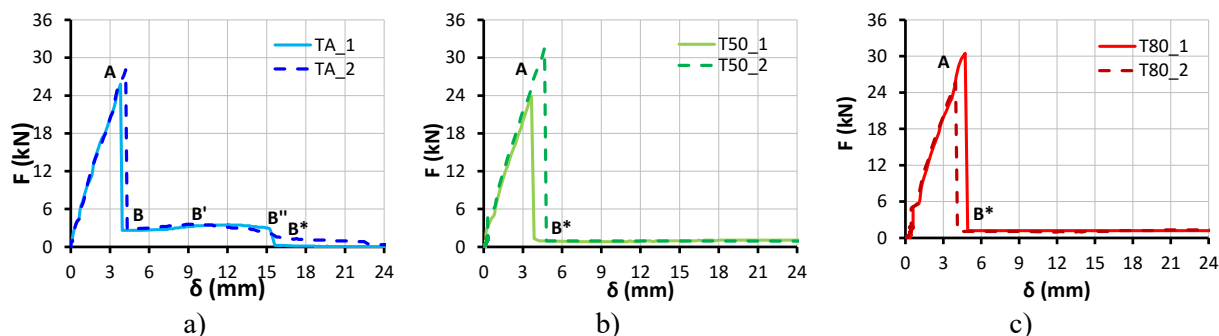


Figura 3.64 – Comparação do comportamento global: a) temperatura ambiente; b) 50°C; c) 80°C

Quadro 3.6 – Comparação dos ensaios sem sistema de pré-esforço

Unid.		Temperatura Ambiente			50°C			80°C		
		TA_1	TA_2	Média	T50_1	T50_2	Média	T80_1	T80_2	Média
$F_{1^{\circ}fenda}$	KN	25.8	28.1	27.0	23.9	31.6	27.8	30.5	25.7	28.1
$\Delta F_{1^{\circ}fenda}$ (*)	%	-4.7	3.9	-	-16.3	12.0	-	7.9	-11.9	-
K	rad	1.42	1.42	1.41	1.41	1.42	1.42	1.42	1.41	1.42
$\sigma_{vidro, max}$	MPa	42.0	45.5	36.5	43.3	55.7	49.5	42.0	37.2	39.6
$\delta_{F_{1^{\circ}fenda}}$	mm	3.81	4.20	3.50	3.94	4.97	4.46	5.26	4.48	4.87

(*) (Ensaio-Média) *100/Ensaio

Da observação dos resultados dos ensaios termomecânicos comprovou-se a degradação das propriedades mecânicas da película intercalar de SG, quando sujeita a solicitações térmicas. Na Figura 3.65 é notória essa diferença de comportamento da película, apresentado um comportamento mais fluído acima de uma gama de temperaturas relativamente baixa (45-50°C).

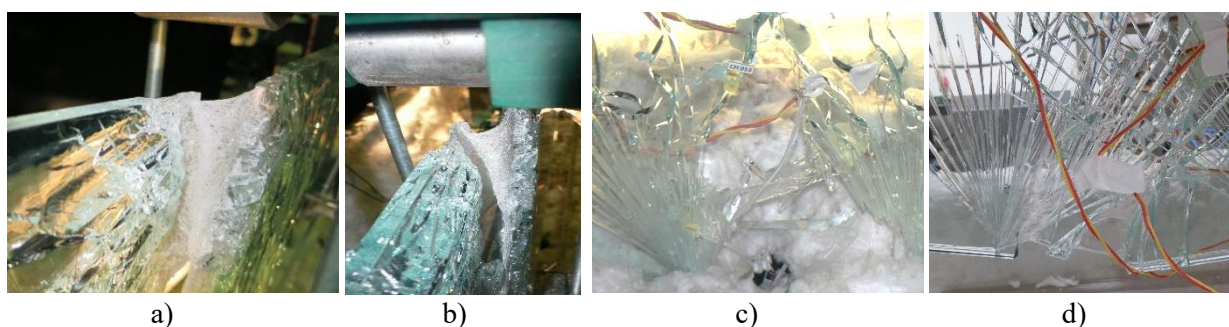


Figura 3.65 – Fotografias ilustrativas das características do SG: (a-b) temperatura ambiente; (c-d) 80°C

Apesar desta comprovada degradação da película, em fase elástica, não existe uma influência clara do efeito da temperatura nos resultados. De facto a diferença de rigidez global entre todos os ensaios é mínima (Quadro 3.6). A explicação para tal, é que quando a viga está posicionada ao alto, para este tipo de solicitação mecânica, neste regime, a película de laminação não contribui para a capacidade resistente da secção compósita (de acordo com *Belis et al.*, 2009 (Figura 2.10)). Na verdade em regime pré-fratura o esquema de funcionamento principal corresponde a flexão no plano. No caso de existir alguma flexão fora do plano, esta tem pouca expressão antes da fratura, pois deve-se apenas a pequenas imperfeições na geometria ou pequenos desalinhamentos no

sistema de ensaio. Neste enquadramento a película de laminação contribui pouco para a resistência deste tipo de secções compósitas, sendo esta pouco penalizada quando o SG se degrada. No entanto, os resultados do Quadro 3.6 mostram que a resistência é superior dos ensaios a temperatura ambiente para 50°C, e destes para 80°C. Isto poderá dever-se ao facto de que, como o SG apresenta uma maleabilidade tão elevada, a transmissão de fissuras, ou dos seus efeitos, de um painel de vidro para o outro fica comprometida, aumentando assim ligeiramente a resistência das vigas quando sujeitas a carregamento térmico.

Em regime pós-fratura, contrariamente ao observado no regime pré-fratura, os provetes demonstraram um comportamento distinto da temperatura ambiente para os ensaios termomecânicos (Figura 3.64). De facto, ambos os ensaios à temperatura ambiente demonstraram uma ligeira capacidade resistente residual contrariamente aos ensaios termomecânicos. À temperatura ambiente, como o SG mantém a sua integridade estrutural, este mantém os pedaços de vidro fragmentados unidos, e proporciona a transmissão de esforços na secção transversal. Deste modo, na zona fendilhada a carga passa a ser resistida num esquema estrutural distinto do que existia inicialmente: i) na zona tracionada, a força de tração é resistida apenas pelo SG; ii) na zona de compressão passam a existir 2 zonas distintas: a zona fraturada, onde a força de compressão é resistida maioritariamente pelo arco estrutural criado pelas partículas fraturadas, e a zona não fendilhada, que continua a funcionar no esquema laminado inicial. Neste cenário, a película de laminação tem uma contribuição muito alta, conferindo às vigas alguma capacidade resistente adicional. Nos ensaios termomecânicos, uma vez que a película de laminação apresenta um comportamento mais fluído, esta perde a capacidade de manter os painéis de vidro unidos num conjunto monolítico, levando a que a rigidez lateral das vigas diminua, e conseqüentemente aumentem as deformações fora do plano. Como tal nos ensaios com solicitação térmica as vigas não possuem a referida capacidade resistente adicional.

Relativamente ao padrão de fratura, em todos os ensaios, o aparecimento das primeiras fendas resultou de tensões de tração por flexão, que se formaram na zona de momento máximo, radiando de um único ponto na secção inferior da viga (forma de “V”). No entanto nos ensaios com solicitação térmica, dada a perda de ligação entre os dois painéis de vidro, para além das deformações fora do plano serem mais apreciáveis, as linhas de rotura também são menos reticuladas, uma vez que o padrão de fratura de ambos os vidros é menos auto influenciável. Além disso, dos ensaios a 50°C para os de 80°C, verificou-se um agravamento acrescido da rotura, onde inclusive nestes últimos acabou por haver colapso de ambos os provetes (separação em duas partes distintas), pois dada a maleabilidade tão elevada do SG, este não conseguiu manter a adesão entre as duas partes da viga.

Efetuada uma comparação de resultados em termos de deformação vertical (Quadro 3.6), verifica-se que os testes com solicitação térmica apresentam maiores valores de deformação aquando do aparecimento das primeiras fendas. Isto deve-se ao facto de que nestes ensaios, os provetes antes da aplicação do carregamento mecânico, já tinham experienciado alguma deformação resultante do aumento de temperatura.

3.9 Ensaios experimentais com sistema de pré-esforço

3.9.1 Introdução

À semelhança do que foi realizado para os ensaios sem pré-esforço, foi ainda efetuado o mesmo estudo em vigas de vidro estrutural reforçadas externamente por sistema de dois cabos de pré-esforço. Pretendeu-se avaliar e caracterizar qual o impacto da introdução deste sistema, em particular na segurança pós-rotura, neste tipo de elementos estruturais. No total foi efetuado um total de oito ensaios, um piloto, dois a temperatura ambiente, dois a 50°C e três a 80°C. O *layout* experimental e a instrumentação, são os apresentados anteriormente.

Serão apresentados e discutidos os resultados, em termos de comportamento global, padrão de fratura, e avaliação da simetria e deformações fora do plano. Por último é efetuada uma comparação de resultados entre os diversos ensaios. A fim de evitar repetições, não serão aqui apresentados todos os resultados gráficos. No Anexo D pode ser consultada essa restante informação.

3.9.2 Estratégia de carga

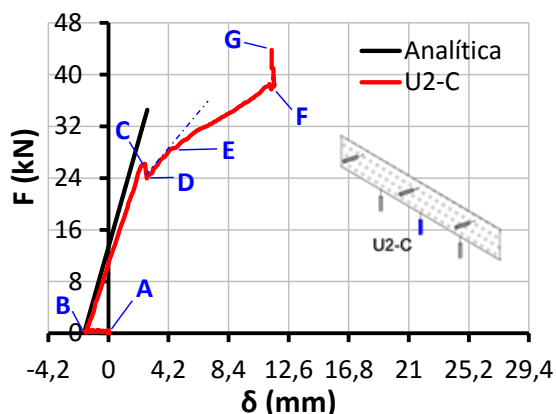
A estratégia de carga considerada engloba três diferentes tipos de carregamento, aplicados em três fases, carregamento de pré-esforço (PE), carregamento mecânico, e nos ensaios termomecânicos foi ainda considerado o carregamento térmico. O primeiro carregamento a ser aplicado foi o PE nos cabos. Este foi aplicado manualmente e de forma gradual, com monitorização permanente, de modo a manter forças idênticas em ambos os cabos. O controlo da força foi feito com base na leitura das células de carga colocadas em ambos os cabos, e do extensómetro localizado no topo da secção a meio vão (2SUP). O valor da força aplicada correspondeu à força necessária para que fosse atingida a tensão de tração na fibra superior, de 2/3 da tensão de tração máxima do vidro. No entanto como a tensão de rotura do vidro tem uma dispersão significativa, optou-se por não assumir a tensão de rotura nominal, mas sim o valor de tensão registado na rotura do ensaio piloto de referência, TA_0 (21.9MPa). Posteriormente, nos ensaios termomecânicos foi aplicado o carregamento térmico, até se atingir a estabilização térmica, de acordo com a temperatura pretendida. A terceira e última fase consistiu na aplicação do carregamento mecânico, por meio do atuador, em controlo de deslocamento, com velocidade de 0,05 mm/seg., até ao esgotamento da capacidade resistente das vigas.

3.9.3 Ensaio piloto, PS_TA_0

Este serviu para otimizar o *layout* e procedimento de ensaio e obter uma primeira caracterização do comportamento estrutural de uma viga pré-esforçada. Foi efetuado à temperatura ambiente e como tal sujeito apenas a solicitação de pré-esforço e mecânica.

a) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Na Figura 3.66 é apresentado o gráfico de comportamento global e respetivos pontos notáveis.



Pontos Notáveis	Descrição
A-B	Aplicação do PE
B	Início da aplicação do carregamento mecânico
B-C	Regime elástico, até ao aparecimento das primeiras fendas
C-D	Regime pós-rotura com ligeira diminuição da rigidez e resistência
D-G	Capacidade resistente residual, com dano progressivo (E,F novas fraturas)
G	Esgotamento da capacidade resistente

Figura 3.66 – Curva de comportamento global e respetivos pontos notáveis (δ a 1/2 vão)

De acordo com a Figura 3.66, o primeiro segmento de A para B corresponde à aplicação do PE nos cabos, e como tal trata-se de uma deformação ascendente (sentido negativo). Após o início da aplicação da carga (B), o provete revelou comportamento elástico linear (B-C), no entanto após o aparecimento das primeiras fendas (C), o provete demonstrou uma significativa capacidade resistente residual (D-G) contrariamente ao observado nas vigas sem sistema de PE.

A primeira fratura (Figura 3.67 a)) ocorreu para uma carga de cerca de 26 KN, na zona de momento máximo junto ao apoio esquerdo do sistema de PE, provocando uma ligeira perda de rigidez. Após este ponto, a viga apresentou uma resposta linear, com aumento da resistência e sucessiva propagação da fenda existente que só terminou em E, com o aparecimento uma única fenda, junto ao ponto de contacto com o apoio esquerdo do sistema de PE (Figura 3.67 b)). Esta fenda inicialmente não irradiou, uma vez que dada a sua localização, se encontrava confinada pelas zonas comprimidas na face inferior e superior da secção. Por este motivo, embora o seu efeito sobre a rigidez seja visível no gráfico de comportamento global, ele é reduzido. Com a continuação da aplicação da carga, esta provocou uma nova propagação das fendas, que culminou (F) com o aparecimento de uma terceira fenda, em forma de diamante, sobre o apoio da direita do sistema de PE (Figura 3.67 c)). Após este ponto (F-G) surgiu uma última fenda diagonal (identificada na Figura 3.67 e)), ligeiramente à esquerda do meio vão da viga. Seguiu-se um aumento da deformação fora do plano, que provocou uma rotação dos apoios do sistema de PE (Figura 3.67 d)), e esmagamento localizado do vidro, tanto nos pontos de contacto do carro de carga, como nos apoios (Figura 3.68). Seguiu-se uma queda abrupta da resistência (G), com o aumento da área fendilhada, para um nível máximo de carga de cerca de 46 KN. O padrão de fratura resultante no final do ensaio é o da Figura 3.67 e).

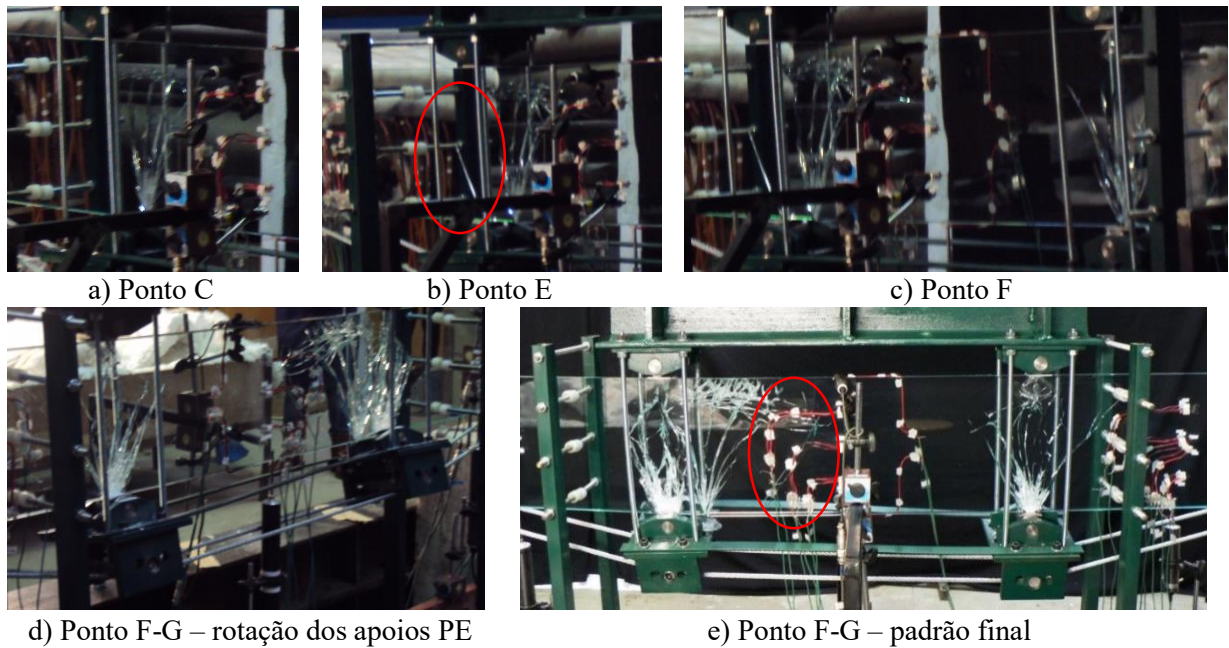


Figura 3.67 - Evolução do padrão de fratura ao longo do ensaio

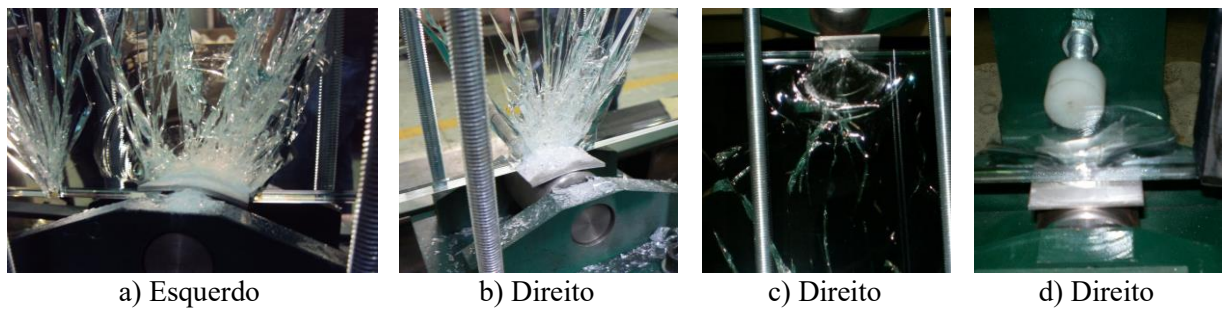


Figura 3.68 – Pormenorização dos pontos de contacto: (a-b) com o sistema de PE; c) com carro de carga; d) apoio da viga

b) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

O primeiro aspeto importante a analisar prende-se com a aplicação da força nos cabos (Figura 3.69).

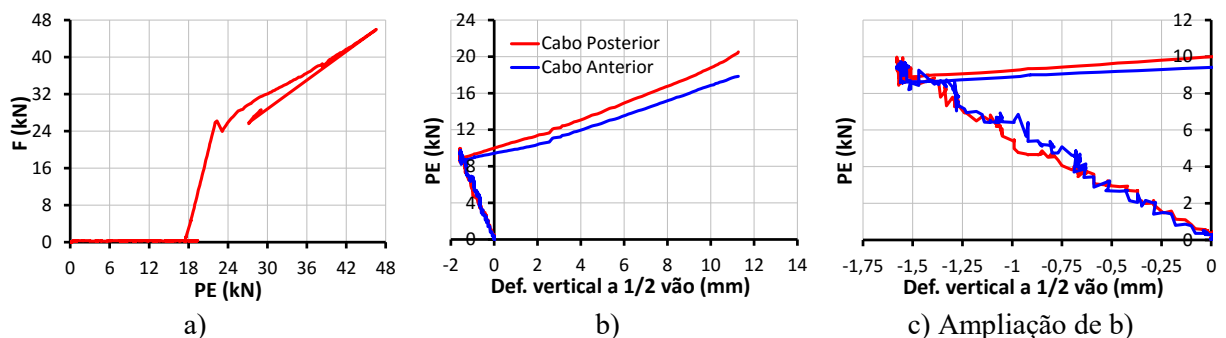


Figura 3.69 – Variação da força de PE ao longo do ensaio: a) Variação da força de PE em função o carregamento mecânico; (b-c) avaliação da diferença de PE nos cabos

Verifica-se que, devido a ajustes do sistema, ocorreu uma perda da força de PE após o aperto e verifica-se também que o PE é proporcional à força no atuador ao longo do ensaio (Figura 3.69 a)). Isto porque a deformação do sistema provoca alterações na força exercida pelos cabos. Verificou-se ainda que a partir da primeira fratura as forças nos cabos deixam de ser iguais (Figura 3.69 (b-c)), facto que não pode ser ignorado, uma vez que esta assimetria provoca solicitação fora do plano. Esta assimetria resultou das perdas de PE, ao longo dos cabos, especificamente no contacto com os desviadores. Além disso, os varões roscados que ligam os desviadores ao carro de carga, e as barras metálicas que unem os desviadores, sofrem deformações após o aperto dos cabos (contrariamente ao previsto, os desviadores estão sujeitos a forças horizontais).

São de seguida apresentadas as curvas força-extensão (Figura 3.70) e força-deformação (Figura 3.71).

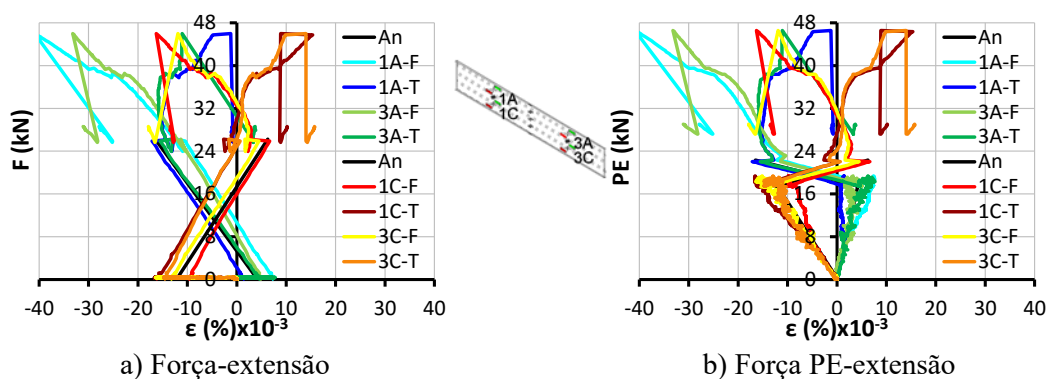


Figura 3.70 - Avaliação preliminar de resultados

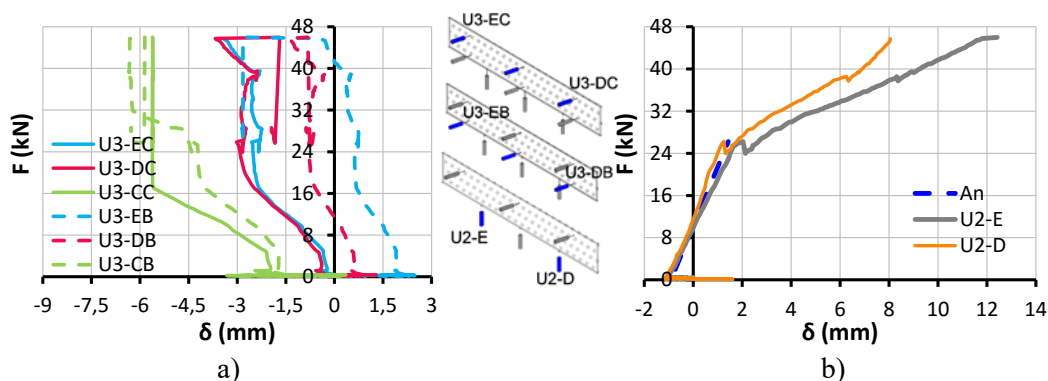


Figura 3.71 – Avaliação preliminar de resultados, força-deslocamento

De acordo com a Figura 3.70, verifica-se que à esquerda e à direita da viga, em posições homólogas não existe uma perfeita simetria de esforços. No caso dos extensómetros da linha A, à esquerda (1A) estarem mais comprimidos que os da direita (3A) demonstra que a tensão de compressão axial é variável ao longo da viga.

A análise dos resultados dos extensómetros (Figura 3.70) e dos defletómetros horizontais (Figura 3.71 a)) permite confirmar a existência de deformação fora do plano (mais acentuada a meio vão), e que esta é variável ao longo do ensaio, cerca. Esta corresponde a cerca de 26% da espessura da

viga, em regime elástico. De acordo com os defletómetros verticais, confirma-se a ligeira assimetria na distribuição dos esforços ao longo da viga, principalmente a partir de um valor de carga de cerca de 12 KN. Estes fenómenos são de pequena expressão e poderá dever-se a assimetrias no *layout*, atrito nos desviadores, ou a rotação das chapas de amarração dos cabos nas extremidades da viga que contribuam para estes efeitos. Isto verifica-se maioritariamente após a fratura.

c) Otimização do procedimento de ensaio

As conclusões a retirar sobre quais os aspetos a melhorar no sistema de pré-esforço são:

- O sistema de desviadores deveria ser melhorado, para que este não esteja sujeito a esforços na direção do cabo e não provoque perdas de PE. A solução passou por alargar os sulcos, que conduzem e mantem os cabos em posição (no rolete inferior) e diminuir o atrito de contacto, com um lubrificante adequado (massa grafitada).
- Colocar células de carga em ambas as extremidades dos cabos, e pré-esforçar os cabos de ambos os lados o mais simetricamente possível.
- Alinhar mais adequadamente a viga, com os roletes dos apoios, do carro de carga e com os eixos do elemento do desviador que conduzem os cabos no vão.
- Intercalar acetato sobre o alumínio, a fim de reduzir o dano superficial no contacto da viga com os elementos exteriores.

3.9.4 Ensaio à temperatura ambiente, PS_TA_1 e PS_TA_2

Foram estudados dois provetes, sujeitos a pré-esforço nos cabos e solicitação mecânica. Estes ensaios serviram de referência aos ensaios termomecânicos.

a) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Na Figura 3.72 encontram-se os resultados de comportamento global e respetivos pontos notáveis.

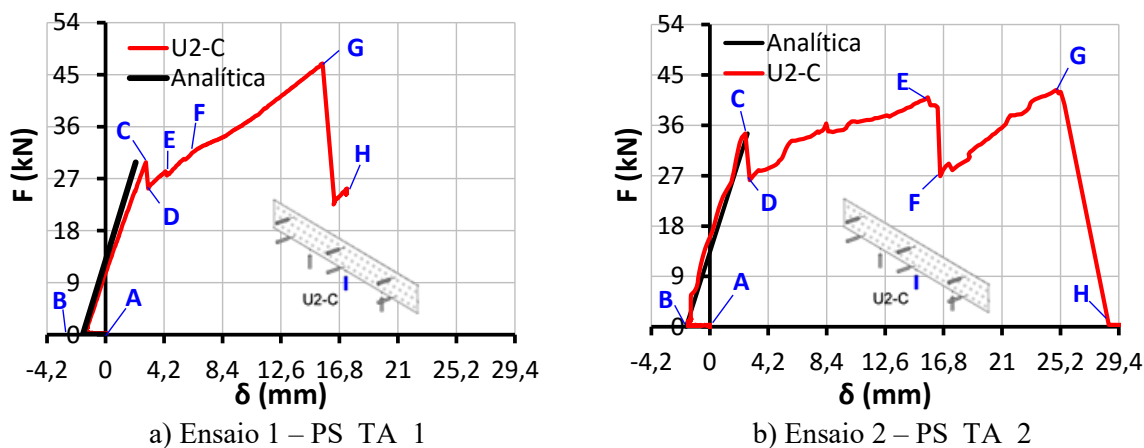


Figura 3.72 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

Os resultados de comportamento global dos dois ensaios (Figura 3.72) são consistentes, permitindo identificar diversos pontos em comum, inclusive relativamente ao ensaio piloto previamente apresentado. Nomeadamente, o troço (A-B) corresponde à aplicação do PE. Em B dá-se o início do carregamento mecânico e em C, o aparecimento das primeiras fraturas. O ponto D corresponde a uma ligeira perda da resistência dos provetes após as primeiras fraturas, e H ao esgotamento da capacidade resistente das vigas. As principais diferenças demonstradas no comportamento destes dois provetes prendem-se essencialmente com a localização da área fendilhada e com a sua evolução ao longo do ensaio, provocando sucessivas perdas de rigidez (Pontos E, F e G).

A Figura 3.73 e a Figura 3.74 representam a evolução e aspeto final das fraturas no provete 1 e no provete 2 respetivamente. É assim possível descrever detalhadamente os diversos eventos em ambas as vigas, desde o aparecimento das primeiras fendas (C) até ao seu esgotamento da capacidade resistente (H).

No provete 1, as primeiras fendas ocorreram na zona de contacto direito da viga e o rolete de PE, em forma de diamante (Figura 3.73 a)) provocando uma ligeira perda de rigidez (D). Após este ponto, com o aumento da carga aplicada (D-E), verificou-se um novo aumento da resistência e da área fendilhada (Figura 3.73 b)) e posteriormente (F) aparecimento de uma nova fenda, desta vez no outro ponto de contacto da viga, com o rolete do sistema de PE (Figura 3.73 c)). Neste ponto, como a fratura era reduzida e dada a sua localização, a perda de rigidez sofrida na viga foi pouco acentuada. Com a continuação do ensaio e a progressão da área fendilhada, ocorreu uma redução brusca da resistência da viga (G) resultante do esmagamento localizado do vidro (tanto na parte superior como inferior na viga) nos pontos de contacto do rolete direito (Figura 3.73 (d-e)). Após este ponto (H) a viga ainda conseguiu mobilizar um ligeiro ganho de resistência, mas acabou mesmo por esgotar a sua capacidade resistente (Figura 3.73 f)).

A Figura 3.73 b) representa um pormenor de um rolete munido com acetato a fim de reduzir o dano superficial no contacto com a viga e os elementos exteriores.

Relativamente ao segundo provete, este apenas apresentou fendilhação numa única zona, no ponto de contacto esquerdo do rolete do sistema de PE. A Figura 3.74 a) ilustra o seu aparecimento (C). Entre o ponto D e ponto E, com continuação da aplicação da carga, houve um aumento da área fendilhada (Figura 3.74 b)), comprovado pelas oscilações da curva do gráfico entre estes dois pontos. No Ponto E, ocorreu uma redução da resistência, devido ao esmagamento localizado do vidro no rolete inferior (Figura 3.74 c)). Após este ponto a resistência aumentou novamente (F-G), até que no ponto G com o esmagamento de toda a biela de compressão na viga (entre os pontos de contacto superior e inferior) ocorreu uma queda abrupta da resistência, ficando a viga sem qualquer capacidade resistente (Figura 3.74 (d-e)). O padrão final da viga após é o presente na Figura 3.74 f).

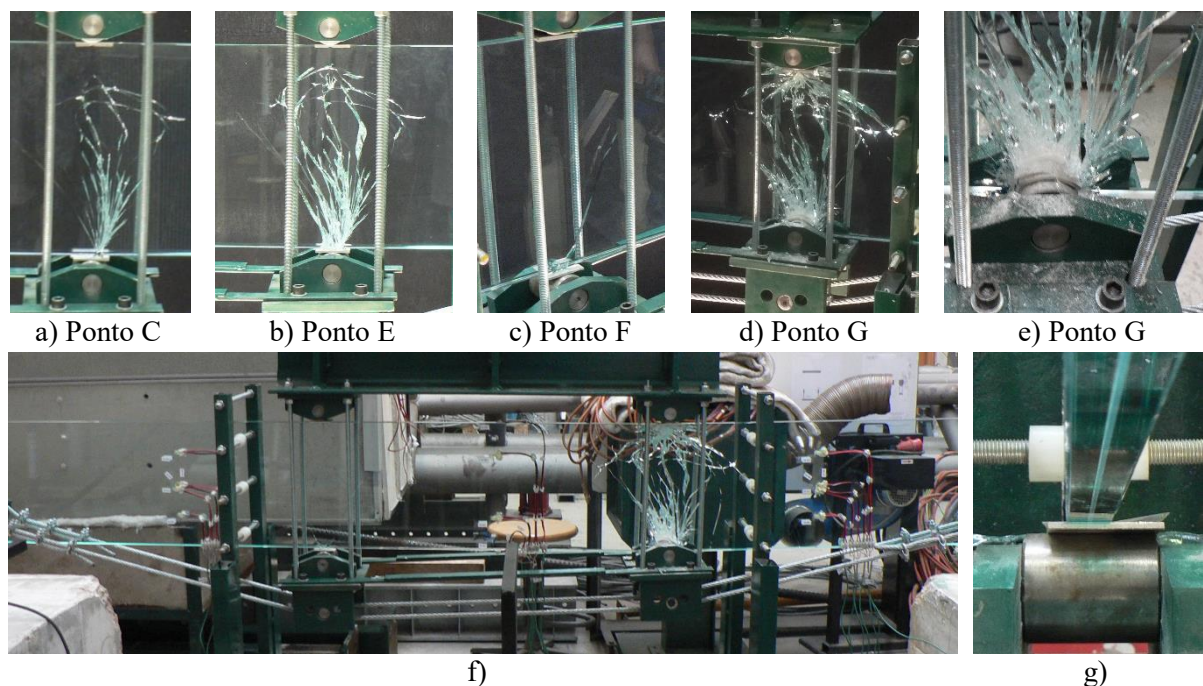


Figura 3.73 Ensaio PS_TA_1: (a-e) evolução do padrão de fratura; f) vista global do padrão de fratura resultante (plano posterior); g) Pormenor de rolete, com acetato intercalado entre o alumínio e o vidro

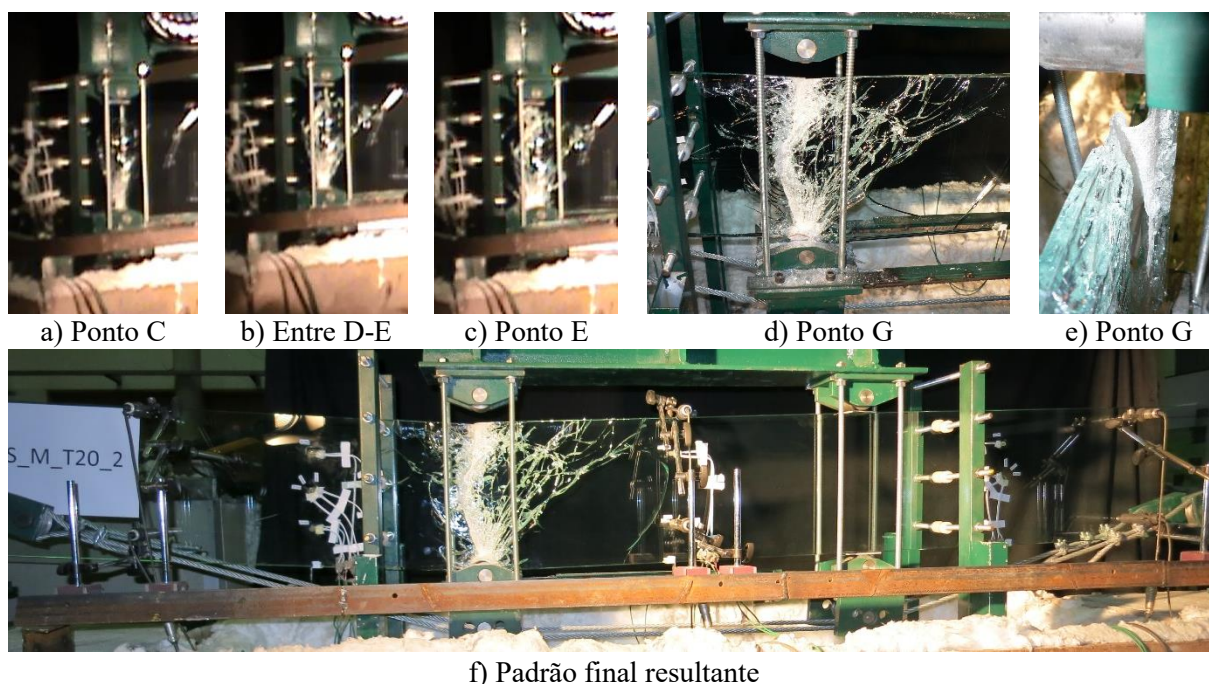


Figura 3.74 - Ensaio PS_TA_2: (a-e) evolução do padrão de fratura; f) vista global (plano anterior)

b) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

Os resultados relativos à avaliação de simetria e de deformações fora do plano demonstram bastantes semelhanças aos já apresentados para ensaio piloto (PS_TA_0). Apresentam-se de seguida para ambos os ensaios, a avaliação da força de pré-esforço nos cabos (Figura 3.75), a

análise das extensões em pontos representativos (Figura 3.76) e a avaliação das deformações verticais (Figura 3.77) e deformações fora do plano (Figura 3.78).

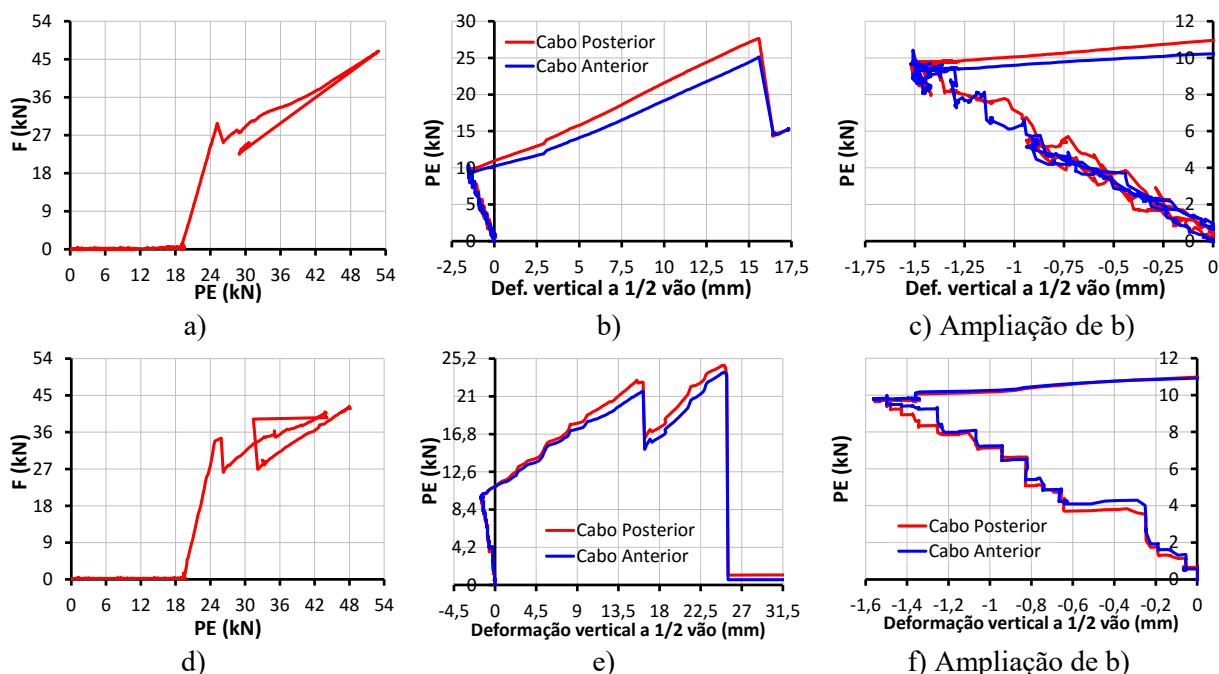


Figura 3.75 – Variação da força de PE ao longo dos ensaios: a) Variação da força de PE em função o carregamento mecânico; (b-c) avaliação da diferença de PE nos cabos; (a-c) PS_TA_1; (d-f) PS_TA_2

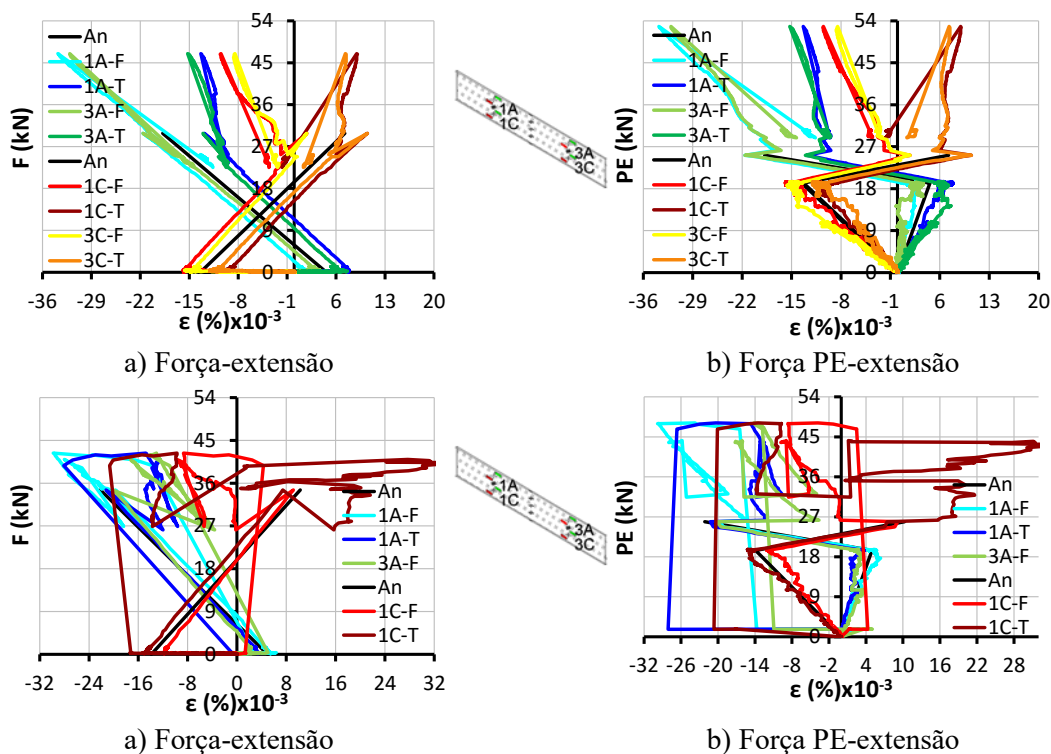
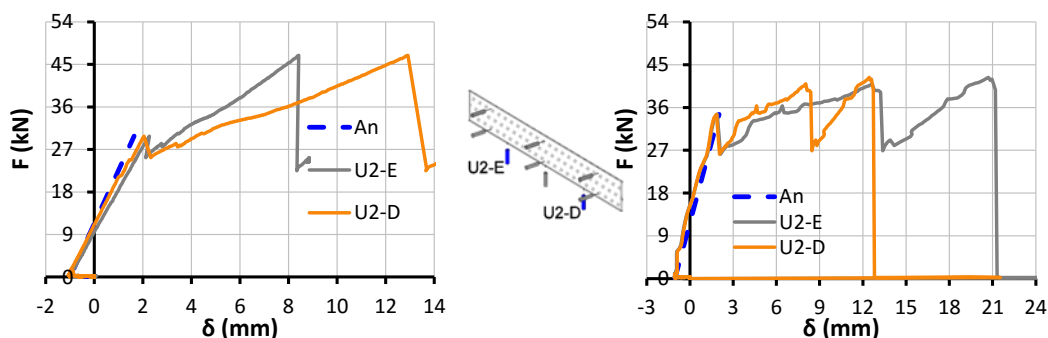
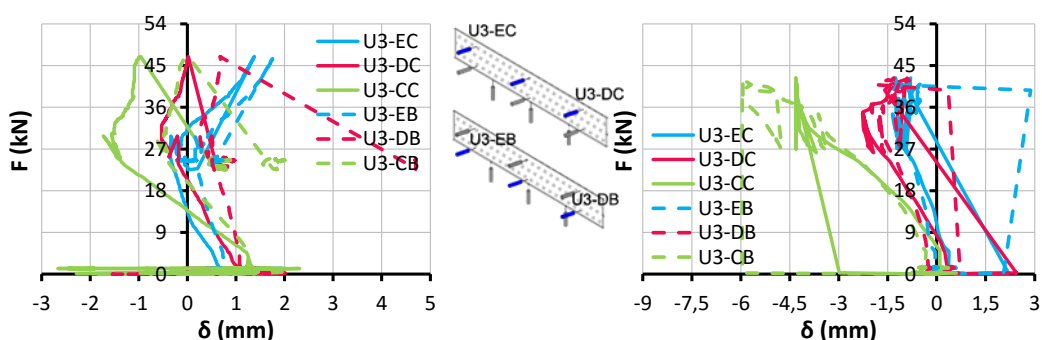


Figura 3.76 - Avaliação preliminar de resultados: (a-b) Ensaio PS_TA_1; (c-d) Ensaio PS_TA_2



a) Ensaio PS_TA_1
b) Ensaio PS_TA_2
Figura 3.77 – Avaliação preliminar de resultados, simetria de carregamento



a) Ensaio PS_TA_1
b) Ensaio PS_TA_2
Figura 3.78 - Avaliação preliminar de resultados, deformação fora do plano

Em ambos os ensaios, como a aplicação da força de PE inicialmente aplicada nos cabos é feita de forma manual, através do aperto das extremidades dos cabos, é de esperar que durante a aplicação existam pequenas desigualdades entre os valores medidos nos cabos (Figura 3.75 c) e f)). Contudo, quando se iniciou a aplicação do carregamento mecânico os dois cabos apresentavam valores próximos. No entanto, no caso do ensaio 1 verificou-se que com o decorrer do ensaio a força exercida pelos cabos posterior e anterior tomou valores cada vez mais distintos (Figura 3.75 b)), o que leva a concluir que existiu deformação por flexão fora do plano do provete.

Verificou-se que a distribuição de esforços à esquerda e direita da viga (Figura 3.76 e Figura 3.77), em regime pré-rotura, foi suficientemente simétrica em ambos os ensaios, facto que também pode ser comprovado pela análise das células de carga (Anexo D). Contudo, em fase pós-rotura, como esta não ocorreu a meio vão, verifica-se assimetria em ambas as vigas, notória na Figura 3.77

Foi novamente detetada deformação fora do plano. Por exemplo no caso do provete 1, ao analisar as extensões (Figura 3.76 a)) na mesma posição, na parte anterior (1A-F) e posterior (1A-T) da viga, verifica-se que a parte anterior encontra-se mais comprimida que a outra. A Figura 3.78 confirma-se que este facto, e que esta é mais acentuada a meio vão, onde corresponde a uma deformação máxima em regime elástico na ordem dos 8% para o ensaio 1, e na ordem dos 19% para o ensaio 2 em relação à espessura da viga.

c) Sumário

O Quadro 3.7 apresenta um resumo, dos principais resultados, dos ensaios acima expostos.

O nível de PE aplicado nos cabos correspondeu a 19,2 KN no caso do ensaio 1, de 16,6 KN, no caso do ensaio 2 e de 17,6 KN no caso do ensaio piloto. Verificou-se que o nível deste influenciou diretamente a resistência até à primeira fenda (26,2 KN, 29,8 KN e 34,6 KN respetivamente), e como tal demonstrou ser uma solução benéfica, não só no regime pré-fratura, mas também no regime pós-fratura, com todos os provetes a demonstrarem uma elevada resistência residual.

Quadro 3.7 - Comparação dos resultados à temperatura ambiente

Ensaio	F _{PE} (KN)	F _{1ªfenda} (KN)	F _{máx,rotura} (KN)	K (rad)	R _{residual} (*) (%)
Piloto PS_TA_0	17,62	26,22	45,98	1,42	175,34
PS_TA_1	19,22	29,82	46,94	1,43	157,41
PS_TA_2	19,62	34,55	42,32	1,44	122,49
Média	18,82	30,20	45,08	1,43	151,75

(*) $F_{máx,rotura} / F_{1ªfenda} * 100$

3.9.5 Ensaio termomecânicos

À semelhança dos ensaios sem sistema de PE, aqui foram também estudados dois níveis de carregamento térmico, a 50°C e 80°C. O *layout*, geometria, e instrumentação são os apresentados anteriormente. Os resultados serão apresentados em termos de estratégia de carga, comportamento global e respetivos padrões de fratura, bem como análise da simetria de esforços ao longo da viga e existência ou não de deformações fora do plano.

3.9.5.1 Temperatura de 50°C, PS_T50_1 e PS_T50_2

a) Estratégia de carga

As vigas foram solicitadas em 3 diferentes fases. Na Figura 3.79 identificam-se claramente cada uma dessas fases, em ambos os provetes: 1) Aplicação da força de PE nos cabos (troço inicial a temperatura constante); 2) Aplicação da solicitação térmica (identificada pela curva de aquecimento em ambos os lados do provete); 3) Aplicação do carregamento mecânico (identificam-se o instante e a sua amplitude).

A Figura 3.79 a) e c) mostra que o pré-condicionamento térmico de ambos os provetes, foi feito de forma idêntica no plano anterior e no plano posterior, facto que pode ser comprovado pelo gráfico com a evolução da temperatura ao longo da viga presente no Anexo D. Similarmente ao observado nos ensaios com solicitação térmica, mas sem sistema de pré-esforço, aqui também se verificou a existência de uma ligeira força residual praticamente desde o início do ensaio, correspondente a uma resposta do sistema ao carregamento térmico.

Relativamente à evolução do PE ao longo dos ensaios (Figura 3.79 b) e d) verifica-se que ocorreu uma ligeira perda do pré-esforço após o aperto, e que esta é proporcional à força no atuador. No ensaio 1 foi aplicado um valor de pré-esforço de cerca de 22,16kN e no ensaio 2 de 23.55kN.

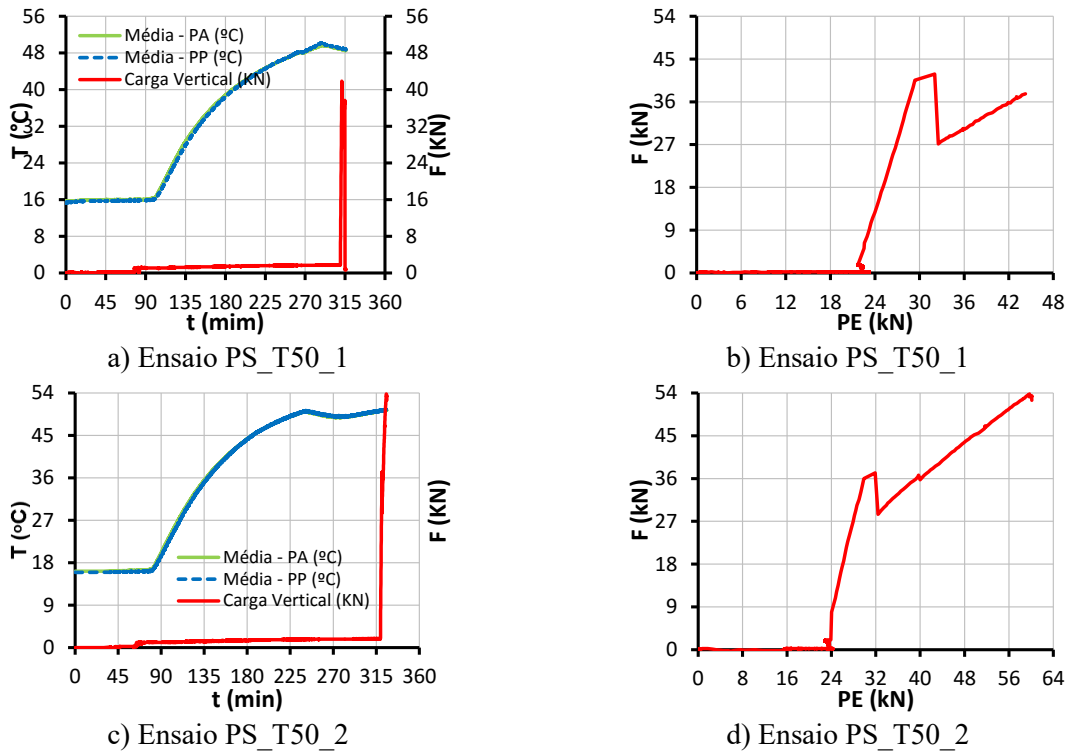


Figura 3.79 – Estratégia de carga considerada ao longo dos ensaios: a) e c) evolução do carregamento térmico e mecânico; b) e d) evolução do PE de acordo com a solicitação mecânica

b) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Apresenta-se de seguida, a curva de comportamento global e respetivos pontos notáveis, para ambos os ensaios a 50°C (Figura 3.80).

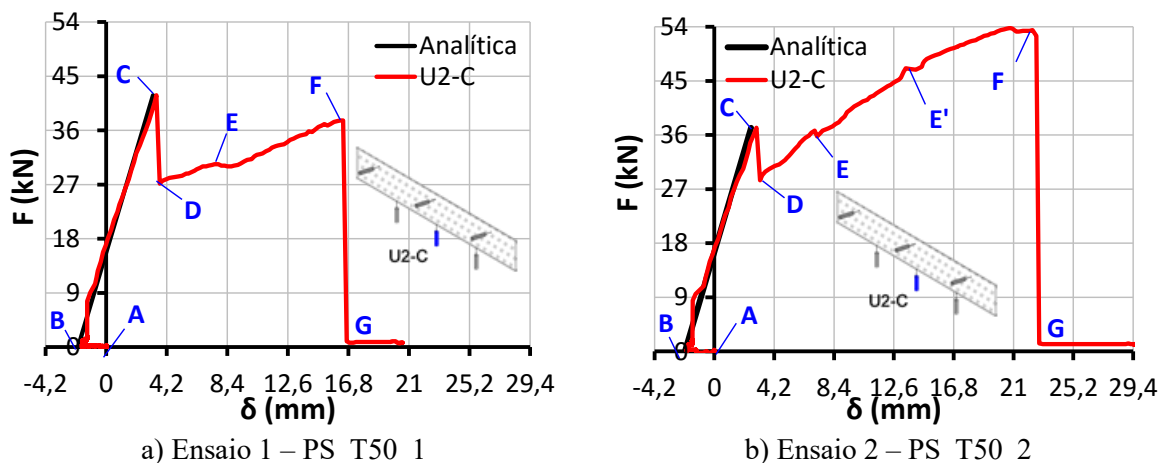


Figura 3.80 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

De acordo com a Figura 3.80, os dois ensaios à temperatura de 50°C também possuem um comportamento bastante similar entre eles, com diversos pontos em comum (inclusive aos ensaios a temperatura ambiente), nomeadamente:

- (A-B) – Aplicação do PE nos cabos, deformação ascendente na viga
- (B-C) – Regime elástico, onde B é corresponde ao início da aplicação do carregamento mecânico e C ao aparecimento das primeiras fendas
- (C-F) – Regime pós-fratura, com dano progressivo e consequentes perdas de rigidez (E)
- G – A viga esgotou a sua capacidade resistente

O padrão de fratura do provete 1 é o representado na Figura 3.81. A fendilhação iniciou-se com o aparecimento de uma fratura em forma de diamante, junto ao rolete esquerdo de apoio do sistema de pré-esforço (C). Posteriormente, a viga foi sofrendo um aumento do dano progressivo da área fendilhada que culminou com o aparecimento de uma nova fenda, no rolete direito (E). Dada a forma desta última fratura, e a sua localização, a perda de rigidez resultante foi pouco acentuada. Após este ponto, com a continuação da aplicação da carga, e uma vez que a rigidez lateral da viga era reduzida (pois o SG sofreu uma degradação das suas propriedades a 50°C) as deformações perpendiculares ao plano da estrutura aumentaram consideravelmente (F), provocando esmagamento tanto localizado no vidro nos pontos de contacto do carro de carga, como das bielas de compressão sobre os roletes, e formação de fendas diagonais a $\frac{1}{2}$ vão (escoras, resultantes do esforço transversal) que conduziram ao esgotamento da capacidade resistente da viga.

Relativamente ao provete 2, o seu padrão de fratura encontra-se representado na Figura 3.82. No geral a sequência de fracturação e o padrão resultante foi muito semelhante ao do ensaio 1.

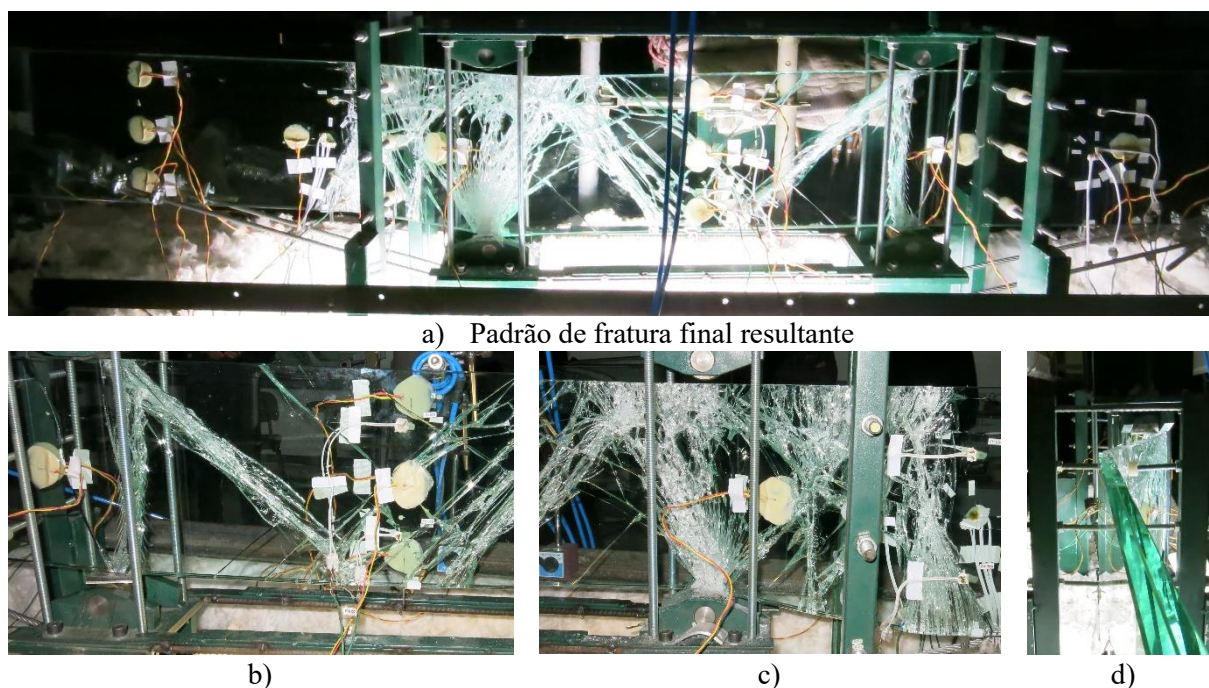


Figura 3.81 – Padrão de fratura, PS_T50_1: a) Vista global; (b-c) pormenorização; d) vista lateral



a) Padrão de fratura final resultante



b)



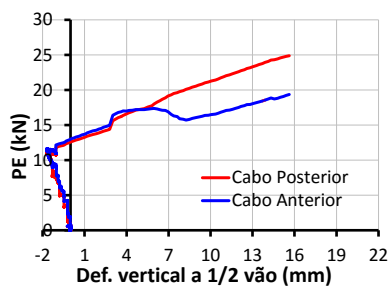
c)

Figura 3.82 – Padrão de fratura, PS_T50_1: a) Vista global; (b-c) pormenorização

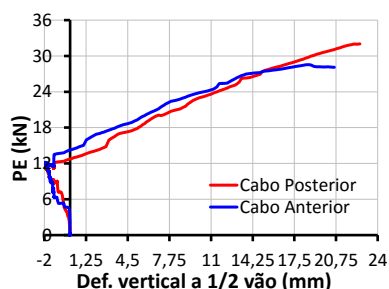
c) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

A avaliação é aqui efetuada em dois regimes, antes da aplicação do carregamento mecânico, e após a aplicação deste, permitindo deste modo avaliar os efeitos da aplicação do PE nos cabos e do carregamento térmico, separadamente do carregamento mecânico.

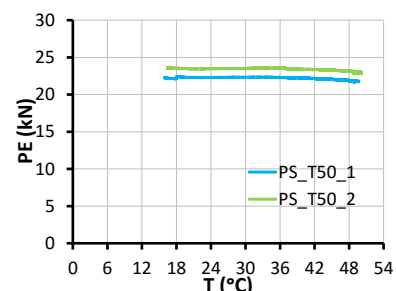
A Figura 3.83 permite avaliar tanto a simetria de forças nos cabos, como a influência da temperatura neles. No ensaio 1 (Figura 3.83 a)) apesar de no instante imediatamente antes da aplicação do carregamento mecânico as forças nos cabos apresentarem valores muito próximos, em regime pós-fratura existe uma notória assimetria entre elas, o que favoreceu nessa fase a deformação fora do plano. No ensaio 2 (Figura 3.83 b)) identifica-se uma ligeira assimetria na aplicação da força nos cabos, o que provocou flexão fora do plano da viga desde o momento inicial. Verifica-se ainda que a temperatura provoca uma ligeira diminuição da força de PE nos cabos. (Figura 3.83 c)).



a) Ensaio PS_T50_1



b) Ensaio PS_T50_2



c) PE vs. Temperatura

Figura 3.83 – Força de PE nos cabos: (a-b) avaliação da diferença de PE nos cabos c) avaliação da influência da temperatura em ambos os ensaios

Para ambos os ensaios são apresentados os resultados relativos às extensões e deformações verticais e horizontais (Figura 3.84), correspondentes à fase anterior à aplicação do carregamento mecânico (apenas PE e solicitação térmica). Verifica-se que ambas as vigas introduzem deformações iniciais nos provetes, embora a solicitação térmica introduza deformações menores.

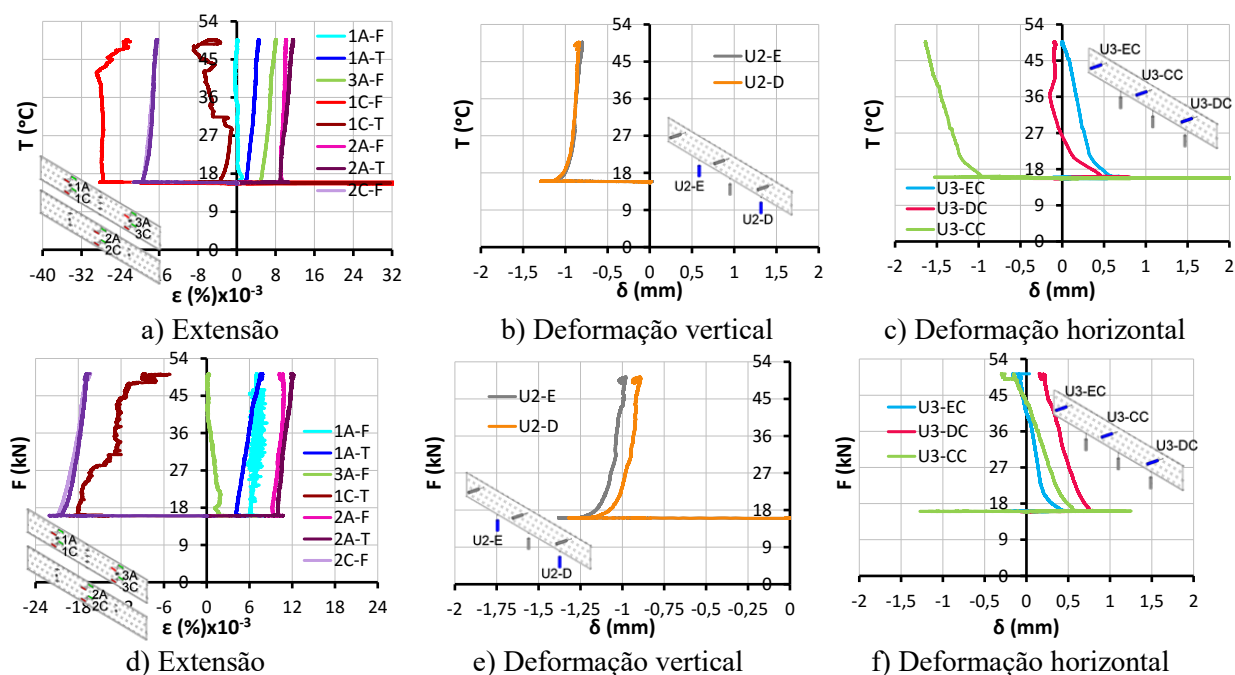


Figura 3.84 - Avaliação preliminar de resultados, em função da temperatura (PE + carregamento térmico): (a-c) Ensaio PS_T50_1; (d-f) Ensaio PS_T50_2

Os resultados relativos à aplicação do carregamento mecânico são de seguida apresentados. A fim de facilitar a sua compreensão, as curvas dos extensómetros são truncadas no valor de força máxima, correspondente ao esgotamento da capacidade resistente das vigas. No entanto no Anexo D encontram-se os resultados gráficos com a totalidade da curva, bem como os restantes resultados, que a fim de evitar repetições não são aqui apresentados.

Em ambos os provetes, verificou-se que a distribuição de esforços à direita e à esquerda da viga é suficientemente simétrica em regime pré-rotura (Figura 3.85 a) e c) e Figura 3.86). Em regime pós-rotura, uma vez que as fraturas não ocorreram a ½ vão, verificou-se existência de assimetria. Verificou-se a existência de deformações fora do plano (Figura 3.85 b) e d) e Figura 3.87). No caso do ensaio 1 corresponde a uma deformação fora do plano máxima, na zona central do provete, em regime elástico, na ordem dos 23% da espessura da viga, e no ensaio 2 corresponde a cerca de 18%. No caso do ensaio 2, uma das causas desta deformação fora do plano, será a assimetria nas forças dos cabos, detetada, imediatamente antes do início da aplicação do carregamento mecânico.

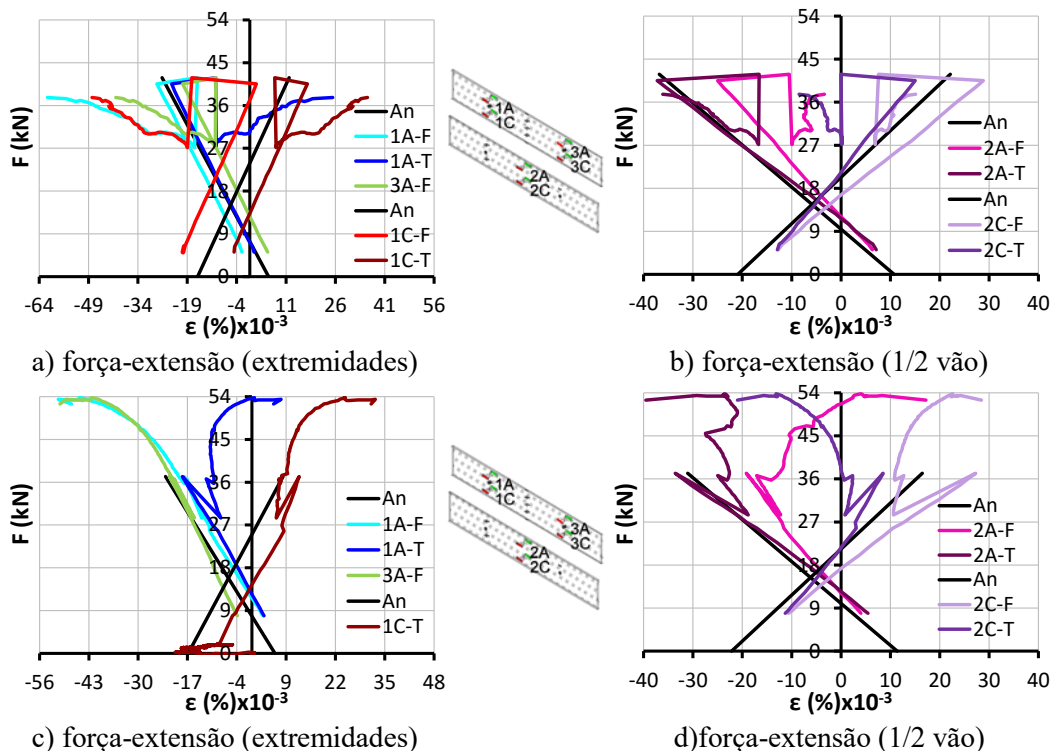


Figura 3.85 - Avaliação preliminar de resultados, (apenas carregamento mecânico): (a-b) Ensaio PS_T50_1; (c-d) Ensaio PS_T50_2

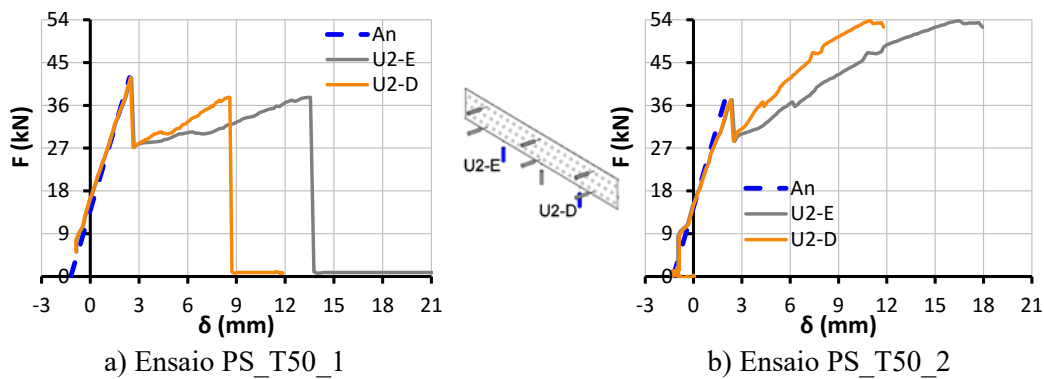


Figura 3.86 – Avaliação preliminar de resultados, simetria de carregamento

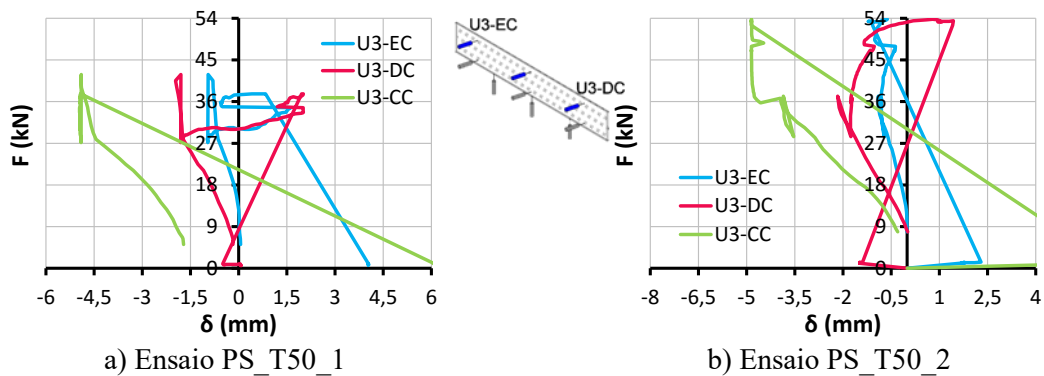


Figura 3.87 - Avaliação preliminar de resultados, deformação fora do plano

d) Sumário

Os resultados dos dois ensaios termomecânicos a 50°C foram bastante consistentes entre si, tanto em regime pré, como pós-fratura. No provete 1 o aparecimento das primeiras fendas ocorreu para um nível de carga de aproximadamente 41,9 KN, e no provete 2 para cerca 37,2 KN. Apesar da solicitação térmica e consequente degradação da película intercalar ambas as vigas demonstraram uma elevada resistência residual (Quadro 3.8). Este facto comprovou novamente a vantagem da introdução do sistema de PE, que apesar da degradação do SG, possibilitou obter uma rotura “segura”. No entanto com a perda de ligação entre os dois painéis de vidro, a rigidez lateral das vigas diminuiu e como tal as deformações horizontais tornaram-se bastante evidentes (observe-se os padrões de fratura, em ambos os ensaios).

Quadro 3.8 - Comparação dos resultados à temperatura de 50°C

Ensaio	F _{PE} (KN)	F _{1ªfenda} (KN)	F _{máx,rotura} (KN)	K (rad)	R _{residual} (*) (%)
PS_T50_1	22,16	41,85	37,66	1,43	90,00
PS_T50_2	23,55	37,18	52,49	1,44	141,16
Média	22,86	39,51	45,07	1,43	115,58

(*) $F_{máx,rotura} / F_{1ªfenda} * 100$

3.9.5.2 Temperatura de 80°C, PS_T80_0, PS_T80_1 e PS_T80_2

Para este nível de temperatura, inesperadamente, um dos provetes sofreu uma rotura súbita, imediatamente após a aplicação do PE (PS_T80_0). Por este motivo, para este nível de solicitação térmica, em vez dos habituais dois provetes ensaiados, foram testados um total de três provetes.

Os resultados do provete que quebrou serão apresentados separadamente e posteriormente, aos restantes provetes, onde apenas será efetuada uma análise a nível de comportamento global, mais concretamente a nível de comportamento pós-rotura.

a) Estratégia de carga

Representa-se de seguida as estratégias de carga (Figura 3.88) consideradas em ambos os ensaios realizados a 80°C. De uma maneira geral, os gráficos, de estratégia de carga são muito similares aos dos ensaios a temperatura de 50°C, permitindo identificar as diversas fases de carregamento.

Verificou-se que aquando da aplicação do carregamento mecânico, existia uma boa uniformização da temperatura, tanto ao longo da espessura (Figura 3.88 a) e c)) como ao longo do comprimento das vigas (consulte-se Anexo D, com o gráfico de evolução da temperatura ao longo da viga, e em ambos os planos). Identifica-se novamente a existência de uma força residual, associada a uma resposta do sistema ao carregamento térmico. O PE aplicado nos cabos, em ambos os ensaios foi bastante similar (Figura 3.88 b) e c)), na ordem dos 20KN, (20,28KN no ensaio 1, e 20,44KN no ensaio 2), sofrendo uma ligeira diminuição, durante a aplicação do carregamento térmico.

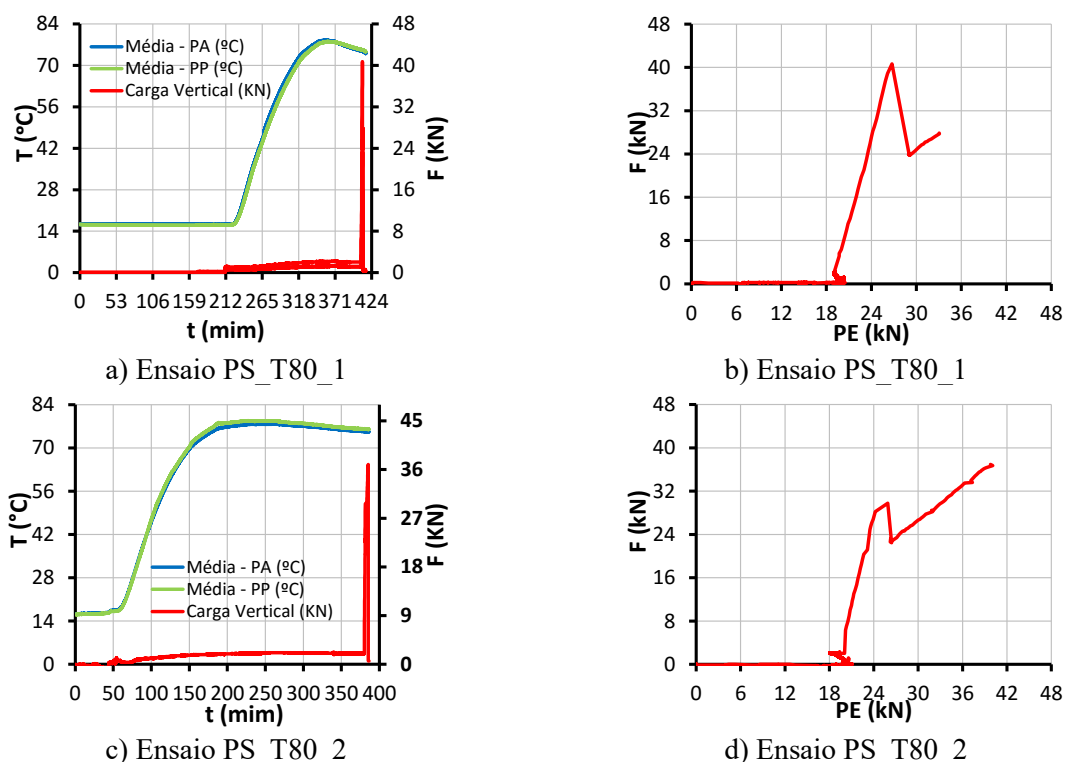


Figura 3.88 – Estratégia de carga considerada ao longo dos ensaios: a) e c) evolução do carregamento térmico e mecânico; b) e d) evolução do PE de acordo com a solicitação mecânica

b) Resultados - Comportamento global e padrão de fratura

Apresenta-se de seguida, as curvas de comportamento global e respetivas curvas analíticas (fase elástica), assim como a identificação dos principais pontos notáveis (Figura 3.89).

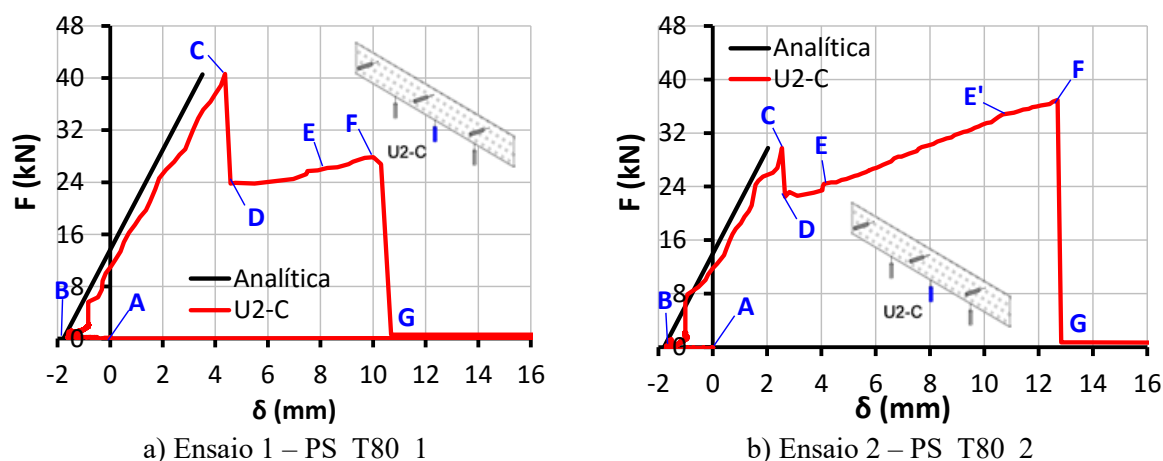


Figura 3.89 - Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

De acordo com os resultados de comportamento global, verificou-se que globalmente ambos os provetes apresentaram um comportamento muito semelhante ao já demonstrado nos ensaios homólogos a 50°C. A principal diferença é ao nível do comportamento pós-rotura, em particular,

relativamente às deformações perpendiculares ao plano da estrutura. De facto, para uma temperatura de 80°C, o SG sofreu degradação das suas propriedades mecânicas superior, e consequentemente a rigidez lateral das vigas diminuiu ainda mais, provocando deformações horizontais maiores, às verificadas nos provetes a 50°C.

Os padrões de fratura resultantes são os da Figura 3.90 (ensaio 1) e Figura 3.91 (ensaio 2).



a) Padrão de fratura final resultante



b)



c)



d)

Figura 3.90 - Padrão de fratura no ensaio PS_T80_1: a) Vista global; b) Pormenorização



a) Padrão de fratura final resultante



b)



c)



d)

Figura 3.91 – Padrão de fratura no ensaio PS_T80_2: a) Vista global; b) perspetiva; (c-d) pormenores

Em relação aos parões de fratura, as semelhanças são bastante notórias em ambos os provetes. As primeiras fraturas apareceram junto ao rolete esquerdo (C), seguindo-se um aumento da área já fendilhada que conduziram não só ao aparecimento de novas fraturas (rolete direito), como aumento de deformações fora do plano, provocando grandes deformações a meio vão (D-F), e consequente esgotamento da capacidade resistente da viga (G).

c) Resultados - Simetria e deformação fora do plano

A avaliação preliminar dos resultados de ambos os ensaios, referentes à influência da temperatura, à simetria e deformações fora do plano, são idênticas entre si e ao verificado nos ensaios a 50°C. Apresentam-se de seguida os diversos resultados para ambos os ensaios.

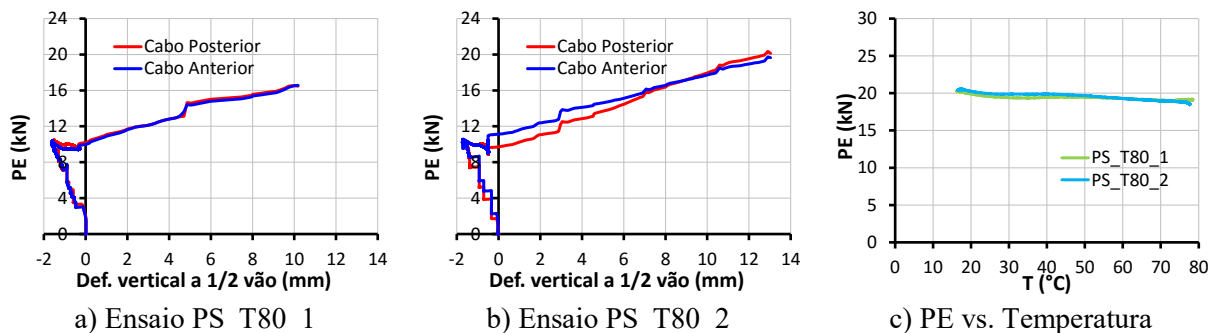


Figura 3.92 – Força de PE nos cabos: (a-b) avaliação da diferença de PE nos cabos c) avaliação da influência da temperatura em ambos os ensaios

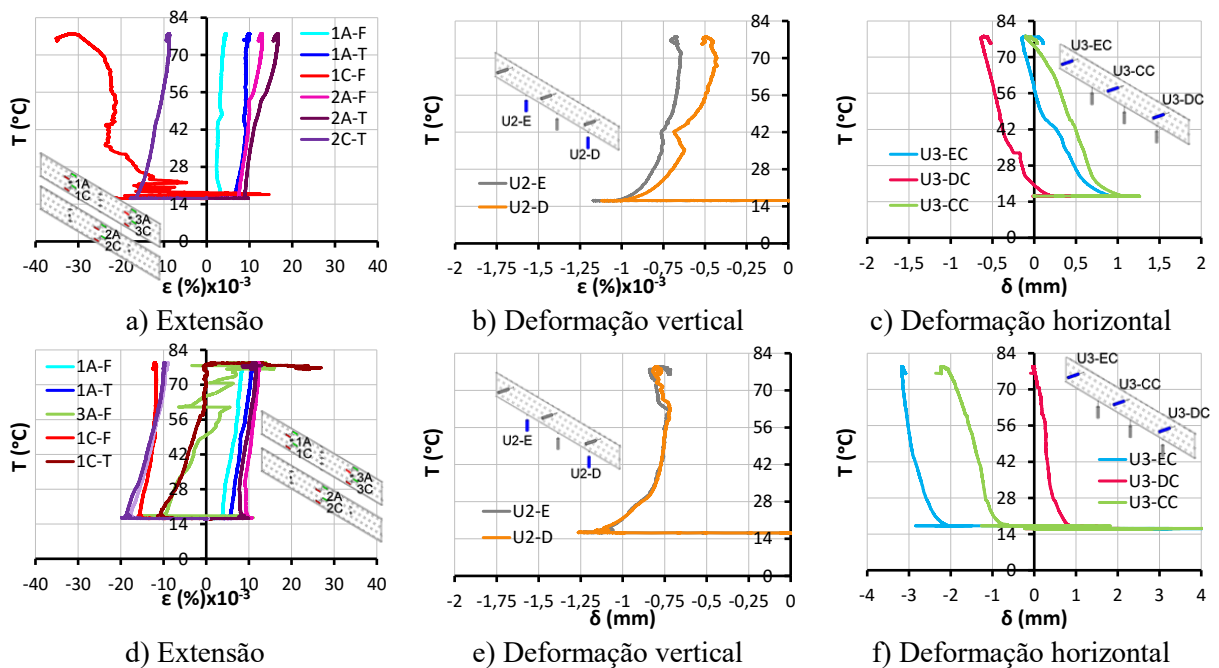


Figura 3.93 - Avaliação preliminar de resultados, em função da temperatura (PE + carregamento térmico): (a-c) Ensaio PS_T80_1; (d-f) Ensaio PS_T80_2

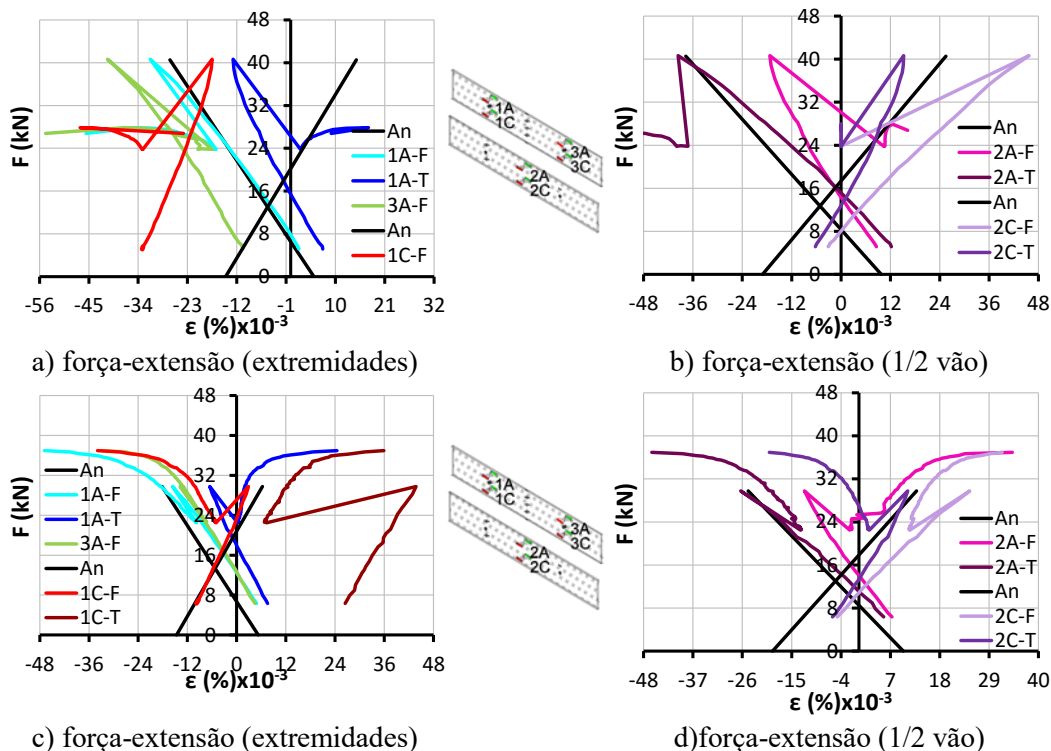


Figura 3.94 - Avaliação preliminar de resultados, (apenas carregamento mecânico): (a-b) Ensaio PS_T80_1; (c-d) Ensaio PS_T80_2

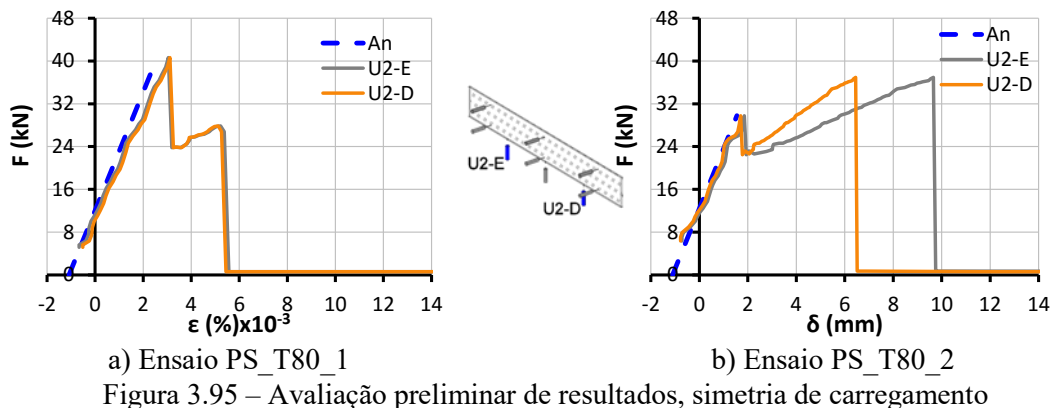


Figura 3.95 – Avaliação preliminar de resultados, simetria de carregamento

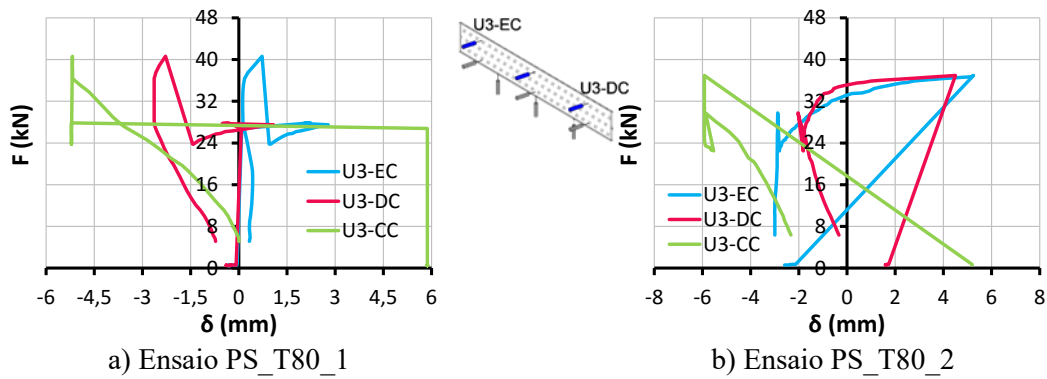


Figura 3.96 - Avaliação preliminar de resultados, deformação fora do plano

Em ambos os ensaios verificou-se que a aplicação da força nos cabos foi suficientemente simétrica para se poder considerar desprezável (Figura 3.92 (a-b)), e que a ação térmica tem um efeito penalizador na força dos cabos de pré-esforço, conduzindo a uma ligeira diminuição desta (Figura 3.92 c)) e como esperado introduz deformações iniciais nos provetes e no sistema (Figura 3.93).

Relativamente à fase de aplicação do carregamento mecânico, verificou-se que a distribuição de esforços era suficientemente simétrica em ambos os ensaios (Figura 3.94 a) e c) e Figura 3.95). Facto que pode também ser comprovado pelos resultados das células de carga no Anexo D. Já relativamente à deformação fora do plano, esta é detetada em ambos os ensaios (Figura 3.94 b) e d) e Figura 3.96), no entanto ganha maior expressão em fase pós-rotura e em particular na zona central do provete.

d) Apresentação e discussão de resultados do ensaio PS_T80_0

Tal como referido, neste ensaio, imediatamente após a aplicação da totalidade da força de PE, o provete sofreu uma rotura inesperada. A rotura ocorreu junto ao rolete esquerdo do carro de carga, abrindo uma fenda na fibra superior da viga, que radiou em forma de diamante (Figura 3.97 a)). Apesar disso, como inicialmente previsto, procedeu-se ao restante protocolo de ensaio. Deste modo, foi efetuada uma nova avaliação, do comportamento pós-rotura a 80°C, neste tipo de elementos estruturais.

A fim de compreender melhor, o comportamento do provete ao longo do ensaio, apresenta-se de seguida o gráfico de comportamento global (Figura 3.97 b)), e respetivos pontos notáveis, bem como os gráficos relativos à estratégia de carga aplicada (Figura 3.98).

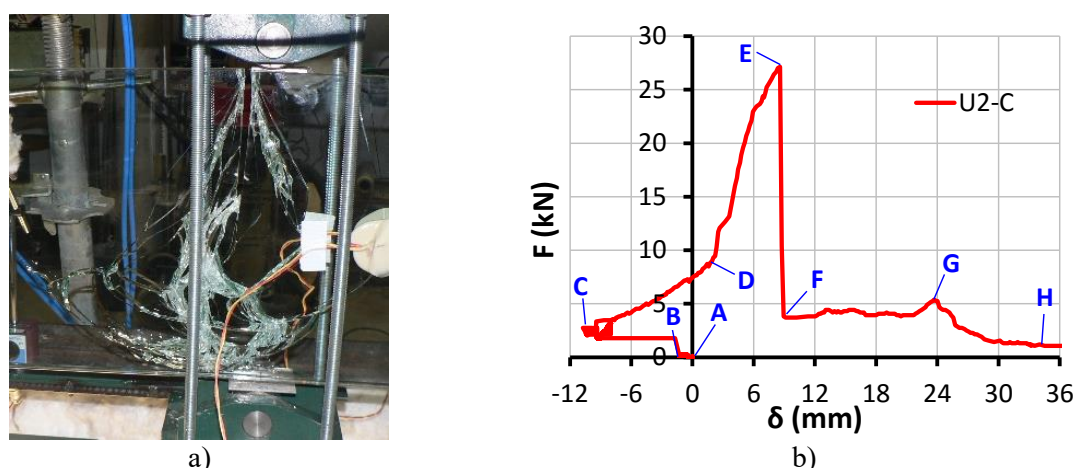


Figura 3.97 – Ensaio PS_T80_0: a) rotura imediatamente após a aplicação do PE; b) Curva de comportamento global (δ a 1/2 vão) e respetivos pontos notáveis

O ensaio iniciou-se com a aplicação do PE nos cabos até cerca de 22 kN (A-B). Imediatamente após este ponto, ocorreu a referida rotura do provete, verificando-se um decréscimo da força de PE até 9,6 kN (o ponto C representa o instante imediatamente após a rotura). Como se pode

observar tanto no gráfico de comportamento global (Figura 3.97), como nos gráficos de estratégia de carga (Figura 3.98) imediatamente a seguir à rotura (B-C) foi registada uma força. Esta força deve-se ao facto de que a distância que existia entre o carro de carga e a viga era inferior ao deslocamento que ocorreu, pela energia elástica libertada na rotura. Deste modo após a rotura, a viga passou a estar encostada ao rolete do carro de carga (Figura 3.97 a)), provocando assim a referida força, que corresponde à energia elástica que ainda se encontra instalada na viga. Em C, iniciou-se a aplicação do carregamento térmico, o que provocou as oscilações verificadas, perto desse ponto. Quando se atingiu a temperatura pretendida, deu-se então início à aplicação do carregamento mecânico. Na fase inicial de aplicação deste carregamento (C-D) a viga demonstrou uma rigidez muito baixa, uma vez que esta fase correspondeu ao fecho da fenda existente, na fibra superior da viga. A partir deste ponto (D-E), a rigidez da viga aumentou consideravelmente, com a fibra superior a contribuir para a resistência à compressão (como se não possuísse fenda), até que foi atingido o limite máximo da força (E). Neste ponto ocorreu um esgotamento quase total da capacidade resistente, resultante do esmagamento de toda a biela de compressão, entre os carros de carga superior e inferior (Figura 3.99). Mesmo assim após este ponto, o provete ainda manteve uma pequena resistência residual (F-H), mas que com a continuação da aplicação da carga, a viga foi se degradando cada vez mais até que esgotou na sua totalidade a capacidade resistente (H).

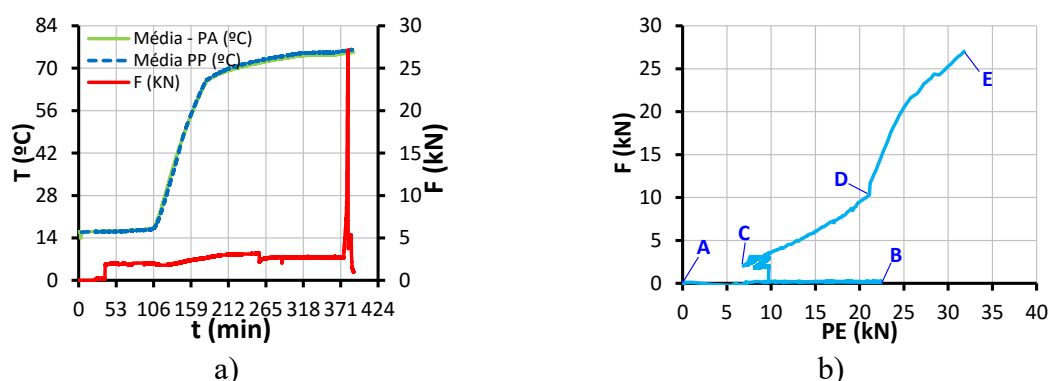


Figura 3.98 - Estratégia de carga considerada ao longo dos ensaios: a) evolução do carregamento térmico e mecânico; b) evolução do PE de acordo com a solicitação mecânica, com pontos notáveis



Figura 3.99 – Padrão de fratura resultante, PS_T80_0

Comparando, o comportamento global deste ensaio, com os restantes à mesma temperatura, ou até mesmo com os ensaios a 50°C, verificou-se que a rotura final não ocorreu por instabilização da zona central devido à degradação das propriedades mecânicas da película. Isto deve-se ao facto de que a fenda que apareceu inicialmente, funcionou como uma espécie de rótula de eixo vertical, diminuindo deste modo o comprimento de encurvadura e aumentando a carga de instabilidade do provete. Neste cenário, o facto de o SG sofrer degradação das suas propriedades, e provocar consequentemente diminuição da rigidez lateral da viga, não se tornou particularmente penalizador.

Verificou-se ainda que o facto da secção inferior da viga permanecer intacta, e a secção superior embora fraturada possibilitar compressão, fez com que a viga ainda apresentasse uma força máxima relativamente elevada (27,1KN).

e) Sumário

Os ensaios demonstraram um comportamento muito idêntico entre si, e inclusive ao comportamento dos provetes ensaiados a 50°C. Comprovou-se novamente que a degradação da película é particularmente penalizadora no comportamento pós-rotura das vigas, resultando num aumento de deformações horizontais excessivas, e consequentemente a uma rotura na zona central por instabilidade. O sistema de pré-esforço provou novamente ser um sistema promissor, uma vez que ambas as vigas demonstraram elevada resistência residual (Quadro 3.9).

Quadro 3.9 - Comparação dos resultados dos ensaios a 80°C

Ensaio	F _{PE} (KN)	F _{1ªfenda} (KN)	F _{máx,rotura} (KN)	K (rad)	R _{residual} (*) (%)
PS_T80_1	20,28	40,65	26,78	1,42	68,88
PS_T80_2	20,44	29,77	36,94	1,42	124,10
Média	20,36	35,21	31,86	1,42	94,99

(*) $F_{máx,rotura} / F_{1ªfenda} * 100$

3.9.6 Comparação e discussão de resultados

É aqui efetuada uma comparação de resultados, relativos aos ensaios com sistema de pré-esforço. A Figura 3.100 permite efetuar uma comparação em termos de comportamento global, o Quadro 3.10 apresenta uma síntese dos principais resultados.

Ao efetuar uma comparação em termos de comportamento global entre os diversos ensaios (Figura 3.100), verifica-se que independentemente da temperatura considerada, todos os provetes apresentaram um comportamento elástico linear em fase pré-rotura (B-C). Em fase pós-rotura (C-F), apresentaram uma significativa capacidade resistente residual e ductilidade (veja-se também os resultados do Quadro 3.10). Isto prova que o sistema de pré-esforço é um conceito extremamente promissor, que melhora significativamente o comportamento pós-rotura, sendo possível obter uma rotura “segura” com este sistema exterior de pré-esforço.

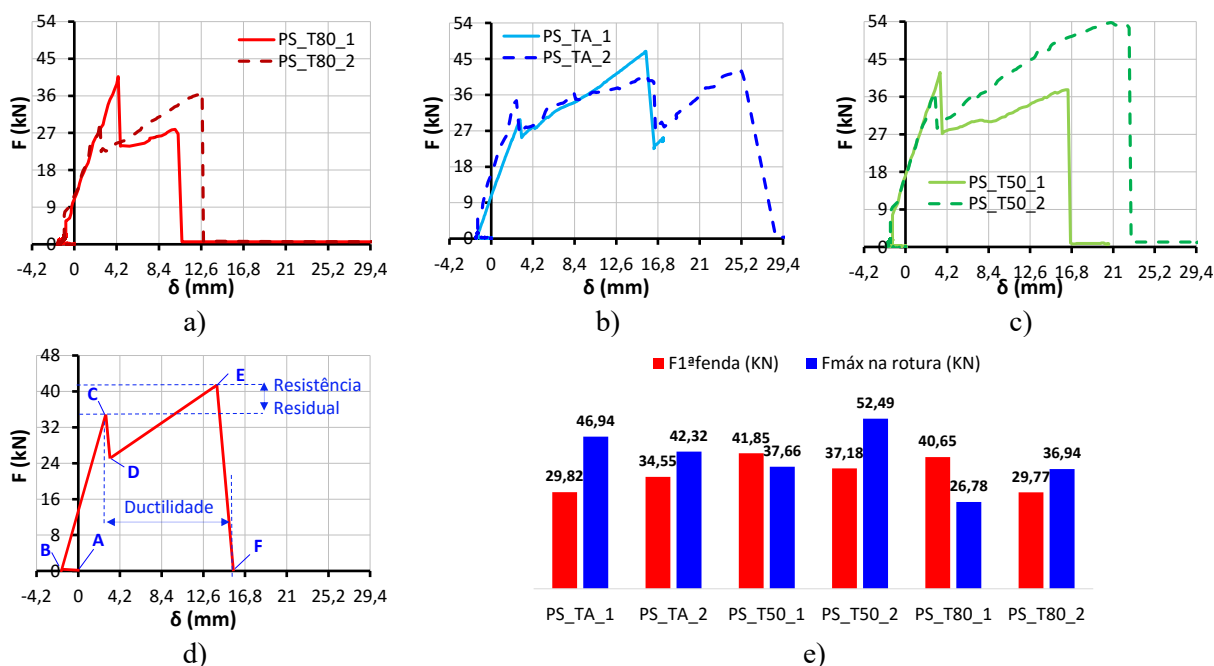


Figura 3.100 - Comparação do comportamento global: a) temperatura ambiente; b) 50°C; c) 80°C; d) curva genérica; e) comparação da resistência dos diversos ensaios

Quadro 3.10 - Comparação dos ensaios com sistema de pré-esforço

		Temp. Ambiente			50°C			80°C		
		E1	E2	Média	E1	E2	Média	E1	E2	Média
F _{PE}	KN	19,22	19,62	18,82	22,16	23,55	22,86	20,28	20,44	20,36
F _{1ªfenda}	KN	29,82	34,55	30,20	41,85	37,18	39,51	40,65	29,77	35,21
F _{máx na rotura}	KN	46,94	42,32	45,08	37,66	52,49	45,07	26,78	36,94	31,86
R _{residual} (*)	%	157,41	122,49	151,75	90,00	141,16	115,58	65,88	124,10	94,99
K	Rad	1,43	1,44	1,43	1,44	1,42	1,43	1,42	1,42	1,42
δ _{PE}	mm	-1,30	-1,36	-1,36	-1,68	-1,75	-1,72	-1,46	-1,73	-1,59
δ _{1ª fratura}	mm	2,90	2,55	2,67	3,49	2,96	3,22	4,37	2,55	3,46
δ _{máx na rotura}	mm	15,59	24,93	17,31	16,43	22,61	19,52	10,30	12,69	11,50
Ductilidade ^{(*)1}	%	537,59	976,14	653,73	471,14	764,22	617,68	236,05	497,60	332,53

(*) F_{máx na rotura}/F_{1ªfenda}*100 | ^{(*)1} (δ_{máx na rotura}/δ_{1ª fratura})*100

De acordo com o Quadro 3.10, é possível concluir que o nível inicial do PE nos cabos influencia diretamente a resistência máxima relativa à primeira fenda. Os ensaios em que foi dado um aperto inicial superior nos cabos, apresentam uma resistência em fase elástica mais elevada.

Foi efetuada uma comparação da deformação vertical (δ a 1/2 vão) em 3 momentos ao longo do ensaio, correspondentes à aplicação do PE (A-B), aparecimento das primeiras fendas (C) e no fim dos ensaios (F). A deformação resultante da aplicação do PE nos cabos (negativa), está diretamente relacionada com o nível a que força de PE aplicada. A média da deformação aquando do aparecimento das primeiras fendas, é superior dos ensaios à temperatura ambiente, para os de

50°C e destes para os de 80°C, uma vez que a aplicação do carregamento térmico só por si causou algumas deformações.

Relativamente à influência da temperatura nos resultados, tanto no regime pré como pós-fratura, como esperado os resultados foram muito idênticos ao demonstrado para os ensaios sem sistema de pré-esforço, o que garantiu confiança nos resultados.

Quanto ao padrão de fratura, apesar de em todos os ensaios, a fissuração se ter iniciado junto aos roletes de apoio, devido a dano local, verificou-se que o dano estrutural resultante, nos ensaios à temperatura ambiente, é significativamente diferente dos ensaios termomecânicos. Nos ensaios termomecânicos, com a degradação da película e a sua conseqüente perda de capacidade de manter os painéis de vidro unidos, em um conjunto monolítico, a rigidez lateral das vigas diminuiu consideravelmente, provocando deformações fora do plano elevadas, que conduziram a uma rotura por instabilidade na zona central da viga. Verificou-se ainda que a perda de ligação entre os 2 vidros conduziu a que os padrões de fratura de ambos fossem menos auto influenciáveis, partindo de forma individual, traduzindo-se em linhas de rotura menos reticuladas.

3.10 Comparação dos ensaios com e sem sistema de pré-esforço

É aqui efetuada uma comparação dos principais resultados obtidos para os diversos ensaios efetuados à escala real. A comparação é efetuada em termos de resistência até às primeiras fendas e respetiva tensão instalada no vidro, bem como rigidez, e resistência máxima. O Quadro 3.11 permite efetuar esta comparação.

Quadro 3.11 - Comparação dos resultados experimentais com e sem sistema de PE

Temperatura	Nomenclatura	F _{1^ofenda} KN	σ _{1^ofenda} MPa	K Rad	F _{máx. na rotura} KN
Temperatura Ambiente	TA_1	25,80	42,07	1,42	-
	TA_2	28,10	45,54	1,42	-
	Média	27,00	43,81	1,41	-
50°C	T50_1	23,90	43,38	1,41	-
	T50_2	31,61	55,73	1,42	-
	Média	27,82	49,51	1,42	-
80°C	T80_1	30,53	42,0	1,42	-
	T80_2	25,72	37,2	1,41	-
	Média	28,10	39,6	1,42	-
Temperatura Ambiente	PS_TA_1	29,82	36,13	1,42	46,94
	PS_TA_2	34,55	48,67	1,42	42,32
	Média	30,20	33,11	1,41	45,08
50°C	PS_T50_1	41,85	24,71	1,41	37,66
	PS_T50_2	37,18	38,19	1,42	52,49
	Média	39,51	31,45	1,42	45,07
80°C	PS_T80_1	40,65	64,02	1,42	26,78
	PS_T80_2	29,77	36,25	1,41	36,94
	Média	35,21	50,14	1,42	31,86

De uma maneira geral, verificou-se que os efeitos da temperatura foram semelhantes, tanto nos ensaios com, como nos ensaios sem PE. Em ambos os casos confirmou-se a degradação das propriedades do SG, para temperaturas acima dos 50°C. No entanto em regime elástico (antes do aparecimento das primeiras fendas) não existiu uma clara influência do efeito da temperatura, em ambos os tipos de ensaio. De facto a diferença de rigidez global é mínima (Quadro 3.11). A razão para tal, é que quando as vigas se encontram posicionadas ao alto, e para este tipo de solicitações mecânicas, a película de laminação contribui muito pouco para a rigidez e resistência das vigas. Relativamente ao sistema de pré-esforço, ainda neste regime e como esperado, este não influencia a rigidez inicial das vigas, apenas melhora ligeiramente a sua resistência, de acordo com o nível de PE inicialmente aplicado nos cabos.

No entanto em regime pós-fratura, é bastante notória tanto a influência da temperatura, como do sistema de pré-esforço. De facto, enquanto em regime pré-fratura a viga funciona à flexão no plano (peça linear), em regime pós-fratura, uma vez que a viga se encontra parcialmente fraturada, ela funciona num esquema misto, com efeito de membrana e de arco, no plano e fora dele. Por este motivo, o comportamento estrutural é extremamente dependente das condições da película de laminação, sendo este afetado quando esta se deteriora. A introdução do sistema de pré-esforço permitiu minimizar este efeito, uma vez que contribui para uma rotura “segura” ao garantir existência de resistência residual e de ductilidade. Como tal, o maior benefício da introdução do sistema de pré-esforço, foi claramente em regime pós-fratura, relativamente à resistência residual e robustez que demonstrou conferir a cada um dos provetes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões

Na presente dissertação, foi estabelecida uma campanha experimental, a fim avaliar e caracterizar o comportamento de vigas de vidro laminado (compostas por película de laminação SentryGlas®), com e sem sistema de pré-esforço, à escala real, em posição ao alto e em esquema de flexão em quatro pontos, quando sujeitas a solicitação térmica. Foram estudados dois níveis de solicitação térmica, 50°C e 80°C, com posterior carregamento mecânico até à rotura. Deste modo pretendeu-se não só avaliar o comportamento deste tipo de elementos estruturais, quando sujeitos à ação térmica, como também analisar os benefícios da introdução do sistema de pré-esforço, na sua capacidade resistente à flexão.

Para uma avaliação o mais correta possível da influência da temperatura sobre o comportamento estrutural neste tipo de secções compósitas, é necessário que os provetes se encontrem a temperatura uniforme, ao longo do seu comprimento, e em particular ao longo da sua espessura. Deste modo, foram efetuados ensaios de pré-condicionamento térmico, que permitiram avaliar qual o período de tempo necessário para aquecer uniformemente os provetes. Concluiu-se que a película de laminação adquire a temperatura do vidro, em um intervalo de tempo muito curto, e como tal o período de pré-condicionamento térmico dos provetes é muito reduzido.

Apesar da incerteza associada à rotura frágil do vidro, ao comportamento da película quando sujeita a ações térmicas, e da própria aplicação do carregamento térmico, os ensaios para condições idênticas, apresentaram resultados muito consistentes entre si, o que garante confiança nos resultados.

Independentemente da existência ou não do sistema de pré-esforço confirmou-se que o SG sofre degradação das suas propriedades mecânicas (apresenta uma condição mais fluída), para temperaturas acima as 50°C. No entanto verificou-se que esta degradação apenas influencia o comportamento estrutural das vigas em regime pós-rotura. Esta constatação deve-se ao facto de a viga se encontrar fletida no plano perpendicular à película de laminação. De facto em regime pré-fratura (regime elástico), verificou-se que o efeito da temperatura é muito pequeno. Neste regime o esquema de funcionamento principal corresponde a flexão no plano, com alguma flexão fora do plano. No entanto esta última tem pouca expressão antes da fratura, pois deve-se apenas a pequenas imperfeições da geometria ou da aplicação de carga. Neste cenário, a película de laminação contribui pouco para a resistência, sendo esta pouco penalizada quando o SG sofre degradação das suas propriedades. Ainda neste regime, verificou-se que de uma maneira geral, a resistência à primeira fenda é superior dos ensaios a temperatura ambiente para 50°C e destes para 80°C. Este facto poderá ser explicado pela perda de contacto entre os painéis de vidro, resultante da maleabilidade do SG quando sujeito a solicitações térmicas. Deste modo a transmissão de

fissuras, ou dos seus efeitos, de um painel de vidro para o outro fica comprometida, aumentando assim a resistência das vigas quando sujeitas a carregamentos térmicos.

Em regime pós-fratura, como a viga já se encontra parcialmente fraturada, as deformações fora do plano são apreciáveis, mobilizando flexão, segundo o eixo fraco, que depende em grande escala da película de laminação. Quando esta se degrada, esta perde a capacidade de manter os painéis de vidro unidos num conjunto monolítico, conseqüentemente a rigidez lateral da viga diminui, aumentando ainda mais as deformações fora do plano. Por este motivo a degradação da película, neste regime, torna-se particularmente penalizadora, uma vez que provoca diminuição ou até mesmo o esgotamento da resistência residual nas vigas.

Verificou-se que a introdução do sistema de pré-esforço, permitiu minimizar este efeito negativo, associado á degradação da película, conferindo elevada resistência residual e ductilidade, permitindo deste modo obter uma rotura “segura”. Neste enquadramento verificou-se que a aplicação do sistema de pré-esforço é um método de reforço bastante promissor.

4.2 Propostas para desenvolvimentos futuros

Finalizando este estudo, apresentam-se algumas sugestões para estudos futuros a fim de complementar todo o trabalho desenvolvido na presente dissertação.

- Propõe-se a realização de uma análise paramétrica, com a realização de Modelos de Elementos Finitos, a fim de auscultar o efeito de variar os parâmetros com maior peso no comportamento estrutural, nomeadamente: variar o *layout* do cabo e a sua geometria; o nível de PE; considerar outras espessuras de película; considerar outros tipos de contraventamento (estabilidade); considerar outras temperaturas (por exemplo negativas);
- Proceder à calibração dos modelos numéricos com os resultados experimentais obtidos;
- Estabelecer formulações para o dimensionamento e recomendações construtivas relativamente ao efeito da temperatura sobre o sistema estrutural estudado;
- Utilização dos resultados obtidos na validação de formulação estabelecida para dimensionamento deste tipo de elemento estrutural;
- Seria também interessante o estudo de soluções híbridas que partam desta geometria e permitam melhorar aspetos menos positivos do sistema estudado (madeira, aço, FRP’s...)

4.3 Publicações

O trabalho levado a cabo na presente dissertação deu origem a 5 artigos científicos: 2 artigos de conferência internacional; 1 artigo de conferência nacional e 2 artigos de revista (1 submetido e outro em fase de preparação).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM (2010). “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. D638-10, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM 4065 “Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties”

Behr, R., Minor, J., Linden, M., and Vallabhan, C. (1985). “Laminated Glass Units Under Uniform Lateral Pressure”. *J. Journal of Structural Engineerin*, 111:5(1037), pp. 1037-1050

Belis, J., Beken, J.V., Impe, R. Van e Callewaert, D. (2007a). “Performance of glass-ionoplast laminates above room temperature”. *Glass Performance Days*, Tampere, Finland, pp.639-642

Belis, J., Depauw, J., Callewart, D., Delincé, D., Impe, R. van, (2009), “Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature”. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, 16, pp. 1866-1875

Bennison, S.J., Jagota, A., Smith, C.A, (1999). “Fracture of Glass/Poly(vinyl butyral) (Butacite®) Laminates in Biaxial Flexure”. *Journal of the American Ceramic Society*, 82: pp.1761-10

Bennison, S.J., Smith C.A., Duser, A. van, Jagota, A. (2002) “Structural performance of laminated glass made with “stiff” interlayer”, *Glasstech Asia*

Bennison, S.J., Qin M., Davies, P. (2008). “High-performance laminated glass for structural efficient glazing”. *Innovative Light-weight Structures and Sustainable Facades*, Hong Kong

Bos, F.P., Veer, F.A., Hobbelman, G.J., Louter, P.C. (2004). “Stainless steel reinforced and post-tensioned glass beams”. *ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics*, Politecnico di Bari, Italia

Bos, F.P. (2009). “Safety Concepts in Structural Glass Engineering.Towards an Integrated Approach”, *Tese de Doutoramento*, Technische Universiteit Delft, Delft.

Callewaert, D., Delincé, D., Belis, J., Impe, R. Van (2008). “Temperature-dependent behaviour of glass/ionomer laminates: preliminary test results”. *Challenging Glass, Conference on Architectural and structural applications of glass*, Eds.: Bos, Louter, Veer, TU Delft

Colvin, J. B. (JCGC Ltd), (2007), “Comparison of monolithic and laminated glass subjected to barrier loads”, *Proceedings of Glass Performance Days 2007*, Tampere, Finland, pp.: 648-649

Delincé, D., Callewaert, D., Belis, J., Impe, R. van (2008^a). “Post-breakage behaviour of laminated glass in structural applications”. Challenging Glass, Conference on Architectural and structural applications of glass, Eds.: Bos, Louter, Veer, TU Delft

Delincé, D., Depauw, J., Callewaert, D., Vanlaere, W., Belis, J. (2008^b). “Plastic deformation of polymer interlayers during post-breakage behavior of laminated glass – partim 2: experimental validation”. Internat J Modern Phys B; 22: pp. 5447-5452

Delincé, D., Callewaert, D., Belis, J., Impe, R. van (2010). “Influence of temperature on post-breakage behaviour of laminated glass beams: Experimental approach”. Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and structural applications of glass, Eds.: Bos, Louter, Veer, TU Delft, Delft

DuPont (2009) “DuPont TM SentryGlas® architectural safety glass interlayer”, EI du Pont de Nemours and company, obtido através do *website* www.sentryglas.com.

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; Part 2: Coaxial double ring test on flat specimens with large test surface areas; Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending)”. CEN, Brussels, Belgium.

Ferreira, R. (2014). “Aspectos tecnológicos relativos a ensaios de vidro”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

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

Froli, M. e Lani, L. (2010) “Glass tensegrity trusses”, *Strutural Engineering International*, 20(4), p.436-441

Haldimann, M., Luible, A., Overende M. (2008). “Structural use of glass”. IABSE-AIPC-IVBH, Zurique, Suíça, ISBN 978-3-85748-119-2

Hooper, J.A. (1973). “On the Bending on Architectural Laminated Glass”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1973:15; pp. 309-325

JRC Scientific and Policy Reports. (2014). “Guidance for European Structural Design of Glass Components”. Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, Luxembourg: Publications Office of the European Union, ISBN 9789279350948

Jordão S., Pinho M., Neves L., Santiago A. and Martins J. (2014) “Behaviour of laminated glass beams reinforced with pre-stressed cables”. *Steel Construction Journal*, 3/2014

Jordão, S., *et al.* (2015). “S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente.” Projeto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, inserido no projeto PTDC/ECM/116609/2010.

Kennedy, R., (1997), “The history and future of the flat glass industry”, Jan Belis (Eds.), Glass Processing days, Tampere, Finland, ISBN 952-90-8959-7, pp. 28- 36.

Le Bourhis, E. (2008), “Glass: Mechanics and Technology”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemanha

Louter, C. (2009), “Metal-to-glass bonding properties of an acrylate adhesive (DELO GB368) and an ionoplast interlayer (SentryGlas) at 23, -20 and 60°C”. Glass Performance Days. Tampere, Finland, pp. 149-143

Louter, C. (2010), “Experimental investigation of the temperature effect on the structural response of SG-laminated reinforced glass beams”. Engineering Structures, Elsevier, 32, pp. 1590-1599

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

Louter, C., Belis, J., Veer, F., Lebet, J. (2012) “Durability of SG-laminated reinforced glass beams: Effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration”. Engineering Structures, Elsevier, 27, pp. 280-292

Nielson, J.H. (2009), “Tempered Glass: bolted connections and related problems”, Tese de Doutorado, Technical University of Denmark, Denmark

O’Regan, C. (2014), “Structural use of glass in buildings”, 2nd Edition, The Institute of Structural Engineers, London, ISBN 978-1-906335-25-0

Rolo, G. (2014) “Caraterização de ensaios de vigas de vidro”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra

Shelby, J.E. (2005), “Introduction to glass science and technology”, Cambridge: Royal Society of Chemistry, ISBN: 0-85404-639-9

Stelzer, I. (2010) “High performance laminated glass”, Proceedings of Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and structural applications of glass, Eds.: Bos, Louter, Veer, TU Delft, pp. 467-474

TML (2015), Catálogo do fabricante, obtido através do *website* www.tml.jp/e/product/strain_gauge/

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

Weller, B. and Engelmann, M. (2015). “An Innovative Concept for Pre-stressed Glass Beams”. IABSE Conference, Nara, Japão

CRÉDITOS DE IMAGEM

Imagem 1.1	<i>Refectory</i> , TU Dresden	objectuur.nl/2013/05/12/de-kracht-van-glas/	26/05/2015
Imagem 1.2	<i>Skydeck</i> , Chicago	theskydeck.com/	21/09/2015
Imagem 1.3	<i>Broadfield Glass Museum</i>	www.glassmuseum.org.uk	26/05/2015
Imagem 1.4	<i>Apple Store</i> , 5 th Avenue, NY	www.sedak.com/	26/05/2015
Imagem 2.1	Obsidiana, vidro natural	en.wikipedia.org/wiki/Obsidian	01/03/2015
Imagem 2.2	Vaso Egípcio, 1400-1300 a.C.	www.cmog.org/	01/03/2015
Imagem 2.3	Vasos Romanos, séc. II d-C.	www.stalbansmuseums.org.uk	01/03/2015
Imagem 2.4	Vitral, <i>Cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul</i> , séc. XIV	en.wikipedia.org/wiki/Troyes_Cathedral	21/09/2015
Imagem 2.5	“crown process”	www.sollex.co.uk/	01/03/2015

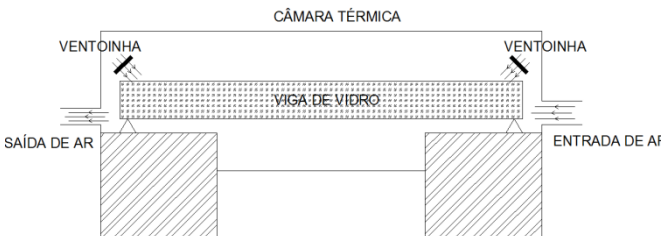
ANEXOS

A. Anexo A – Otimização da câmara térmica

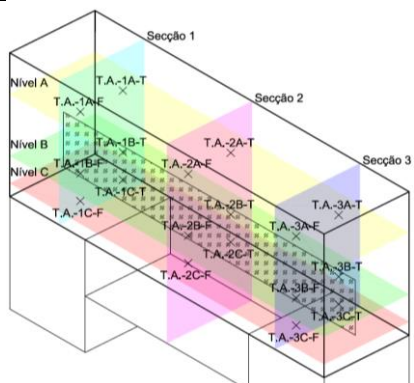
A construção da câmara térmica foi um processo iterativo, que englobou diversos testes, com melhoramentos sucessivos, até se obter a solução ideal. Essa solução ideal, era aquela que permitia obter uma temperatura praticamente uniforme em todos os pontos no interior da câmara térmica. São de seguida apresentados sinteticamente os diversos testes e respetivas alterações/melhoramentos que foram sendo efetuados no *layout* da camara térmica.

Teste 1 – 45°C	
Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações <i>layout</i>
<p>Circulação de ar em circuito fechado, forçado por ventilador e aquecido por forno. Para simular a existência da viga de vidro, foi colocada uma viga com as mesmas dimensões feita em aglomerado de madeira. Termopares adicionados de acordo com o esquema.</p>	
<p>Resultados/Observações</p> <p>Valores discrepantes entre os vários termopares, diferindo até 8°C. Os termopares na face da frente têm maior temperatura do que os da face de trás, o que indica que o escoamento do ar se encontra mais direcionado para esse lado</p>	
Teste 2 – 45°C	
Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações <i>layout</i>
<p>Com o mesmo esquema de circulação de ar, apenas se alterou o posicionamento do tubo de admissão de ar quente (colocado a vir de cima, de acordo com a imagem) a fim de tornar o escoamento de ar mais simétrico relativamente a ambas as faces da viga</p>	
<p>Resultados/Observações</p> <p>Não se verificaram melhorias</p>	
Teste 3 – 45°C	
Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações <i>layout</i>
<p>Adicionou-se um redutor de velocidade, entre a tubagem de admissão de ar quente e a câmara térmica, com difusor de ar de secção quadrada a fim de dispersar o fluxo de ar</p>	
<p>Resultados/Observações</p> <p>Verificaram-se melhorias na homogeneização da temperatura, sendo o diferencial entre o máximo e o mínimo registado de cerca de 3°C</p>	
Teste 4 – 75°C	
Descrição	Resultados/Observações
<p>Com o mesmo <i>layout</i>, foi efetuado este teste com temperatura alvo superior, de modo a avaliar os diferenciais de temperatura entre vários pontos de leitura</p>	<p>O diferencial de temperaturas entre os diversos termopares continuou a 3°C, no entanto foram feitas leituras em pontos superiores e inferiores da câmara e registou-se um gradiente de 50°C</p>

Teste 5 – 45°C e 75°C

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
Foram adicionadas duas ventoinhas na câmara, na tentativa de homogeneizar o ar no seu interior	
Resultados/Observações	
A colocação das ventoinhas tornou algumas leituras mais instáveis, nomeadamente perto da entrada de ar quente	

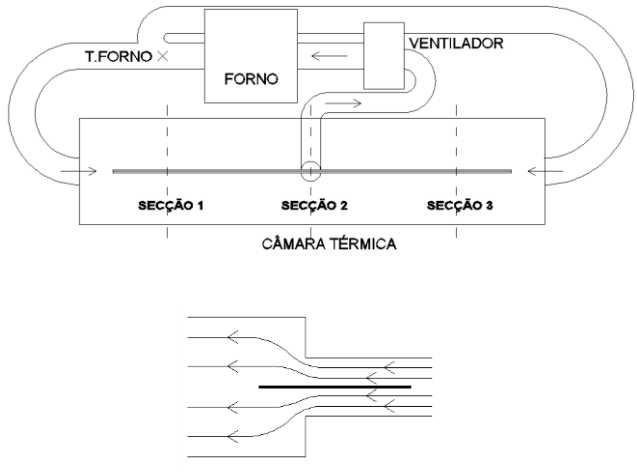
Teste 6 – 45°C

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
Procedeu-se à colocação de mais 2 níveis de termopares (Superior – A e Inferior- C) de acordo com o esquema aqui apresentado, a fim de conhecer a temperatura em diferentes alturas. No total passaram a existir o total de 18 termopares, para medir o ar no interior da câmara	
Resultados/Observações	
Verificaram-se temperaturas muito díspares. Clara quebra de temperatura deste a secção 3 para a secção 1.	


Teste 7 – 75°C

Descrição	Resultados/Observações
Teste idêntico ao anterior, mas com uma temperatura superior e ventoinhas desligadas, de modo a analisar a influência destas	Os diferenciais de temperatura continuaram muito elevados, mantendo-se principalmente a grande diferença entre a entrada (3) e a saída (1) do ar

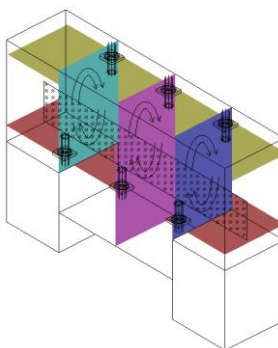
Teste 8 – 75°C

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
Procedeu-se à alteração do esquema de circulação do ar. São agora consideradas duas entradas de ar idênticas, uma em cada topo da câmara, e uma saída de ar a meio e por baixo desta. Foi ainda construído um novo redutor de velocidade e trocado o difusor de ar quente para plano.	
Resultados/Observações	
Verificou-se uma melhoria na aproximação das temperaturas da secção de entrada (3) e saída (1), mas o diferencial entre todos os termopares é de cerca de 12°C. Na fase inicial do ensaio, verificou-se que a secção 1 se encontrava com maior temperatura que a 3, devido a um maior caudal de entrada de ar nessa secção, então por volta dos 50 minutos obturou-se ligeiramente a tubagem de admissão de ar desse lado de modo a compensar a diferença de caudal.	

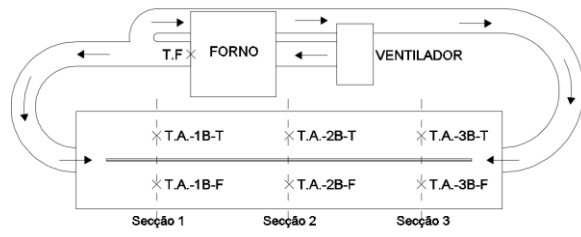
Teste 9 – 75°C

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
<p>Foi alterado o redutor de velocidade da entrada mais quente (1) (teste anterior) de modo a permitir a redução (ajustável) do caudal de ar e equilibrar a temperatura nas duas entradas (de acordo com a figura)</p>	
Resultados/Observações	
<p>Verificou-se que os diferenciais de temperaturas continuavam muito grandes, e que o posicionamento das ventoinhas não era satisfatório</p>	

Teste 10 – 75°C

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
<p>Alterou-se o sistema de 2 para 6 ventoinhas, colocados de forma a misturar adequadamente o ar em toda a câmara térmica</p>	
Resultados/Observações	
<p>Verificaram-se diferenciais de temperatura de cerca de 8°C.</p>	
<p>Até ao minuto 70 as ventoinhas encontravam-se desligadas, e por isso foi possível verificar que estas reduzem o diferencial e estabilizam melhor as temperaturas</p>	

Teste 11 – 50°C e 75°C – Ensaio Piloto T75_0

Descrição	Esquema de circulação de ar/ alterações layout
<p>O esquema de circulação de ar foi novamente modificado. A saída de ar foi obturada. O esquema de circulação de ar passou a funcionar como, entrada de ar nas duas extremidades, e a saída através das fugas da própria câmara. Neste ensaio a viga de aglomerado de madeira foi substituída por uma viga de vidro. Foram registadas temperaturas superficiais na viga e na película de laminação – Ensaio de pré-condicionamento térmico à escala real</p>	
Resultados/Observações	
<p>Verificaram-se diferenciais de temperatura na câmara de cerca de 2°C e diferenciais de temperatura na superfície do vidro e película de cerca de 2.5°C. Foi este o esquema de circulação de ar final para a câmara térmica.</p>	

B. Anexo B – Instrumentação

Encontra-se aqui informação detalhada sobre o posicionamento dos diversos tipos de instrumentação, ao longo da superfície das vigas, e respetiva identificação para cada um dos ensaios apresentados na presente dissertação.

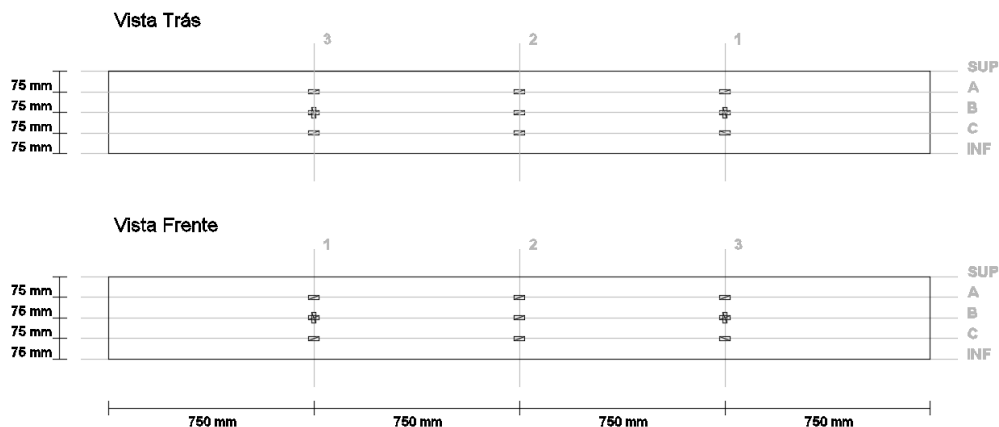


Figura B.1 - Representação esquemática da localização dos extensómetros

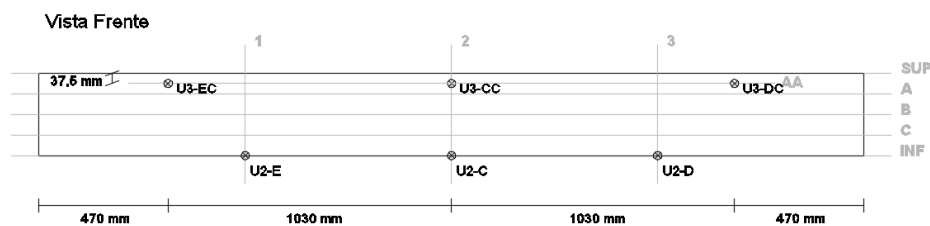


Figura B.2- Representação esquemática da localização dos defletómetros

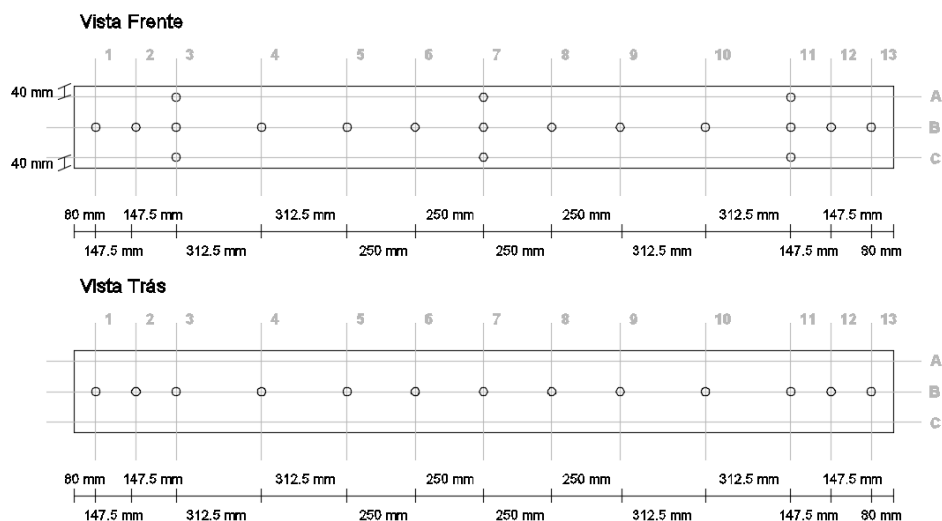


Figura B.3- Representação esquemática da localização dos termopares

Anexo C – Ensaios experimentais sem sistema de pré-esforço – Resultados

C.1. Ensaio Piloto, TA_0

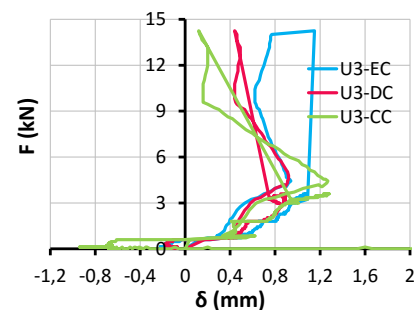
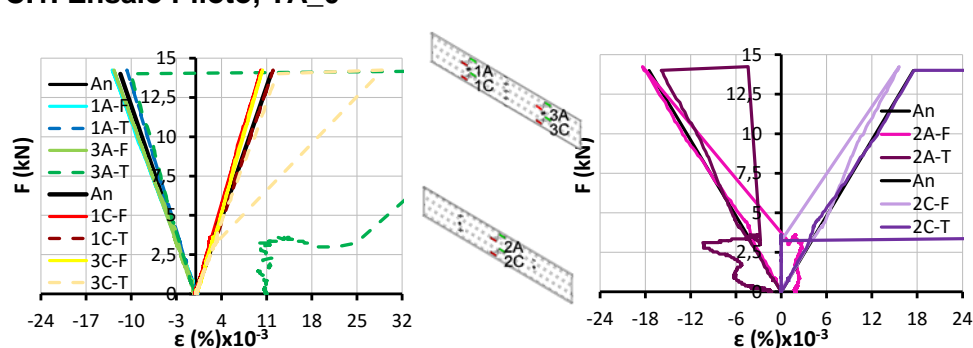


Figura C.2 - Resultados: gráficos força-deslocamento – TA_0

C.2. Ensaio Piloto, T75_0

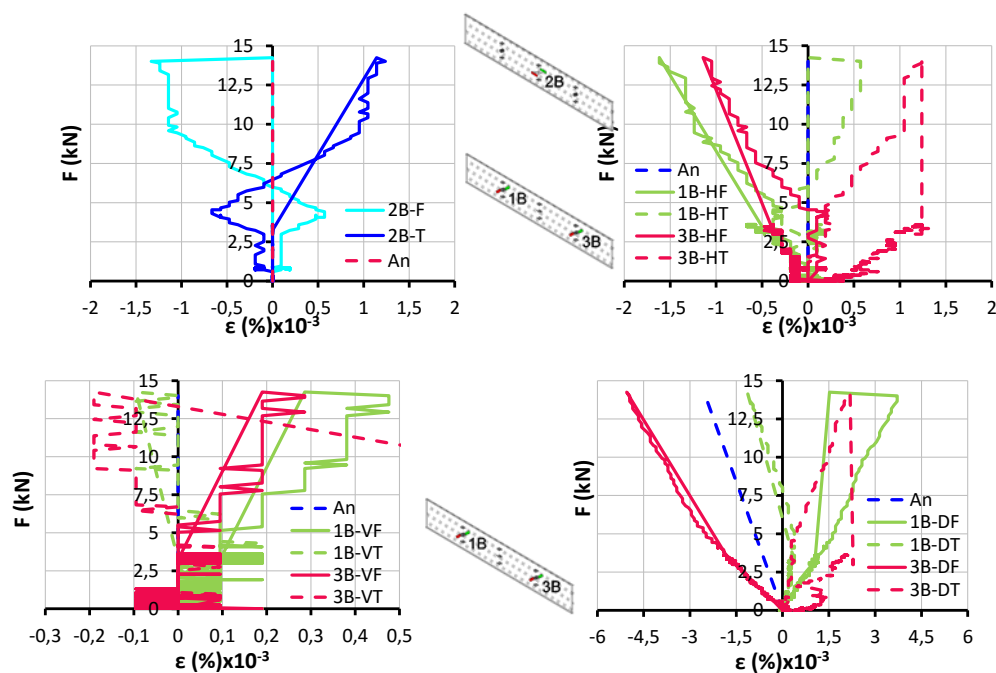


Figura C.1 – Resultados: gráficos força-extensão – TA_0

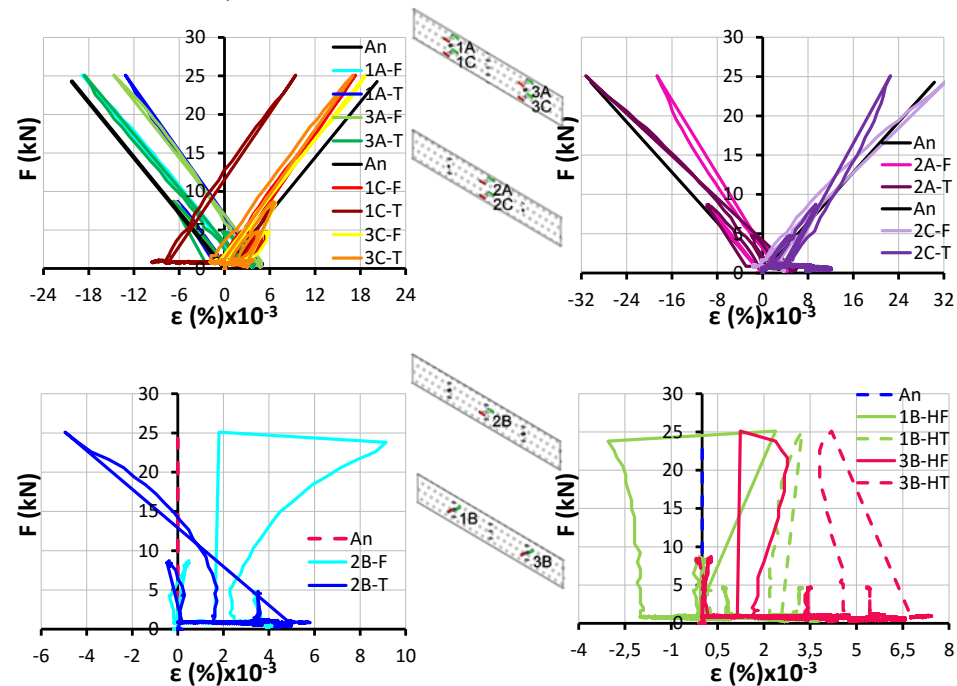


Figura C.3 – Resultados: gráficos força-extensão – T75_0

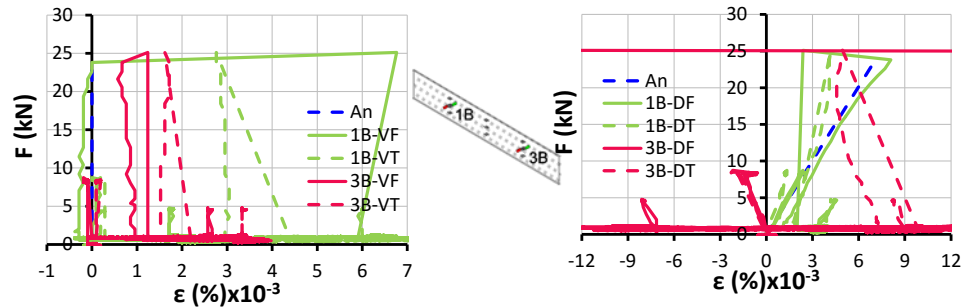


Figura C.4 – Resultados: gráficos força-extensão – T75_0

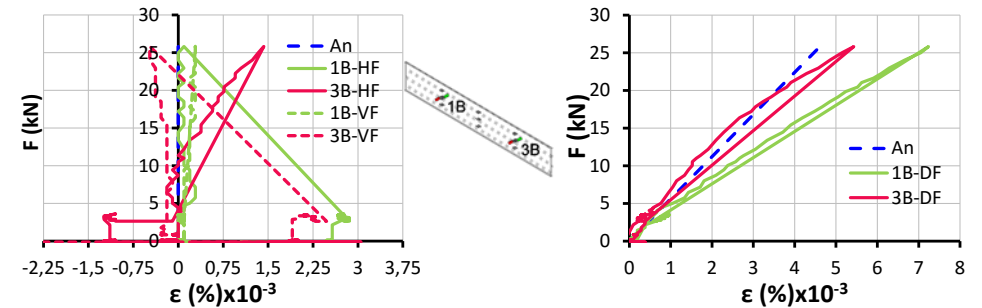


Figura C.7 – Resultados: gráficos força-extensão – TA_1

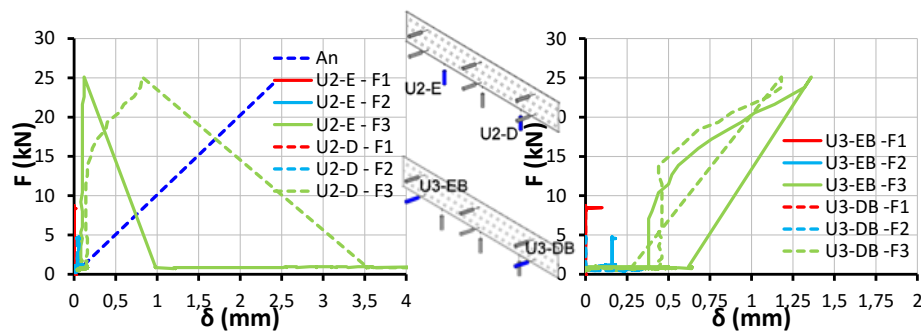


Figura C.5 – Resultados: gráficos força-deslocamento – T75_0

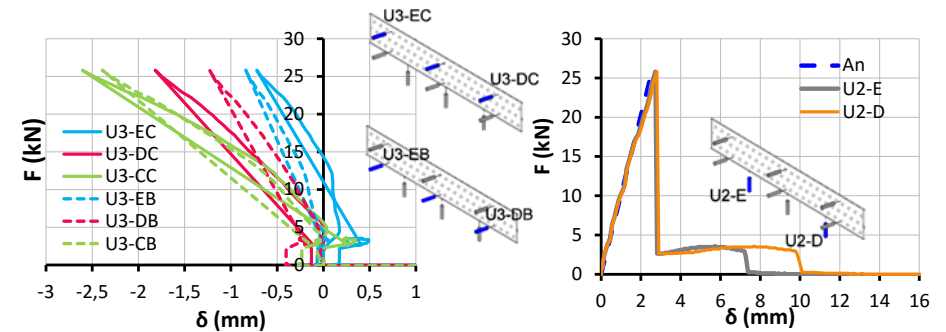


Figura C.8 – Resultados: gráficos força-deslocamento – TA_1

C.3. Ensaio a Temperatura Ambiente, TA_1

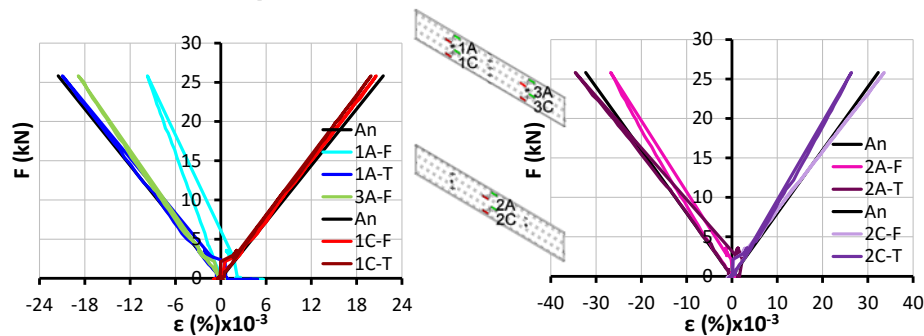


Figura C.6 – Resultados: gráficos força-extensão – TA_1

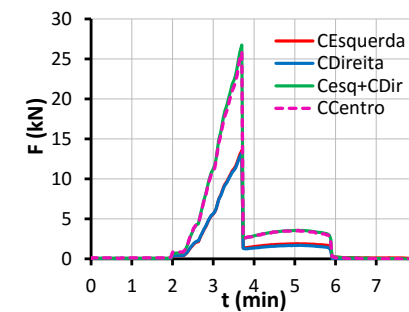


Figura C.9 – Resultados: células de carga – TA_1

C.4. Ensaio a Temperatura Ambiente, TA_2

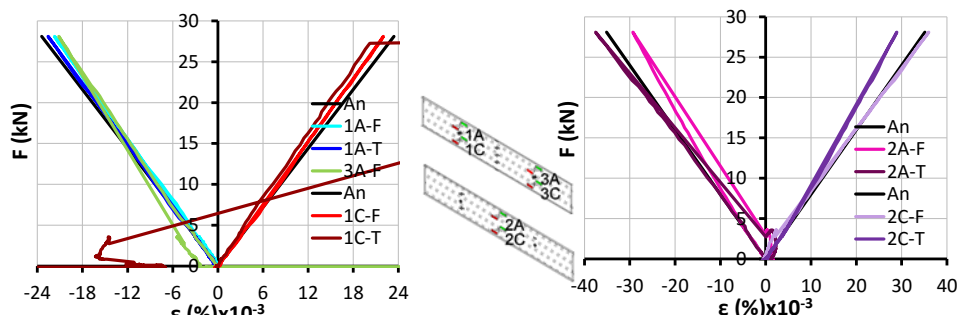


Figura C.10 – Resultados: gráficos força-extensão – TA_2

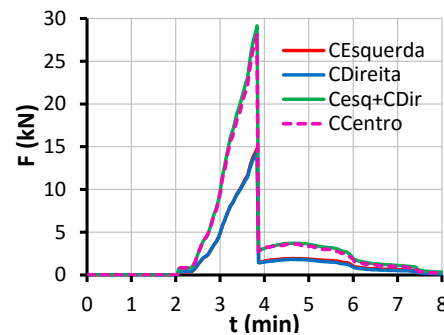


Figura C.13 – Células de carga – TA_2

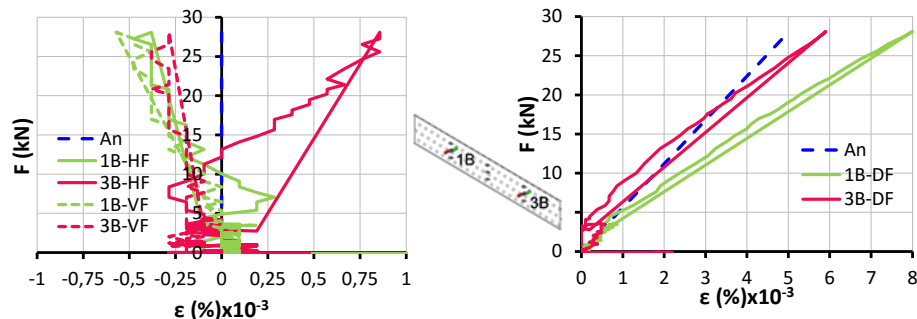


Figura C.11 – Resultados: gráficos força-extensão – TA_2

C.5. Ensaio Termomecânico a 50°C, T50_1

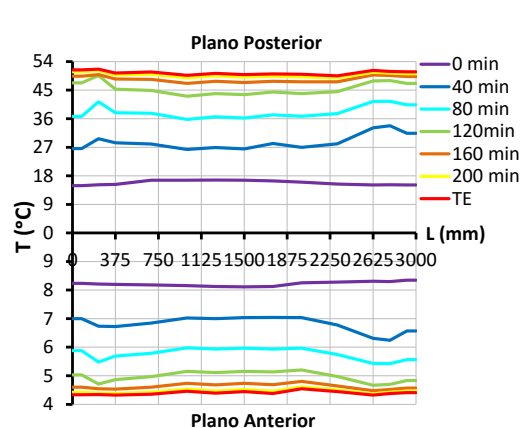


Figura C.14 – Evolução da temperatura na viga, T50_1

Figura C.15 – Células de carga, T50_1

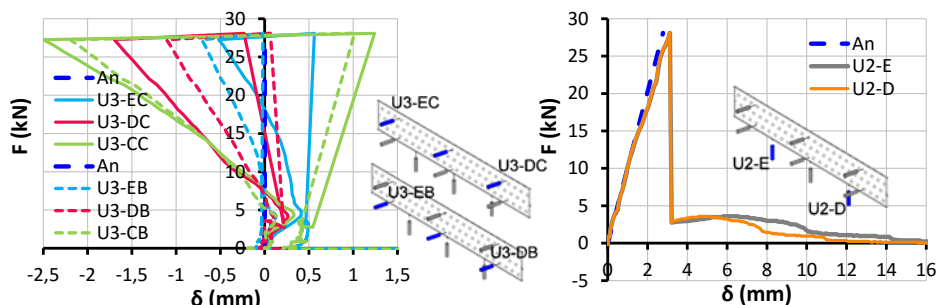
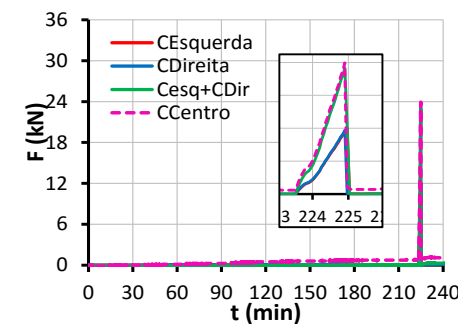


Figura C.12 – Resultados: gráficos força-deslocamento – TA_2

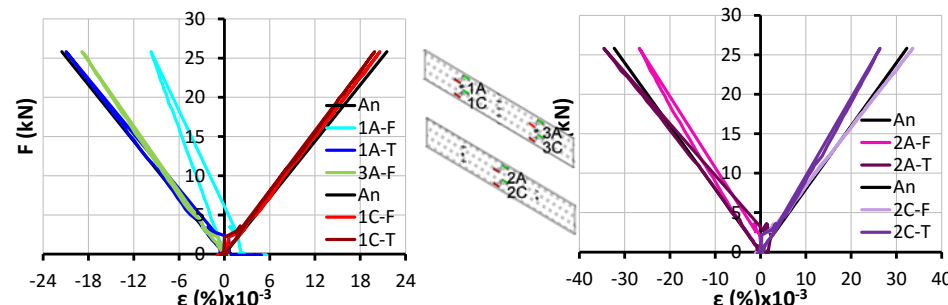


Figura C.16 – Resultados: gráficos força-extensão – 50_1

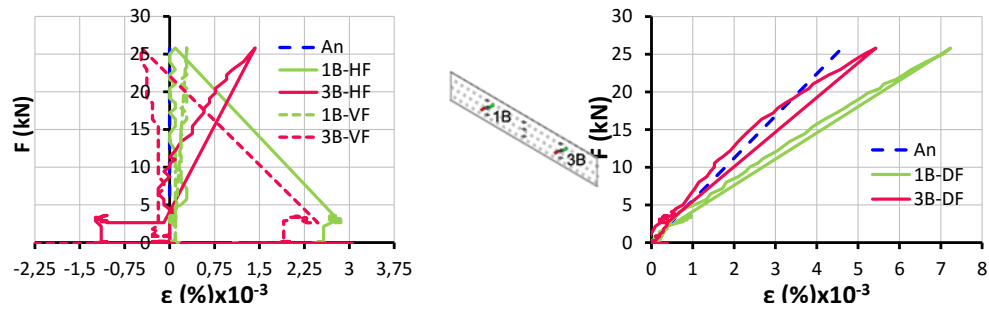


Figura C.17 – Resultados: gráficos força-extensão – T50_1

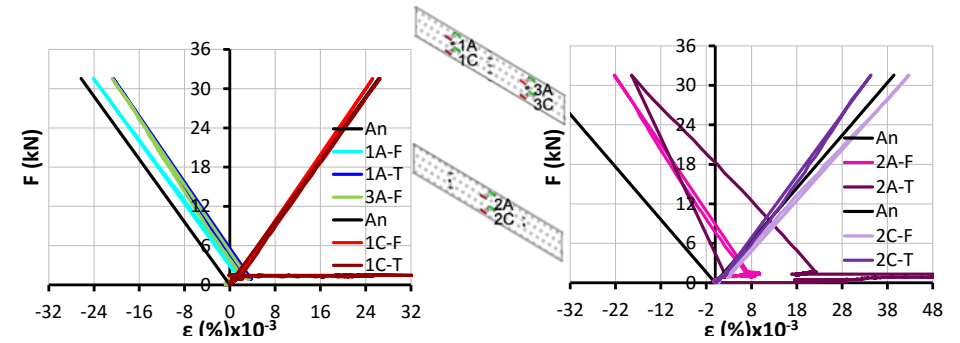


Figura C.21 – Resultados: gráficos força-extensão – T50_2

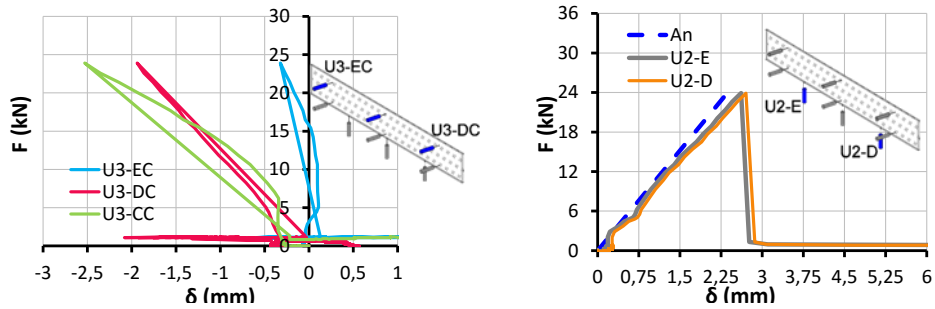


Figura C.18 – Resultados: gráficos força-deslocamento – T50_1

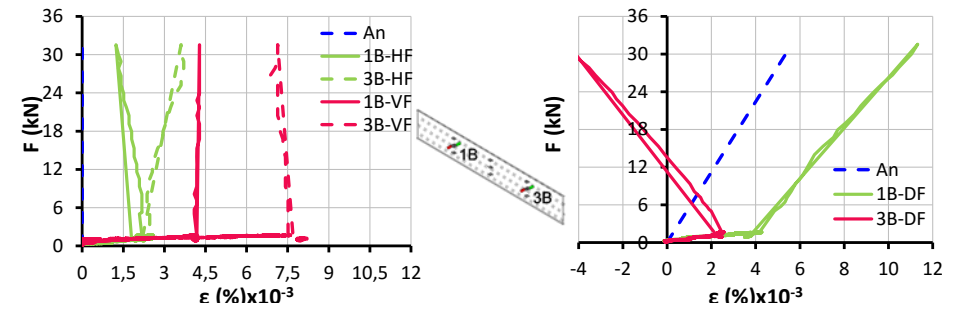


Figura C.22 – Resultados: gráficos força-deslocamento – T50_2

C.6. Ensaio Termomecânico a 50°C, T50_2

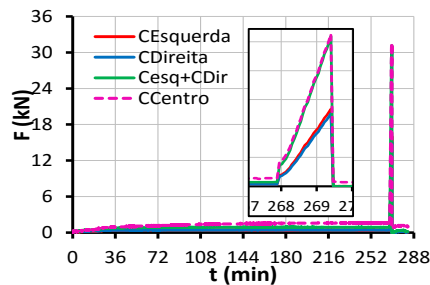
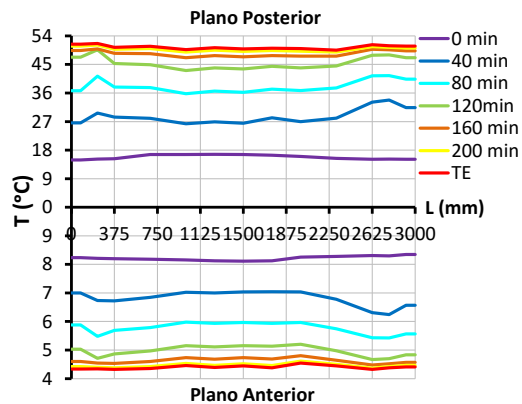


Figura C.19 – Evolução da temperatura na viga, T50_2

Figura C.20 – Células de carga, T50_2

C.7. Ensaio Termomecânico a 80°C, T80_1

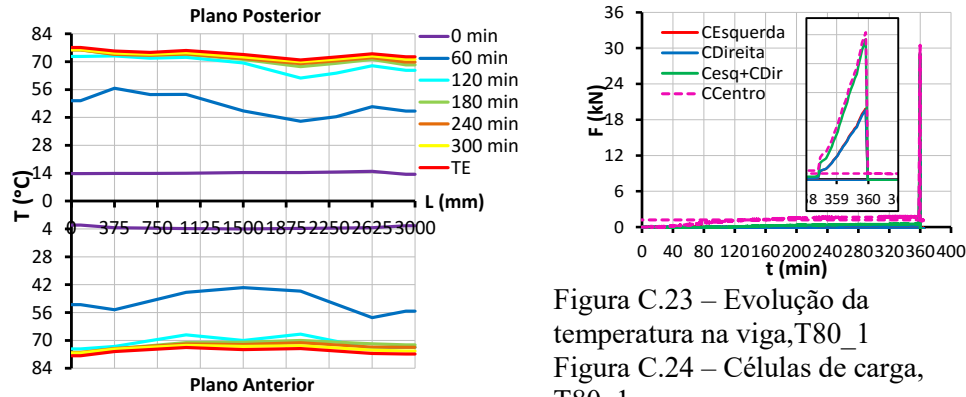


Figura C.23 – Evolução da temperatura na viga, T80_1
 Figura C.24 – Células de carga, T80_1

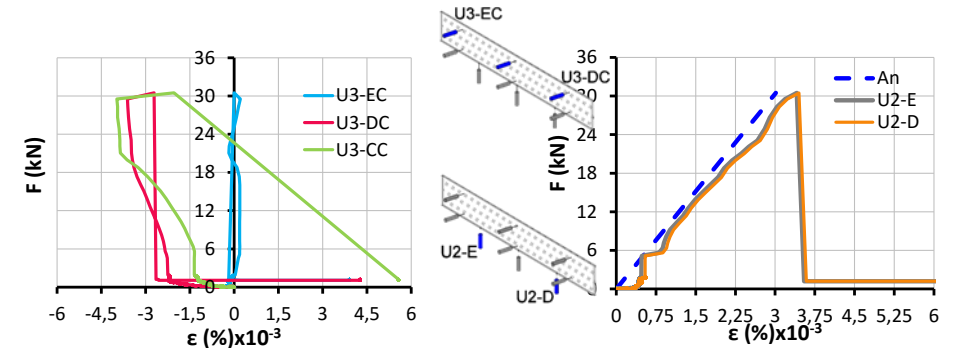


Figura C.26 – Resultados: gráficos força-deslocamento – T80_1

C.8. Ensaio Termomecânico a 80°C, T80_2

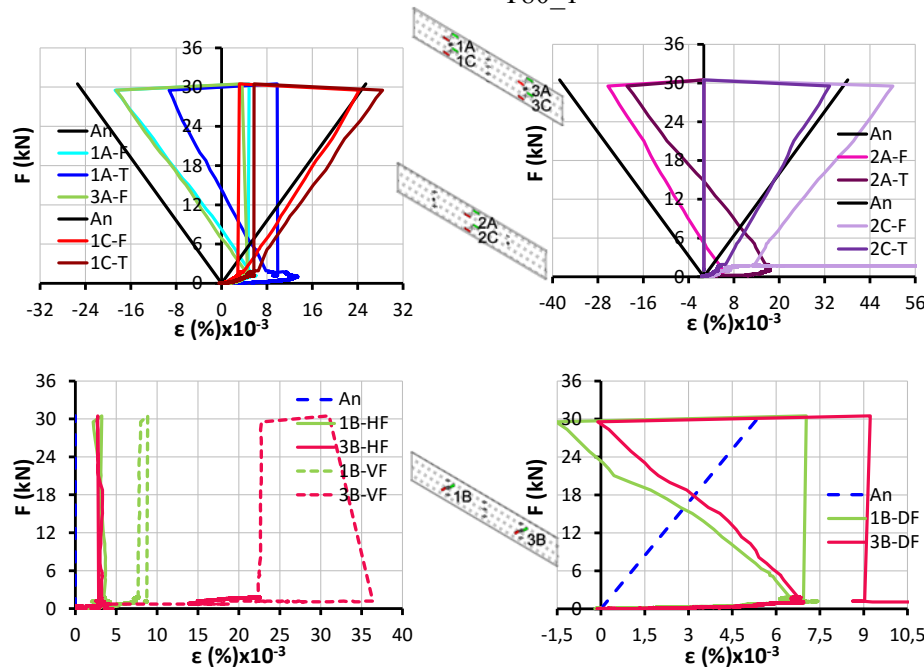


Figura C.25 – Resultados: gráficos força-extensão – T80_1

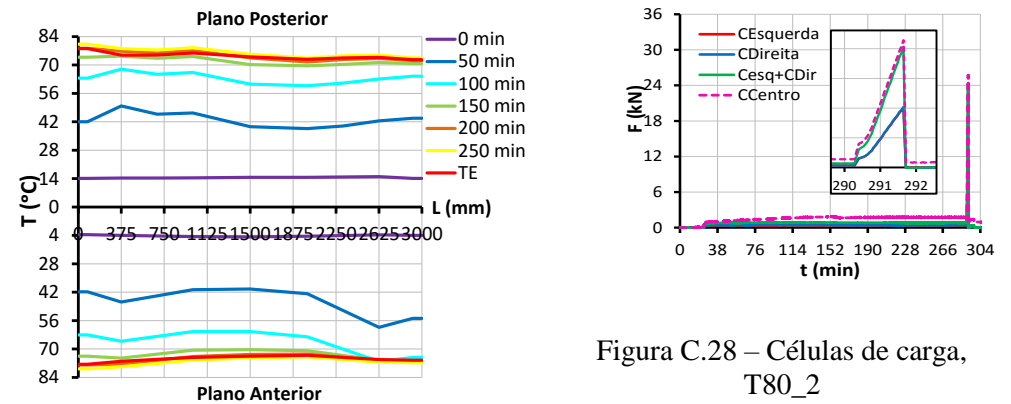


Figura C.28 – Células de carga, T80_2

Figura C.27 – Evolução da temperatura na viga, T80_2

D. Anexo D – Ensaios experimentais com sistema de pré-esforço - Resultados

D.1. Ensaio Piloto, PS_TA_0

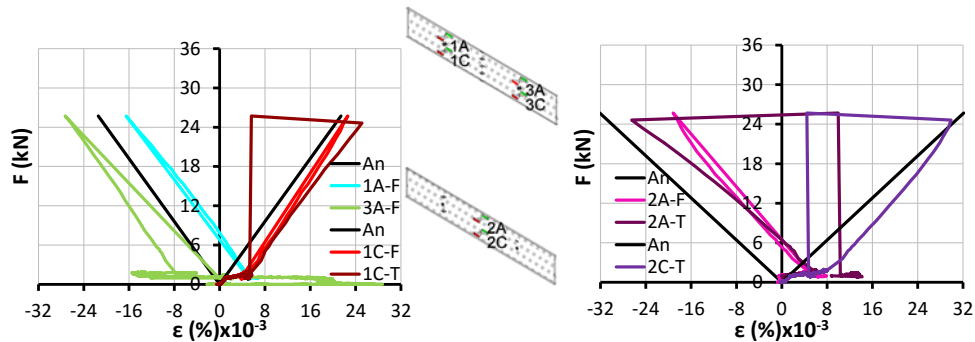


Figura C.29 – Resultados: gráficos força-extensão – T80_2

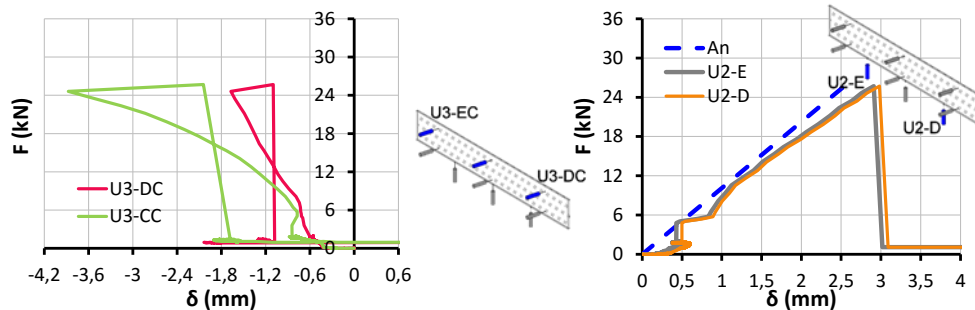
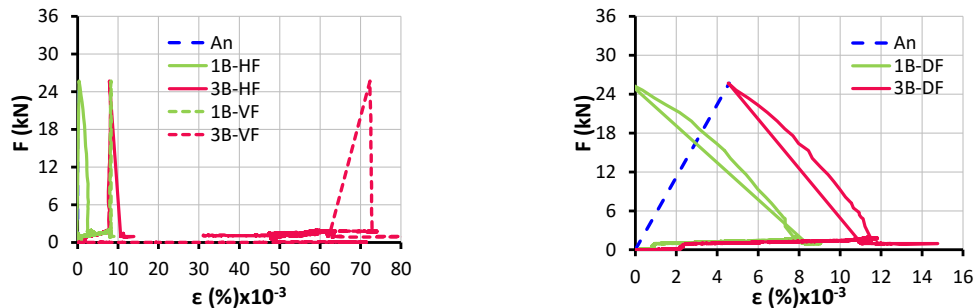


Figura C.30 – Resultados: gráficos força-deslocamento – T80_2

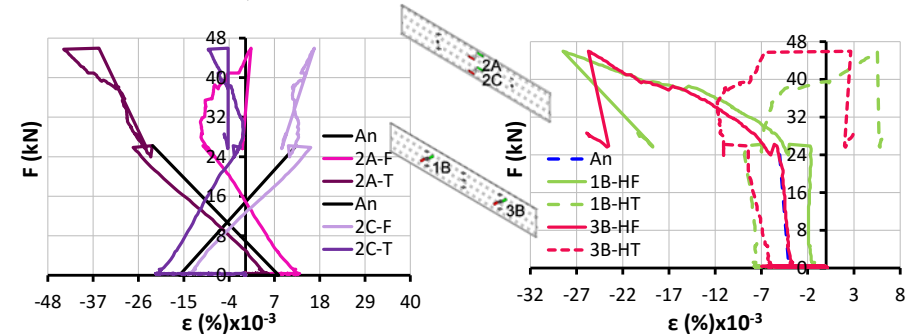


Figura D.1 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_TA_0

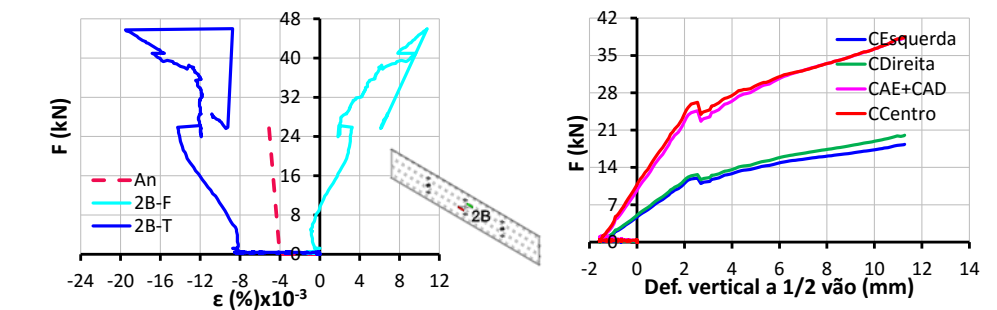
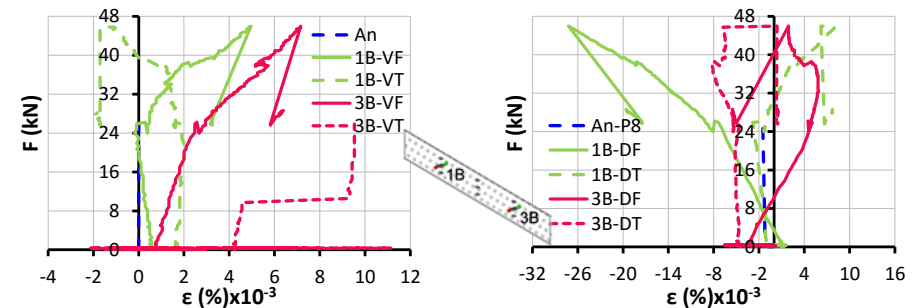


Figura D.2 – Resultados força-extensão

Figura D.3 – células de carga

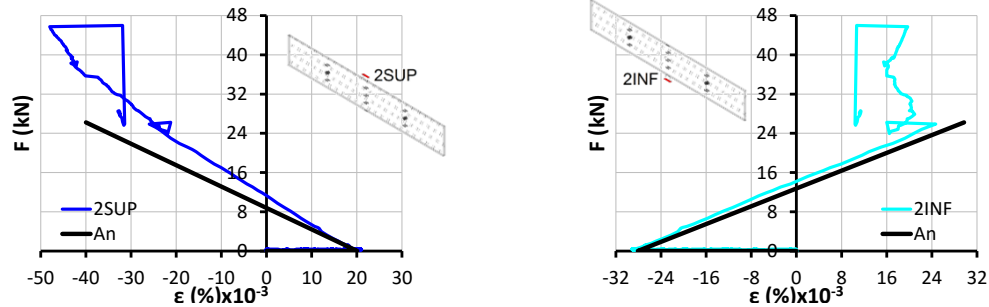


Figura D.4 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_TA_0

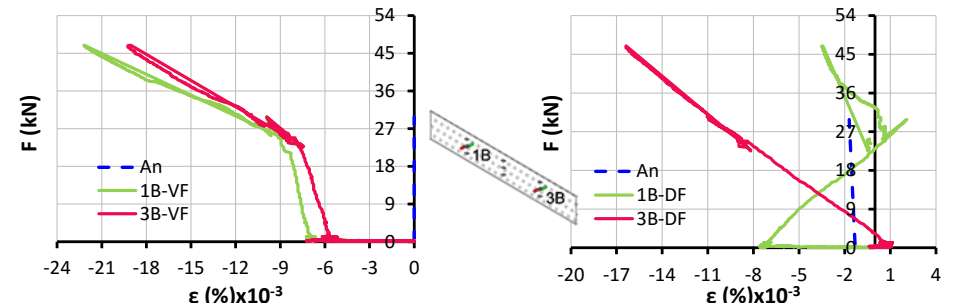


Figura D.7 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_TA_1

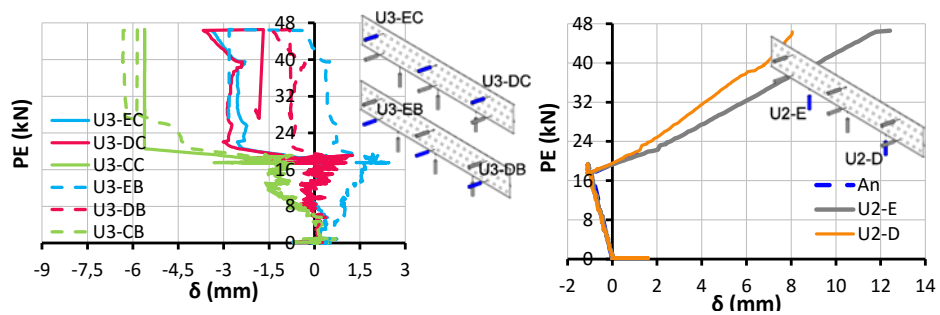


Figura D.5 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_TA_0

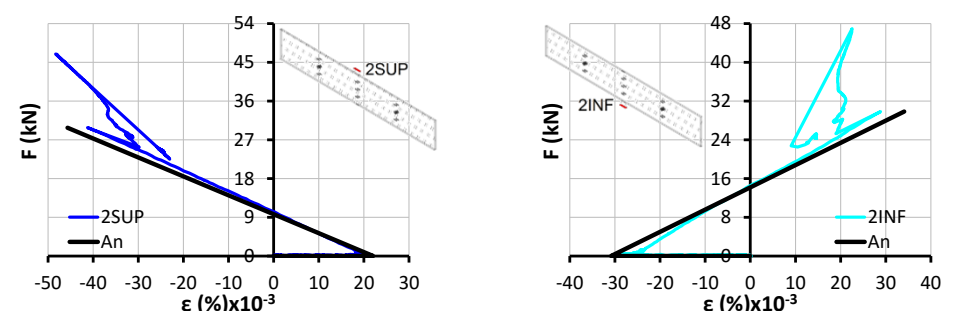


Figura D.8 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_TA_1

D.2. Ensaio a temperatura ambiente, PS_TA_1

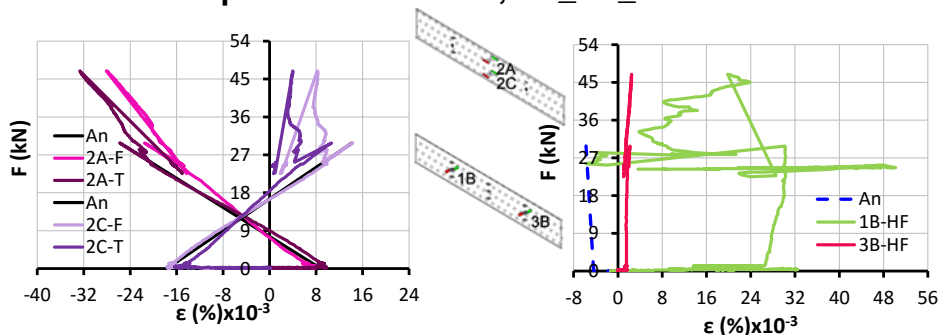
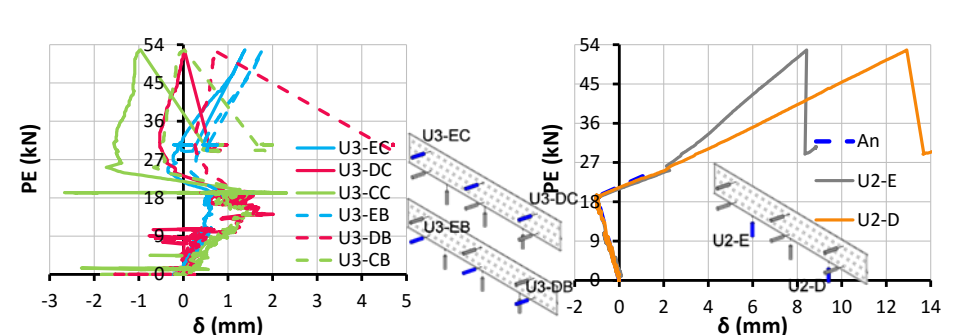


Figura D.6 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_TA_1



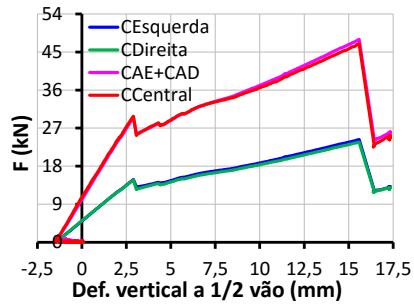


Figura D.9 – Resultados: células de carga – PS_TA_1

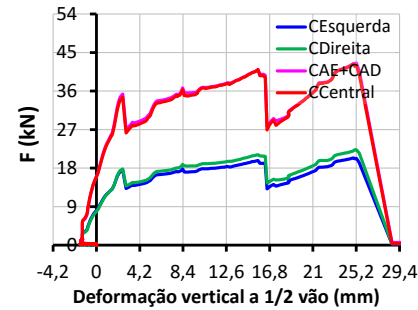


Figura D.11 – Resultados: células de carga – PS_TA_2

D.3. Ensaio a temperatura ambiente, PS_TA_2

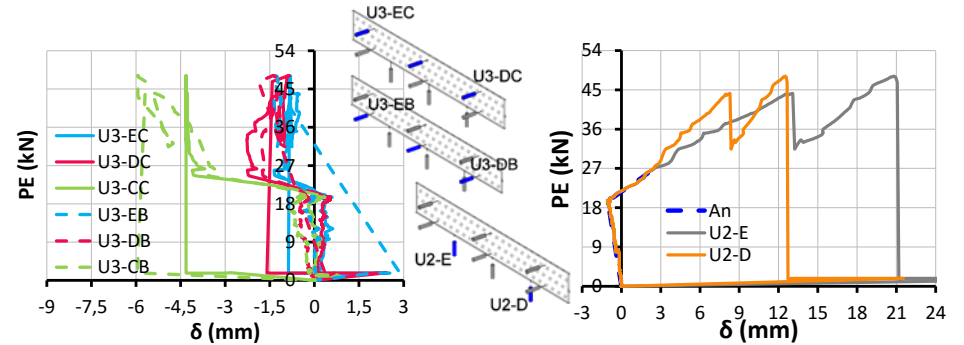
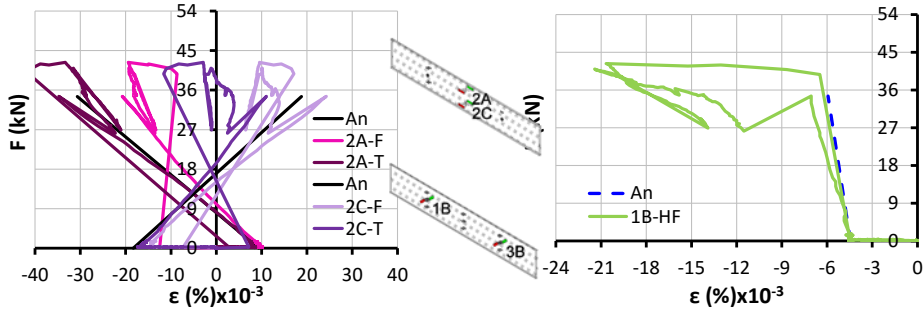


Figura D.12 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_TA_2

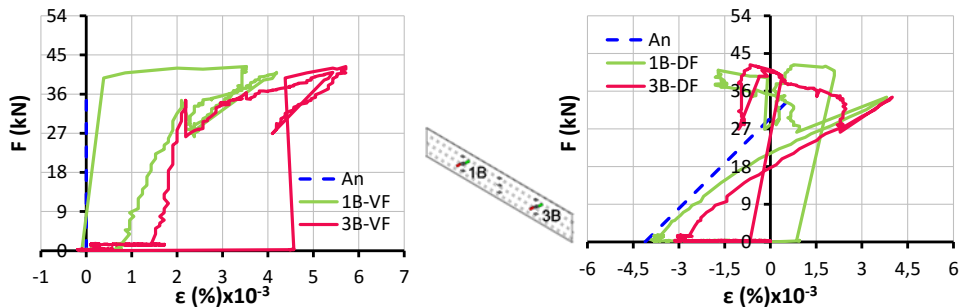


Figura D.10 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_TA_2

D.4. Ensaios Termomecânico a 50°C. PS T50 1

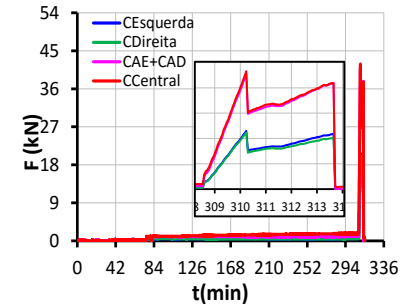
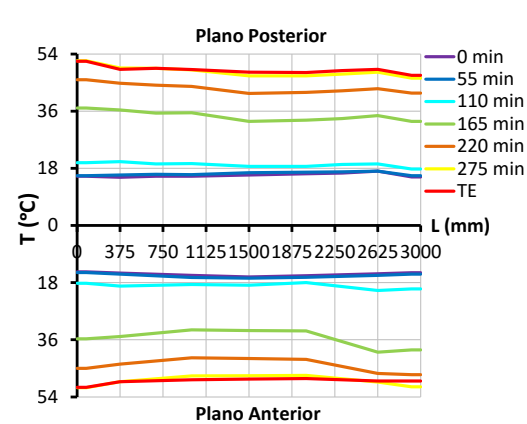


Figura D.13 – Evolução da temperatura na viga, PS_T50_1

Figura D.14 – Células de carga, PS_T50_1

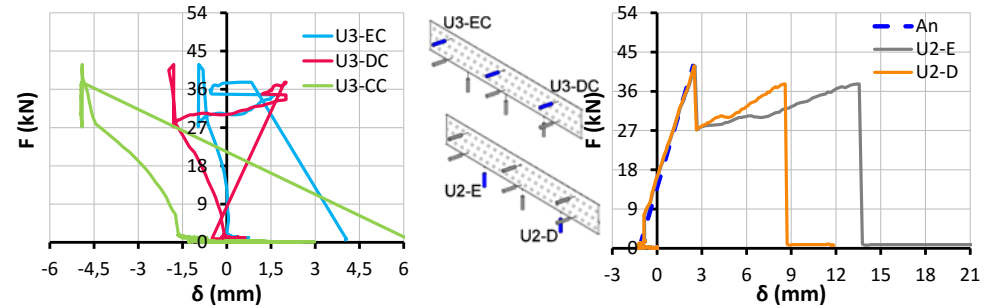
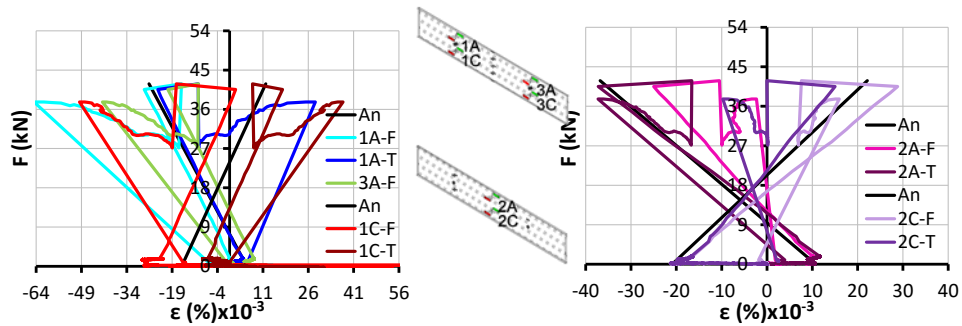


Figura D.16 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_T50_1

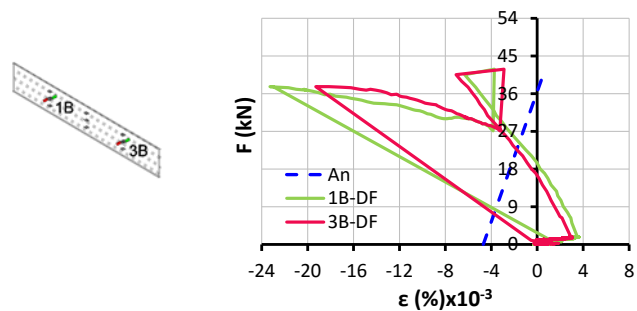
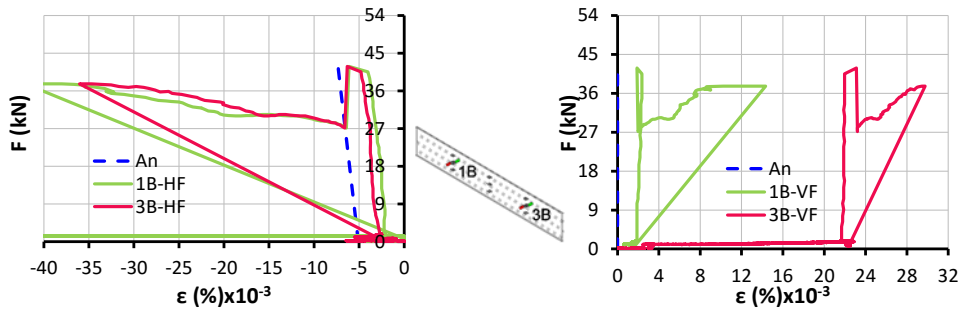


Figura D.15 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_T50_1

D.4. Ensaio Termomecânico a 50°C, PS_T50_1

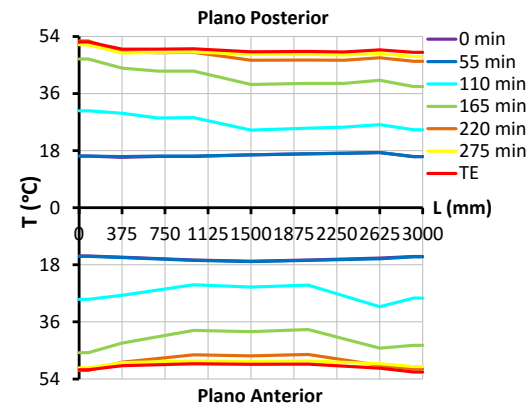


Figura D.17 – Evolução da temperatura ao longo da viga, PS_T50_2

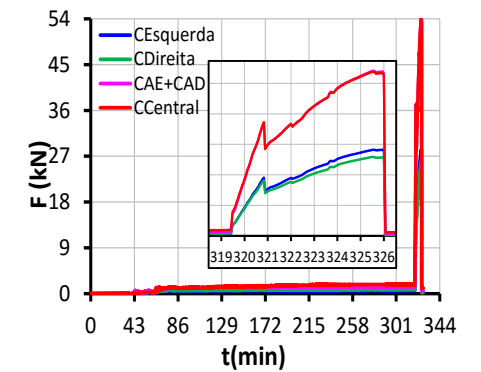


Figura D.18 – Células de carga, PS_T50_2

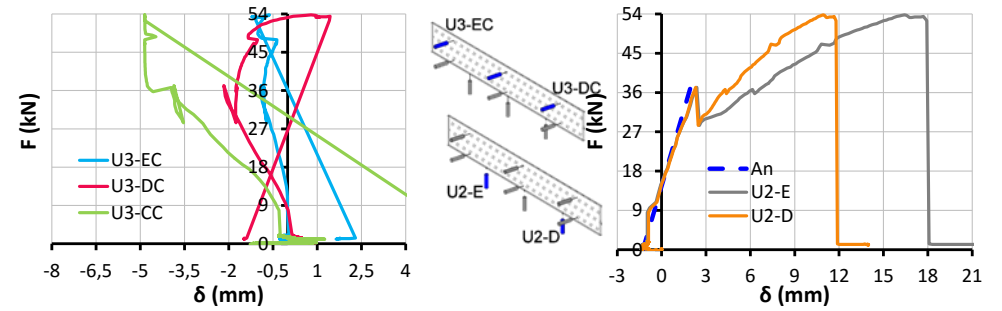
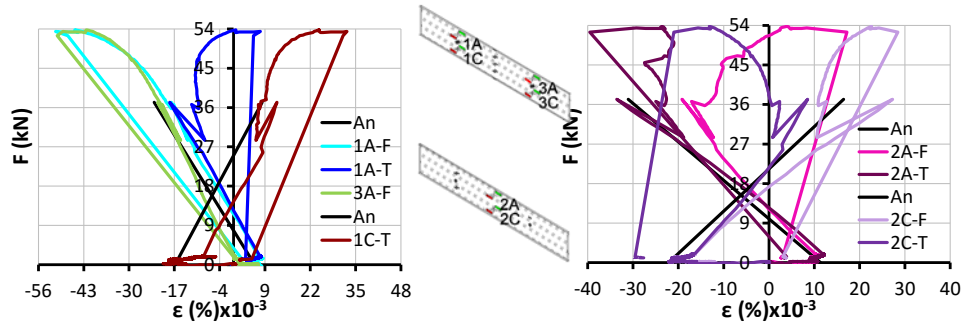


Figura D.20 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_T50_2

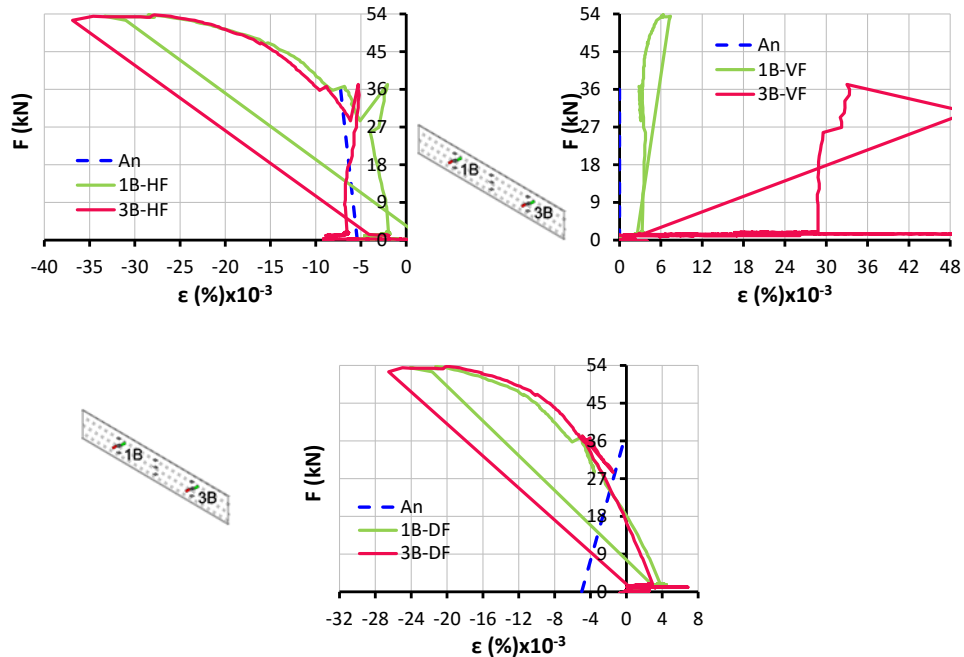


Figura D.19 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_T50_2

D.4. Ensaios Termomecânico a 80°C, PS_T80_1

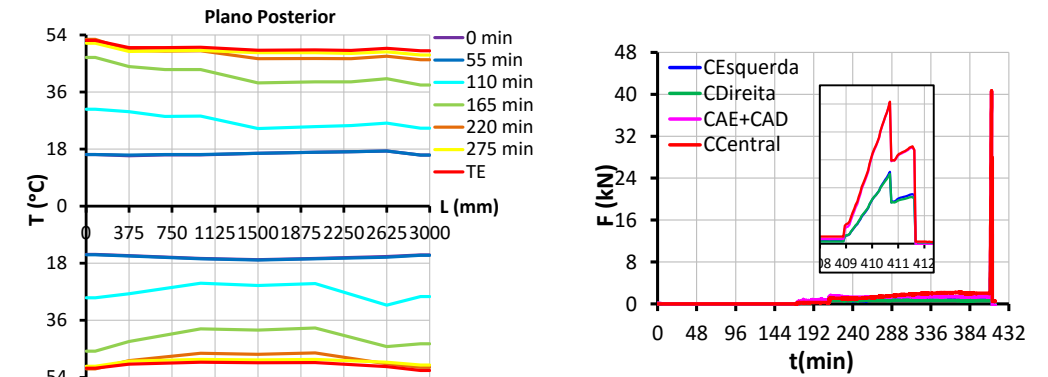


Figura D.21 – Evolução da temperatura ao longo da viga, PS_T80_1

Figura D.22 – Células de carga, PS_T80_1

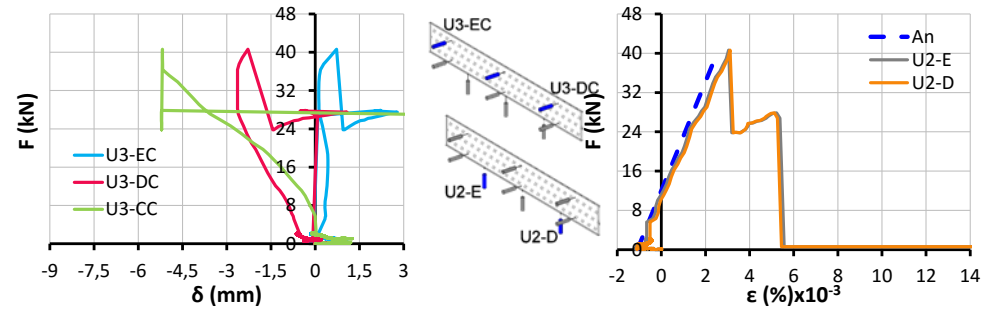
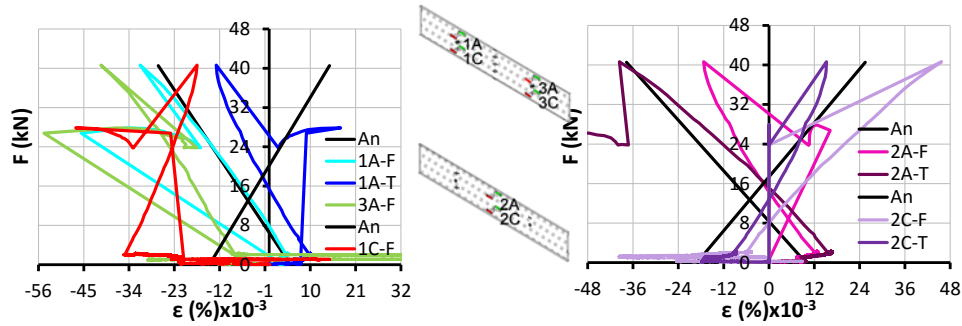


Figura D.24 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_T80_1

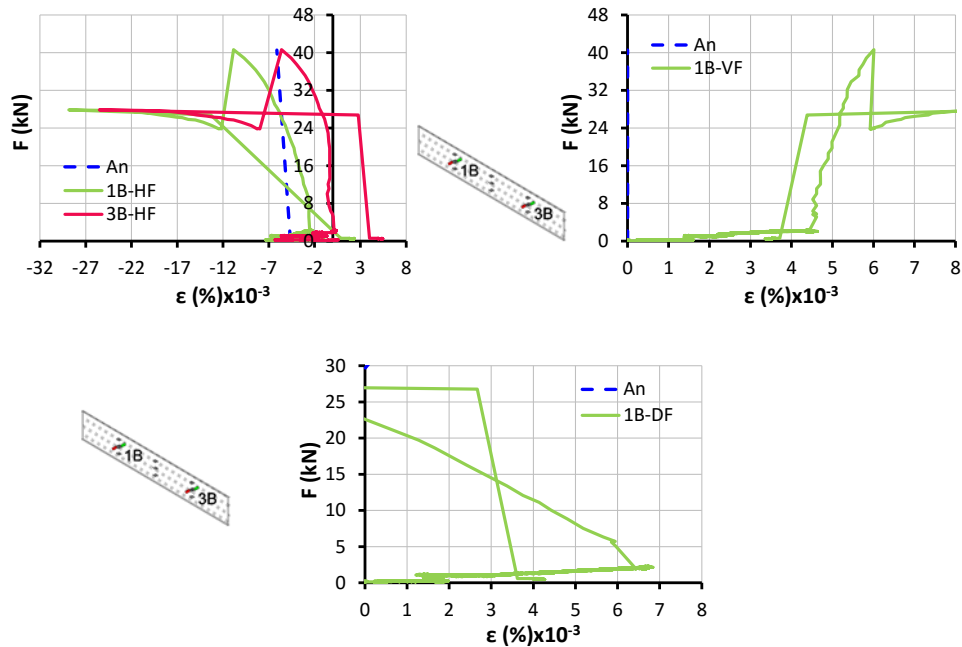


Figura D.23 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_T80_1

D.4. Ensaio Termomecânico a 80°C, PS_T80_2

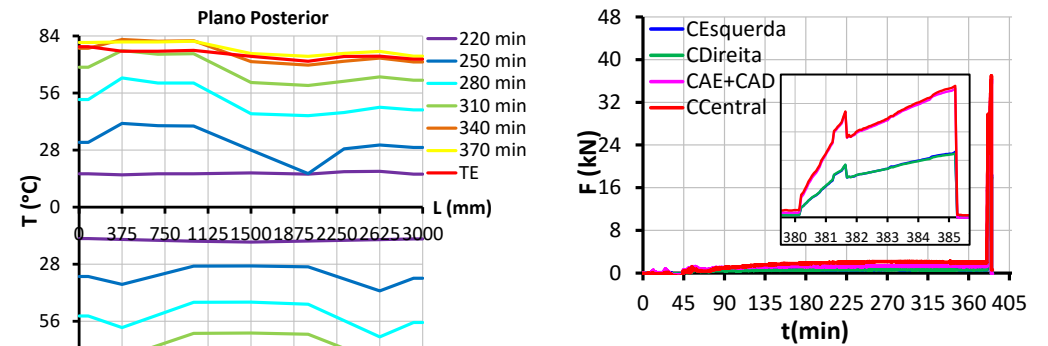


Figura D.25 – Evolução da temperatura ao longo da viga, PS_T80_2

Figura D.26 – Células de carga, PS_T80_2

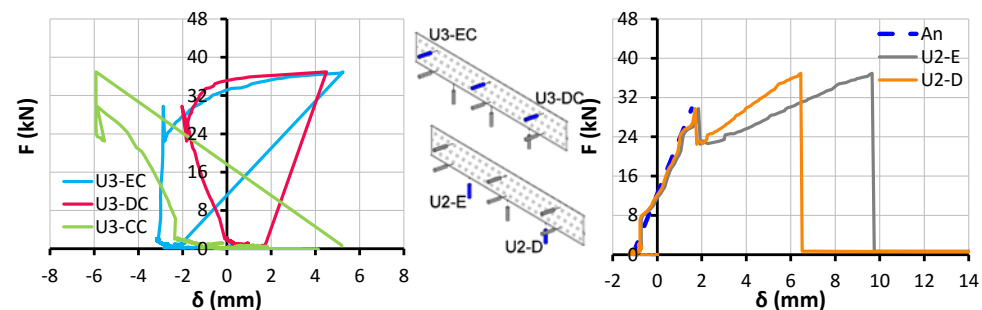
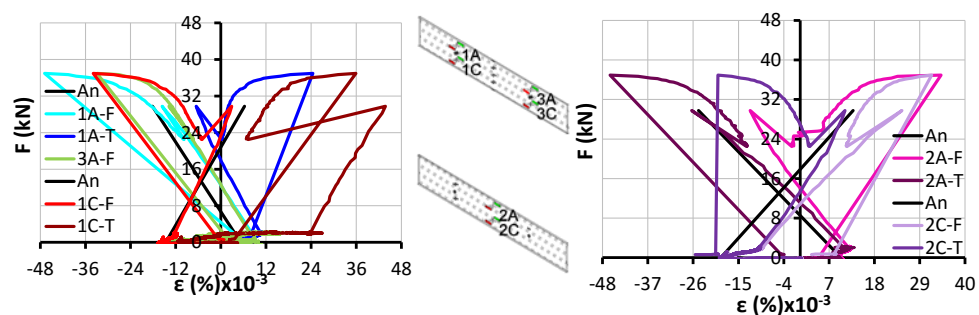


Figura D.28 – Resultados: gráficos força-deslocamento – PS_T80_2

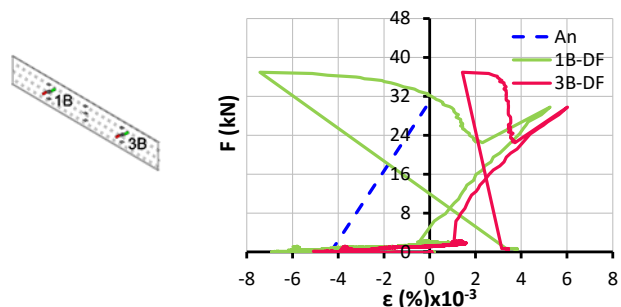
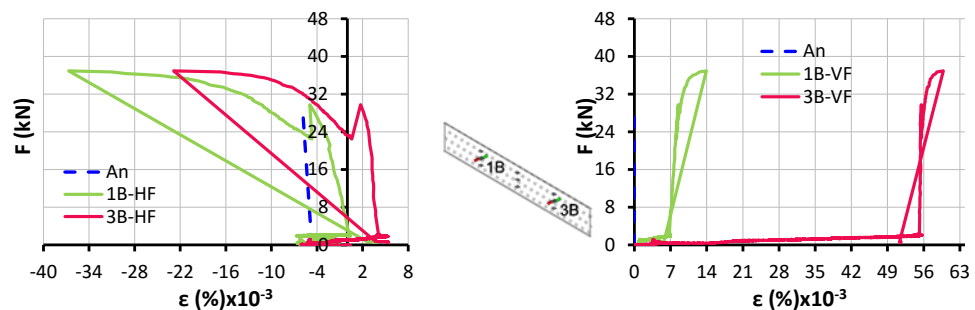


Figura D.27 – Resultados: gráficos força-extensão – PS_T80_2

E. Anexo E – Avaliação quantitativa da deformação fora do plano – Tensões

Quadro E.1 – Determinação das tensões devidas à deformação fora do plano em pontos representativos

Ensaio	Ensaio sem sistema de pré-esforço							Ensaio com sistema de pré-esforço						
	TA_0	TA_1	TA_2	T50_1	T50_2	T80_1	T80_2	PS_TA_0	PS_TA_1	PS_TA_2	PS_T50_1	PS_T50_2	PS_T80_1	PS_T80_2
σ_{1A-F} (MPa)	-18,13	-13,20	-29,60	-20,21	-31,88	-24,69	-23,11	-17,06	-29,87	-27,60	-39,50	-23,94	-38,09	-19,70
σ_{1A-T} (MPa)	-14,93	-28,40	-30,67	-21,14	-27,21	-12,02	-	-17,87	-17,73	-29,73	-33,24	-24,47	-17,29	-8,23
σ_{dfp} (MPa)	3,20	15,20	1,07	0,93	4,67	12,67	-	0,81	12,13	2,13	6,27	0,53	20,80	11,47
σ_{1C-F} (MPa)	14,00	28,80	30,00	21,53	33,72	32,91	30,62	2,93	2,40	12,13	2,76	-	-24,52	4,03
σ_{1C-T} (MPa)	16,53	27,87	28,27	27,13	35,32	38,11	35,15	-3,72	14,27	9,86	24,50	17,39	-	61,23
σ_{dfp} (MPa)	2,53	0,93	1,73	5,60	1,60	5,20	4,53	6,66	11,87	2,27	21,73	-	-	57,20
σ_{2A-F} (MPa)	-25,47	-36,27	-40,00	-30,61	-31,21	-35,49	-25,78	-14,52	-30,13	-28,13	-14,71	-25,54	-23,16	-15,70
σ_{2A-T} (MPa)	-22,27	-46,80	-51,07	-33,41	-25,88	-28,42	-37,12	-31,72	-36,13	-47,33	-23,24	-44,87	-46,13	-33,17
σ_{dfp} (MPa)	3,20	10,53	11,07	2,80	5,33	7,07	11,33	17,21	6,00	19,20	8,53	19,33	23,47	17,47
σ_{2C-F} (MPa)	21,60	45,47	48,80	43,93	57,19	67,84	-	14,54	20,00	32,67	10,63	35,93	55,77	31,23
σ_{2C-T} (MPa)	24,67	35,73	39,47	35,93	45,72	44,91	41,82	-4,19	14,93	14,67	-0,04	11,00	20,84	14,30
σ_{dfp} (MPa)	3,07	9,73	9,33	8,00	11,47	22,93	-	18,73	5,07	18,00	10,67	24,93	34,93	16,93

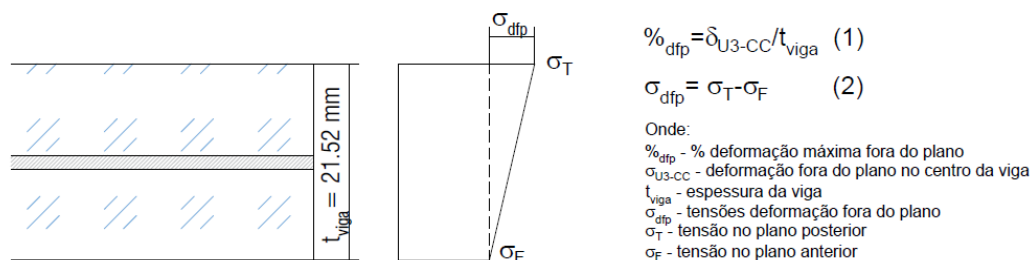


Figura E.2 – Esquema para quantificação da deformação fora do plano