



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

## **Estudo de Vigas Híbridas Vidro - Aço**

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

Autor

**Antony da Costa Gonçalves**

Orientador

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Carla Maria Araújo Fernandes da Costa  
Ferreira**

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves**

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

**Coimbra, Janeiro, 2015**

## AGRADECIMENTOS

Com a presente dissertação encerro um capítulo muito importante da minha vida. Apesar de ser um trabalho individual, muitas pessoas estiveram envolvidas, às quais quero deixar um especial agradecimento:

À Professora Doutora Sandra Jordão, Professora Doutora Carla Ferreira e ao Professor Doutor Luís Costa Neves pelo apoio e disponibilidade demonstrada na fase de elaboração deste documento mas também pelos ensinamentos, conhecimentos partilhados e o incentivo crescente no decorrer da tese. A colaboração destes professores foi fundamental. Um especial agradecimento ao colega Marco Pinho pelo seu apoio, disponibilidade e paciência (que sei que foi muita), por despende do seu tempo para fornecer a sua ajuda, conhecimentos, para esclarecimento de dúvidas relativos ao complexo programa *Abaqus*.

Ao apoio financeiro da Fundação da Ciência e Tecnologia, através do programa PTDC/ECM/116609/2010 relativo ao projecto de investigação S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente. À empresa Sosoares pelo fornecimento das vigas de vidro usadas para os ensaios experimentais. À empresa SIKA pelo fornecimento da cola para a execução do adesivo de ligação entre os banzos metálicos e as vigas de vidro. À empresa Metalúrgica Ideal de Mondego para os fornecimento dos banzos metálicos. À empresa Cristalmax pelo corte dos provetes de vidro laminado.

Agradeço também a todos os funcionários do Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC. Ao Rui Ferreira, bolseiro técnico do projecto S-GLASS, pela sua constante ajuda na elaboração e execução dos ensaios.

Aos meus melhores amigos, Mãe, Pai, Mana e Mano, obrigada por TUDO, pelo amor e confiança mas sobretudo pelo esforço feito para que eu chegasse até aqui. Um muito obrigado igualmente a todos os meus amigos que sempre me apoiaram e motivaram, não só durante a elaboração da tese mas durante a vida de estudante. Não posso deixar de salientar os meus amigos da Especialidade de Mecânica Estrutural, “Os Zé’s Nerds”, a vocês um muito obrigado pela força dada nas longas horas de trabalho.



## RESUMO

O tema aborda o estudo de vigas híbridas vidro-aço, um sistema relativamente inovador e com claras vantagens estéticas. Para além disso, fornece um bom equilíbrio entre alta capacidade de carga, viabilidade de conexão fácil e transparência. As vigas híbridas são elementos de construção inovadores que podem ser aplicáveis como elementos estruturais, em vigas e pilares, e elementos de fachada.

O trabalho contém uma componente analítica, uma componente experimental e uma componente numérica, com recurso ao programa de elementos finitos “ABAQUS”.

Foram realizados ensaios de vigas híbridas com a alma em vidro laminado e os banzos em aço, ligados por sistemas de adesivos, também estudados no âmbito desta tese. Na primeira fase fizeram-se ensaios à escala reduzida do material interveniente no sistema estrutural em estudo para caracterizar o comportamento reológico do mesmo, ou seja, o aço, o vidro e o sistema de ligação entre a alma de vidro e os banzos em aço. Na segunda fase ensaiaram-se, à escala real, vigas híbridas até à rotura através de ensaios à flexão de 4 pontos.

As conclusões foram definidas com base nos resultados obtidos experimentalmente, numericamente e analiticamente, sendo realizado uma comparação desses mesmos resultados. Os resultados obtidos mostram que nos sistemas híbridos, a inclusão do reforço em aço permite ultrapassar as desvantagens inerentes à utilização das vigas de vidro simples, modificando-lhes o comportamento em três requisitos relevantes para a segurança das estruturas, a saber: incremento da resistência; introdução de rotura dúctil, com aumento significativo de deformação após a fendilhação inicial do vidro; evitar o colapso explosivo do vidro.

## **ABSTRACT**

The work developed during this thesis is related with the characterization of hybrid glass-steel beams, which is a relatively innovative system with several aesthetic advantages. Besides the visual properties this hybrid system provides a good balance between high load capacity, easy connection viability and transparency. These hybrid beams are innovative construction elements that can be applied as structural elements, pillars, beams and facade elements.

This work contains an analytical, experimental and numeric component that were developed using a program of finite elements, “ABAQUS”.

The experiments were performed with hybrid beams in which the web is made out of plate glass and the flanges are made out of steel, connected by adhesive systems, which were also studied in this thesis work. In a first phase experiments at a small scale were performed to the material composing the structural system to characterize its rheological behaviour. Such materials include the steel, plate glass and the connection system between the glass web and the steel flanges. In a second phase the experiments were performed at a real scale in which the hybrid beams were brought to rupture through 4 points flexion experiments.

Final conclusions were obtained through the results obtained in the experimental, numerical and analytic analysis and their comparison. The results show that the inclusion of a steel reinforcement in the hybrid system surpasses the intrinsic disadvantages related with the use of simple glass beams. This reinforcement modifies three relevant behaviours of the beam that are important for the security of structures, such as: resistance increase; introduction of ductile rupture with the significant increase of deformation after initial cracking of the glass; avoiding the explosive collapse of the glass.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT.....	iii
SIMBOLOGIA.....	vii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Resumo da estrutura da tese .....	2
2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS .....	3
2.1 Propriedades do vidro.....	3
2.1.1 Propriedades químicas do vidro.....	3
2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas do vidro.....	4
2.2 Processos tecnológicos para reforço do vidro .....	5
2.2.1 Introdução.....	5
2.2.2 Vidro temperado .....	5
2.2.3 Vidro Termo Endurecido .....	5
2.2.4 Vidro laminado .....	6
2.3 Sistemas Híbridos.....	6
2.4 O Adesivo na ligação dos sistemas híbridos.....	7
2.4.1 Propriedades dos adesivos.....	8
2.4.2 Tipos de ligações adesivas vidro-aço.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Resumo histórico.....	11
3.2 Estudos anteriores em sistemas híbridos .....	13
3.3 Formulação analítica para vigas híbridas .....	18
3.3.1 Método de Mohler .....	19

---

3.3.2	Método de Pischl.....	20
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	21
4.1	Introdução.....	21
4.2	Ensaio de caracterização do aço .....	21
4.2.1	Procedimento de ensaio .....	21
4.2.2	Resultados .....	23
4.3	Ensaio de caracterização do adesivo.....	24
4.3.1	Ensaio do adesivo à tracção.....	24
4.3.1.1	Procedimento de ensaio .....	24
4.3.1.2	Resultados .....	25
4.3.2	Ensaio do adesivo ao corte .....	26
4.3.2.1	Procedimento de ensaio .....	26
4.3.2.2	Resultados .....	28
4.4	Ensaio de caracterização do vidro.....	30
4.4.1	Procedimento de ensaio .....	30
4.4.2	Resultados .....	31
4.5	Ensaio à escala real.....	33
4.5.1	Introdução.....	33
4.5.2	Definição da secção transversal óptima.....	33
4.5.3	Layout experimental e da geometria da viga.....	34
4.5.4	Método de colagem .....	36
4.5.5	Instrumentação e estratégia de carga .....	38
4.5.6	Ensaio do sistema de referência .....	40
4.5.6.1	Resultados .....	40
4.5.7	Ensaio do sistema híbrido .....	45
4.5.7.1	Introdução.....	45
4.5.7.2	Resultados da Viga 1 .....	46
4.5.7.3	Resultados da Viga 2 .....	52
5	MODELOS NUMÉRICOS.....	59
5.1	Introdução.....	59
5.2	Sistema base.....	59

---

---

5.3	Modelação da laminação .....	60
5.4	Escolha do EF estudo de convergência da malha .....	61
5.4.1	Estudo de convergência da malha .....	61
5.4.2	Análise não linear de estabilidade .....	63
5.5	Sistema de referência.....	64
5.5.1	Resultados .....	64
5.5.2	Comparação com resultados experimentais.....	65
5.6	Sistema híbrido.....	67
5.6.1	Modelação da laminação .....	69
5.6.2	Resultados .....	70
5.6.3	Comparação com resultados experimentais.....	71
6	CONCLUSÕES.....	78
7	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTUROS .....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
	ANEXOS .....	A-1
	Anexo A – Medição das imperfeições das vigas híbridas.....	A-1
	Anexo B – Caracterização das propriedades do aço .....	B-3
	B1. Geometria dos provetes de aço .....	B-3
	B2. Procedimento de cálculo.....	B-4
	Anexo C – Caracterização das propriedades do adesivo.....	C-7
	C1. Geometria dos provetes do adesivo à tracção .....	C-7
	Anexo D – Caracterização das propriedades do vidro .....	D-8
	D1. Geometria dos provetes do vidro .....	D-8
	Anexo E – Instrumentação dos ensaios à escala real.....	E-9
	E1. Instrumentação do sistema de referência .....	E-9
	E2. Instrumentação do sistema híbrido .....	E-9
	Anexo F – Resultados .....	F-12
	F1. Resultados experimentais do sistema de referência .....	F-12
	F2. Resultados numéricos do sistema do sistema de referência .....	F-14
	F3. Resultados experimentais do sistema híbrido 1 .....	F-15
	F4- Resultados experimentais do sistema híbrido 2 .....	F-17

---

## SIMBOLOGIA

$A$	Área da secção transversal
$A_{aço}$	Área da secção transversal de aço
$A_{vidro}$	Área da secção transversal de vidro
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade do aço
$E_{vidro}$	Módulo de elasticidade do vidro
$F$	Acção
$F_{cr}$	Acção crítica
$I_{y,aço}$	Momento de inércia da secção de aço
$I_{y,vidro}$	Momento de inércia da secção de vidro
$I_{eff}$	Momento de inércia efectivo
$G$	Módulo de distorção do adesivo (rigidez de corte)
$K$	Rigidez da ligação
$L$	Comprimento
$N_{Ed}$	Valor de cálculo do esforço normal actuante
$N_{aço}$	Esforço normal actuante no aço
$M_{Ed}$	Valor de cálculo do momento flector actuante
$M_{aço}$	Momento flector actuante no aço
$M_{vidro}$	Momento flector actuante no vidro
$M_{cr}$	Momento crítico actuante
$M_{crm}$	Momento crítico médio
$t_{aço}$	Espessura da secção transversal do aço
$h_{vidro}$	Altura da secção transversal da viga de vidro
$b$	Largura da secção transversal
$d$	Espessura da camada adesiva

---

$n$	Coeficiente homogeneização
$k$	Propriedades efectivas da ligação adesiva
$\Upsilon$	Factor de efectividade da ligação adesiva
$\sigma_{\text{aço}}$	Tensão no aço
$\sigma_{\text{vidro}}$	Tensão no vidro
$\sigma^*$	Tensão real de tracção
$\sigma_c^*$	Tensão real de tracção correspondente à tensão máxima da curva aparente
$\sigma_{yh}^*$	Tensão real de tracção correspondente à extensão de cedência da curva aparente
$\sigma_{st}^*$	Tensão real de tracção correspondente à tensão à qual se inicia o endurecimento na curva aparente
$\sigma_u^*$	Tensão real correspondente à tensão para qual se inicia a estricção na curva aparente
$\sigma_f^*$	Tensão real correspondente à tensão de rotura da curva aparente
$\varepsilon^*$	Extensão logarítmica real
$\varepsilon_c^*$	Extensão logarítmica correspondente à tensão máxima da curva aparente
$\varepsilon_{yh}^*$	Extensão logarítmica correspondente à tensão de cedência superior
$\varepsilon_{st}^*$	Extensão logarítmica correspondente à tensão a qual se inicia o endurecimento na curva aparente
$\varepsilon_u^*$	Extensão logarítmica correspondente à tensão para qual se inicia a estricção na curva aparente
$\varepsilon_f^*$	Extensão logarítmica correspondente à tensão de rotura da curva aparente
$\tau$	Tensão tangencial
$\tan\gamma$	Distorção

## ABREVIATURA

CFRP Carbon Fiber Reinforcement Polymer

EF Finite Element

GFRP Glass Fiber Reinforcement Polymer

SGP SentryGlas Plus

4PB Four Point Bending Test

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A aplicação do vidro como material estrutural é um campo relativamente recente e em franco desenvolvimento. O vidro, aparentemente não sendo um material estrutural, após um estudo sobre as suas propriedades apresenta um enorme potencial na concretização de uma arquitectura moderna, segura e duradoura. O seu uso como elemento estrutural deve-se especialmente aos avanços tecnológicos, que o colocaram como um material forte e seguro para a aplicação em diversos tipos de estruturas. Desde então, o vidro estrutural tem sido aplicado em vários tipos de elementos estruturais, usadas em diferentes tipos de estruturas: fachadas, coberturas, pequenas pontes/passarelas e escadas. Hoje em dia os edifícios modernos são inimagináveis sem vidro.

No entanto, apesar da sua crescente procura, a sua utilização como elemento estrutural é limitada, por se considerar um material inadequado. Fisicamente, o vidro é, de facto, considerado um material com um comportamento frágil, devido ao seu modo de rotura, imprevisível e sem ductilidade. Contrariamente ao aço, que exhibe uma significativa ductilidade antes da rotura, o vidro não revela esse comportamento dúctil. Apesar de se comportar bem em compressão, é fraco em tração, o que aliado à sua incapacidade em redistribuir tensões, limita a sua aplicabilidade. Comparado com outros materiais, o vidro simples (vidro recozido) apresenta um valor satisfatório de resistência à tração, cerca de 45 MPa, parâmetro que pode atingir 250 MPa, caso se use um produto alterado como o vidro temperado. Existe, inclusive, a possibilidade de uma rotura dúctil, recorrendo a painéis de vidro laminado. Contudo, estas modificações continuam a ser limitativas, uma vez que apenas contornam o problema da rotura frágil.

O conceito de vigas híbridas com alma de vidro e os banzos metálicos, ligados entre si através de um adesivo, surge assim como resposta à necessidade de dotar os painéis de vidro de ductilidade pós rotura. Este conceito permite utilizar a resistência e a ductilidade do aço e beneficiar da beleza estética do vidro. Os dois materiais criam um aspeto leve e devido à alta transparência do vidro, este conceito permite maximizar ganhos de luz natural, contribuindo assim para a sustentabilidade do próprio edifício. A adição de banzos metálicos proporciona não só uma resposta pós rotura como também aumenta a estabilidade lateral e a capacidade de carga, facilitando a ligação a outro tipo de elementos.

O estudo desta dissertação está incluído no projecto S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente, PTDC/ECM/116609/2010, em desenvolvimento no departamento de engenharia civil da FCTUC.

## **1.2 Objectivos**

Esta tese tem como objetivo o estudo e caracterização do comportamento à flexão das vigas híbridas vidro-aço, quer através de ensaios experimentais, quer através de modelações numéricas. É estudado também o comportamento do adesivo, usado na ligação aço-vidro, através de ensaios à escala reduzida.

## **1.3 Resumo da estrutura da tese**

Esta tese divide-se em 7 capítulos. No primeiro capítulo é apresentado resumidamente a importância do tema, os objetivos desta tese e o conteúdo do trabalho.

No segundo capítulo apresentam-se alguns conceitos fundamentais relacionados com as propriedades do vidro estrutural, dos vários sistemas de ligações existentes nos sistemas híbridos e das propriedades dos adesivos de ligação mais utilizados. O foco está no sistema constituído por alma de vidro e os banzos em aço, que é o objetivo deste trabalho.

No terceiro capítulo faz-se um breve resumo histórico da produção do vidro e descrevem-se os principais trabalhos conhecidos no âmbito do estudo das vigas híbridas e que constituem as contribuições científicas mais recentes nesta área. Neste capítulo são ainda apresentados os modelos analíticos para a otimização da secção da viga híbrida de vidro e aço bem como a sua formulação.

No quarto capítulo é descrito todo o programa experimental realizado, incluindo o “layout”, a instrumentação e estratégia de carga de cada ensaio. Após a descrição de cada ensaio apresentam-se os resultados. O programa experimental consiste em ensaios em escala reduzida para caracterização mecânica dos materiais (aço, vidro e adesivo utilizado na ligação entre a alma de vidro e os banzos em aço) e ensaios à escala real sobre viga de vidro laminado, tomado como sistema de referência, e duas vigas híbridas aço-vidro.

No quinto capítulo são apresentados os modelos numéricos utilizados na análise do sistema de referência e do sistema híbrido. Os resultados computacionais obtidos com um programa de elementos finitos são comparados com os experimentais.

Finalmente, no sexto capítulo são expostas as conclusões do presente estudo e no sétimo capítulo são feitas propostas de trabalhos futuros nesta área.

## 2 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

### 2.1 Propriedades do vidro

#### 2.1.1 Propriedades químicas do vidro

O vidro é um material sólido, homogêneo e inorgânico, que se obtém por arrefecimento rápido de uma massa em fusão. O rápido arrefecimento impede a correta cristalização, fazendo com que o material final se mantenha num estado transitório entre o cristalino e o totalmente amorfo. A indústria vidreira dedica-se, especialmente, a dois tipos de vidros: maioritariamente aos vidros de silicatos (SLSG) e, em menor escala, aos vidros de boro-silicatos (BSG). A figura 2.1 apresenta a composição de um vidro de silicato. O cálcio proporciona estabilidade ao vidro contra ataques de agentes atmosféricos, o Magnésio garante a resistência às mudanças bruscas de temperatura e aumenta, tal como a Alumina, a resistência mecânica.

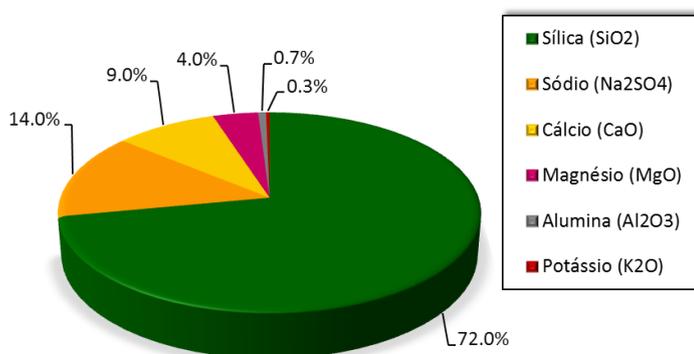


Figura 2.1 - Composição química do vidro de silicato.

Um vidro de boro-silicatos difere do anterior apenas por alterações nos seus compostos secundários que passam a ser maioritariamente constituídos por óxido de boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O). Devido aos novos compostos secundários, os vidros de boro-silicatos são mais resistentes a variações de temperatura, a água e a ácidos. No Quadro 2.1 encontram-se descritos os diferentes tipos de vidros.

Quadro 2.1 - Grupos químicos do vidro. (Cruz et al., 2012)

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

### 2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas do vidro

A propriedade mais importante do vidro é a sua transparência, que possibilita a passagem de luz visível. O vidro é habitualmente fabricado em superfícies muito lisas e impermeáveis. As propriedades físicas mais relevantes do vidro encontram-se resumidas no Quadro 2.2, onde se pode ver que a densidade aproxima-se da do betão armado e o módulo de elasticidade é quase igual ao do alumínio.

Quadro 2.2 - Propriedades físicas do vidro (Valarinho, 2010)

Propriedades	SLSG
Densidade	25kN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	70000 MPa
Módulo de distorção	28000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.23
Coefficiente de expansão térmica	9·10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Temperatura de fusão	600 °C
Calor específico	720 Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dureza (escala de Mohs)	6.5

O vidro recozido é um material frágil, com comportamento elástico quase perfeito e isotrópico. Não sofre deformações plásticas e por ser um material amorfo, não há lugar a redistribuições de tensões quando se atinge a tensão limite do material, o que o torna muito suscetível a concentrações de tensão. A resistência à compressão (800 MPa) é muito superior à resistência à tração (45 MPa). Apesar dos valores teóricos da resistência à tração poderem ser elevados, os micro-defeitos à superfície são responsáveis pela falta de fiabilidade e por valores de tensão de rotura a tração bem inferiores aos teóricos. Esta incerteza dos valores da

tensão resistente do vidro torna-o num material inseguro para uso estrutural. No entanto, a sua utilização tem vindo a aumentar com o aparecimento de vários tipos de vidro obtidos com diferentes tratamentos aplicados.

## 2.2 Processos tecnológicos para reforço do vidro

### 2.2.1 Introdução

O vidro recozido tem rotura marcadamente frágil, rompendo de forma instantânea e espontânea. Apesar da boa resistência à compressão, a fraca fiabilidade na resistência à tração limita a sua aplicabilidade em termos estruturais. Para superar o problema da fiabilidade do comportamento estrutural, o vidro recozido é frequentemente sujeito a tratamentos que aumentam o seu desempenho mecânico, como a têmpera, o termo endurecimento e a laminação, que a seguir se descrevem.

### 2.2.2 Vidro temperado

A têmpera ou tratamento por calor é um dos tratamentos mais importantes da indústria vidraceira para as aplicações estruturais, aumentando a resistência à tração para valores de aproximadamente 250 MPa e evitando os estilhaços em pequenos fragmentos cortantes na rotura. O vidro temperado representa uma grande fatia do vidro utilizado na construção, pois é mais resistente a choques mecânicos e térmicos que o vidro comum, preservando as características de transmissão luminosa e de composição química. O processo de têmpera está esquematizado na Figura 2.2.

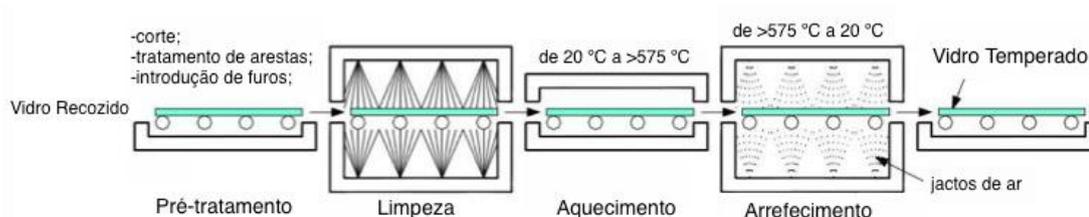


Figura 2.2 - Processo de obtenção do vidro temperado (Nielsen, 2009).

O processo de têmpera consiste no aquecimento do vidro recozido até atingir a temperatura próxima do seu ponto de amolecimento e arrefecimento rápido a taxa controlada através de jatos de ar, fazendo com que a zona superficial do painel de vidro arrefeça mais rapidamente que o seu interior. Este arrefecimento inicial faz com que a zona superficial se contraia, originando tensões de compressão à superfície do painel e tensões de tração no interior.

### 2.2.3 Vidro Termo Endurecido

O vidro termo endurecido é produzido seguindo o mesmo processo que o vidro temperado, mas com arrefecimento mais lento, que dá lugar a um campo de tensões residuais de menor intensidade e, conseqüentemente, valores de tensão resistente inferiores às do vidro

temperado. A Figura 2.3 mostra as diferenças de padrões de fragmentação entre o vidro recozido e os vidros sujeito a tratamento térmico.

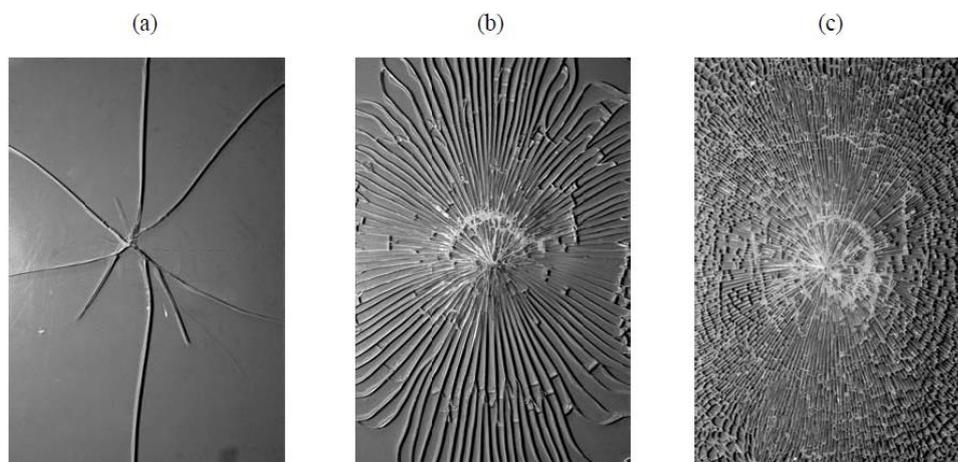


Figura 2.3 - Padrão de fragmentação do vidro: a) vidro recozido; b) vidro termo-edurecido; c) vidro temperado (Haldimann, 2006).

#### 2.2.4 Vidro laminado

O vidro laminado é um vidro formado pelo conjunto de duas ou mais placas de vidro recozido ou de vidro temperado, ou até mesmo de ambos os tipos. O conjunto de placas de vidro são unidas através de um filme intercalar transparente, garantindo a integridade mesmo que uma placa quebre. A película aderente melhora o desempenho estrutural do laminado após a rotura, permitindo que o vidro permaneça no lugar e aumentando a segurança quanto a possíveis quedas.

Aos procedimentos anteriormente descritos, podem ser adicionados outros que aumentam a capacidade de carga, tal como o reforço do vidro com outros materiais mais resistentes. Os sistemas híbridos são abordados no ponto seguinte.

### 2.3 Sistemas Híbridos

O conceito de vigas de vidro híbridas consiste em reforçar uma viga de vidro com outro material mais resistente, com o objetivo de aumentar a resistência e robustez do elemento estrutural. Assim, mesmo estando fendilhadas todas as camadas de vidro laminado, a viga não deve entrar em colapso e deve ser capaz de suportar a carga existente. Este conceito pretende gerar uma resistência pós rotura significativa para vigas com vidro estrutural (Louter, 2011).

Este aumento de resistência pós rotura é obtido pela ligação da viga de vidro estrutural a uma secção de reforço na zona mais tracionada. Caso o vidro fracture, o reforço atua como uma ponte nas fendas existentes no vidro, transferindo as tensões de tração existentes nas zonas fendilhadas para o vidro intacto: o processo de abertura de fenda localizada é interrompido e a fenda não se propaga a toda a altura total da viga, deixando de existir na zona de compressão,

como se pode observar na Figura 2.4b. Na curva de carga-deslocamento da Figura 2.4c, cada pico corresponde à rotura de um painel único de vidro. Como se pode observar, mesmo depois da quebra do primeiro painel, a transmissão da força de tração existente é assegurada pelo reforço e painéis adjacentes.

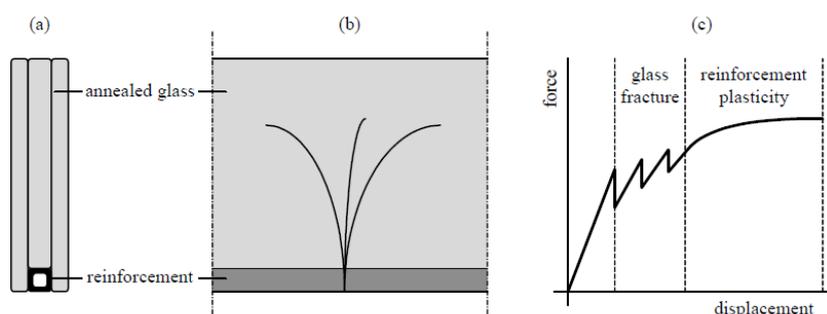


Figura 2.4 - Representação esquemática do funcionamento de uma viga de vidro reforçada: (a) Secção transversal da viga de vidro; (b) Visualização de uma viga de vidro reforçada fendilhada; (c) Curva carga-deslocamento a meio vão (Louter, 2011).

## 2.4 O Adesivo na ligação dos sistemas híbridos

Nas vigas híbridas de vidro e aço, as ligações entre os dois materiais são maioritariamente efetuadas por colagem através de adesivos, estas apresentam vantagens e desvantagens em relação a outros tipos de ligações mais tradicionais, que estão resumidas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Vantagens e Desvantagens de ligações adesivas (Adaptado de Abeln et al, 2013).

Vantagens	Desvantagens
As componentes da ligação não são enfraquecidas por aberturas.	A resistência da ligação é inferior, comparada com outro tipo de soluções.
Devido ao baixo módulo de elasticidade dos adesivos, existe amortecimento das vibrações.	Exige um pré-tratamento das superfícies e um processo de manufatura elaborado.
Construção leve e económica uma vez que não é necessário parafusos nem chapas de topo.	A durabilidade da ligação é influenciada por fatores como a humidade, a temperatura, duração e radiação UV.

A seleção do tipo de ligação depende dos condicionantes de cada caso e deve ser avaliada no dimensionamento. Vários tipos de adesivos estão disponíveis no mercado. Seguidamente referem-se algumas propriedades dos adesivos existentes.

### 2.4.1 Propriedades dos adesivos

Os principais requisitos dos adesivos nas aplicações estruturais são a resistência ao corte, a rigidez, a aderência, a resistência a ações térmicas e da luz solar, a capacidade de deformação e a capacidade de colmatar as irregularidades superficiais dos elementos a ligar. A junta de ligação tem de ser suficientemente rígida para proporcionar uma interação ótima entre as duas componentes para maximizar a resistência (assegurando a transferência de esforços), mas, por outro lado, tem que ter capacidade para redistribuir os picos de tensões em pontos críticos e compensar o alongamento devido a diferença de temperatura existente entre o aço e o vidro, para evitar roturas localizadas do vidro ou do adesivo.

Os adesivos podem ser divididos de acordo com seu módulo de elasticidade e módulo de corte, em flexíveis, elástico e rígidos, como se mostra no esquema da figura 2.5.

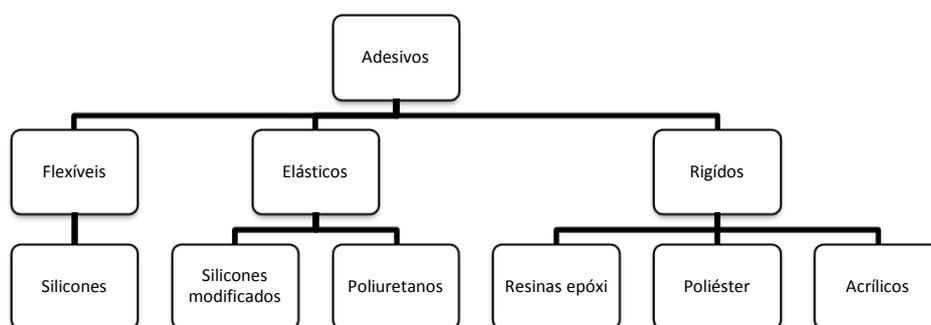


Figura 2.5 - Tipos de adesivos.

Existe uma relação entre a rigidez dos adesivos e a sua capacidade de deformação longitudinal. Os adesivos com elevada rigidez têm baixa deformabilidade longitudinal em comparação com adesivos elásticos. Por outro lado, os adesivos que têm elevada deformabilidade longitudinal têm baixa capacidade de carga. A figura 2.6 indica a posição relativa de diferentes adesivos quanto à grandeza do módulo de elasticidade.

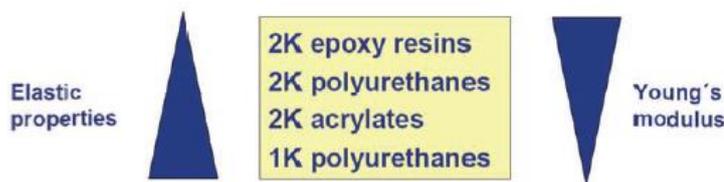


Figura 2.6 - Variação da resistência com a elasticidade dos adesivos (Abeln et al., 2013).

No âmbito do projeto de investigação Europeu da INNOGLAST (Abel et al., 2013) foram realizados ensaios ao corte em escala reduzida para determinar as características da ligação realizada com diferentes adesivos (resina epóxi, acrílico, poliuretano e silicone). O Quadro 2.4 mostra o esquema de ensaio realizado no âmbito do projecto e a Figura 2.7 ilustra os resultados obtidos que representam o comportamento ao corte de cada um dos adesivos

testados (com exceção da resina epóxi) e a influência da espessura do adesivo. A influência da espessura da junta é significativa especialmente para o acrílico para o poliuretano. Ao aumentar a espessura da junta de ligação, esta perde a sua capacidade de suportar carga devido ao aumento da capacidade de alongamento da camada adesiva.

Quadro 2.4 - Ensaio para caracterização do adesivo ao corte utilizado por Netusil e Eliasova (adaptado de Abeln et al (2013)).

Ensaio	Descrição do ensaio	Representação do sistema de ensaio
Steel-glass shear connection test	Dois vidros são colados aos substratos com o adesivo e é aplicada uma força de tração que se transfere para o adesivo como tensão de corte.	

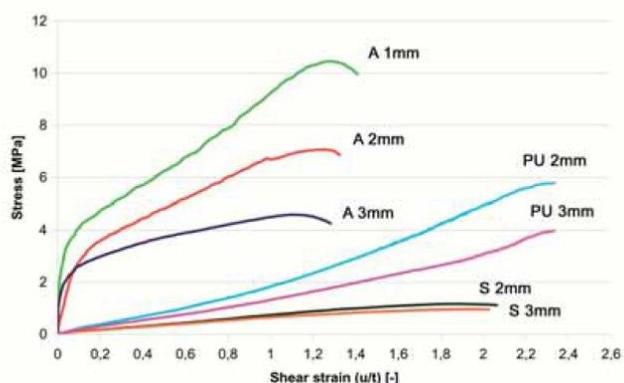


Figura 2.7 – Resistência ao corte dos diferentes adesivos e espessuras das ligações (S – Silicone, A – acrílico, PU – poliuretano) (Netusil & Eliasova, 2011).

A escolha do adesivo é então um exercício de ponderação entre a elevada rigidez e deformabilidade que se pretende para uma conexão efetiva entre a alma e o banzo. A ligação tem de ser rígida o suficiente para proporcionar uma ótima interação entre a alma e o vidro, no entanto, tem de ser flexível o suficiente para que não se verifiquem concentrações elevadas de tensões que possam conduzir à rotura do vidro. Deve-se ainda ter em conta que para sistemas híbridos, é necessário que o adesivo tenha uma espessura suficiente para colmatar as irregularidades nas superfícies de contacto.

#### 2.4.2 Tipos de ligações adesivas vidro-aço

Vários tipos de ligações podem ser utilizadas para a unir a alma de vidro aos banzos em aço. No caso de vigas híbridas vidro-aço, em forma de I, a junta pode ser realizada de quatro maneiras diferentes (ver Figura 2.8), apresentando, cada uma as suas vantagens e desvantagens. A junta pode ser: direta (“butt splice bonding”); criando um canal nos banzos

para assentar e colar a alma (“Chanel bonding in a groove”); com perfis metálicos em U (“bonding with U-profiles”); com perfis metálicos em L (“bonding with L-profiles”).

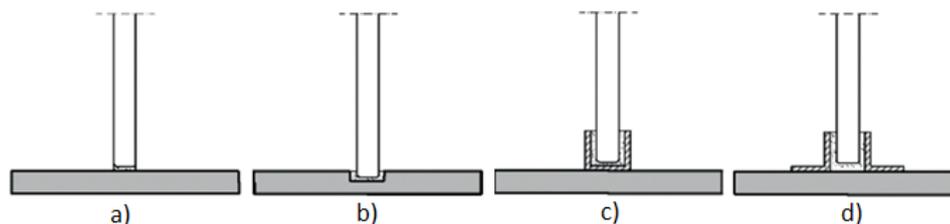


Figura 2.8 - Tipos de ligação banzo de aço-alma de vidro (Adaptado de (Netusil & Eliasova, 2011).

A junta direta e em canal, para além de serem esteticamente apresentáveis, são de mais fácil execução comparando com as juntas recorrendo a um elemento intercalar auxiliar. No entanto, as juntas recorrendo a perfis metálicos em U ou em L possuem maior ductilidade e maior resistência (Abeln et al., 2013).

Ungermann e Preckwinkel (2010), avaliaram a capacidade de carga e o comportamento estrutural de vigas híbridas vidro-aço através de ensaios de flexão em 4 pontos utilizando vários adesivos estruturais. Os resultados estão resumidos no Quadro 2.5

Quadro 2.5 – Ilustração dos ensaios realizados por Ungermann e Preckwinkel (2010).

Amostra	Ligação Banzo-Alma	Espessura Adesivo	Tipo de adesivo	Banzos (mm)	Alma (mm)	Carga de Rotura (kN)
TS1		3mm	Poliuretano SF7750	S235	Vidro temperado laminado 2x12x250 <sup>(1)</sup>	72,1
TS4			Silicone DC 993	80x10		52,8
TS3			Resina DP490	S355 80x10		126,5
TS5			Resina DP490			161,6
TS6			Resina AD821			76,8
TS2		3mm	Poliuretano SF 7550	S235 80x10 Perfil-U 40x24x3,25	Vidro temperado laminado 2x12x250 <sup>(1)</sup>	75,3

(1) A capacidade de carga da placa de vidro sem banzos metálicos é de aproximadamente 40 kN assumindo uma tensão última de 120 N/mm<sup>2</sup> (Ungermann & Preckwinkel, 2010).

Da observação do Quadro 2.5 retiram-se as seguintes conclusões: devido à baixa rigidez do silicone (provete TS4) houve pouca contribuição dos banzos na resposta da viga; o perfil metálico em U aumenta a capacidade de carga (comparação entre provetes TS1 e TS2) devido à maior rigidez que confere à ligação; as amostras TS3 e TS5, ambas conectadas por resina DP 490, revelaram uma alta contribuição dos banzos; a resina AD851 tem uma rigidez inferior à resina DP490 (comparação entre TS6, TS3 e TS5).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Resumo histórico

O vidro é um material milenar. Os primeiros objetos em vidro foram encontrados no Egito, na Mesopotâmia Oriental e na Síria e datam de aproximadamente 3500 a.C. O fabrico de vidro surge por volta de 1500 a.C no Egito e na Mesopotâmia. O processo utilizado era a moldagem em massa: os fabricantes envolviam o vidro macio em torno de um núcleo de areia ou de argila para de seguida arrefece-lo. O vidro frio era cortado e polido.

No século 1 d.C, os romanos revolucionaram a indústria do vidro com novos processos de fabrico: o sopro livre, moldes de sopro e moldes de pressão. Estes processos permitiram produzir uma ampla gama de produtos, incluindo o vidro plano para a execução de janelas.

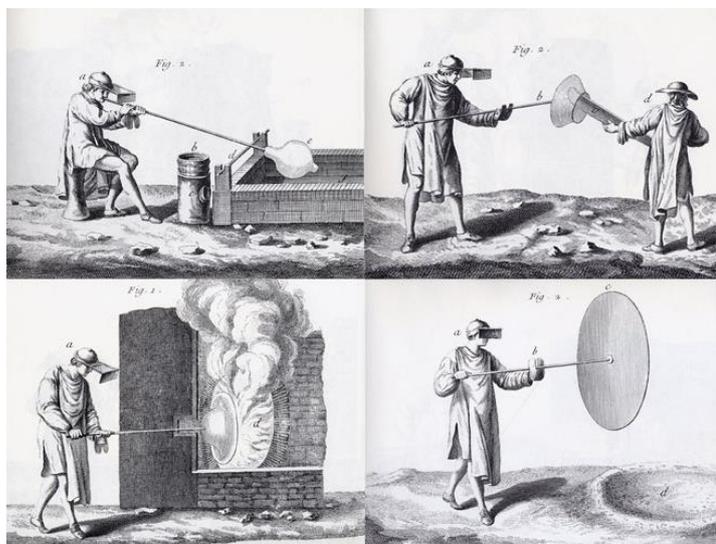


Figura 3.1 - Faseamento da execução de vidro usando o processo de sopro de vidro.

No mesmo século, deu-se uma expansão da produção vidreira romana por toda a Europa. Os franceses melhoraram os processos romanos, usando moldes maiores e criando fornos de recozimento.

O aperfeiçoamento do fabrico do vidro atinge um ponto alto em Inglaterra onde, em 1773, surgem placas de vidro de qualidade para a execução de janelas.

Com a revolução Americana expandiu-se a indústria do vidro nos Estados Unidos, onde surgiu a primeira máquina de prensagem para o vidro. A revolução industrial introduziu uma

série de inovações na indústria do vidro, entre as quais uma bomba de pressão de ar desenvolvida em Inglaterra em 1859, que automatizou o processo de sopro. Os avanços na química também permitiram alterar a composição do vidro, tornando-o mais forte e mais resistente ao calor. Em 1871, William Pilkington inventou uma máquina que automatizou a produção de chapas de vidro.

No início do século XX, foi descoberto que o vidro plano podia ser "temperado" por aquecimento e em seguida arrefecido rapidamente. A compressão realizada pelo aquecimento do vidro aumenta a sua resistência até 400%. Tal descoberta veio a ser especialmente importante na indústria automóvel. Nos anos seguintes à Primeira Guerra Mundial, a indústria do vidro teve um grande crescimento, acompanhando o crescimento da construção de casas em todo o mundo e da indústria automóvel.

Em 1950, Alastair Pilkington alterou o processo de fabrico de vidro, através do desenvolvimento de um novo processo para a execução de vidro plano. Este novo processo, esquematizado na figura 3.2, revolucionou a indústria de vidro plano por todo o mundo, com aplicações nos sectores da construção, automóvel e da indústria em geral, pois permite obter placas de vidro de alta qualidade, com espessuras constantes e de melhor qualidade.



Figura 3.2 – Esquema do “processo de flutuação” de Alastair Pilkington para o fabrico de vidro (Valarinho, 2010).

Neste processo as matérias-primas são misturadas com a precisão necessária e fundidas num forno a temperatura entre os 1600°C e 1800°C. De seguida, a mistura é escoada até um tanque de estanho fundido onde arrefece e solidifica gradualmente (é aqui que o vidro adquire a espessura pretendida). É utilizado o estanho pelo largo espectro de temperaturas em que este material se mantém no estado líquido, e, simultaneamente, ter um peso específico superior ao do vidro, permitindo assim a flutuação do vidro sobre ele. No forno de recozimento, o vidro é arrefecido de forma lenta e uniforme, evitando a criação de tensões internas do choque térmico. O processo termina com o vidro apresentando superfícies polidas e paralelas. Esta última etapa de fabrico dá o nome a este tipo de vidro, sendo por isso denominado por “vidro recozido”. Ainda hoje, 90 por cento do vidro plano no mundo é feito usando o processo de Pilkington.

### 3.2 Estudos anteriores em sistemas híbridos

Os principais estudos realizados em elementos resistentes contendo vidro estrutural são: vigas de vidro com reforço de aço inoxidável; aquário de vidro reforçado com aço inoxidável; vigas de vidro em caixão reforçadas com aço inoxidável; vigas de vidro em T com cabo de pré-esforço; vigas de vidro reforçadas com fibras de vidro e de carbono; vigas híbridas de vidro e madeira, de vidro e betão armado, de vidro e aço. Estes estudos constituem a base de conhecimento.

De todos os trabalhos salienta-se o projeto de um pavilhão todo transparente realizado em 2004 na Universidade de Delft. O projeto inicial apresentava vigas de vidro de 8m de comprimento, no entanto, os modelos realizados à escala reduzida eram constituídos por 7,2m de vão. O telhado, elemento principal do projeto, é constituído por vigas principais de vidro restringidas lateralmente por madres e suportadas por colunas, igualmente em vidro (Figura 3.3a).

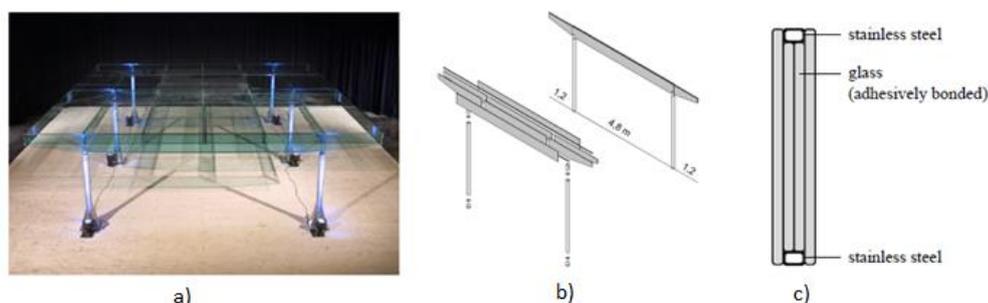
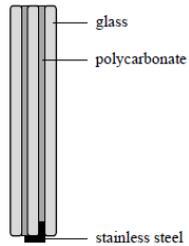
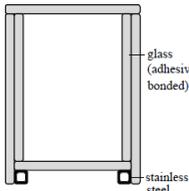
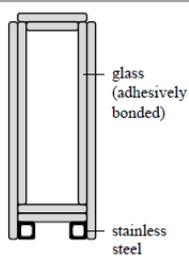
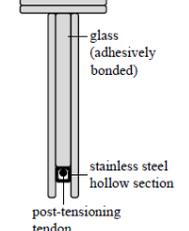
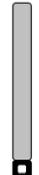
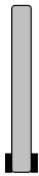
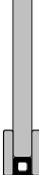


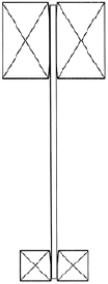
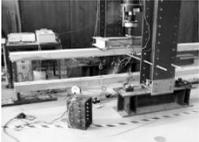
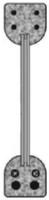
Figura 3.3 - Pavilhão transparente: a) Esquema de ensaio b) Esquema das vigas de vidro c) Perfil transversal.

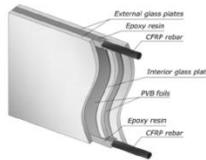
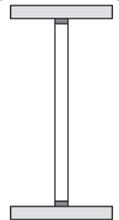
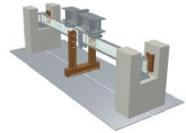
Entre pilares, as vigas apresentam um comprimento de 4,8 m e uma secção transversal constituída por quatro painéis de 385 mm de altura por 15 mm de espessura. Nas zonas em consola, as vigas tinham 1,2 m e uma secção transversal constituída por dois painéis com 15 mm de espessura e uma altura variável de 385 mm na zona do pilar para 230 mm no fim da consola. Nas zonas em consola foram reforçadas com aço inoxidável na parte superior e inferior da viga. As madres encontram-se espaçadas de 1,2 m. Devido ao significativo comprimento da viga, esta foi dividida em segmentos e unida através de um adesivo de acrilato GB 368 da DELO (Figura 3.3b e 3.3c). Foi realizado um ensaio de flexão de três pontos, em que a viga mostrou ter uma capacidade em suportar uma carga quase 50 % maior do que a carga que formou as primeiras fendas (Kozłowski, 2012).

No Quadro seguinte encontram-se indicados os principais trabalhos com sistemas híbridos em vidro estrutural ilustrando as diferentes possibilidades de execução (geometria e materiais), bem como o diferencial entre a carga de fissuração e de rotura.

Tipo de viga	Autor/Data/Local	Secção transversal	Vidro (mm)	Reforço (mm)	Adesivo	Representação do ensaio	Esquema de ensaio	Carga de Fissuração (kN)	Carga de Rotura (kN)
Viga híbrida vidro-aço inoxidável	Veer, Louter, Rijgersberg, Ruytenbeek 2003 Universidade de Delft		Vidro recozido	Perfil em L de 3 x 3mm e 1mm de espessura	-	-	3PB Vão de 3m	-	-
	Veer, Gross e Hobbelman 2002 Universidade de Delft		Vidro recozido 300x300 mm	Perfil rectangular oco de 10 x 10mm e 1mm de espessura	Acrílico GB368 Da DELO		3PB Vão de 4m	-	14,5 kN
	Veer, Bos e Louter 2004 Universidade de Delft		Vidro recozido 210x70 mm	Perfil rectangular oco	Acrílico GB 368 da DELO		4PB Vão de 3m	10,8 kN	14,3 kN
Viga híbrida vidro-aço inoxidável pré-esforçada	Bos, Veer, Hobbelman e Louter 2004 Universidade de Delft		Alma: duas camadas de 8mm e um de 10mm Banzo: duas camadas de 8mm	Perfil rectangular oco de 10x10mm e 1mm de espessura	-		4PB	20,5 kN	23,9 kN

Tipo de viga	Autor/Data/Local	Secção transversal	Vidro (mm)	Reforço (mm)	Adesivo	Representação do ensaio	Esquema de ensaio	Carga de Fissuração (kN)	Carga de Rotura (kN)
Viga híbrida vidro-aço inoxidável	Louter, Veer e Hobbelman 2007 Universidade de Delft		Vidro recozido 115x10 mm	Secção rectangular oca 10x10 mm e 1 mm de espessura	Acrílico GB368 DELO	-	4PB 5 vigas de 1,5m	-	-
					Resina epóxi		4PB 5 vigas de 1,5m		
			Vidro recozido 115x10 mm	2 secções rectangular 2x9 mm	Acrílico GB368 DELO	-	4PB 5 vigas de 1,5m	-	-
					Resina epóxi		4PB 5 vigas de 1,5m		
			Vidro recozido 115x10 mm + 2 Camadas de vidro recozido 40x6 mm	Secção rectangular oca 10x10 mm e 1 mm de espessura	Acrílico GB368 DELO	-	4PB 5 vigas de 1,5m	-	-
					Resina epóxi		4PB 5 vigas de 1,5m		
Vigas híbridas vidro-GFRP (fibra de vidro)	Louter, Leug, Kolstein e Vambersky Universidade de Delft		Vidro laminado 2 painéis 115x8 mm	Secção circular 2 mm de diâmetro	-	-	4PB Vão de 1,5 m	-	-
			Vidro laminado 2 painéis 115x8 mm	Secção rectangular 0,8x6 mm	-	-	4PB Vão de 1,5 m	-	-

Tipo de viga	Autor/Data/Local	Secção transversal	Vidro (mm)	Reforço (mm)	Adesivo	Representação do ensaio	Esquema de ensaio	Carga de Fissuração	Carga de Rotura (kN)
Viga híbrida vidro-madeira	Hamm 2000 École Polytechnique de Lausanne		Vidro recozido 250x10mm	Secção rectangular 50x30mm 60x50mm	PU		4PB 8 vigas de 4m	-	-
	Kreher 2004 École Polytechnique de Lausanne		Vidro recozido termo- endurecido e temperado 150x4mm 150x6mm	Secção quadrada 20x20mm 50x50mm	PU	-	4PB Vão de 2m	-	-
	Cruz e Pequeno 2008 Universidade do Minho		Vidro recozido 2 painéis de 500x6mm	Secção rectangular 70x100mm	Silicone  PU		4PB 15 vigas	0,65m 1m 1,7m 3,2m 0,65m 1m 1,7m	99 kN 22 kN 71 kN 35 kN 72 kN 69 kN 40 kN
Viga híbrida vidro-betão armado	Freitag 2004 Graz University of Technology		Vidro laminado temperado 3 painéis de 8mm	Betão Armado  Betão Armado e cabo de pré-esforço	-		4PB Vão de 7,8m	-	100 kN  257 kN

Tipo de viga	Autor/Data/Local	Secção transversal	Vidro (mm)	Reforço (mm)	Adesivo	Representação do ensaio	Esquema de ensaio	Carga de Fissuração	Carga de Rotura (kN)
Viga híbrida vidro-CFRP (Fibra de carbono)	Palumbo e Antonelli 2005		4 Painéis de vidro temperado e laminado	Reforço em fibra de carbono ligado no lado de tração	-	-	3PB Vão de 1,1m	-	-
	Antonelli e Cagnacci 2008		Vidro temperado	Secção lisa ou nervurada incorporada nas extremidades	-		3PB Vão de 3m	-	-
Viga híbrida vidro-aço	Wellershoff 2003 Institute of Steel Construction, RWTH Aachen		Vidro recozido 360x19mm	Secção rectangular 250x10mm ligado através de cantoneiras de aço aparafusadas	-		4PB Vão de 3.6m	-	137,8 kN
	Ungermann e Preckwinkel 2010 Universidade de Dortmund		Vidro Laminado e temperado 2 painéis de 250x12mm	Secção rectangular 80x10mm	Silicone		4PB Vão de 4m	-	52,8 kN
					PU			-	72,1 kN
Resina epóxi	-	126,6 kN							

### 3.3 Formulação analítica para vigas híbridas

A formulação analítica de vigas híbridas é bastante complexa, ou contrário da formulação de vigas constituídas por um único material, pois pretende-se descrever o comportamento de vigas cuja ligação é flexível. No entanto, existem dois modelos analíticos para caracterizar vigas híbridas, sendo esses, o método desenvolvido por Richard Pischl e o método desenvolvido por Karl Mohler.

Como referido anteriormente, a resistência das vigas híbridas de vidro e aço depende fortemente da rigidez e da geometria da ligação entre os dois materiais. A resistência à flexão dos banzos acaba por ter pouca influência na capacidade de carga, uma vez que é através do adesivo que são introduzidas as forças normais nos banzos. Um aumento da rigidez da ligação permite, geralmente, um aumento da resistência, porque o adesivo é capaz de transferir forças normais mais elevadas para os banzos. A rigidez da ligação pode ser descrita por uma "rigidez efetiva", que depende da rigidez ao corte do adesivo "G", da espessura "d" e da largura do adesivo "b". Na Figura 3.4 ilustra-se a geometria dos diferentes tipos de ligação.

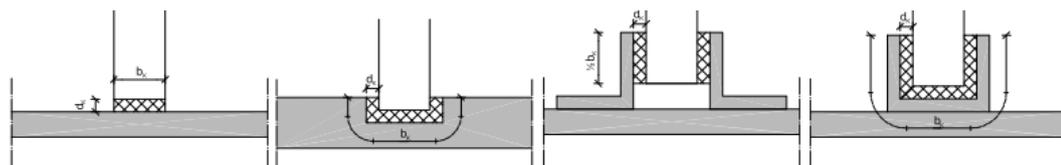


Figura 3.4 - Definição da espessura, d, e largura, b, do adesivo para os vários tipos de ligações.

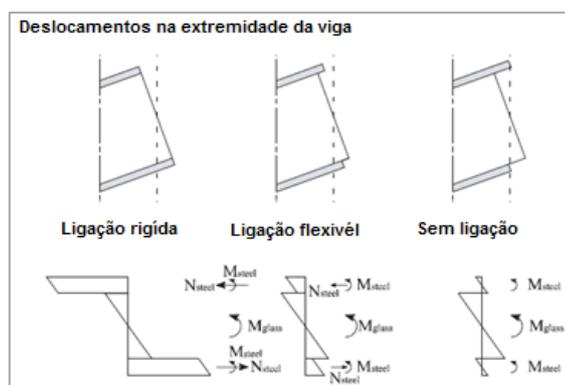


Figura 3.5 - Diagrama de tensões para diferentes graus de conexão entre vidro e aço (adaptado de Ungermann e Preckwinkel, 2010)

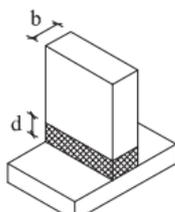
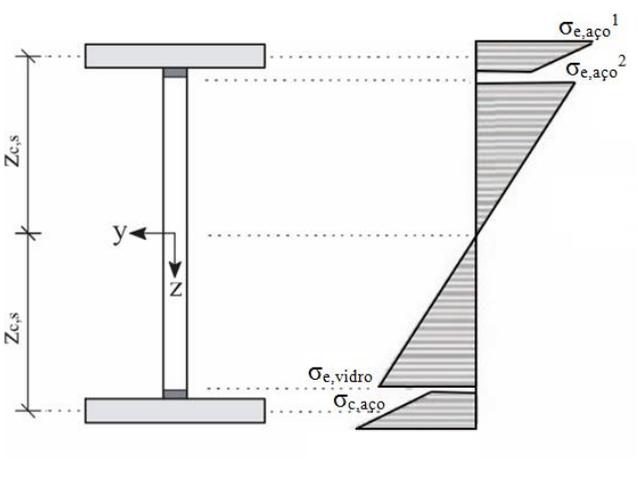
A Figura 3.5 ilustra a distribuição de tensões para vigas mistas com diferentes graus de conexão. Quando a ligação é rígida, não existe deslocamento entre aço e vidro, ou seja, os banzos são submetidos a momentos e a forças normais elevadas, o que origina uma grande capacidade de carga. Quando a seção não está conectada, todos os materiais são solicitados apenas com momentos, resultando em grandes deslocamentos e numa pequena resistência. O comportamento das vigas em estudo situa-se entre estes dois casos. Trata-se portanto, de uma

ligação semi-rígida. Graças ao adesivo, o momento externo ( $M_{y,ed}$ ) é distribuído por momentos internos no vidro ( $M_{y,vidro}$ ) e nos banzos ( $M_{y,aço}$ ) e por forças normais ( $N_{aço}$ ).

### 3.3.1 Método de Mohler

O método de cálculo desenvolvido por Karl Mohler, conhecido como o “ $\gamma$ -método”, é considerado o modelo analítico mais simples para o cálculo de vigas híbridas de vidro e aço, sendo inicialmente desenvolvido para estruturas de madeira. Este método é aplicado a vigas híbridas ponderando as diferentes propriedades dos materiais que a constituem. Desta forma, este método tem em consideração a flexibilidade da ligação através de um momento de inércia efetivo, obtido com uma reduzida contribuição dos banzos.

Quadro 3.1 - Método de Mohler

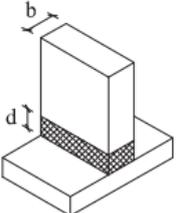
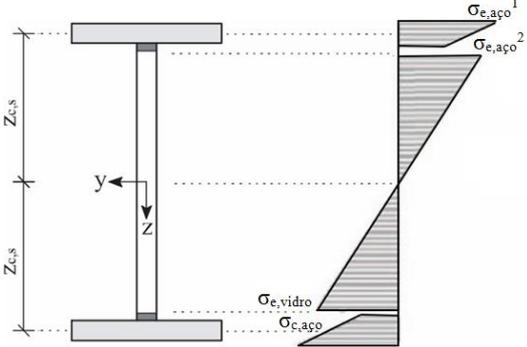
<p><b>Coefficiente de homogeneização</b></p> $n = \frac{E_{vidro}}{E_{aço}}$ <p><b>Propriedades efectivas da ligação</b></p> $k = \frac{\pi^2 * E_{aço} * A_{aço}}{l^2 * K}$		<p><b>Rigidez da ligação semi-rígida</b></p> $K = G * \frac{b}{d}$ <p><b>Factor de efectividade da ligação</b></p> $\gamma = \frac{1}{1+k}$
<p><b>Momento de Inércia Efectivo</b></p> $I_{y,eff} = 2I_{y,aço} + n * I_{y,vidro} + 2 * \gamma * A_{aço} * z_{c,s}^2$		
	$\sigma_{e,aço}^1 = \pm \frac{M_{y,Ed}}{I_{y,eff}} * (\gamma * z_{c,s} + \frac{t_{aço}}{2})$ $\sigma_{e,aço}^2 = \pm \frac{M_{y,Ed}}{I_{y,eff}} * (\gamma * z_{c,s} - \frac{t_{aço}}{2})$ $\sigma_{c,aço} = \pm \frac{M_{y,Ed}}{I_{y,eff}} * \gamma * z_{c,s}$ $\sigma_{e,vidro} = \pm \frac{M_{y,Ed}}{I_{y,eff}} * \frac{h_{vidro}}{2} * n$ $\tau = \frac{V_{Ed} * \gamma * z_{c,s} * A_{aço}}{I_{y,eff} * b}$	

O método de Mohler é considerado como a formulação mais exata para vigas simples com carregamento sinusoidal. Para outros sistemas, por exemplo, vigas simples com carregamento uniforme o método de Mohler não é exato, no entanto, de acordo com Abeln et al (2013), uma análise comparativa mostrou que este método é adequado para vigas com ligação flexível.

**3.3.2 Método de Pischl**

Richard Pischl desenvolveu, para estruturas de madeira, outro método analítico usado no estudo deste tipo de vigas com diferentes tipos e posições de carregamento, tendo sido posteriormente ajustado para vigas mistas. De acordo com este método, as forças normais nos banzos podem ser calculadas diretamente, uma vez que apenas dependem da geometria da viga e da rigidez da ligação. Deste modo, é possível determinar a distribuição de momentos internos tendo em conta a diferente rigidez de flexão na alma e no banzo.

Quadro 3.2 - Método de Pischl

<p><b>Coefficiente de homogeneização</b></p> $n = \frac{E_{vidro}}{E_{aço}}$ <p><b>Rigidez da ligação semi-rígida</b></p> $K = G * \frac{b}{d}$		
$\alpha = \frac{K}{E_{aço}} \left( \frac{z_{c,s}}{2I_{y,aço} + nI_{y,vidro}} \right)$	$\beta^2 = \frac{K}{E_{aço}} \gamma^2$	
$\gamma^2 = \frac{1}{A_{aço}} + \frac{2z_{c,s}^2}{2I_{y,aço} + nI_{y,vidro}}$		
<p><b>Carga Pontual</b></p> 		
<p><b>Meio vão</b></p> $N_{aço} = \frac{\alpha}{\gamma^2} Pl * \left[ \frac{3}{16} - \frac{\sinh\left(\frac{3}{8}\gamma l\right) * \sinh\left(\frac{1}{2}\gamma l\right)}{\gamma l * \sinh(\gamma l)} \right]$	<p><b>Zona de introdução de carga</b></p> $N_{aço} = \frac{\alpha}{\gamma^2} Pl * \left[ \frac{3}{8} - \frac{\sinh^2\left(\frac{3}{8}\gamma l\right) - \sinh\left(\frac{3}{8}\gamma l\right) * \sinh\left(\frac{5}{8}\gamma l\right)}{\gamma l * \sinh(\gamma l)} \right]$	
$M_{y,Ed} = 2M_{y,aço} + M_{y,vidro} + 2N_{aço}z_{c,s}$	$\sigma_{c,aço} = \frac{N_{aço}}{A_{aço}}$	
$M_{y,aço} = (M_{y,Ed} - 2N_{aço}z_{c,s}) * \left( \frac{2I_{y,aço}}{2I_{y,aço} + nI_{y,vidro}} \right)$	$\sigma_{e,aço}^1 = \frac{N_{aço}}{A_{aço}} + \frac{M_{y,aço}}{I_{y,aço}} * \frac{t_{aço}}{2}$	
$M_{y,vidro} = (M_{y,Ed} - 2N_{aço}z_{c,s}) * \left( \frac{nI_{y,vidro}}{2I_{y,aço} + nI_{y,vidro}} \right)$	$\sigma_{e,vidro} = \frac{M_{y,vidro}}{I_{y,vidro}} * \frac{h_{vidro}}{2}$	
$\tau_{Adesivo} = \frac{\alpha}{\beta^2} * V * \left[ 1 - 2 \frac{\sinh\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\beta l \cosh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} \right]$		

## 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Introdução

Um dos objetivos dos trabalhos desenvolvidos na presente dissertação consiste na caracterização do comportamento de vigas híbridas de vidro e aço. Os ensaios experimentais enquadram-se nesse objetivo em dois aspetos. Por um lado permitem obter informação para compreender e quantificar o comportamento deste tipo de sistema estrutural, e por outro lado fornecem dados para a calibração dos modelos numéricos de elementos finitos.

Além de serem realizados dois ensaios à escala real de um sistema híbrido (VH1 e VH2) sujeito a um ensaio de flexão em quatro pontos, serão também realizados ensaios de provetes, para caracterização do comportamento reológico dos materiais. Os materiais intervenientes no sistema estrutural em estudo são o aço, o vidro e o adesivo bi-componente Sikaforce 7710 L100 da SIKA que permite a ligação entre a alma e o banzo da viga. Realizaram-se ensaios de tração uniaxial para a caracterização do aço e do adesivo, e de tração por flexão do vidro para a obtenção da curva  $F/\varepsilon$  longitudinal. Para o adesivo foram também realizados ensaios de modelos à escala reduzida para caracterizar o seu comportamento ao corte.

Para cada tipo de ensaio serão reportados aspetos relativos à geometria, instrumentação, e solicitação e serão também apresentados e discutidos os resultados.

### 4.2 Ensaio de caracterização do aço

#### 4.2.1 Procedimento de ensaio

Para caracterizar o comportamento de um elemento estrutural é fundamental conhecer-se o comportamento reológico dos materiais. Assim, um dos ensaios a ser realizado para a caracterização do material a utilizar na execução das vigas híbridas é o ensaio de tracção do aço. O objectivo deste ensaio é determinar a curva de tensão-extensão na sua totalidade para a calibração de modelos numéricos. Este ensaio é realizado de acordo com o definido na norma ISO 6892-1, considerando que os provetes são prismáticos e que têm dimensões proporcionais. Os provetes são retirados de chapas de aço proveniente do mesmo lote dos banzos utilizados na viga híbrida em estudo. A geometria dos provetes encontra-se definida e pormenorizada no Anexo B – Caracterização das propriedades do aço.

No que diz respeito à instrumentação recorreu-se aos dispositivos de medição da própria máquina de tracção, força aplicada e deslocamento das garras, bem como a um extensómetro

---

elétrico linear e um extensómetro mecânico exterior. O extensómetro elétrico (Figura 4.2) é do tipo FLA-6-11 e é colado no centro do provete e na direção longitudinal e tem como finalidade avaliar com maior precisão a fase elástica do ensaio. O extensómetro mecânico (Figura 4.1b)) serve para medir com rigor suficiente toda a deformação até à rotura.

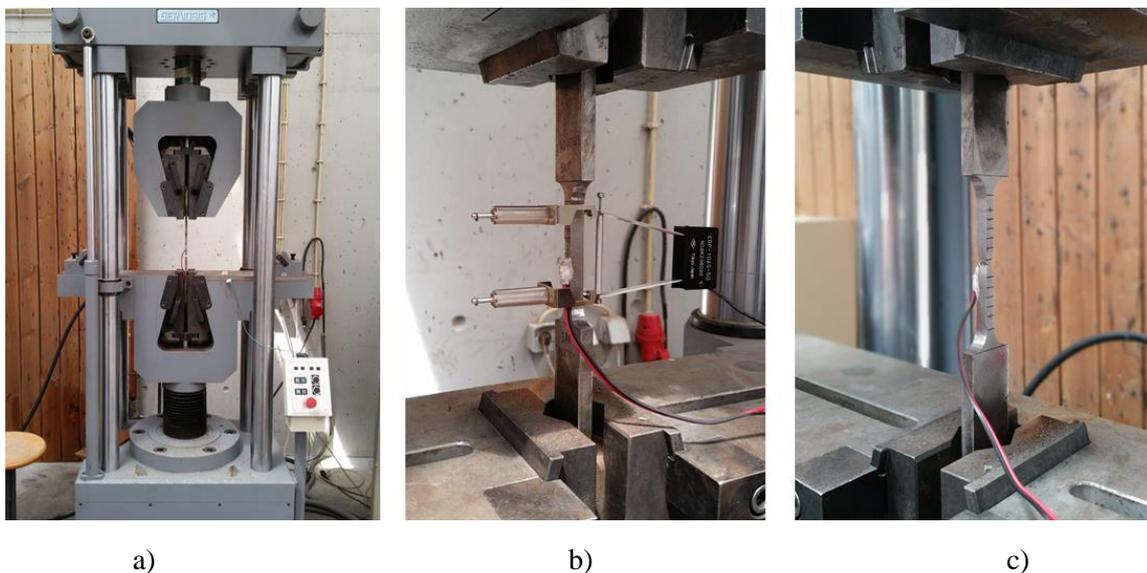


Figura 4.1 – Detalhes do ensaio de tração do aço; a) Máquina de ensaio; b) Extensómetro mecânico; c) Rotura do provete.

Para a realização dos ensaios à tração do aço, o equipamento pelo qual se optou usar foi a prensa de 60 toneladas (Figura 4.1a)). Relativamente à estratégia de carga, optou-se por assumir uma velocidade constante ao longo do ensaio de 0,015 mm/s em controlo de extensão. Esta opção foi também assumida de modo a evitar interrupções no ensaio para proceder à mudança da velocidade.

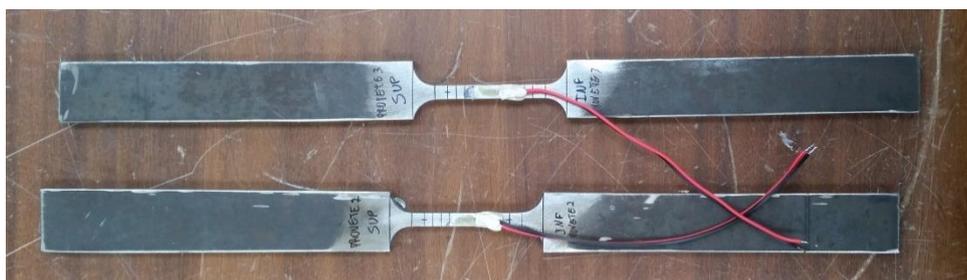


Figura 4.2 – Provete instrumentado com extensómetros elétricos.

Para a determinação da extensão após a rotura foi utilizado o procedimento preconizado pela norma ISO 6892-1 que consiste na marcação de marcas de referência no provete antes do ensaio, e posterior avaliação da extensão com base na distância final entre elas (Figura 4.2).

#### 4.2.2 Resultados

A partir dos ensaios realizados, os quais foram descritos anteriormente, obtiveram-se os resultados apresentados nas figuras seguintes.

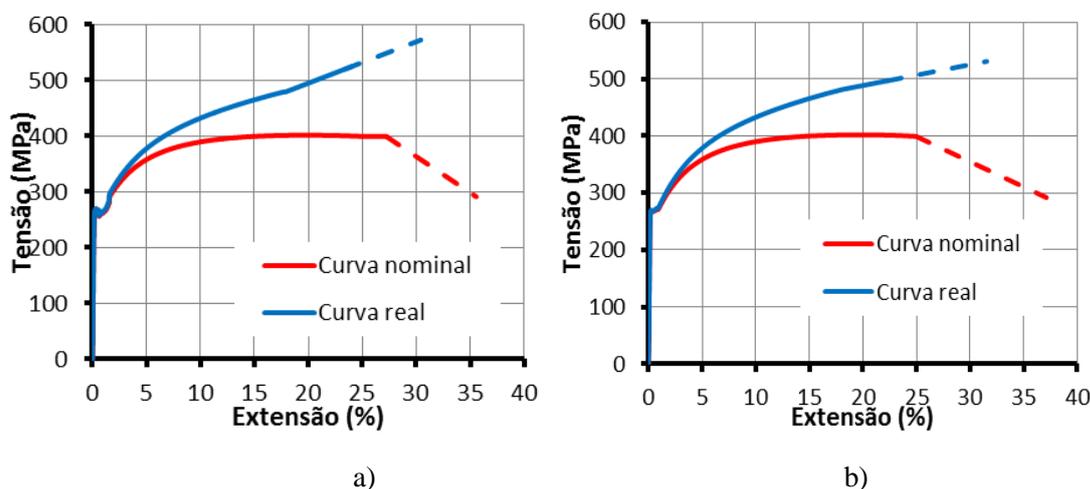


Figura 4.3-Transformação da curva tensão-extensão aparente na curva real; a) Provete 2; b) Provete 3.

A Figura 4.3 ilustra, a vermelho, a curva tensão com a extensão obtida do ensaio experimental, na qual a tensão é obtida pelo coeficiente entre a força e a área inicial do provete. Esta curva é denominada por curva aparente, dado que não corresponde à verdadeira curva constitutiva do material. Na curva real, a azul, a tensão é calculada tendo em conta a área real em cada instante. Esse procedimento de cálculo encontra-se pormenorizado no Anexo B.

Todos os provetes mostraram comportamentos bastante semelhantes, particularmente em fase elástica, onde as curvas reais são praticamente coincidentes (Figura 4.4). Os resultados obtidos revelam-se interessantes porque se julga que a viga híbrida, quando submetida ao teste de flexão, não irá esgotar a capacidade elástica dos banzos metálicos.

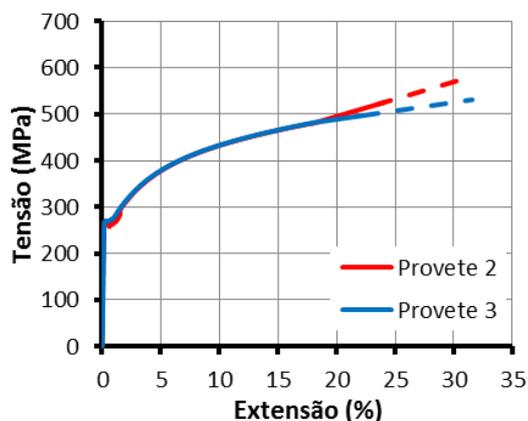


Figura 4.4 - Transformação da curva tensão vs. extensão aparente na curva real.

### 4.3 Ensaio de caracterização do adesivo

#### 4.3.1 Ensaios do adesivo à tração

##### 4.3.1.1 Procedimento de ensaio

Este subcapítulo irá abordar os ensaios de tração do adesivo realizados segundo a norma ASTM D 638 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, que define o método de ensaio para obtenção das propriedades de tração de materiais plásticos. O objetivo deste ensaio é determinar a curva tensão-extensão na sua totalidade e o coeficiente de Poisson para calibração de modelos numéricos. O adesivo utilizado foi o Sikaforce 7710 L100 + 7010, sendo este de base poliuretano bi-componente. Na Figura 4.5 está representada o processo de preparação do mesmo. A geometria dos provetes encontra-se definida no Anexo C – Caracterização das propriedades do adesivo.

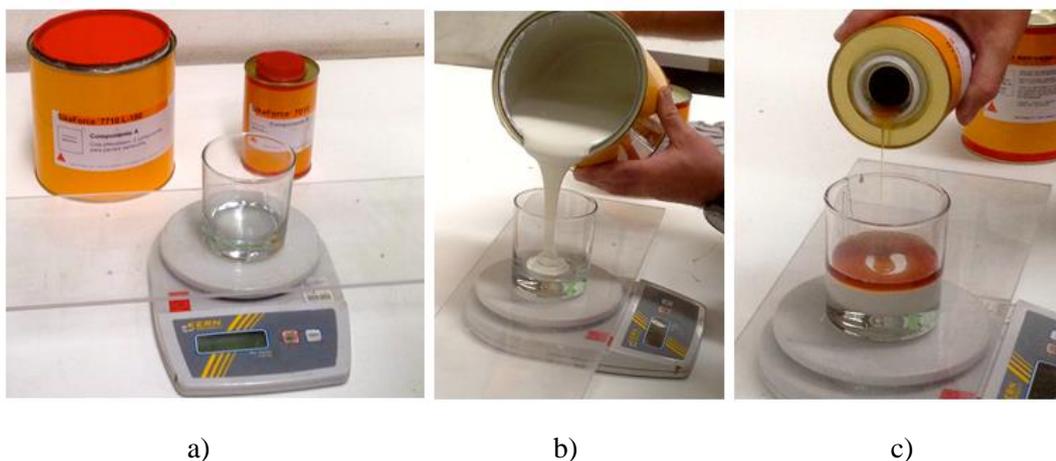


Figura 4.5 – a) Embalagens do adesivo Sikaforce 7710 L100 + 7010; b) e c) Mistura dos componentes.

No que diz respeito à instrumentação utilizada no ensaio de tração do adesivo, foi usado um extensómetro mecânico (Figura 4.7b)) com uma abertura inicial de 50 mm e dois extensómetros elétricos do tipo GFLA-3-50 (próprios para plásticos), colocados na longitudinal e na transversal, respetivamente, como se pode observar na Figura 4.6.

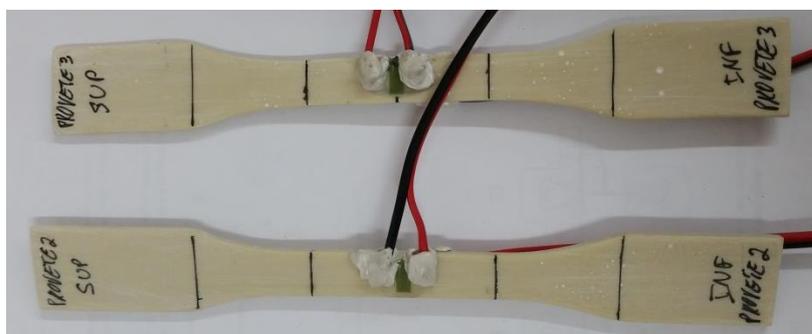


Figura 4.6 - Provetes instrumentados com extensómetros elétricos.

Os ensaios de tração do adesivo foram realizados na prensa de 5 ton com célula de precisão 0.5 % (Figura 4.7a)). No que diz respeito a estratégia de carga do ensaio, a norma indica três velocidades, em que deverá ser escolhida a mais baixa para que o adesivo atinja a rotura entre  $\frac{1}{2}$  a 5 min. Considerou-se uma velocidade de 5 mm/min para os ensaios, o que corresponde a 0.083 mm/s.

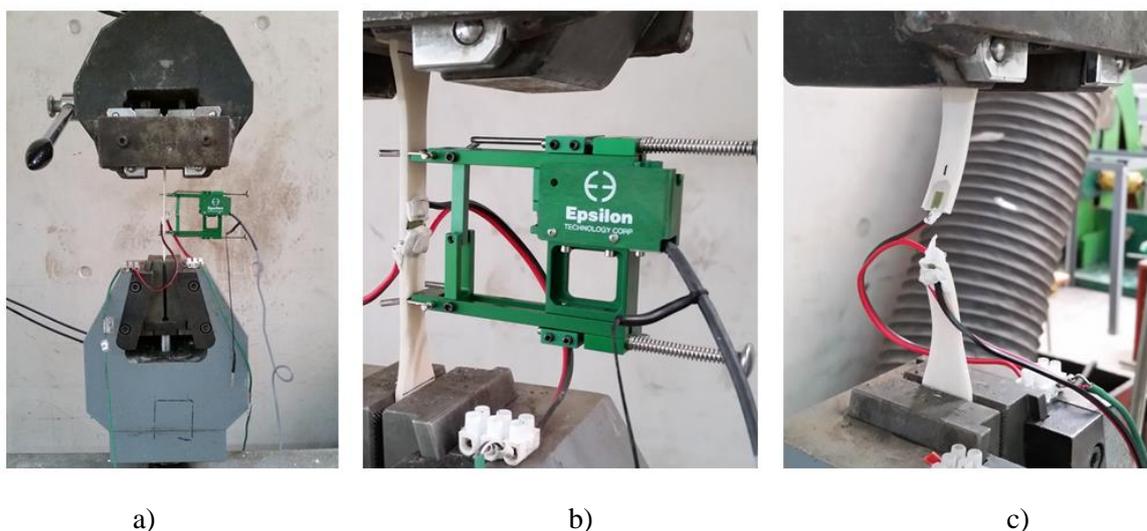


Figura 4.7 - Detalhes do ensaio de tração do adesivo; a) Máquina de ensaio; b) Extensómetro mecânico; c) Rotura do provete.

#### 4.3.1.2 Resultados

Dos ensaios realizados obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 4.8 e Figura 4.9, que representam as curvas tensão vs extensão dos três provetes ensaiados, sendo a Figura 4.8 relativos as extensão dos extensómetros eléctricos e a Figura 4.9 referentes as extensão obtidas através do extensómetro mecânico. Neste último é incluída uma curva com as propriedades do produto indicadas na ficha técnica da SIKA.

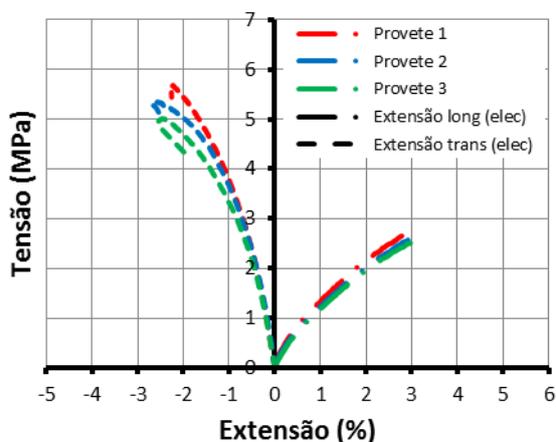


Figura 4.8 - Curvas tensão extensão obtida através dos extensómetros eléctricos.

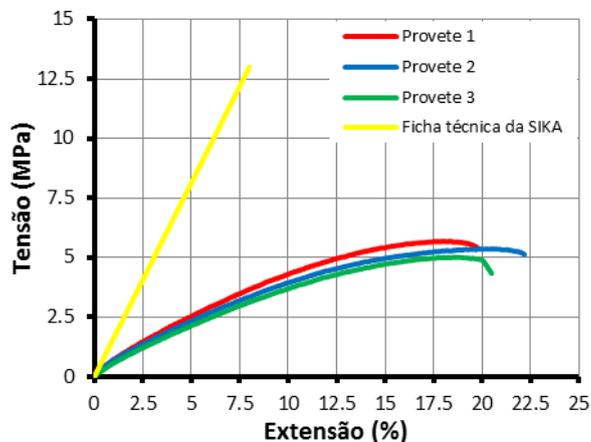


Figura 4.9 - Curvas tensão extensão obtida através do extensómetro mecânico.

Analisando os resultados, verifica-se a existência de alguma discrepância entre os resultados obtidos dos ensaios de tração com os fornecidos pelo fabricante. A tensão de rotura indicada na ficha técnica do fabricante (13 MPa) é muito superior a obtida nos ensaios de tração. No entanto os resultados dos extensómetros elétricos longitudinais mostram ter a mesma rigidez inicial da SIKA. Relativamente à extensão na rotura, os valores obtidos foram superiores nos ensaios realizados aos valores indicados na ficha do produto, evidenciando ganhos em termos de deformabilidade.

As diferenças registadas talvez possam ser justificadas com base no tempo de cura, uma vez que, as amostras ensaiadas pelo fabricante possuem um tempo de cura de 90 dias, tendo os provetes realizados para os ensaios de tração apenas 8 dias de cura. No entanto, verifica-se que os três provetes ensaiados apresentaram comportamentos bastante semelhantes. Conclui-se também que os parâmetros indicados no Quadro 4.1 possuem uma variabilidade pequena.

É de referir ainda que este material não possui uma zona linear, da qual possa servir para a obtenção do módulo de elasticidade. Assim, não se procedeu ao cálculo do módulo de elasticidade mas sim ao cálculo do módulo secante. Similarmente, para o coeficiente de Poisson, visto não existir uma zona linear na curva tensão-extensão, a sua determinação foi realizada de outro modo. De acordo com o exposto na cláusula A3.10.1.2 da norma ASTM D 638 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, o coeficiente de Poisson foi determinado através da variação da extensão transversal medida entre os valores de extensão longitudinal de 0.0005 até 0.0025.

Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de tração do adesivo (curva extensómetro mecânico).

Provete	Resistência à tracção (MPa)	Extensão na cedência (%)	Tensões na rotura (MPa)	Extensão na rotura (%)	Módulo Secante (MPa)	Coefficiente de Poisson
Provete 1	5.682	17.56	5.441	19.72	32.36	0.34
Provete 2	5.361	20.00	5.138	22.18	26.80	0.25
Provete 3	5.020	18.58	4.339	20.48	27.02	0.29
Média	5.354	18.71	4.973	20.79	28.73	0.29
Desvio Padrão	0.33	1.23	0.57	1.26	3.15	0.04

## 4.3.2 Ensaios do adesivo ao corte

### 4.3.2.1 Procedimento de ensaio

Este subcapítulo irá abordar os ensaios ao corte do adesivo. Para a definição deste ensaio foi considerado um layout baseado em ensaios de corte realizados no âmbito do projeto Innoglast. O objetivo deste ensaio consiste em determinar a resistência ao corte do adesivo, que combinada com as propriedades dos materiais obtidos pelos ensaios de tração uniaxial, irão permitir calibrar os modelos numéricos.

A geometria dos provetes foi definida tendo em conta o material disponível, ou seja, os elementos metálicos têm dimensões de 500 x 35 mm, sendo estes obtidos através das chapas metálicas usadas para os provetes de aço ensaiados à tração. O vidro tem dimensões de 300 x 150 mm e provém de uma viga de vidro de tamanho real (3000 x 300 mm), representando assim o contacto existente entre vidro e o aço existente na viga à escala real. A colagem dos dois elementos é feita através do produto Sikaforce 7710 L100 + 7010 com uma espessura de 1,5 mm. A Figura 4.10 mostra a geometria dos provetes ensaiados.

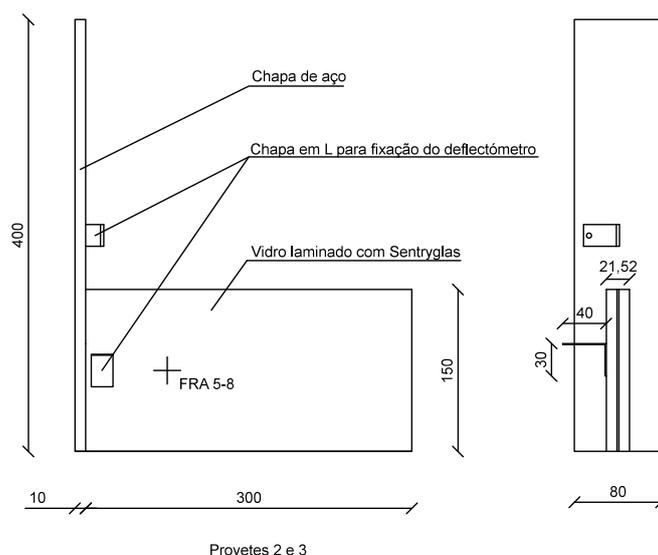


Figura 4.10 - a) Representação da geometria dos provetes.

No que diz respeito à instrumentação, esta é constituída por um deflectómetro e por um extensómetro do tipo roseta que tem como objetivo a medição das tensões na direção longitudinal, transversal e a 45° (Figura 4.11c) superior). O deflectómetro regista a deformação vertical, registando assim o escorregamento do aço com o vidro. Trata-se de um deflectómetro da marca TML de 25 mm de extensão (Figura 4.11b)).

Para a realização dos ensaios ao corte do adesivo, o equipamento usado foi a prensa de 60 toneladas (Figura 4.11a)), sendo que o layout consiste numa base fixa à parte inferior da máquina, que possui uma caixa que enclausura e fixa a parte de vidro do provete a essa mesma base, mantendo a parte de vidro imóvel, enquanto a garra superior da máquina puxa para cima a parte metálica do provete. A velocidade de carga usada nestes ensaios foi 1 mm/min (Abeln et al., 2013).

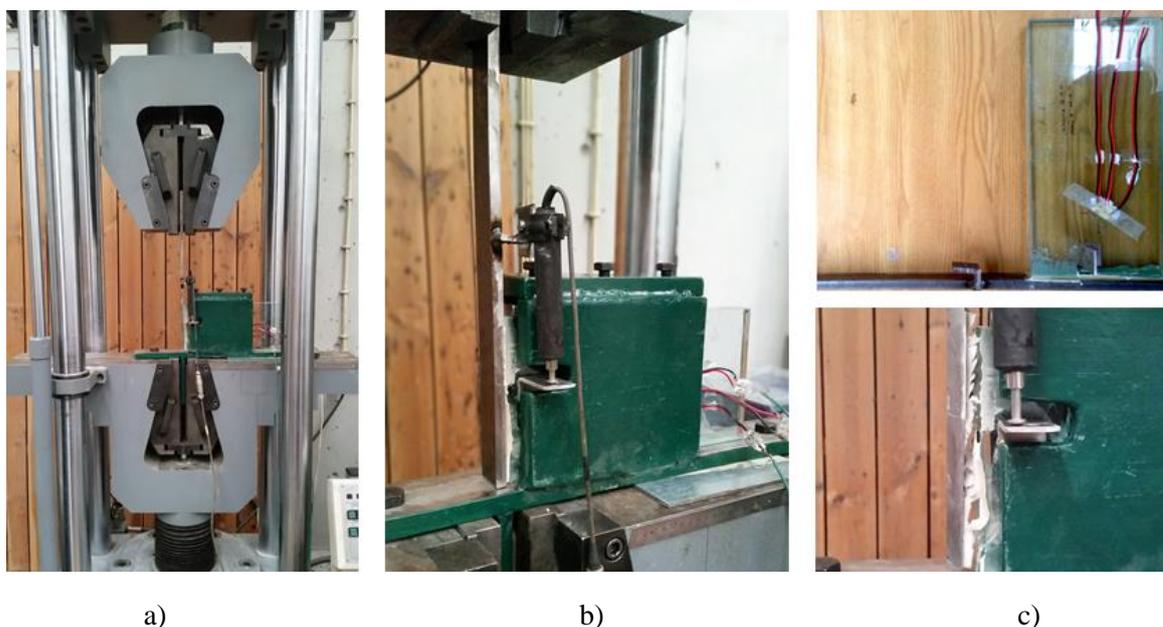


Figura 4.11 - Detalhes do ensaio de corte do adesivo; a) Máquina de ensaio; b) Deflectómetro; c) Sup. Extensómetro do tipo roseta; Inf. Rotura do provete.

#### 4.3.2.2 Resultados

A partir dos ensaios realizados, os quais foram descritos anteriormente, obtiveram-se os resultados das curvas força vs. deslocamento de cada provete de ensaio, os quais se encontram apresentados na figura seguinte (Figura 4.12).

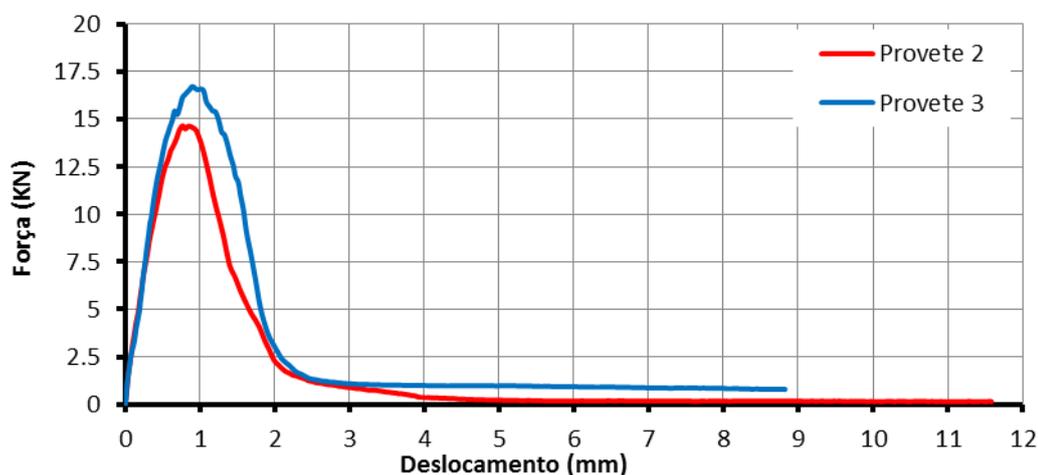


Figura 4.12 - Curva força vs deslocamento dos ensaios do adesivo ao corte.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se a existência de alguma diferença, nomeadamente ao nível da carga máxima. Essa diferença pode ser explicada pelo facto de existir resíduos de cola nas laterais dos provetes devido ao processo de colagem (faixas excedentes). De facto, o

processo de adesivagem dos provetes é complexo, sendo necessário recorrer ao uso de peças de esquadria que impedem a remoção das faixas excedentes durante o processo de cura.

A partir dos resultados do ensaio calculou-se a tensão tangencial, bem como as respectivas distorções. Para isso considerou-se uma distribuição de tensões constante no adesivo, sendo essa simplificação, já efetuada em estudos anteriores (Netusil, 2011). Assim, tendo a geometria da camada adesiva e sabendo a força aplicada ao longo do ensaio, é possível determinar a correspondente tensão tangencial. Da mesma forma, com base na medição do escorregamento entre os dois materiais foi possível achar a distorção, medida pelo ângulo  $\gamma$  e o módulo de corte do adesivo ( $G$ ).

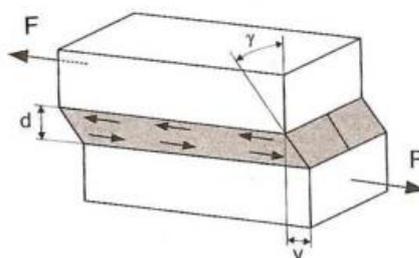


Figura 4.13 - Deformação do adesivo sujeito ao corte (adaptado de Netusil (2011))

$$\gamma = \arctan\left(\frac{v}{d}\right) \quad (1)$$

$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma} \quad (2)$$

Analisando os resultados da curva tensão-extensão de corte, representada na Figura 4.14, verifica-se que os dois provetes apresentaram comportamentos semelhantes. Para além disso, verifica-se que numa fase inicial da curva até atingir uma tensão tangencial de cerca de 2 MPa, os provetes revelam um comportamento linear. À medida que a tensão tangencial se aproxima do seu máximo (4,5 MPa e 5,5 MPa) existe uma perda de rigidez considerável, correspondente à perda de eficácia da ligação adesiva (deslocamento e roturas locais), sendo que, depois de atingir o ponto de tensão tangencial máxima existe uma queda repentina de rigidez.

Para além disso, determinou-se o valor do módulo de distorção correspondente à fase linear dos dois provetes, ou seja, para a tensão tangencial de 2 MPa, tendo-se chegado a um valor de aproximadamente 13 MPa, como se pode observar pela Figura 4.14.

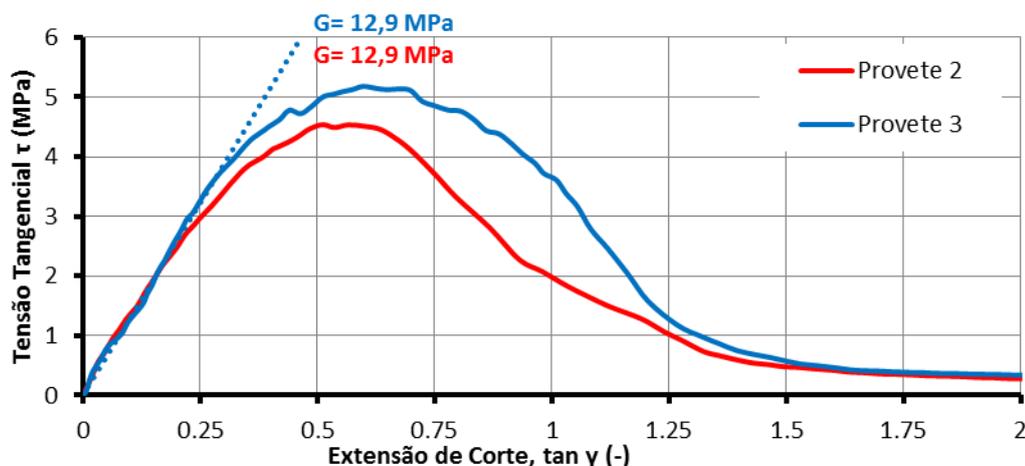


Figura 4.14 - Curva tensão tangencial vs extensão de corte do adesivo ao corte.

## 4.4 Ensaio de caracterização do vidro

### 4.4.1 Procedimento de ensaio

Neste subcapítulo irá determinar-se o comportamento do vidro através de ensaios à escala reduzida, os quais foram realizados no âmbito do projecto S-GLASS (Jordão, 2013). Este tipo de ensaios pode ser realizado em esquema de flexão em 4 pontos ou em esquema de anéis duplos concêntricos. No âmbito deste trabalho optou-se por ensaios de flexão em 4 pontos pois este fornece resultados mais próximos do que se verifica num modelo à escala real. Os ensaios seguiram o procedimento indicados pela norma EN 1288-3:2000 Glass in buildings – Determination of the bending strength of glass – Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending). Foram realizadas algumas alterações, que se prenderam com o equipamento disponível em laboratório. Os provetes ensaiados foram retirados de uma mesma placa de vidro recozido, correspondendo ao mesmo lote dos modelos à escala real, e têm o mesmo tipo de tratamento de aresta (biselada e polida). O corte e o tratamento de aresta foram realizados com equipamento industrial de precisão pelo fornecedor. A geometria dos provetes encontra-se definida no Anexo D – Caracterização das propriedades do vidro.

A instrumentação é constituída por um deflectómetro e por vários extensómetros elétricos. O deflectómetro da marca TML, tem capacidade de 10 mm e regista a deformação vertical a meio vão da secção do provete. Os extensómetros elétricos TML PFL6-11 são colocados a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  da largura do provete, tanto na face superior como na face inferior. No entanto, visto que a  $\frac{1}{2}$  da largura da face inferior é colocado o deflectómetro, este não foi instrumentado por um extensómetro elétrico. A Figura 4.15 e a Figura 4.16b) mostram a instrumentação utilizada para os ensaios bem como um dos provetes a ensaiar.



Figura 4.15 - Representação esquemática da instrumentação e provete instrumentado (Jordão, 2013).

Os ensaios de caracterização do vidro em testes de flexão em 4 pontos foram realizados através de uma prensa universal de 60 toneladas, representada na Figura 4.16a). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, a uma velocidade de 0.05mm/s, o que equivale a uma taxa de tensão de  $2 \text{ N/mm}^2$  por segundo. A norma, para este tipo de ensaios preconiza um valor de  $2 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$  por segundo. Na figura 4.16c) podem ainda ver-se os diferentes padrões de rotura dos provetes ensaiados.

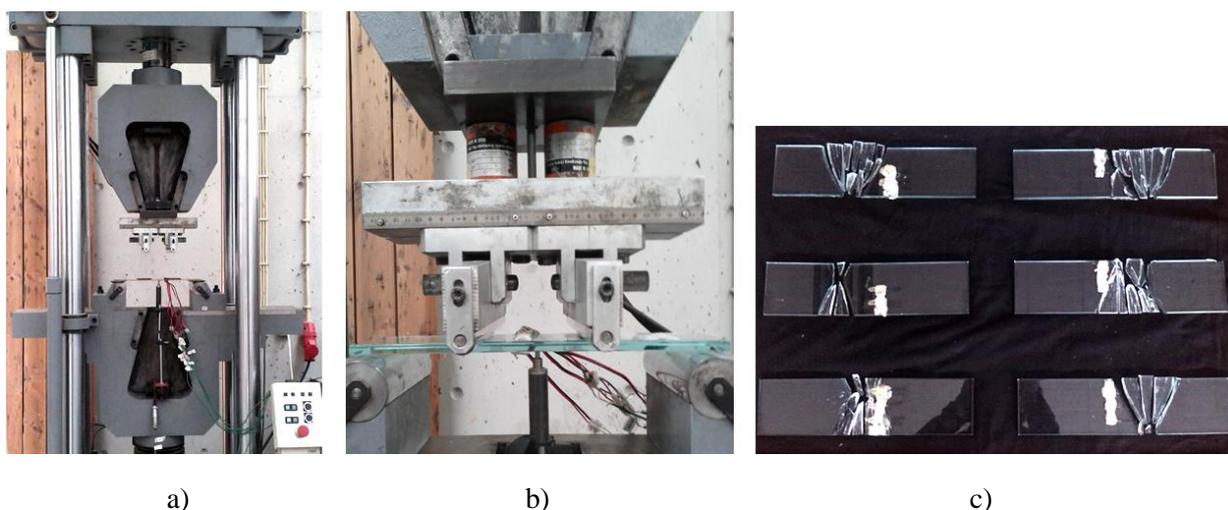


Figura 4.16 - Detalhes do ensaio de corte do vidro; a) Máquina de ensaio; b) Deflectómetro; c) Rotura dos provetes (Jordão, 2013).

#### 4.4.2 Resultados

A Figura 4.17 representa os resultados da curva força-deslocamento dos testes de flexão em 4 pontos dos provetes 4, 5 e 6. O Quadro 5.2 sistematiza os resultados obtidos. Os resultados do ensaio apresentados são a força máxima ( $F_{\text{máx}}$ ) atingida na rotura e a correspondente deformação vertical a meio vão ( $\delta_{\text{máx}}$ ), a média das leituras medidas em todos os extensómetros dos respetivos provetes ( $\epsilon_{\text{méd}}$ ).

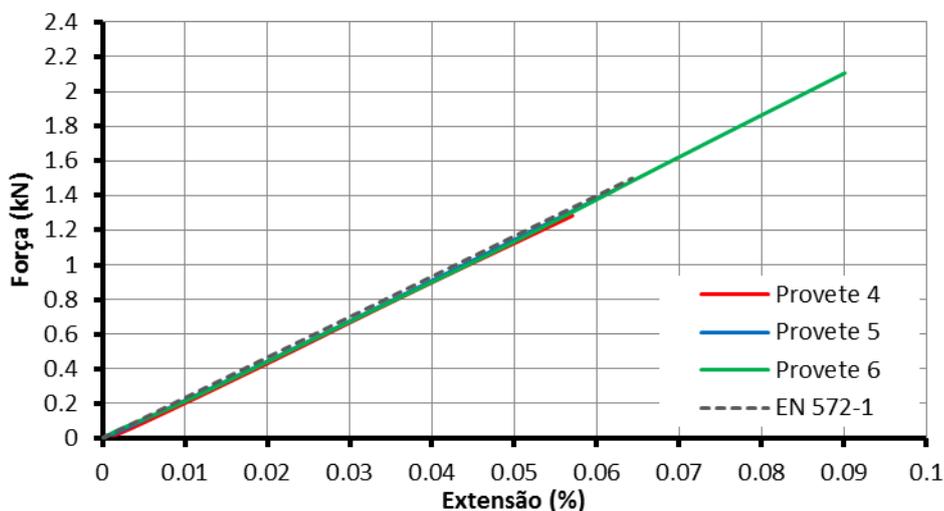


Figura 4.17 – Curva Força-Deslocamento dos provetes 4, 5 e 6 (adaptado de Jordão, 2013)

No quadro seguinte são ainda indicadas as tensões máximas e módulos de elasticidade calculados a partir da força máxima e da deformação vertical atingidas nos ensaios. O módulo de elasticidade foi obtido através da integração da linha elástica e da relação tensão-extensão (expressões (3) e (4), respetivamente).

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

$$E = \left( \frac{F_{m\acute{a}x} a}{2} \frac{e}{1} \frac{e}{2} \right) \times \frac{1}{\varepsilon} \quad (4)$$

Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios de caracterização monotónicos a 20° C (Jordão, 2013).

Provede	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	$\varepsilon_{m\acute{e}d}$ (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E (GPa)	
					Integração da linha elástica	Relação tensão extensão
Provede 4	1.284	1.13	0.057	38.1	64.7	66.9
Provede 5	1.431	1.24	0.062	42.5	65.7	68.4
Provede 6	2.107	1.80	0.090	62.6	66.6	69.5

Analisando os resultados obtidos conclui-se que, a tensão do vidro apresenta uma grande disparidade de valores, o que também é demonstrado em outros trabalhos. Este facto deve-se provavelmente a danos existentes na superfície do vidro. Quanto aos resultados do módulo de elasticidade, verifica-se que são sempre ligeiramente inferiores usando a integração da linha elástica e ambos são inferiores ao valor nominal, indicado na norma, de 70 GPa. Para esta amostra, e considerando os valores dados pela lei de Hooke, o valor médio é de 68,2 GPa e o desvio padrão é de 1,1 GPa.

## 4.5 Ensaios à escala real

### 4.5.1 Introdução

O objetivo da realização de ensaios à escala real reside na caracterização do comportamento da viga híbrida de vidro e aço. Pretende-se a compreensão do comportamento estrutural e a identificação dos parâmetros mais determinantes nesse mesmo comportamento estrutural. É de referir que, o presente documento pretende também avaliar as diferenças entre o comportamento estrutural de vigas híbridas de vidro e aço com vigas de vidro que foram ensaiadas no âmbito do projecto S-GLASS em curso na Universidade de Coimbra (Jordão, 2013). Pretende-se também que os ensaios forneçam valores para uma calibração rigorosa dos modelos numéricos.

### 4.5.2 Definição da secção transversal óptima

Recorrendo à formulação exposta no capítulo 3, nomeadamente ao método de Mohler, tentou-se de uma forma otimizada, definir a secção transversal da viga híbrida. Assim, de acordo com o método de Mohler, sabe-se que a rigidez à flexão está diretamente relacionada com o fator de efetividade ( $\gamma$ ), sendo esse fator, o que define o grau de conexão entre a alma de vidro e os banzos metálicos. Uma vez que existem inúmeras variáveis, sendo essas, a geometria dos vários constituintes da viga e a própria rigidez da ligação, é necessário definir alguns desses parâmetros para assim, ser possível definir os restantes. A viga de vidro laminado é o primeiro parâmetro a ser definido, pois as suas dimensões são iguais à viga de vidro ensaiada no âmbito do projecto S-GLASS. De seguida, optou-se por fazer duas análises distintas, sendo a primeira, manter como incógnita a espessura do adesivo e a segunda, definir como incógnita a secção transversal dos banzos.

- 1) Análise sobre a influência da espessura do adesivo.

De forma a estudar a influência do adesivo na definição da secção transversal foi necessário assumir uma geometria para os banzos. Assim considerou-se a geometria usada no ensaio experimental, ou seja, banzos com 100 mm de largura e 10 mm de espessura. Para calcular o fator de efetividade da ligação ( $\gamma$ ) é necessário conhecer as propriedades efetivas da ligação ( $k$ ) que, por sua vez, dependem da rigidez da própria ligação ( $K$ ). Considerando o valor do módulo de distorção 13 MPa, obtido nos ensaios de corte à escala reduzida, é possível obter uma expressão que relaciona diretamente o fator de efetividade da ligação com a espessura do adesivo (expressão (5)).

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_S * A_S}{I^2 * G * \frac{b}{d}}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 210000 * (100 * 10)}{2900^2 * 13 * \frac{21,52}{d}}} \Leftrightarrow d = \frac{1,13465}{\gamma} - 1,13465 \quad (5)$$

## 2) Análise sobre a influência da seção transversal dos banzos.

Nesta segunda análise, foi-se analisar a influência das dimensões dos banzos sendo para isso assumir uma espessura do adesivo. Tal como efetuado para a análise anterior, assumiu-se a espessura do segundo ensaio realizado, sendo a espessura da cola de 1,5 mm e o módulo de distorção de 13 MPa, obtido através dos ensaios de corte à escala reduzida. Assim é possível relacionar a área de aço dos banzos com o fator de efetividade da ligação (expressão (6)).

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_s * A_s}{l^2 * G * \frac{b}{d}}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 210000 * (100 * 10)}{2900^2 * 13 * \frac{21,52}{d}}} \Leftrightarrow d = \frac{1,13465}{\gamma} - 1,13465 \quad (6)$$

O quadro 4.3 resume os resultados obtidos para a análise da influência da espessura do adesivo bem como a influência das dimensões dos banzos com o aumento do fator de efetividade.

Quadro 4.3 - Resultado da análise para a definição da seção transversal.

Fator de efetividade ( $\gamma$ )	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Espessura do adesivo (d)	-	10,2	4,5	2,7	1,7	1,1	0,8	0,5	0,3	0,1	0
Área dos banzos (mm <sup>2</sup> )	-	6811	3027	1766	1135	757	505	324	189	84	0

Analisando os resultados obtidos, verifica-se a importância do adesivo na resposta estrutural da viga híbrida. Este, com base nas suas propriedades e na sua geometria vai influenciar significativamente a resposta global do compósito garantindo, com maior ou menor eficácia, a assemblagem dos dois materiais e um maior ou menor aproveitamento de todos os materiais envolvidos.

### 4.5.3 Layout experimental e da geometria da viga

O sistema de ensaio, como se pode observar na Figura 4.18, apoia-se num sistema externo constituído por um pórtico de grande rigidez e dois blocos de betão que são unidos entre si através de vigas rígidas. Este sistema é bastante robusto, pois uma vez que as deformações alcançadas pelas vigas em estudo são muito reduzidas, é necessário que todo o sistema seja o mais indeformável possível.

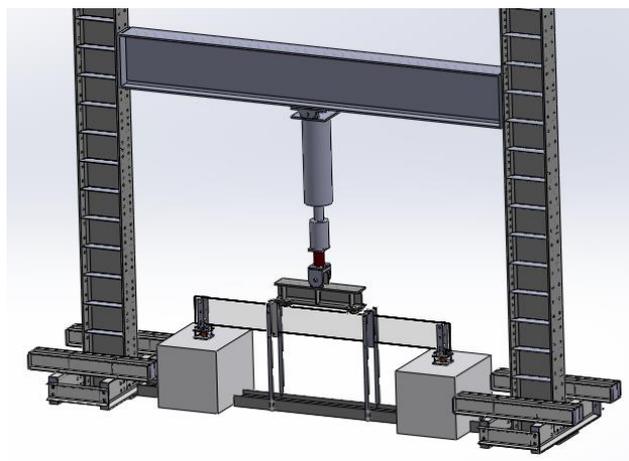


Figura 4.18 - Layout de ensaios (Jordão, 2013).

O contraventamento das vigas ensaiadas é feito em quatro seções: nos apoios e nas proximidades da aplicação da carga (Figura 4.19a) e 4.19c)). Este sistema é executado através de perfis tubulares fixos na viga de lintel, que fica por baixo da viga, entre os blocos de betão. A ligação ao vidro é feita através de um sistema de parafusos sem fim capeados com círculos de nylon (Figura 4.19b)). Este sistema de contraventamento, para além de ser reutilizável, permite uma fácil afinação e uma rápida montagem e desmontagem.

Os apoios são constituídos por roletes de aço, munidos de placas de alumínio (AW5454-H24), para minimizar os efeitos associados às altas pressões de contacto que podem conduzir ao esmagamento e à iniciação de fendas. Foi escolhido o alumínio para esta utilização, em detrimento da borracha de alta densidade devido à sua elevada capacidade de deformação que dificultaria a correta avaliação da deformabilidade da viga. É de referir ainda que, os apoios foram equipados com células de carga, marca TML de 5 toneladas, para a avaliação rigorosa das reações dos apoios.

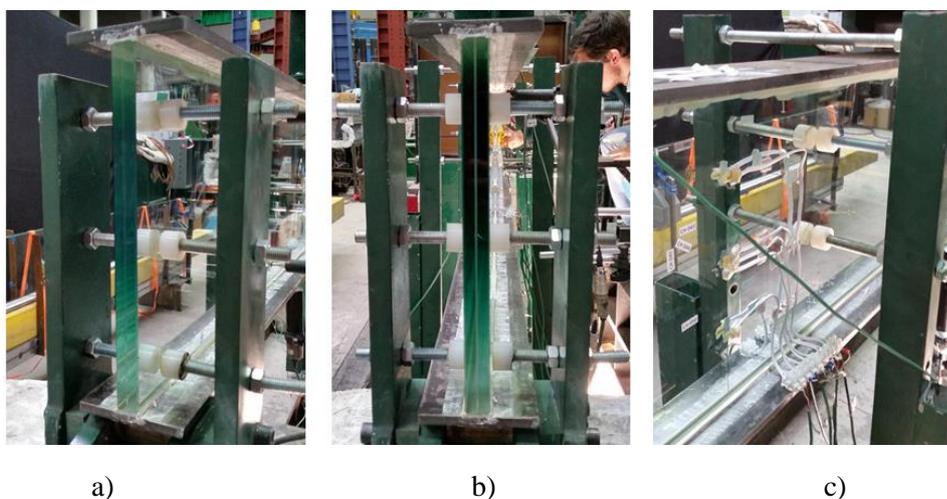


Figura 4.19 - Pormenores do apoio e do sistema de contraventamento.

O carregamento é aplicado através de um atuador hidráulico, Dartec/Servosis de 20 toneladas com curso de 200 mm. Sob o atuador instalou-se uma célula de carga da marca TML de 20 toneladas para avaliar de forma rigorosa a carga transmitida à viga. Acoplado ao actuador encontra-se um carro de carga, rotulado na direção ortogonal à viga (Figura 4.20). Os seus pontos de contacto com a viga são realizados por roletes equipados com pequenas chapas de alumínio.

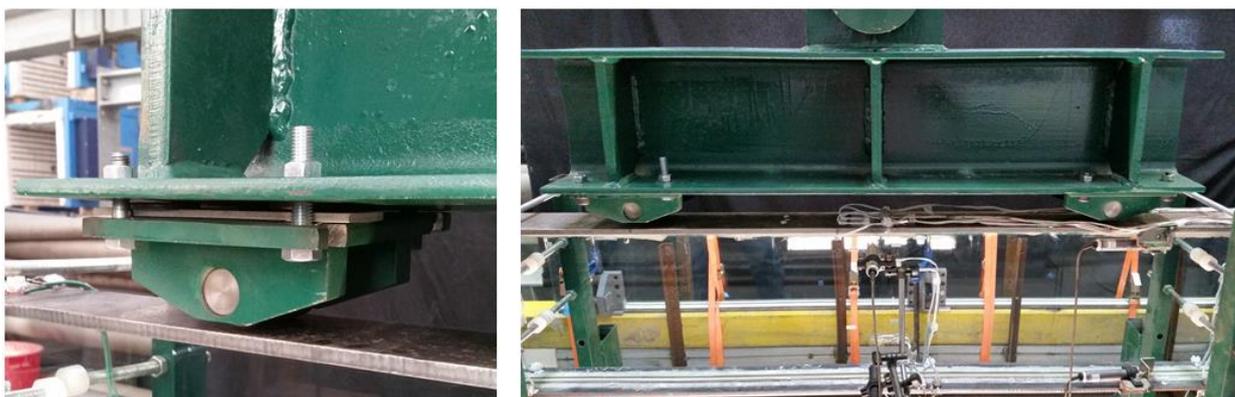


Figura 4.20 - Pormenor do carro de carga.

A viga híbrida em estudo é constituída por uma secção com geometria em “I” que é composta por uma alma de duas camadas de vidro recozido de 10 mm cada, unidas por uma película de SentryGlas<sup>®</sup> Plus (SGP) com 1,52 mm, e banzos em aço de 10 mm de espessura em cada extremidade do vidro (Figura 4.21). Os provetes têm aresta biselada e polida após laminagem com perfeito nivelamento entre vidros. O sistema de referência referido anteriormente (estudado no âmbito do projecto S-GLASS) apresenta a mesma geometria, sendo apenas constituída pelas duas camadas de vidro recozido e pela película de SentryGlas<sup>®</sup> Plus (SGP), como anteriormente referido.

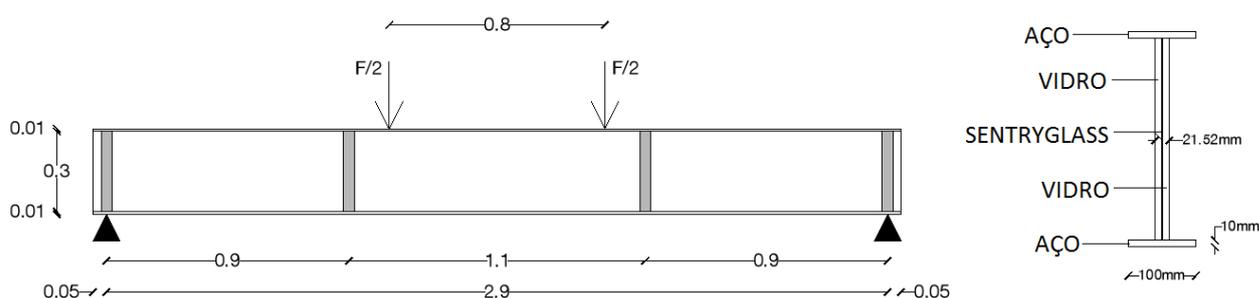


Figura 4.21 - Geometria da viga híbrida de vidro e aço em estudo.

#### 4.5.4 Método de colagem

Na montagem do sistema híbrido e devido à grande esbelteza dos elementos envolvidos na colagem da mesma, desenvolveu-se um sistema para a colagem dos banzos metálicos à alma

de vidro. Este sistema (Figura 4.23) tem como finalidade facilitar e garantir a perpendicularidade desses dois elementos.

Este sistema consiste numa base rígida nivelada, garantida por um perfil tubular quadrado de grande rigidez (elemento amarelo), onde inicialmente será apoiado o banzo inferior. Na 1ª fase, a cola é aplicada na superfície pretendida e o vidro é colocado na sua posição, a qual é assegurada por contraventamentos laterais ajustáveis e por 3 peças de esquadria (Figura 4.22a)). É de referir que, para impedir a descolagem dos elementos são colocados grampos em posições simétricas com iguais forças de aperto, ver Figura 4.22b) e 4.22c). A cola usada para montagem do sistema híbrido é o adesivo da marca SikaForce® 7710 L100, cuja espessura ideal de aplicação é de 0,1 mm.

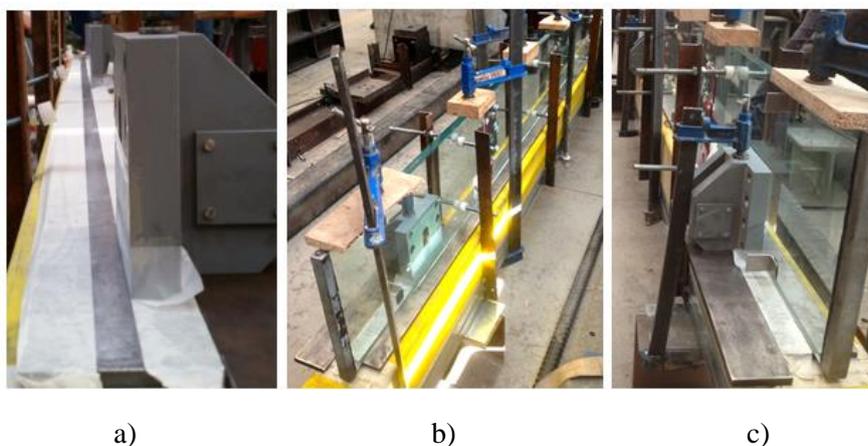


Figura 4.22 - Sistema de colagem da viga híbrida (1ª viga).

Na 2ª fase, e apenas após o adesivo ter ganho presa, é retirado o vidro e o banzo colado, e realiza-se o mesmo processo da 1ª fase na face oposta do vidro. Este processo encontra-se representado na Figura 4.23.

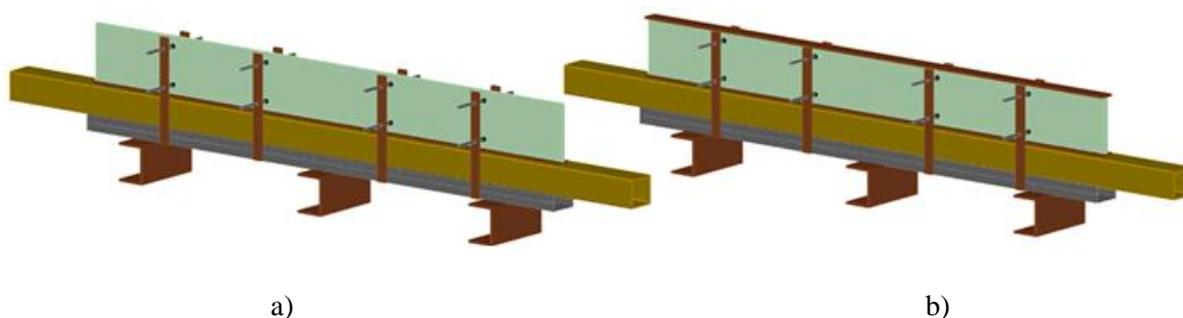


Figura 4.23 - Sistema de colagem da viga híbrida - a) fim da 1ª fase; b) fim da 2ª fase.

O sistema de montagem sofreu no entanto alguns aperfeiçoamentos pois, após a colagem da primeira viga híbrida, com 0,1 mm de espessura do adesivo, chegou-se a conclusão que devido às imperfeições da chapa de vidro, a reduzida espessura usada na montagem da

primeira viga não garantia uma correta ligação entre os banzos metálicos e a alma de vidro. Por este motivo, após se ter consultado o fabricante, decidiu-se aumentar a espessura da ligação para 1,5 mm. Assim, na montagem da segunda viga, optou-se pela utilização de uma fita adesiva “mounting tape” com 1,5 mm de espessura para delimitar a zona de colagem (Figura 4.24b)). Para além disso, optou-se igualmente pela utilização de espaçadores que foram fabricados usando a cola SikaForce® 7710 L100 com 1,5 mm de espessura, os quais foram distribuídos de igual forma ao longo da zona de colagem (Figura 4.24a)). Outro aperfeiçoamento efetuado para a optimização do sistema de colagem foi a substituição dos grampos metálicos por cintas evitando assim a existência de excentricidades devido ao posicionamento dos grampos (Figura 4.24c)).

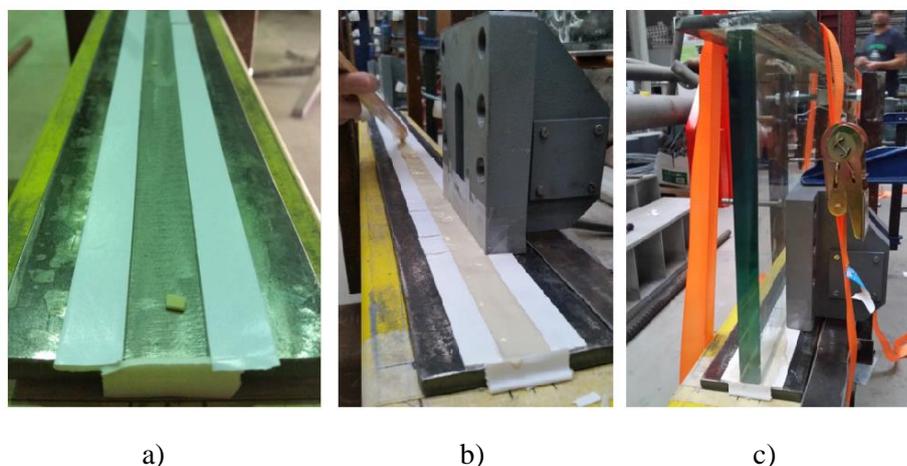


Figura 4.24 - Sistema de colagem da viga híbrida (2ª viga).

#### 4.5.5 Instrumentação e estratégia de carga

A instrumentação das vigas híbridas em estudo no presente documento, como da viga desenvolvida no âmbito do projecto S-GLASS, foi feita através de extensómetros em ambas as faces do vidro a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  do comprimento da viga e deflectómetros na face frontal e na face traseira. O objetivo desta instrumentação reside numa caracterização do estado de tensões existente ao longo da viga, avaliar a migração da posição do eixo neutro, avaliar a simetria do carregamento, a deformação fora do plano da estrutura e recolher informação para uma calibração rigorosa dos modelos numéricos. Para além disso, na viga híbrida, optou-se pela colocação de deflectómetros no sentido longitudinal à viga, com vista à medição do escorregamento dos banzos sobre a alma em vidro da mesma.

Os deflectómetros aplicados nas posições indicadas com a referência “U2” servem para medir as deformações verticais e têm 100 mm de curso. Os deflectómetros com a referência “U3” servem para medir as deformações horizontais provenientes de instabilidades por flexão e têm 10 mm de curso. Por fim, os deflectómetros com a referência “U1” servem para medir as

deformações longitudinais à viga provenientes do escorregamento entre os banzos em aço e a alma de vidro e têm igualmente 10 mm de curso. Todos os deflectómetros são da marca TML. A representação da posição dos deflectómetros encontra-se ilustrada na Figura 4.25.

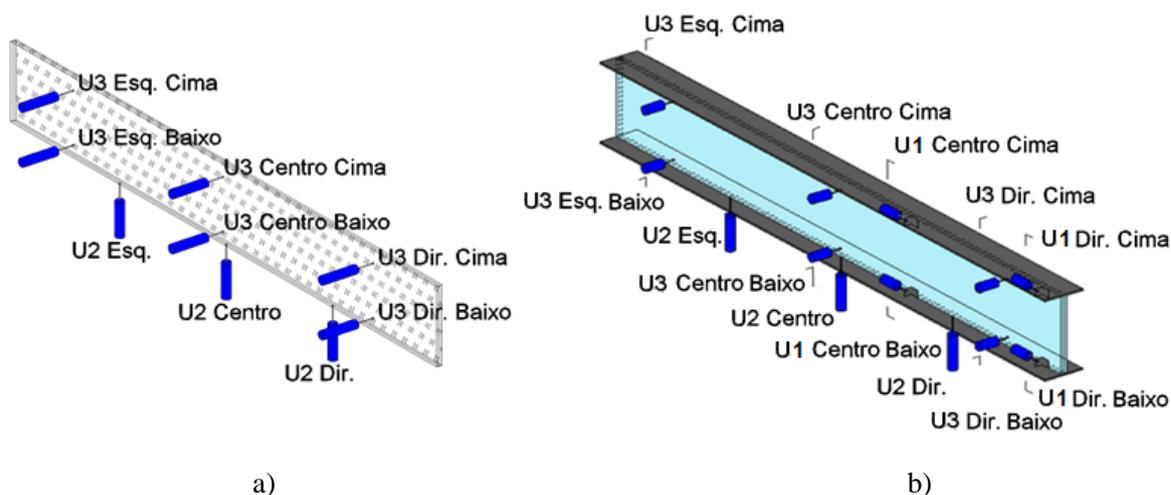


Figura 4.25 - Localização dos deflectómetros; a) Viga de vidro; b) Viga híbrida vidro-aço.

Os extensómetros elétricos, como anteriormente referido, foram colocados em ambas as faces da viga de vidro, na direcção longitudinal da mesma. No entanto, os extensómetros com designação “1B” e “3B” são rosetas e têm como objetivo a medição das tensões na direcção longitudinal, transversal e a 45°. No caso das vigas híbridas optou-se pela colocação de extensómetros igualmente a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  do comprimento dos banzos. Os extensómetros unidireccionais são do tipo FLA 6-11 e os multidireccionais (rosetas) são do tipo FRA 5-11. De seguida, encontra-se representada na Figura 4.26 a localização dos extensómetros.

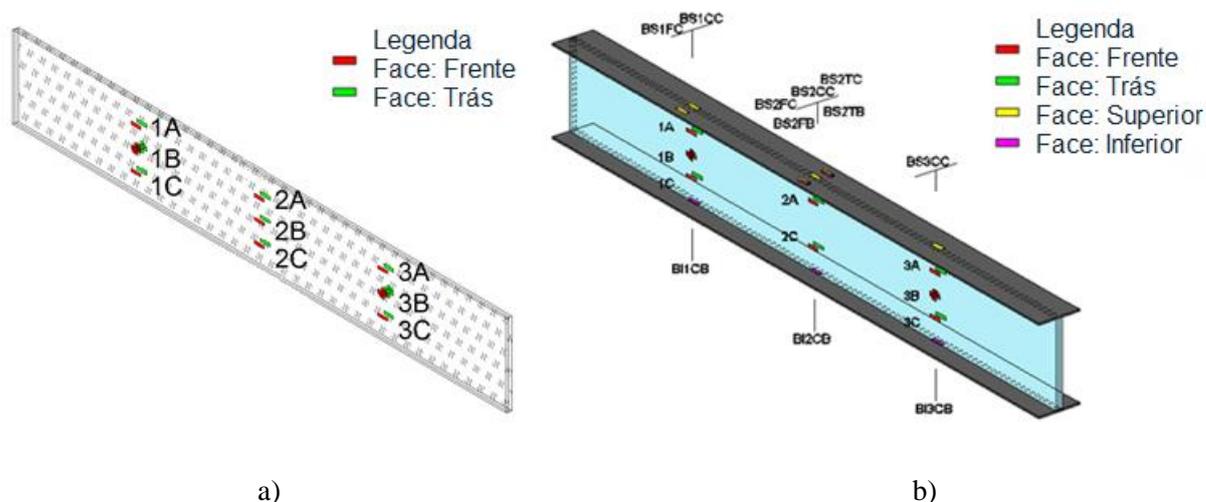


Figura 4.26 - Localização dos extensómetros; a) Viga de vidro; b) Viga híbrida vidro-aço.

A instrumentação encontra-se definida com pormenorização no Anexo E – Instrumentação dos ensaios à escala real. A estratégia de carga usada no ensaio adopta um controlo de deslocamento a uma velocidade de 0.05 mm/seg., até ao completo esgotamento da capacidade resistente da viga em flexão.

#### 4.5.6 Ensaio do sistema de referência

##### 4.5.6.1 Resultados

A viga de vidro laminado ensaiada no âmbito do projecto S-GLASS sofreu uma fratura no tramo central, próximo do seu centro, para uma carga de aproximadamente 14 kN, o que corresponde a uma tensão máxima no vidro de 24,5 MPa. É de referir que, este valor fica abaixo do valor nominal para vidro recozido (45 MPa), no entanto, a dispersão de resultados, no caso de elementos de vidro, é significativa pois depende da distribuição de micro fendas superficiais existentes neste tipo de material. Além disso, visto que se trata de uma peça de dimensões apreciáveis, a probabilidade de existência de um micro dano é maior.

A Figura 4.27 e a Figura 4.28 ilustram respectivamente a evolução da relação deslocamento vertical a  $\frac{1}{2}$  vão com a força aplicada ao longo do ensaio e a evolução do padrão de fratura.

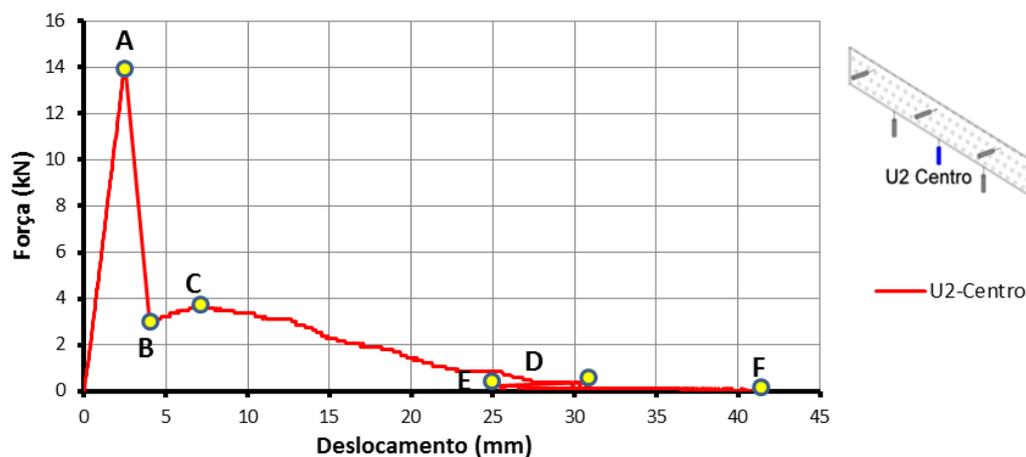


Figura 4.27 - Relação do deslocamento vertical a meio vão com a força aplicada (adaptado de Jordão, 2013).

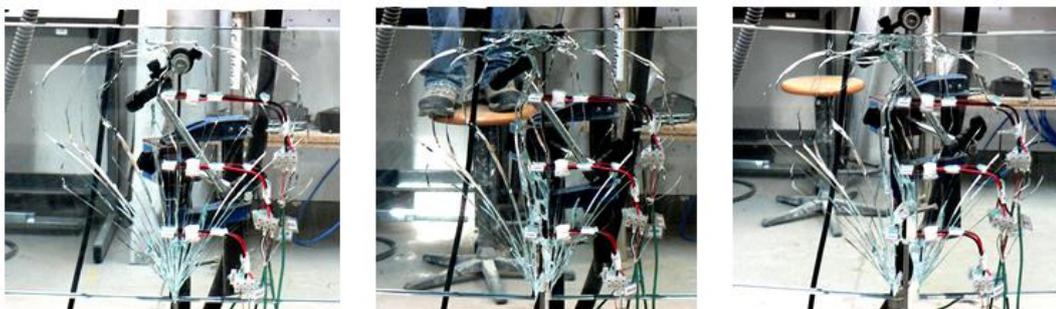


Figura 4.28 - Evolução da fratura na seção a meio vão da viga de vidro (Jordão, 2013).

Como se pode observar, o padrão de fratura inicial tem a tradicional forma em diamante, radiando de uma posição única na zona de momento flector máximo, claramente uma rotura em tração por flexão. Depois da viga fraturar verifica-se uma drástica redução da resistência da estrutura (troço AB), em que a carga na zona da fratura passa a ser resistida num esquema estrutural diferente do verificado antes da fratura. Ainda assim, esse esquema estrutural permite ainda algum ganho de resistência (troço BC), o qual se deve a: (i) na zona traccionada, a força de tração é agora resistida exclusivamente pela película de laminação; (ii) na zona de compressão existem duas zonas distintas: a zona também fraturada, onde a força de compressão é resistida maioritariamente pelo arco estrutural criado pelas partículas fraturadas e a zona ainda não fendilhada, funcionando no esquema laminado inicial. Quando se verifica a rotura da zona ainda intacta na parte superior da secção (Ponto C), a resistência vai diminuindo até que a película de laminação rompe (troço DE), fazendo aumentar significativamente o nível de tensão de compressão no topo da seção, o que leva ao esmagamento do vidro nesse local e ao completo esgotamento da capacidade resistente da viga (Ponto F).

O gráfico seguinte (Figura 4.29) representa o reflexo da evolução do comportamento da estrutura com o aumento de carga, referido no parágrafo anterior, mas em termos de extensão em dois locais da estrutura. Verifica-se que, para um extensómetro fora da zona de fratura, há uma descarga elástica idêntica à carga. Se o extensómetro estiver localizado na zona de fratura a descarga é também uma reta, mas com inclinação diferente da carga, na medida em que, as características resistentes da seção, em que se encontra colado, se alteraram.

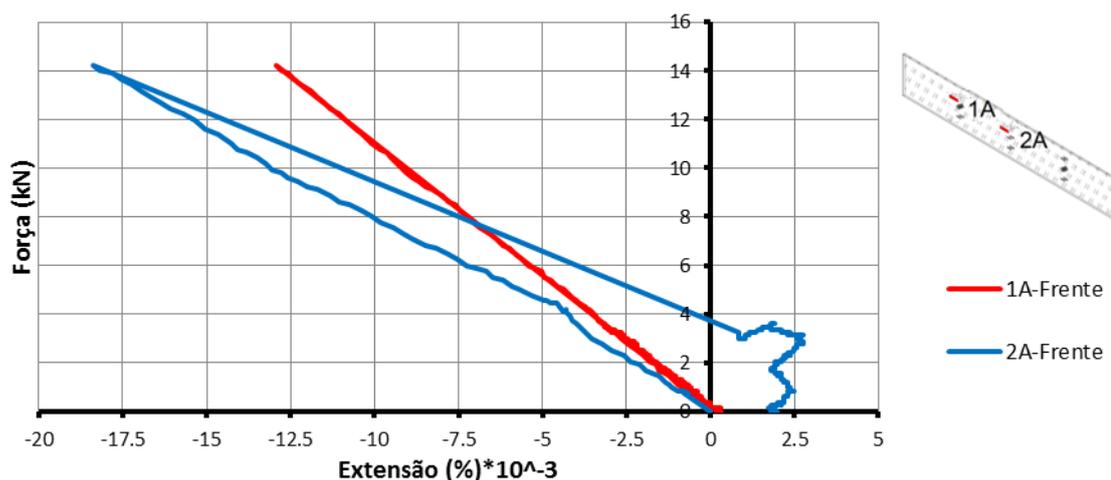


Figura 4.29 - Extensão junto a zona de fratura e afastado da mesma (adaptado de Jordão, 2013).

Para a carga última a deformação global da viga é muito significativa, como se pode avaliar através da Figura 4.30.

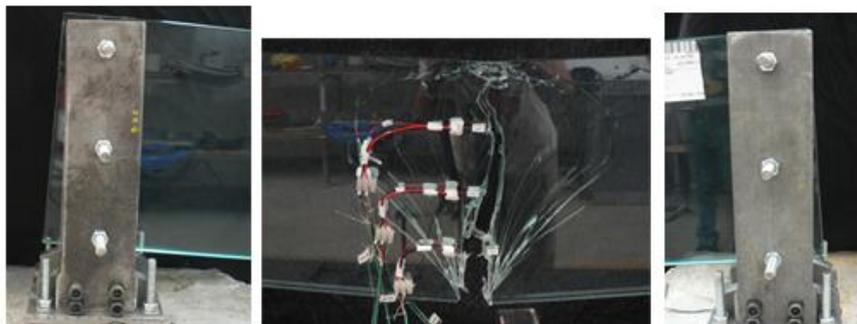


Figura 4.30 - Deformação final da viga ao nível dos apoios e da seção de meio vão (Jordão, 2013).

A Figura 4.31 mostra os resultados experimentais de força vs. extensão para o agrupamento P1, sendo os restantes resultados relativos aos extensómetros longitudinais representados no Anexo F– Resultados experimentais do sistema de referência. Os gráficos são truncados no valor da carga de rotura. Em cada gráfico é representada também a respectiva curva analítica, calculada com um módulo de elasticidade de 70 GPa.

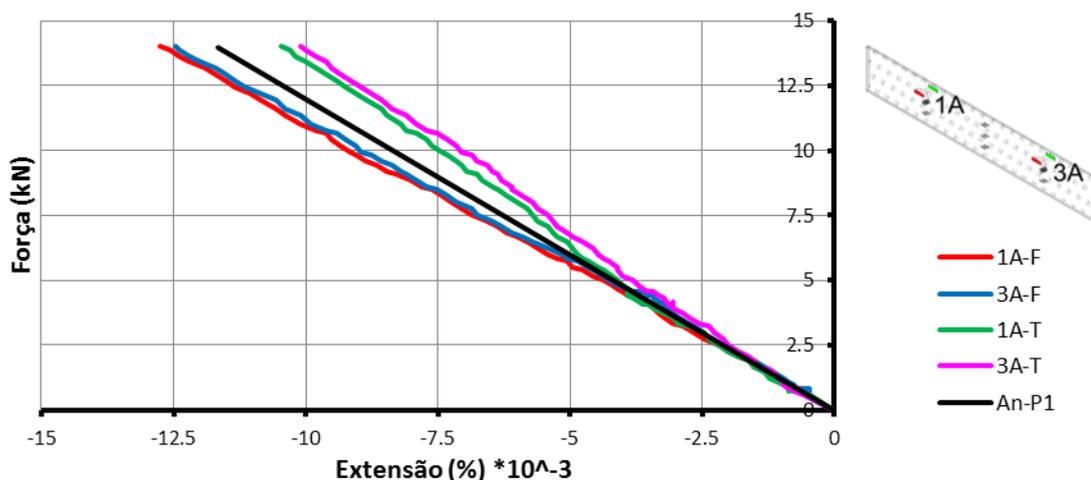


Figura 4.31 -Extensão para o Agrupamento P1.

Os resultados da Figura 4.31 mostram uma semelhança assinalável entre os resultados dos extensómetros com os alinhamentos 1 e 3, em ambas as faces da alma, comprovando a simetria de esforços. Este aspeto reveste-se de grande importância, na medida em que se podem verificar desalinhamentos do sistema de ensaio que conduzam a uma distribuição assimétrica do carregamento, comprometendo os resultados. Pode verificar-se também que os resultados de posições homólogas na face anterior e posterior não são completamente coincidentes, ainda que aproximadamente simétricos em relação à reta analítica obtida através da lei de Hooke.

A figura 4.32 mostra o deslocamento a meio da viga em função do carregamento com a indicação de alguns níveis de carregamento considerados.

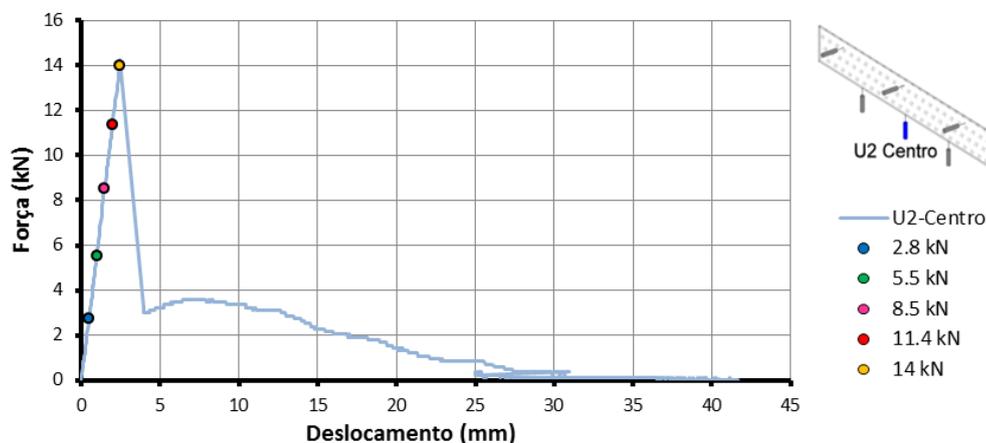


Figura 4.32 - Deslocamento vertical a meio vão e níveis de carregamentos considerados.

Para os níveis de carregamento assinalados na Figura 4.32, a Figura 4.33 representa a variação da extensão na direção vertical na altura da viga e a Figura 4.34 a variação da extensão na direção vertical com a força aplicada, nos locais assinalados na figura. A análise da Figura 4.33 permite concluir que o eixo neutro não passa a meia altura da seção. A Figura 4.34 mostra que as tensões na direção vertical perpendicular ao eixo da peça são muito reduzidas mas não são nulas. Todos os resultados obtidos neste ensaio, incluindo as extensões diagonais encontram-se no Anexo F–Resultados experimentais do sistema de referência.

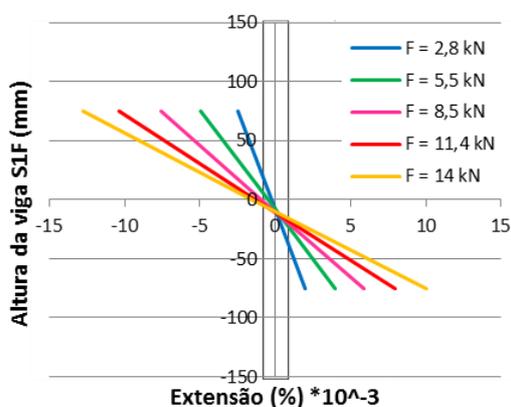


Figura 4.33 - Secção 1 frente.

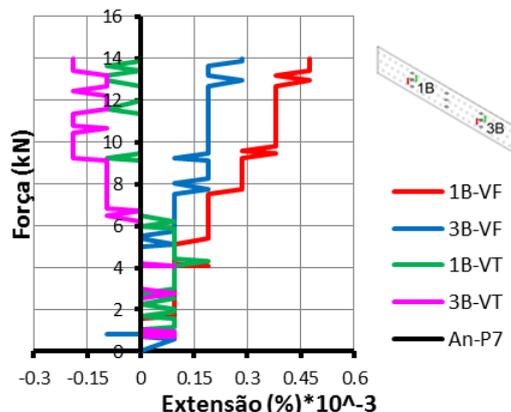


Figura 4.34 -Extensão para o Agrupamento P7.

A observação dos resultados indicam que existe alguma flexão fora do plano da estrutura, que pode dever-se ao posicionamento inicial do layout de ensaio. De facto, se a viga não estiver completamente vertical, ou se o carro de carga estiver ligeiramente descentrado ou ainda se o carro de carga não estiver completamente alinhado com os apoios, haverá flexão fora do plano desde o momento inicial de carregamento. Outra possibilidade, dada a esbelteza da viga, consiste em instabilidade por divergência. No entanto, essa possibilidade será de excluir na medida em que nas três secções se verifica compressão ao nível do eixo neutro em ambos os lados da alma. Se se tratasse de deformação associada a instabilidade, a deformação em onda

teria concavidades opostas entre pontos de contraventamento, pelo que as extensões seriam alternadamente positivas e negativas nas secções 1, 2 e 3.

Os gráficos das figuras seguintes mostram os resultados dos deflectómetros verticais e a sua comparação com os respetivos valores analíticos. Pode verificar-se um ligeiro desajustamento entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos analiticamente, ao contrário do que sucede com os valores dos extensómetros.

As hipóteses para esse desajuste são a eventual deformabilidade dos elementos de alumínio nos apoios ou o gradual ajuste de folgas nos aparelhos de apoio. Poderá também dever-se a erros na medição, mas a simetria das leituras dos defletómetros simétricos (U2 Esq e U2 Dir) (Figura 4.36) parecem apontar em sentido contrário. No caso de se tratar de um deslocamento de corpo rígido, associado às folgas dos apoios, o seu valor será constante ao longo da viga, e pode ser determinado pela diferença entre os valores experimentais e os valores analíticos (Figura 4.37). Essa diferença permitirá corrigir os valores experimentais (Figura 4.38 e 4.39).

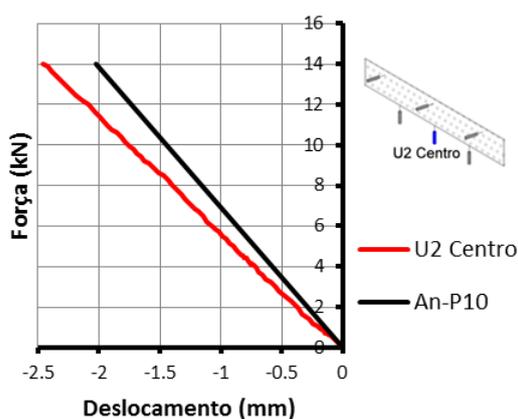


Figura 4.35 - Deslocamento para o Agrupamento P10.

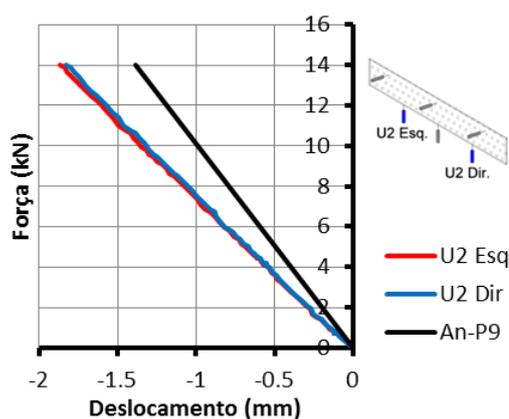


Figura 4.36 - Deslocamento para o Agrupamento P9.

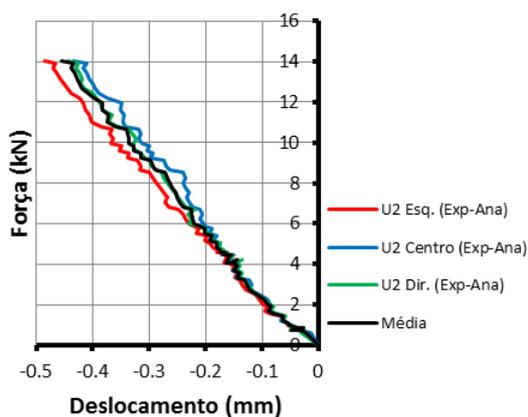


Figura 4.37 - Resultados experimentais vs analíticos para os deflectómetros verticais e sua média.

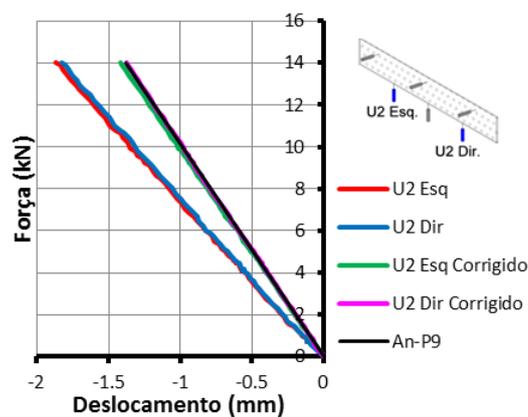


Figura 4.38 - Correção das leituras dos deflectómetros verticais U2 Esq e U2 Dir.

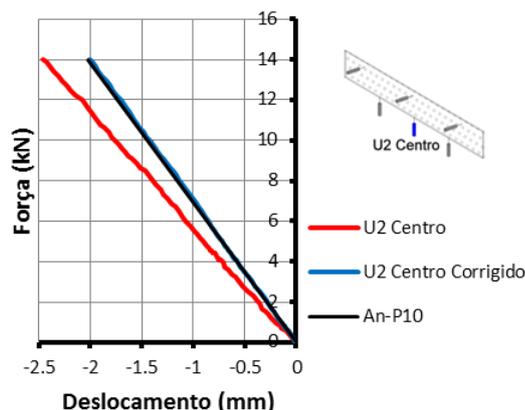


Figura 4.39 – Correção das leituras do defletómetro vertical U2 Centro.

Os resultados dos gráficos das Figuras 4.40 e 4.41 confirmam a deformação fora do plano da estrutura, através dos defletómetros colocados para esse efeito, e mostram também que essa deformação varia ao longo do ensaio. A partir de uma carga de 4,5 kN a deformação da viga fora do plano muda de concavidade. Este facto deve-se seguramente a ajustes do sistema durante o ensaio. Este efeito poderá ser corrigido ou minimizado através de um alinhamento mais rigoroso dos elementos do layout, nomeadamente garantindo que a viga está perfeitamente vertical e os pontos de apoio perfeitamente alinhados antes de começar o ensaio.

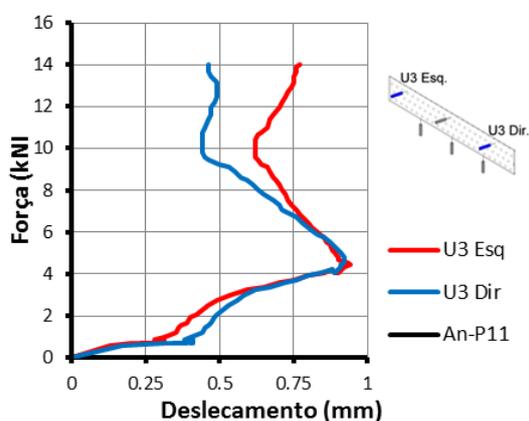


Figura 4.40 -Deslocamento para o Agrupamento P11.

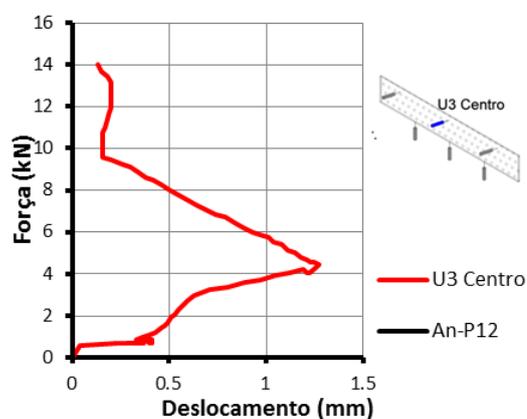


Figura 4.41 -Deslocamento para o Agrupamento P12.

## 4.5.7 Ensaio do sistema híbrido

### 4.5.7.1 Introdução

Os ensaios à escala real da viga híbrida representam o estudo principal deste documento, sendo que, como anteriormente referido, se pretende realizar uma comparação com o sistema de referência estudado no âmbito do projecto S-GLASS anteriormente descrito. Neste subcapítulo encontram-se abordados todos os pormenores da realização dos ensaios, ou seja, o

sistema de colagem dos banzos à viga de vidro e o ensaio propriamente dito. O ensaio realizado para testar as vigas híbridas é de flexão em 4 pontos e segue as mesmas definições dos ensaios monotônicos do projecto S-GLASS.

#### 4.5.7.2 Resultados da Viga 1

A viga híbrida VH1 em estudo, com 0,1 mm de espessura, sofreu fissuração próximo do meio vão da viga e da zona de introdução de carga para uma carga de aproximadamente 46 kN. No entanto, observando a Figura 4.42 observa-se que a viga ainda foi capaz de suportar carga adicional, atingindo uma carga de rotura de 81 kN. Assim, a viga sofreu um aumento pós-fissuração de aproximadamente 176%, devido à colocação dos banzos metálicos. Para compreender a influência da aplicação dos banzos metálicos na capacidade de suporte de carga é de referir que, para a mesma geometria a viga de vidro ensaiada no âmbito do projecto S-GLASS, a qual serve de sistema de referência para a viga híbrida em estudo atingiu uma carga de rotura de 14 kN.

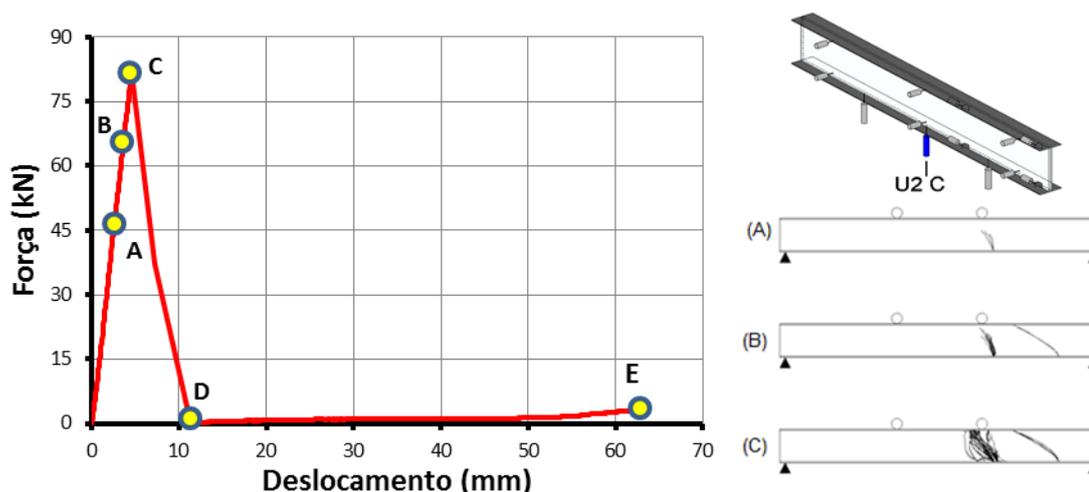


Figura 4.42 - Deslocamento vertical a meio vão e evolução do padrão de fratura.

A Figura 4.43 ilustra a viga após a sua rotura. Analisando com mais pormenor os resultados obtidos na Figura 4.42, verifica-se que depois de se formar a primeira fenda, a viga ainda foi capaz de suportar carga (troço AB). No instante B verifica-se uma nova formação de fenda, no entanto ainda se verifica um aumento da capacidade de carga até que a viga entre em rotura (troço BC). Posteriormente à fratura da viga híbrida verifica-se uma drástica redução da resistência da estrutura (troço CD), em que a viga sofre uma completa diminuição de resistência, deixando de ser capaz de suportar carga. O troço DE mostra que a viga ainda teve algum ganho de resistência após rotura, no entanto esse aumento de resistência é desprezável.

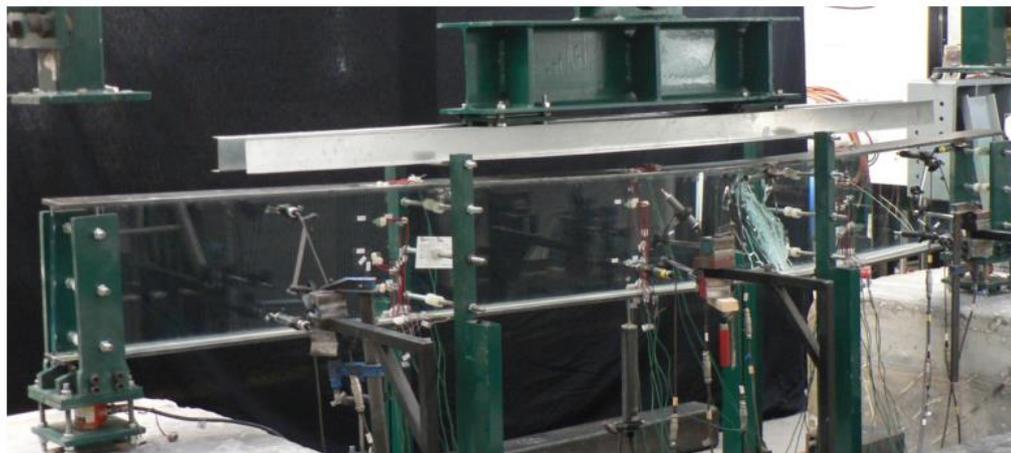


Figura 4.43 – Representação da viga híbrida após a sua rotura.

A Figura 4.44 representa o reflexo da evolução do comportamento da primeira viga ensaiada com o aumento de carga mas em termos de extensão.

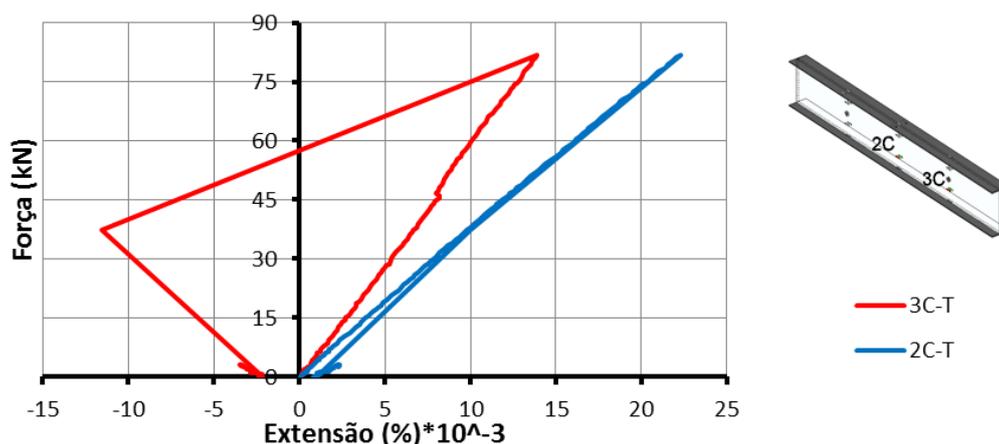


Figura 4.44 - Extensão junto a zona de fratura e afastado da mesma.

Este estudo é feito em dois locais distintos da estrutura, tal como foi efectuada no ensaio da viga de referência. Assim, verifica-se que para um extensómetro fora da zona de fratura, há uma descarga elástica idêntica à carga. No entanto, o extensómetro localizado na zona de fratura, a descarga é também uma reta, mas com inclinação diferente da carga. Assim, conclui-se que as características resistentes da seção em que se localiza o extensómetro encontram-se alteradas.

Os resultados experimentais de força vs. extensão existentes na alma de vidro e nos banzos encontram-se representados no Anexo F—Resultados experimentais do sistema híbrido. No entanto, a Figuras 4.45 e Figura 4.46 mostram os resultados obtidos para extensões na viga de vidro e no banzos respectivamente para os agrupamentos P1 e P19. Os gráficos são truncados no valor da carga de rotura (81 kN).

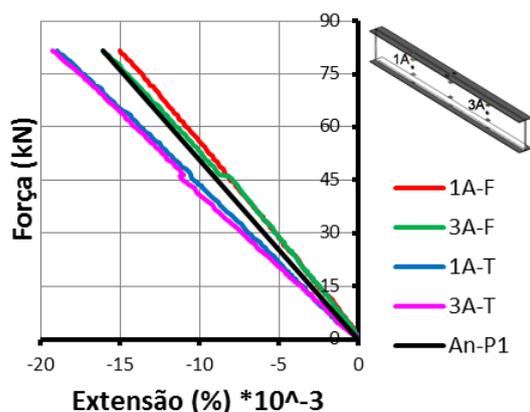


Figura 4.45 -Extensão para o Agrupamento P1.

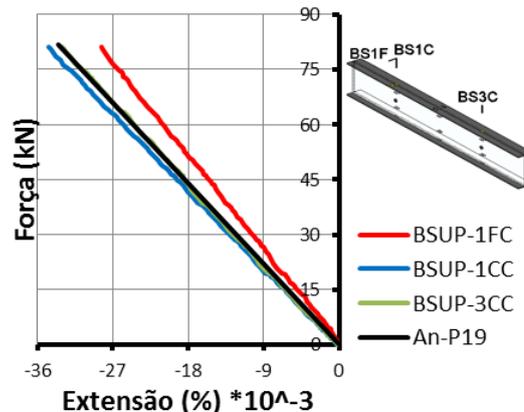


Figura 4.46 -Extensão para o Agrupamento P19.

Os resultados apresentados acima, relativos aos agrupamentos P1, tal como se verifica no ensaio do sistema de referência, mostram uma semelhança assinalável entre os resultados dos extensómetros entre as seções 1 e 3, quer na parte da frente quer na parte de trás da viga de vidro, o que mostra que existe simetria de esforços. Para além disso, os resultados apresentados para o agrupamento P19, relativos as extensões longitudinais existentes nos banzos nas secções 1 e 3, mostram igualmente uma semelhança notável. Assim conclui-se que os resultados obtidos são válidos pois verifica-se a existência do alinhamento do sistema de ensaio, que conduz assim a uma distribuição simétrica do carregamento na viga híbrida. Pode analisar-se também que os resultados obtidos, apesar de não serem completamente coincidentes, são aproximadamente iguais em relação à reta obtida analiticamente através do Método de Mohler.

De seguida, encontram-se representados os resultados experimentais da extensão ao longo da altura da seção transversal da viga híbrida, sendo esses resultados apresentados para vários níveis de carregamento. A figura 4.47 mostra o deslocamento a meio da viga em função do carregamento e os níveis de carregamentos considerados.

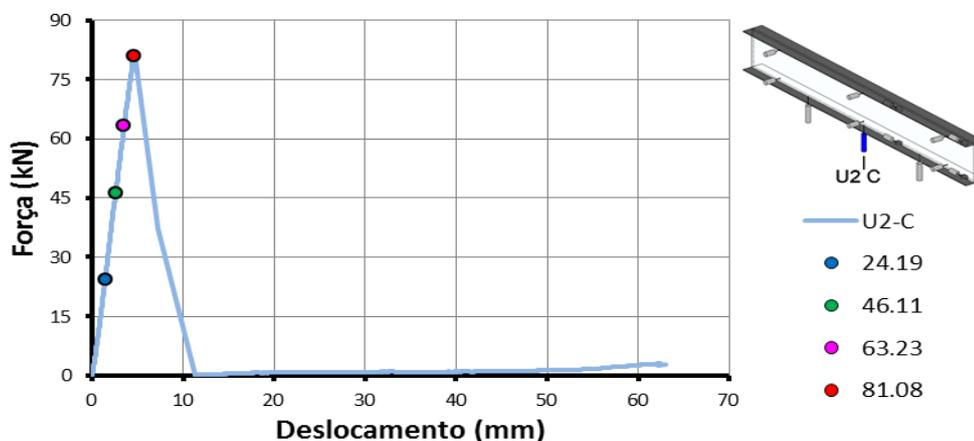


Figura 4.47 - Deslocamento vertical a meio vão e níveis de carregamentos considerados.

Considerando os níveis de cargas acima apresentados determinou-se a variação da extensão existente ao longo da altura de seção transversal durante o processo de carregamento da viga para as secções 1, 2 e 3. Os resultados obtidos referentes as secções 2 e 3 bem como para as extensões diagonais encontram-se no Anexo F–Resultados experimentais do sistema híbrido. Analisando a Figura 4.48, verifica-se que o eixo neutro não passa a meia altura da seção da viga e que as extensões na direção vertical, apesar de serem muito reduzidas, não são nulas (Figura 4.49). Estes factos apontam para a existência de alguma flexão fora do plano da viga, o que provavelmente estará relacionado com o posicionamento inicial do layout de ensaio pois, se a viga não estiver completamente vertical, se o carro de carga estiver ligeiramente descentrado ou não estiver completamente alinhado com os apoios, haverá flexão fora do plano da estrutura desde do início do carregamento. Para além disso é necessário ter em conta as imperfeições geométricas da própria viga (Anexo A– Medição das imperfeições das vigas híbridas).

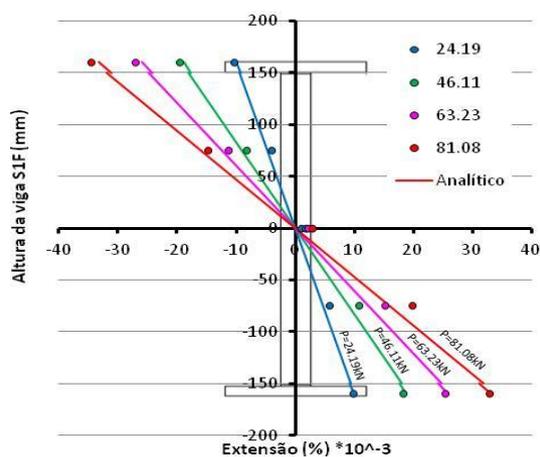


Figura 4.48 - Variação da extensão com a altura da viga (S1-Frente).

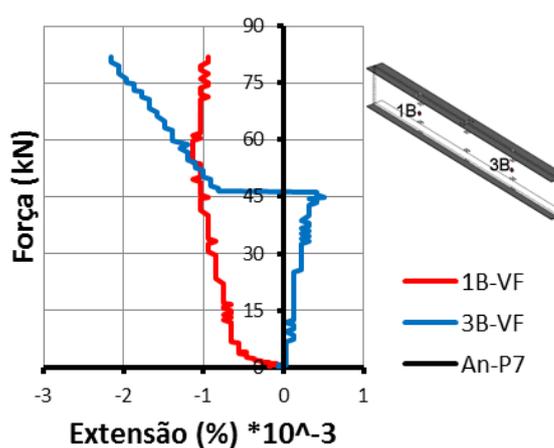


Figura 4.49 - Extensão para o Agrupamento P7.

As figuras seguintes mostram os resultados dos deflectómetros verticais. Pode verificar-se uma discrepância de resultados entre os obtidos experimentalmente e os analiticamente. Esta diferença, tal como no ensaio do sistema de referência, deve-se muito provavelmente a um deslocamento de corpo rígido, associado às folgas dos apoios. Assim, procedeu-se à correção dos resultados obtidos experimentalmente, da mesma forma à efectuada no sistema de referência. Portanto, a Figura 4.50 e a Figura 4.51 representam as leituras dos deflectómetros a meio vão e nas secções 1 e 3 respectivamente, obtidos experimentalmente bem como as suas correções. Para além disso, observa-se que a viga sofreu uma deformação máxima de 3,18 mm a meio vão (valor corrigido).

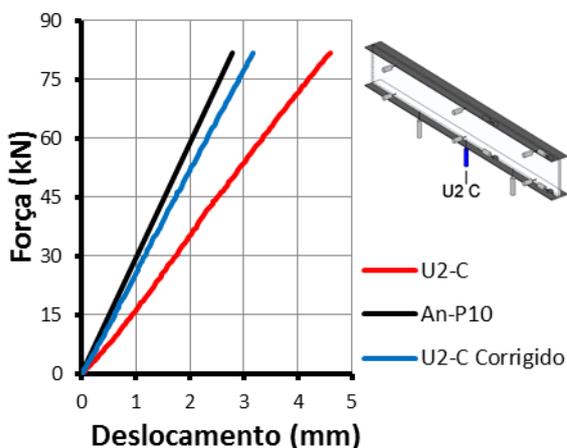


Figura 4.50 - Deslocamento para o Agrupamento P10.

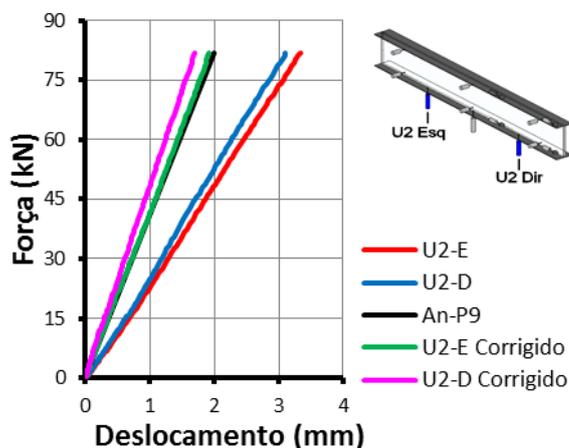


Figura 4.51 - Deslocamento para o Agrupamento P9.

Os resultados dos gráficos seguintes confirmam o facto já estabelecido atrás de que há deformação fora do plano da estrutura, e mostram também que essa deformação varia ao longo do ensaio (Figura 4.52 a Figura 4.55). Para além disso, verifica-se que o deslocamento fora do plano é maior na parte superior da viga. Estes efeitos poderão ser corrigidos através de um alinhamento mais rigoroso dos elementos do layout, ajustando os pontos de apoio antes de começar o ensaio, e de um sistema de montagem mais exigente, nomeadamente, garantir que a viga está perfeitamente vertical e os banzos perfeitamente ortogonais à alma.

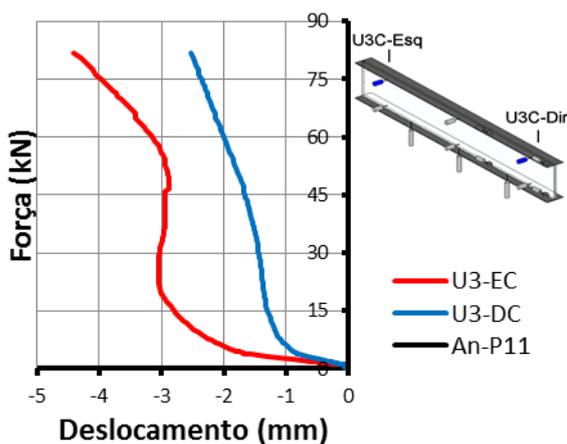


Figura 4.52 - Deslocamento para o Agrupamento P11.

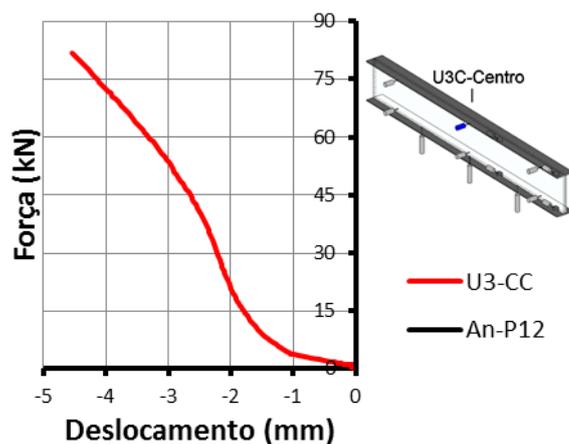


Figura 4.53 - Deslocamento para o Agrupamento P12.

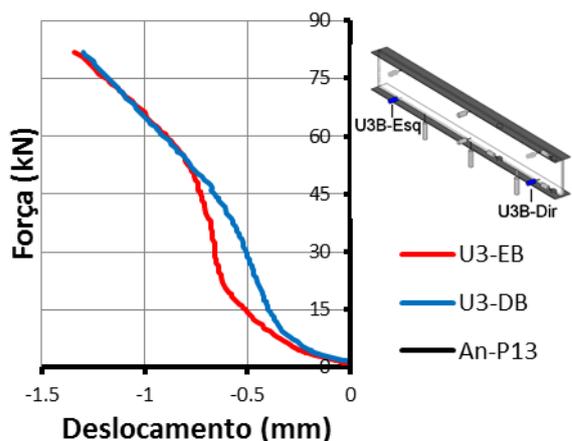


Figura 4.54 - Deslocamento para o Agrupamento P13.

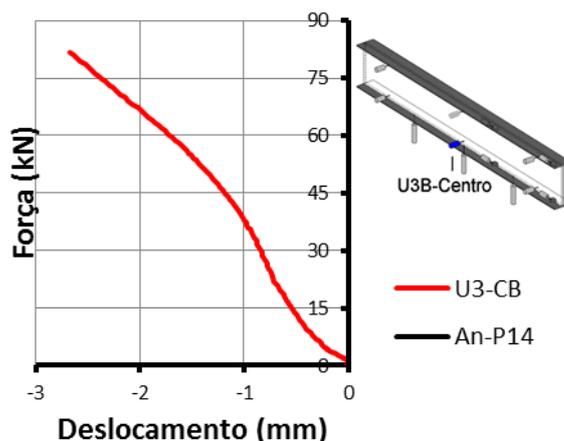


Figura 4.55 - Deslocamento para o Agrupamento P14.

Nas Figuras 4.56 e 4.57 encontram-se representados os resultados referentes ao escorregamento entre os banzos e a alma de vidro medidos pelos deflectómetros longitudinais. Os resultados encontram-se registados em forma de escada, pois houve um erro na programação do número de casas decimais no datalogger, que impossibilitou um correto registo do deslocamento relativo entre os dois materiais. Mesmo assim, é possível observar que houve um maior escorregamento do banzo superior do que no banzo inferior. Para além disso, observa-se que o deflectómetro “U1B-Centro”, situado a meio vão da viga na parte inferior da viga deixa de medir o escorregamento entre a alma de vidro e o banzo metálico, após a formação da primeira fenda ( $F=46$  kN). Tal facto deve-se, provavelmente, à proximidade do deflectómetro à 1ª fissura.

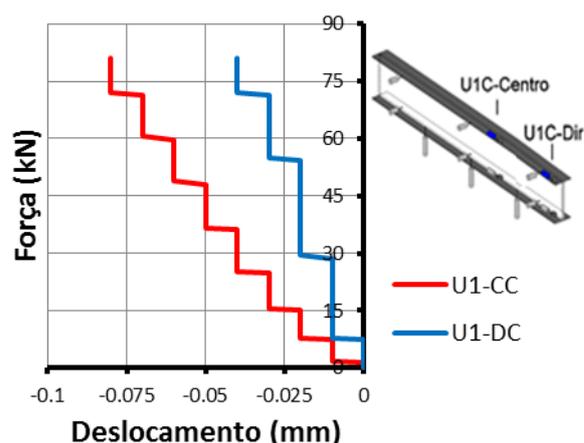


Figura 4.56 - Deslocamento para o Agrupamento P15.

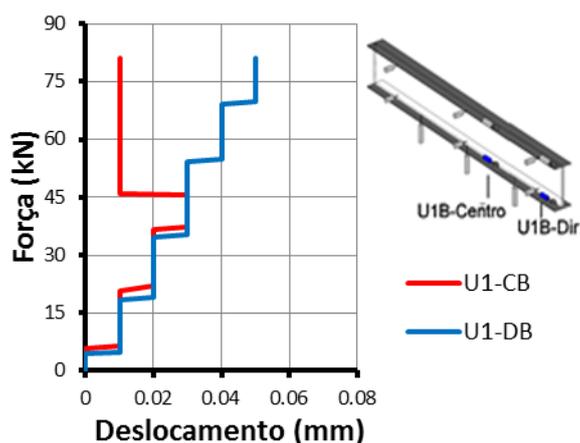


Figura 4.57 - Deslocamento para o Agrupamento P16.

A Figura 4.58 mostra as curva tensão tangencial vs. distorção, sendo essa determinada através do método de Mohler. Assim, verifica-se que o adesivo mostrou ter um comportamento linear

até a rotura. Para além disso, na mesma figura estão ainda representados os módulos de distorção para a carga de fissuração (46,11 kN) a que corresponde uma tensão tangencial no adesivo de, aproximadamente, 2,61 MPa.

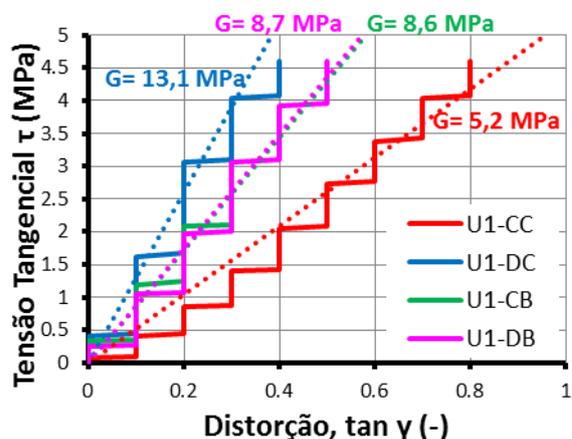


Figura 4.58 - Curvas Tensão tangencial vs. Distorção no adesivo.

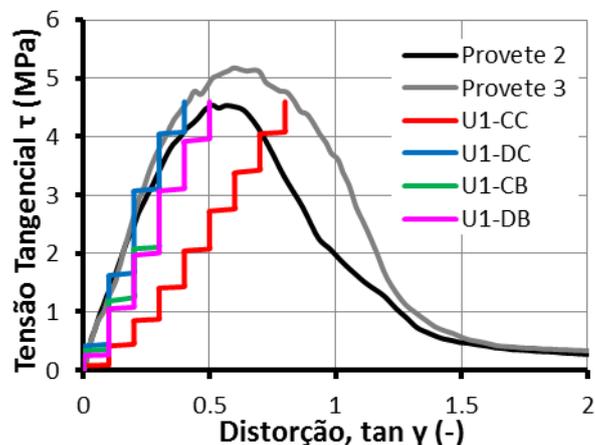


Figura 4.59 - Comparação com os resultados do ensaio de corte à escala reduzida.

A Figura 4.59 mostra a comparação dos resultados obtidos no ensaio da primeira viga com os obtidos nos ensaios à escala reduzida ao corte. Assim, verifica-se que o comportamento apresentado no ensaio à escala real é aproximadamente igual ao apresentado nos provetes ensaiados à escala reduzida. No entanto, verifica-se que existe alguma diferença no valor do módulo de distorção com o valor determinado nos ensaios de corte (13 MPa). Tal facto, terá provavelmente a ver com a espessura do adesivo existente neste primeiro ensaio, sendo essa de 0,1 mm enquanto que os ensaiados ao corte possuem uma espessura de 1,5 mm.

#### 4.5.7.3 Resultados da Viga 2

No segundo ensaio, a viga híbrida VH2 constituída por uma espessura de adesivo de 1,5 mm sofreu uma primeira fissuração próximo do meio vão da viga para uma carga de aproximadamente 75 kN e uma segunda na zona de introdução de carga para uma carga de aproximadamente 82 kN, a qual provocou a rotura da viga. A formação da primeira fenda fez com que a viga perdesse alguma resistência, no entanto, observando a Figura 4.60 vemos que a viga ainda foi capaz de suportar uma carga adicional. Verifica-se que a viga sofreu um aumento pós-fissuração de aproximadamente 110%.

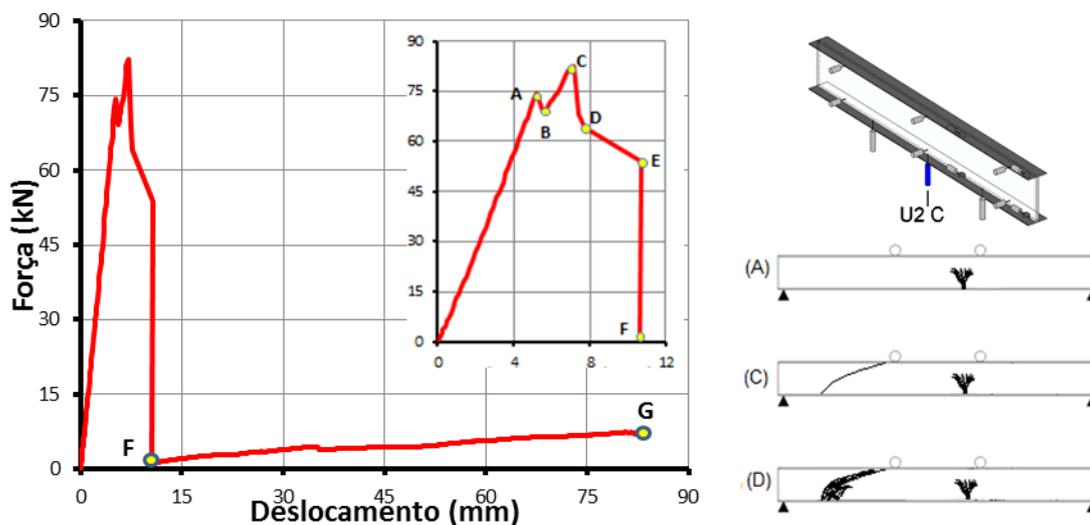


Figura 4.60 - Deslocamento vertical a meio vão e evolução do padrão de fractura.

A Figura 4.61 ilustra a viga após a sua rotura. Analisando em pormenor a Figura 4.60 verifica-se que devido à formação da primeira fenda, a viga sofreu uma perda de resistência (troço AB). No entanto, a viga ainda foi capaz de suportar uma carga adicional, ultrapassando, como anteriormente referido, a carga de fissuração (troço BC). Esse ganho de resistência deve-se principalmente ao facto de na zona traccionada a força passar a ser resistida pela película de laminação mas principalmente pelos banzos metálicos. Posteriormente à viga ter atingida a sua carga máxima (ponto C) verifica-se uma drástica redução da resistência da estrutura (troço CD), em que a viga volta a sofrer uma diminuição de resistência. O troço (DE) mostra que a viga ainda foi capaz de sustentar a carga existente, no entanto, não foi capaz de aumentar a sua capacidade de carga. O troço (EF) mostra a completa diminuição de resistência da viga, deixando de ser capaz de sustentar carga, tal facto deve-se à falha adesiva, fazendo com que haja separação entre o banzo inferior e a alma de vidro. O troço (FG) mostra, tal como aconteceu no primeiro ensaio, que a viga ainda teve algum ganho de resistência após rotura.



Figura 4.61 – Representação da viga híbrida após a sua rotura (Viga 2).

A Figura 4.62 representa o reflexo da evolução do comportamento da segunda viga com o aumento de carga em termos de extensão, sendo este feito em três locais distintos da viga.

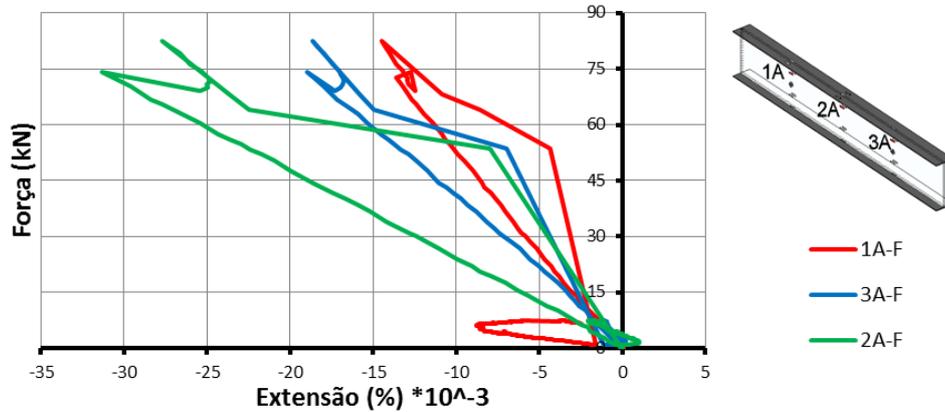


Figura 4.62 - Extensão junto a zona de fratura e afastado da mesma.

Analisando a figura anterior, verifica-se que para a primeira fenda (75 kN), o extensómetro 2A, que se encontra na zona da fenda, tem uma descarga em reta mas com inclinação diferente da sua carga, o mesmo não acontece nos extensómetros 1A e 3A que se encontram fora dessa zona. O mesmo se verifica na formação da segunda fenda que provoca a rotura da viga híbrida (82 kN), a descarga do extensómetro 1A, que se encontra na zona da fratura, é feita com uma recta de inclinação diferente da sua carga, o que não acontece para os extensómetros 2A e 3A. Assim conclui-se que as características resistentes das seções em que os extensómetros se encontram colados alteraram-se com a progressiva rotura da viga.

Os resultados experimentais de força vs. extensão, tal como no ensaio da primeira viga, encontram-se representados no Anexo F—Resultados experimentais do sistema híbrido. No entanto a Figuras 4.63 e Figura 4.64 mostram a evolução das extensões na viga de vidro e nos banzos, respetivamente, para os agrupamentos P1 e P19. Os resultados estão truncados no valor da carga de rotura (82 kN).

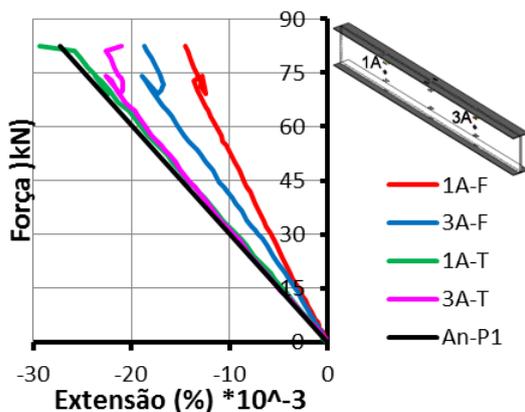


Figura 4.63 -Extensão para o Agrupamento P1.

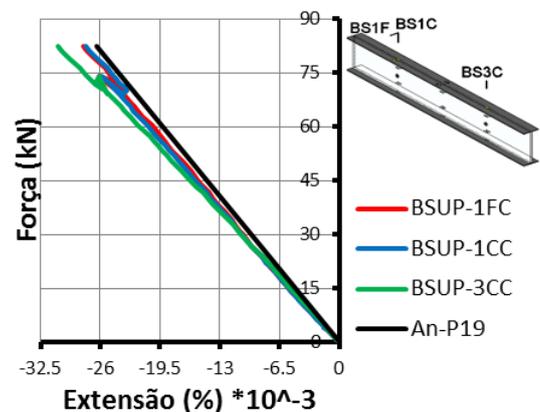


Figura 4.64 -Extensão para o Agrupamento P19.

Os resultados apresentados acima, tal como se verifica no sistema de referência e no ensaio da primeira viga híbrida, mostram que os resultados dos extensómetros para as seções 1 e 3 são aproximadamente iguais, quer na parte da frente quer da parte de trás da viga de vidro como para os banzos metálicos. Conclui-se assim que existe simetria de esforços na viga híbrida e que os resultados obtidos são válidos. Pode analisar-se também que os resultados obtidos, apesar de não serem completamente coincidentes, são semelhantes em relação à reta obtida analiticamente através do Método de Mohler.

Os resultados experimentais da relação extensão vs. altura da secção transversal da viga híbrida encontram-se representados de seguida, sendo esses apresentados para vários níveis de carregamento, tal como apresentados nos resultados de primeira viga. A figura 4.65 mostra o deslocamento vertical a meio vão da viga e os níveis de carregamentos considerados ao longo do ensaio experimental.

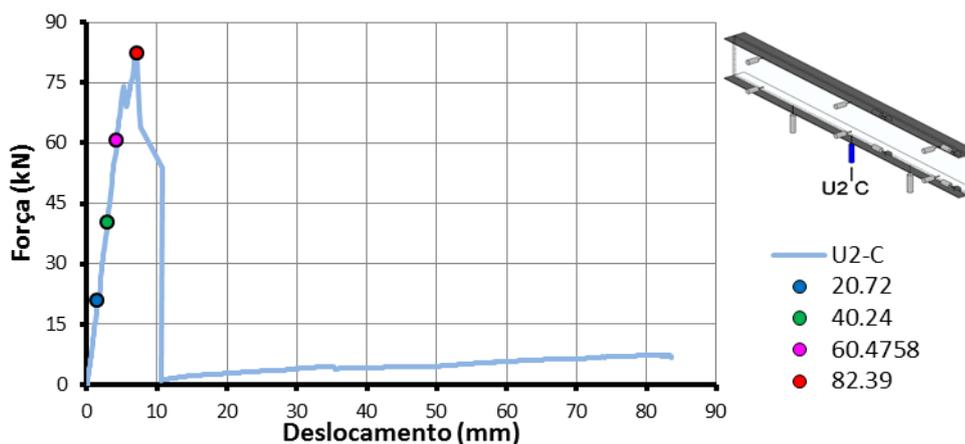


Figura 4.65 - Deslocamento vertical a meio vão e níveis de carregamentos considerados.

Considerando os níveis de carga acima apresentados representou-se a variação da extensão, existente ao longo da altura de secção transversal durante o processo de carregamento da viga. Analisando a Figura 4.66, verifica-se que os resultados experimentais apesar de serem muito próximos dos obtidos analiticamente, não são totalmente coincidentes. Verifica-se que o eixo neutro da viga apesar de não estar a passar exatamente no centro geométrico da secção da viga, houve uma melhoria em relação aos resultados experimentais obtidos no primeiro ensaio pois, as leituras das seções 1 e 3 na parte frontal da viga, a meia altura, correspondem aos obtidos analiticamente. Os resultados obtidos referentes às seções 2 e 3 bem como para as extensões diagonais encontram-se no Anexo F—Resultados experimentais do sistema híbrido.

As extensões na direcção vertical, representadas na Figura 4.67, mostram que, apesar de serem muito reduzidas não são nula, no entanto, existe uma diminuição significativa entre as extensões verticais obtidas no primeiro ensaio e as obtidas no segundo. Conclui-se assim que, existe alguma flexão fora do plano da viga que estará relacionado com o posicionamento

inicial do layout de ensaio e com as imperfeições da própria viga devido à montagem da mesma. Essas imperfeições encontram-se no Anexo A. No entanto, os resultados obtidos apontam para uma melhoria quer do sistema de ensaio quer do sistema de montagem da viga.

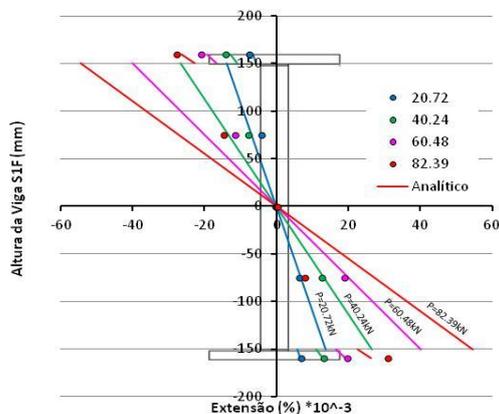


Figura 4.66 - Variação da extensão com a altura da viga (S1-Frente).

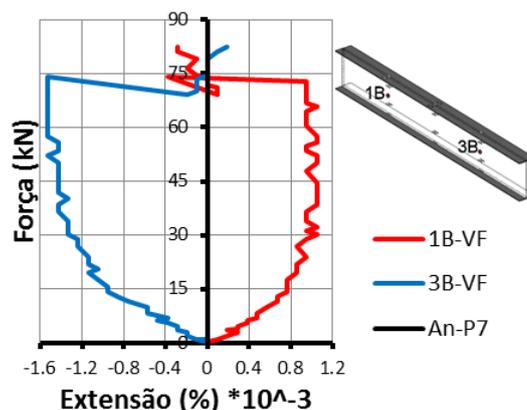


Figura 4.67 - Extensão para o Agrupamento P7.

As figuras seguintes mostram os resultados dos deflectómetros verticais. Tal como para os ensaios anteriores, procedeu-se à correção dos resultados obtidos experimentalmente. Assim, a Figura 4.68 e a Figura 4.69 mostram as leituras dos deflectómetros a meio vão e nas secções 1 e 3 respectivamente obtidos experimentalmente, bem como as suas correcções. Para além disso, observa-se uma deformação máxima de 6,19 mm a meio vão (valor corrigido). É de referir que este resultado é bastante superior ao obtido no primeiro ensaio, que foi de 3,18 mm para a mesma posição. Tendo em conta que, a carga de rotura foi a mesma nos dois ensaios, esta diferença pode se explicar pelo facto de na primeira viga existir uma maior flexão fora do plano, visto que o banzo superior da primeira viga não se encontrava totalmente ortogonal à alma de vidro provocando, sobre efeito de carga, fenómenos de encurvadura lateral.

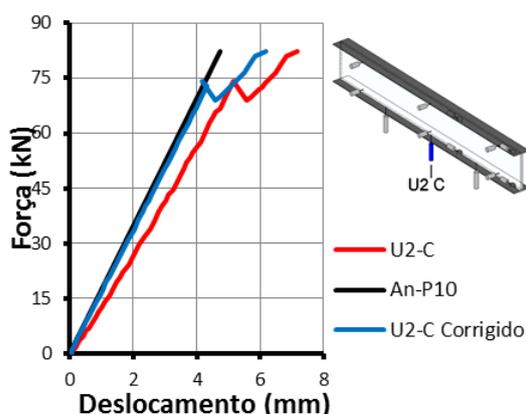


Figura 4.68 - Deslocamento para o Agrupamento P10.

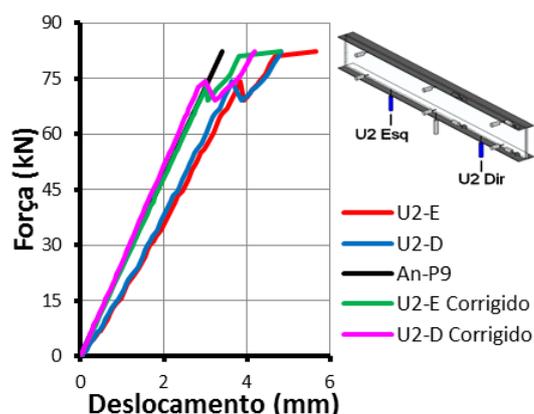


Figura 4.69 - Deslocamento para o Agrupamento P9.

Os resultados apresentados de seguida mostram as leituras obtidas experimentalmente pelos deflectómetros (U3-EC, U3-CC, U3-DC e U3-EB, U3-CB, U3-DB) que nos permitem observar a deformação fora do plano da estrutura (Figura 4.70 à Figura 4.73). Assim, analisando os gráficos, verifica-se a existência de deformação fora do plano da viga, no entanto, observa-se que a essa deformação foi mais pequena que os obtidos ao longo do primeiro ensaio. Tal facto, confirma o descrito anteriormente, ou seja, que houve uma melhoria quer do sistema de ensaio quer do sistema de montagem da viga.

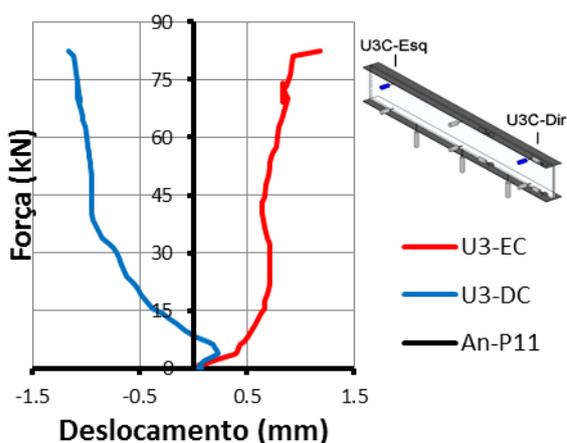


Figura 4.70 - Deslocamento para o Agrupamento P11.

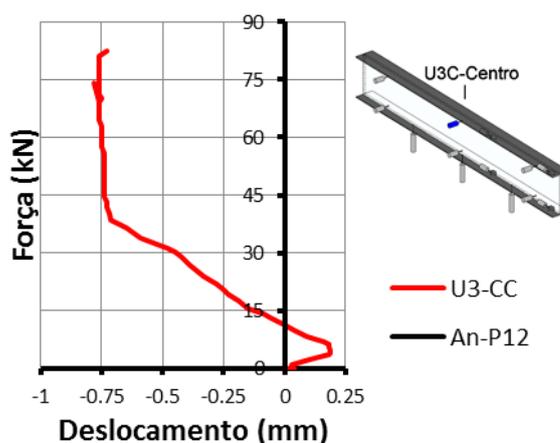


Figura 4.71 - Deslocamento para o Agrupamento P12.

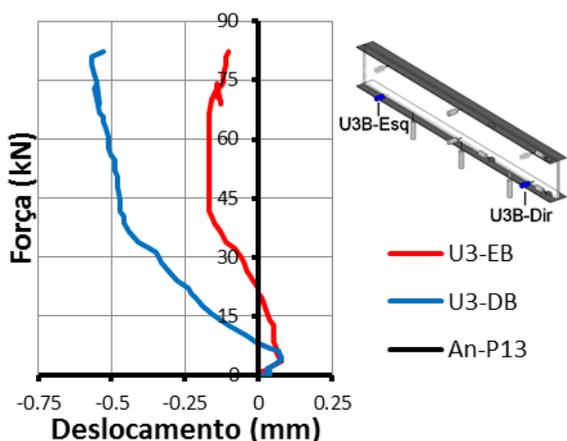


Figura 4.72 - Deslocamento para o Agrupamento P13.

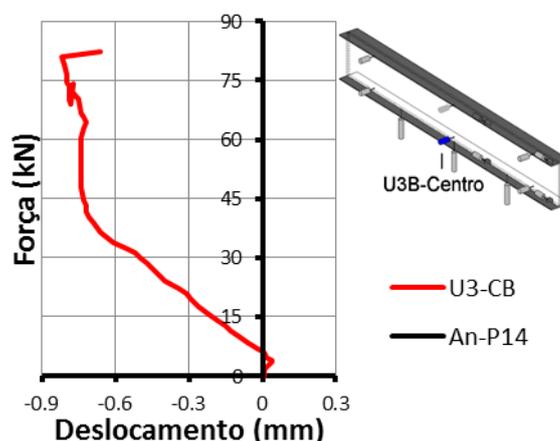


Figura 4.73 - Deslocamento para o Agrupamento P14.

Nas Figuras 4.74 e 4.75 encontram-se representados os resultados referentes ao escorregamento do banzo inferior e superior relativamente à alma de vidro. Verifica-se que o deslocamento dos deflectómetros, colocados no banzo superior, são bastante próximos, afastando-se ligeiramente quando a viga atinge a carga de fissuração, e que os deflectómetros situados no banzo inferior, apesar de os deslocamentos não estarem próximos, apresentam um

comportamento semelhante até a rotura da viga. Para além disso, verifica-se que contrariamente aos resultados obtidos na primeira viga híbrida, houve um maior escorregamento do banzo inferior.

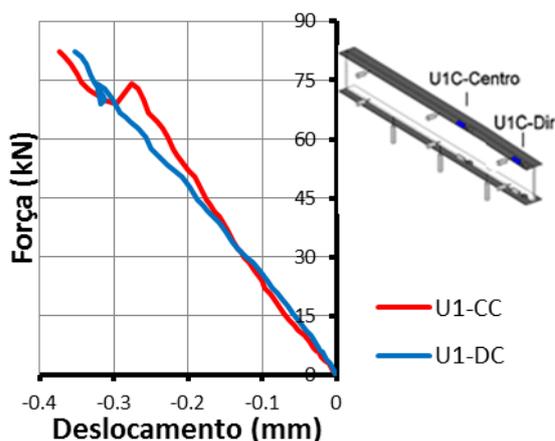


Figura 4.74 - Deslocamento para o Agrupamento P15 e P16.

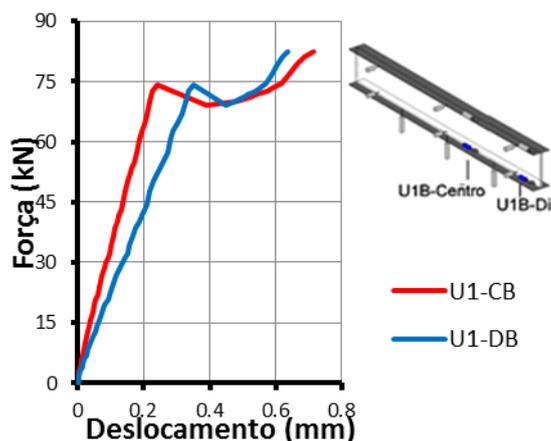


Figura 4.75 - Deslocamento para o Agrupamento P17 e P18.

A Figura 4.76 mostra as curva tensão vs. distorção obtido através do método de Mohler. Assim, verifica-se que o adesivo tem um comportamento não linear, apresentando um patamar dúctil após a formação da primeira fenda no vidro. No entanto, numa fase inicial, até surgir a primeira fenda no vidro, o adesivo apresenta um comportamento linear. Para além disso, na mesma figura estão ainda representados os módulos de distorção para a carga de fissuração (75 kN) a que corresponde uma tensão tangencial no adesivo de, aproximadamente, 3,08 MPa. Na Figura 4.77, verifica-se que o adesivo existente na viga híbrida apresenta uma semelhança notável com os resultados dos ensaios de corte, no entanto verifica-se que o adesivo é menos resistente do que quando está sujeito unicamente a corte.

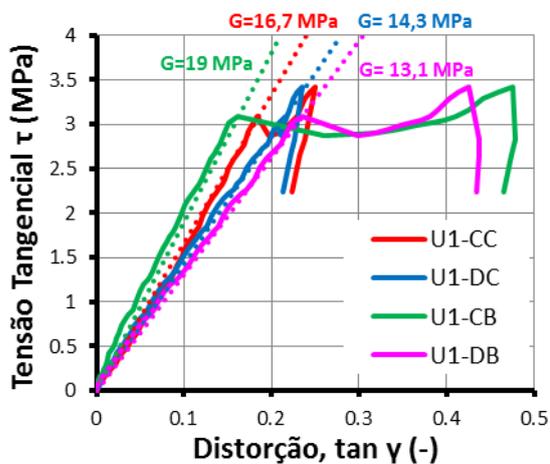


Figura 4.76 - Curvas Tensão tangencial vs. Distorção no adesivo.

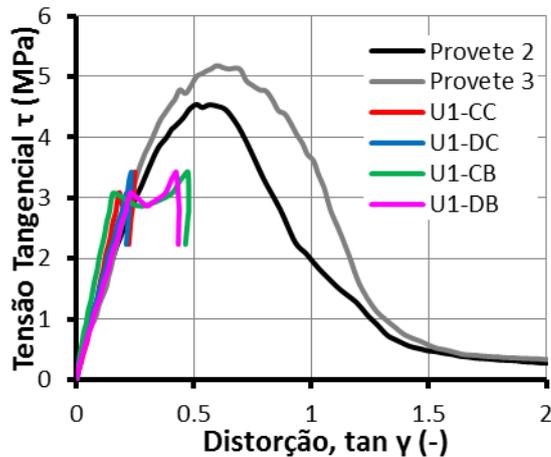


Figura 4.77 - Comparação com os resultados do ensaio de corte à escala reduzida.

## 5 MODELOS NUMÉRICOS

### 5.1 Introdução

No presente capítulo expõe-se o desenvolvimento do modelo elementos finitos (EF) e mostram-se os resultados da sua aplicação à simulação numérica dos ensaios das vigas híbridas estudadas. A construção do modelo inclui a definição da estrutura do sistema base da discretização que melhor se adapta à representação das diversas componentes da estrutura (lâminas de vidro, película SGP, banzos de aço e ligações adesivas) e das condições de fronteira. O elemento finito, o grau de discretização e a integração numérica são definidos com base em estudos de convergência da malha em análises linear e de estabilidade. Os resultados obtidos com o modelo na simulação numérica das vigas híbridas são comparados com os resultados experimentais.

### 5.2 Sistema base

Na realização do modelo de EF para a viga de referência optou-se por assumir que todas as vigas têm conexão total entre o vidro e o SGP. O comportamento do material adotado no modelo numérico para o vidro foi elástico linear e isotrópico. A película de SGP usada na laminação do vidro tem um comportamento dúctil, apresentando um comportamento elástico linear até à cedência como se pode verificar na Figura 5.1a). Apesar disso, o comportamento do material adotado no modelo numérico para o SGP foi também elástico linear e isotrópico. Esta escolha fundamenta-se com o facto de que as extensões dos dois materiais são iguais nos pontos de contacto, quando o vidro entra em rotura a tensão na película ainda não atingiu o final da sua fase elástica (Figura 5.1b). Visto que apenas se está a ter em conta o comportamento do vidro laminado até à rotura do vidro, a contabilização da parte plástica do SGP é nula, já que ela nunca é atingida. As principais propriedades do vidro recozido e do SGP são indicadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Propriedades dos materiais intervenientes na constituição da viga.

Elemento	Vidro	SentryGlas Plus
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	0.3
Coefficiente de Poisson	0.22	0.5
Tensão de cedência (MPa)	-	23
Resistência à tracção (MPa)	45	-
Resistência à compressão (MPa)	1000	-

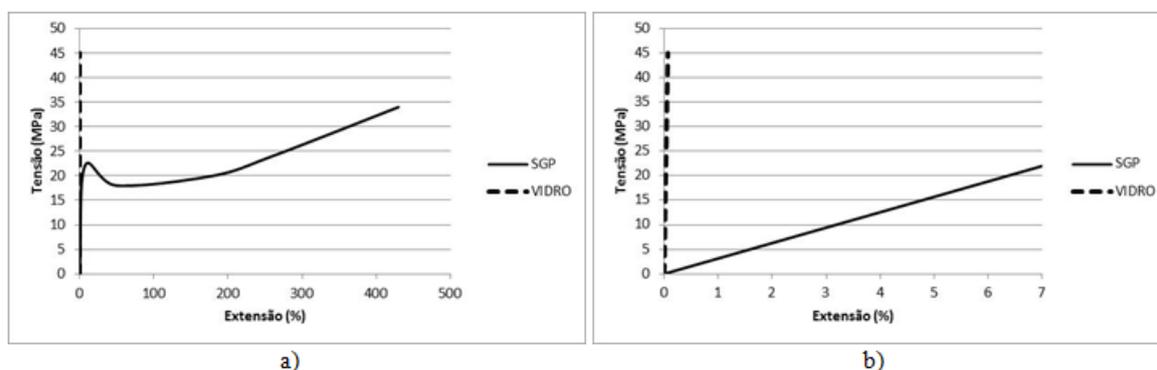


Figura 5.1 - Comparação entre as curvas tensão-extensão da película de SGP e do vidro recozido: a) gráfico total; b) fase elástica.

As condições de apoio e de contraventamentos bem como as condições de carregamento correspondem às aplicadas à viga de vidro laminado no ensaio experimental. A Figura 5.2 mostra o sistema de EF considerado.

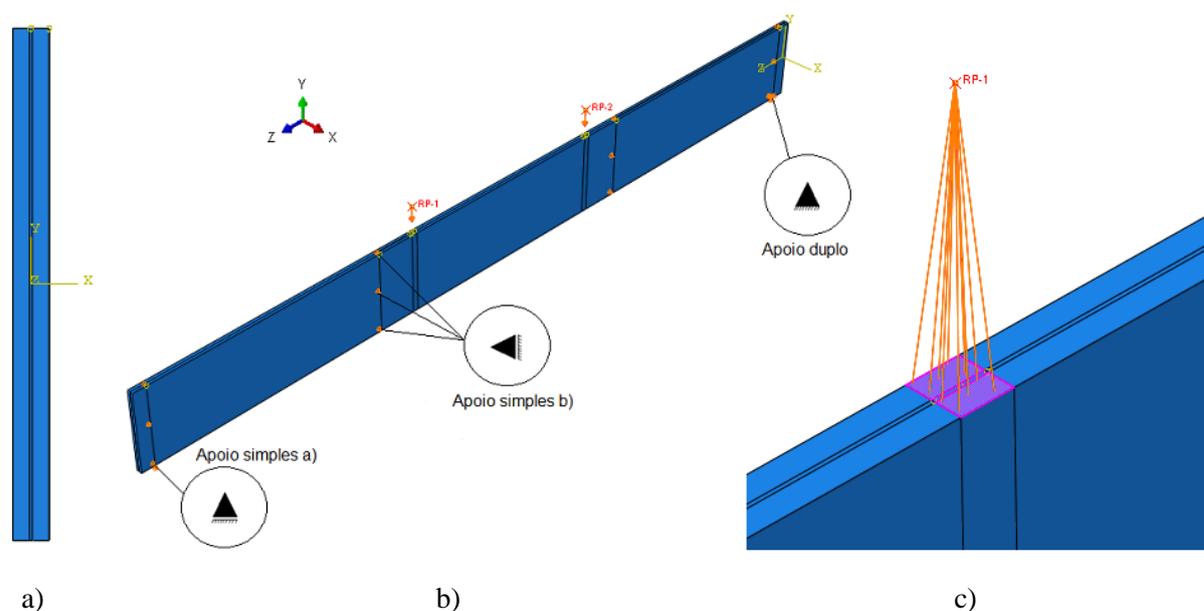


Figura 5.2 – Representação do modelo de EF; a) seção transversal; b) condições de apoio e de contraventamento; c) pormenor da aplicação da carga.

### 5.3 Modelação da laminação

Na elaboração do modelo numérico foi necessário modelar a seção compósita (vidro e SGP). Para isso, a ligação entre as duas superfícies foi realizada de modo a não existir deslocamento relativo entre elas (Belis, 2009). Assim, podem ser consideradas duas formas de realizar a interação entre ambos os materiais: a primeira consiste na criação de elementos finitos

distintos para cada camada de material sendo atribuídas interações de contacto entre os dois materiais, através de um contacto perfeito; a segunda consiste em criar apenas uma camada de elementos finitos e definir-lhe uma seção compósita, onde são definidas as camadas pretendidas na espessura do elemento finito (Figura 5.3).

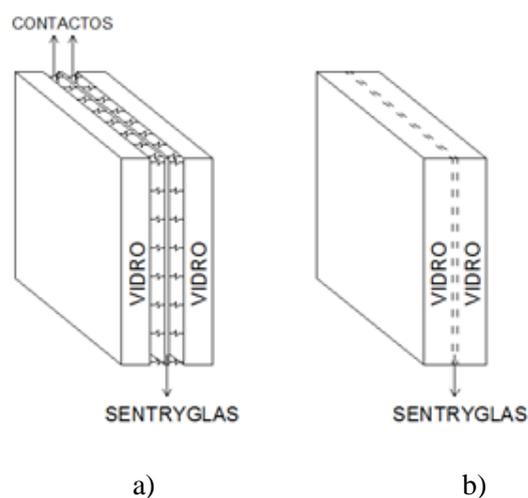


Figura 5.3 - Representação esquemática da interação dos materiais; a) Interação por contacto; b) Interação por seção compósita.

A delaminação entre as duas camadas de vidro e a camada de SGP pela qual se optou foi a interação por seção compósita pelo facto de ser menos laboriosos e conduzir a um menor tempo de cálculo (Jordão et al., 2014).

#### 5.4 Escolha do EF e estudo de convergência da malha

Na escolha dos elementos finitos mais adequado à modelação numérica, realizou-se uma análise comparativa com vários tipos de elementos finitos diferentes. As características de cada elemento usado encontram-se no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Características dos elementos finitos usados.

Nome do Elemento	Tipo de elemento	Tipo de integração	Número de nós
C3D8R	Hexaedro/solido	Reduzida e linear	8
C3D8	Hexaedro/solido	Completa e linear	8
C3D20R	Hexaedro/solido	Reduzida e linear	20
C3D20	Hexaedro/solido	Completa e linear	20

##### 5.4.1 Estudo de convergência da malha

O estudo de convergência da malha permite saber até que ponto o refinamento da sua discretização deixa de ter influência nos resultados obtidos. Assim foram geradas, três malhas

diferentes, sendo essas de elementos aproximadamente quadrados e divididas por oito elementos (N8), dezasseis elementos (N16) e trinta e dois elementos (N32) na sua altura, como se pode verificar na Figura 5.4. As dimensões do modelo, condições de fronteira, as propriedades dos materiais e o posicionamento do carregamento são os indicados anteriormente.

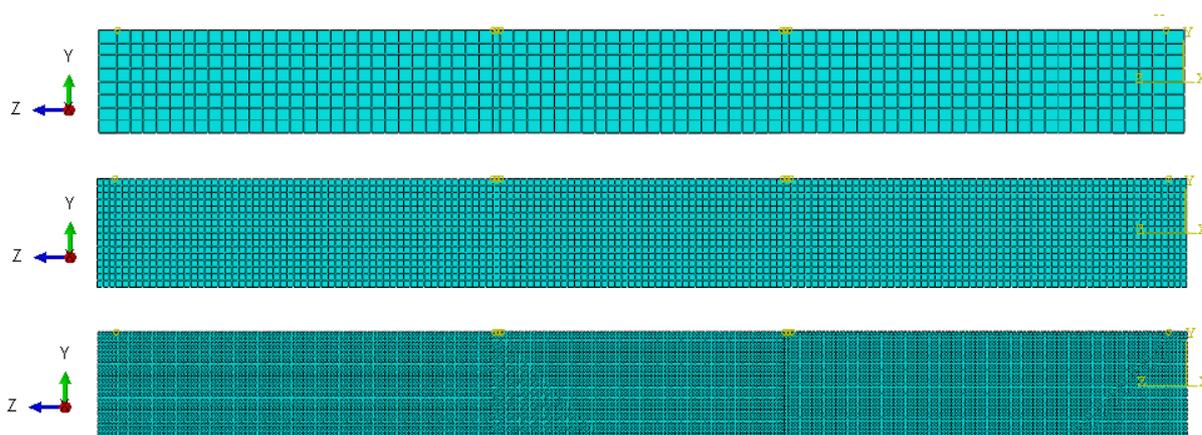


Figura 5.4 - Malha usada nos modelos do estudo paramétrico.

A comparação dos resultados dos vários modelos é realizada com base no valor da deformação vertical a meio vão, tomado como parâmetro representativo do comportamento estrutural do modelo. A análise correspondente à deformação vertical a meio vão é realizada com base na tensão máxima no vidro de 45 MPa que corresponde à carga de 25 kN. Estes resultados encontram-se representados no Quadro 5.3, onde estão assinalados os valores da carga e da deformação vertical a meio vão. A diferença entre os resultados é apresentada sob a forma de distância relativa ao valor médio ( $\Delta$ ).

Quadro 5.3 - Resultados da análise comparativa.

Nome do Modelo	Carga (kN)	$\delta_i$ (mm)	$\delta_m$ (mm)	$\Delta$ (%)	$\delta_{analítico}$ (mm)	$\delta_{ana.m}$ (mm)	$\Delta$ (%)
N8_C3D8R	28,75	4,38	3,98	9,90	4,16	3,87	13,24
N8_C3D8	26,95	3,99		0,10	3,90		3,14
N8_C3D20R	25,53	3,79		4,89	3,70		2,0
N8_C3D20	25,61	3,78		5,10	3,70		2,21
N16_C3D8R	27,12	4,07	3,89	4,76	3,92	3,78	7,84
N16_C3D8	26,20	3,89		0,07	3,80		3,02
N16_C3D20R	25,52	3,80		2,33	3,69		0,54
N16_C3D20	25,54	3,79		2,49	3,69		0,38
N32_C3D8R	26,31	3,94	3,85	2,38	3,80	3,73	5,55
N32_C3D8	25,84	3,85		0,07	3,74		3,17
N32_C3D20R	25,50	3,80		1,14	3,69		1,92
N32_C3D20	25,51	3,79		1,32	3,69		1,74

Da análise dos resultados obtidos depreende-se que, com exceção dos modelos com integração reduzida e linear (N8\_C3D8R, N16\_C3D8R, N32\_C3D8R e N8\_C3D8), os resultados se encontram muito próximos entre si. Tendo em conta as considerações anteriores conclui-se que a escolha ideal recai sobre o modelo com elementos finitos do tipo C3D8 considerando com trinta e dois elementos em altura.

#### 5.4.2 Análise não linear de estabilidade

Devido à esbelteza da viga de vidro em estudo, prevêem-se naturalmente, fenómenos de instabilidade que podem limitar a sua resistência. Assim, numa primeira fase, determinou-se os valores das forças críticas e os respetivos momentos críticos correspondente ao 1º modo de instabilidade da viga de vidro. O cálculo destes valores é efetuado através de uma análise linear de estabilidade realizada recorrendo ao programa de elementos finitos *Abaqus*. Esta análise foi aplicada igualmente em todos os modelos anteriormente referidos na fase de convergência da malha. Por fim, o modelo numérico é validado através da comparação entre os resultados obtidos no modelo com a análise analítica realizada por Jordão e al. (2014), através do software *LTBeam*. Os resultados das forças críticas ( $F_{cr}$ ) bem como os momentos críticos correspondentes ( $M_{cr}$ ) são indicados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Resultados da análise não linear de estabilidade.

Nome do Modelo	$F_{cr}$ (kN)	$M_{cr}$ (kN.m)	$M_{crm}$ (kN.m)	$\Delta$ (%)	$M_{cr,ana.}$ (kN.m)	$\Delta$ (%)
N8_C3D8R	126,578	66,453	73,979	10,17	70,151	5,27
N8_C3D8	214,350	112,534		52,12		60,42
N8_C3D20R	140,590	73,810		0,23		5,22
N8_C3D20	141,234	74,148		0,23		5,70
N16_C3D8R	105,616	55,448	73,441	24,50		20,96
N16_C3D8	156,392	82,106		11,80		17,04
N16_C3D20R	139,772	73,380		0,08		4,60
N16_C3D20	140,002	73,501		0,08		4,78
N32_C3D8R	103,686	54,435	72,956	25,39		22,40
N32_C3D8	138,664	72,799		0,22		3,77
N32_C3D20R	139,264	73,114		0,22		4,22
N32_C3D20	139,348	73,158		0,28		4,29

Comparando os resultados numéricos da análise linear de estabilidade verifica-se que o momento crítico converge para um valor de 73 kN.m com a discretização da malha, sendo o

valor analítico de 70,151 kN.m. Assim, com o estudo da malha realizado anteriormente conclui-se que a escolha ideal recai sobre o modelo com elementos finitos do tipo C3D8 com 32 elementos na sua altura (N32\_C3D8).

## 5.5 Sistema de referência

### 5.5.1 Resultados

Apresenta-se a evolução dos contornos das extensões longitudinais na viga de vidro laminado para três níveis de carregamento. A Figura 5.5 mostra a curva numérica da relação força vs. deslocamento a meio vão bem como os níveis de carregamento considerados para a análise de resultados.

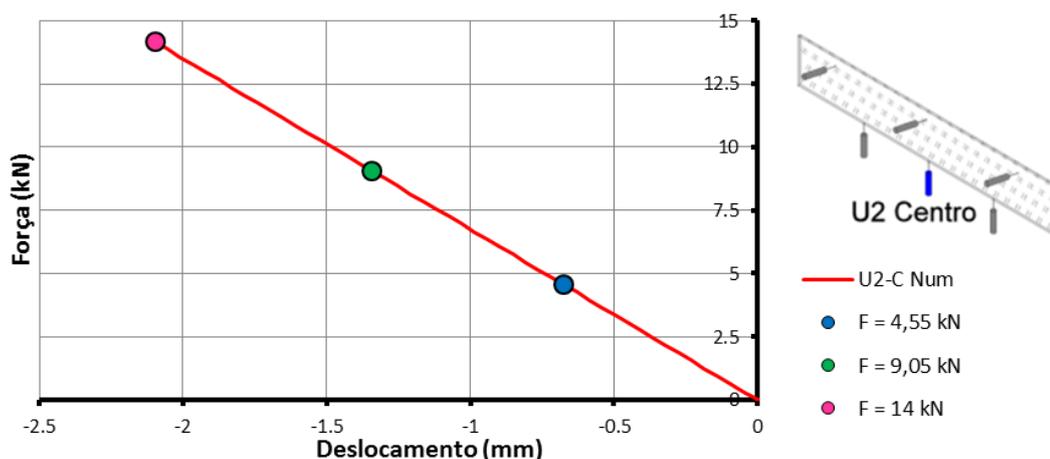


Figura 5.5 - Curva força vs. deslocamento a meio vão e níveis de carregamento considerados.

As Figuras seguintes representam a evolução das extensões longitudinais para os três níveis de carregamento representados no gráfico anterior (Figura 5.6 à 5.8). Verifica-se que existe uma evolução de extensões consistente com o estado de extensões instalado na viga.

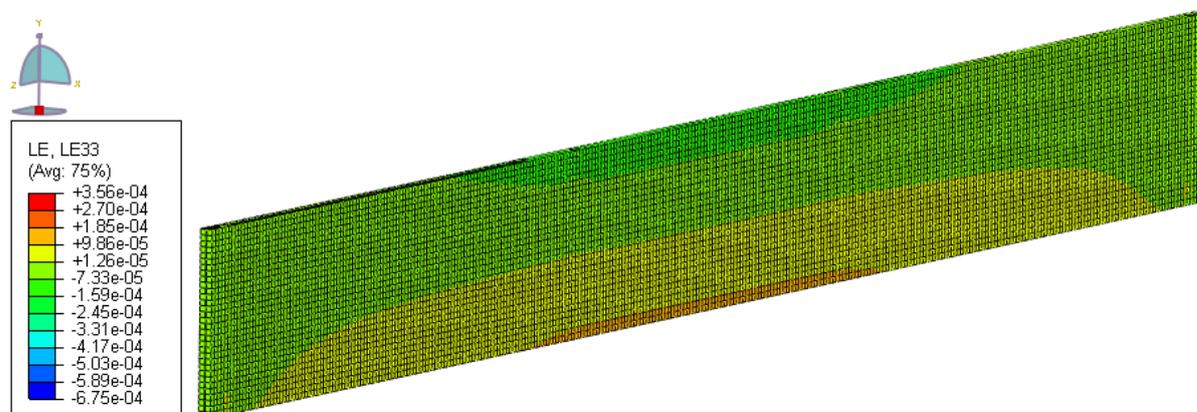


Figura 5.6 - Contornos das extensões longitudinais para F = 4,5 kN.

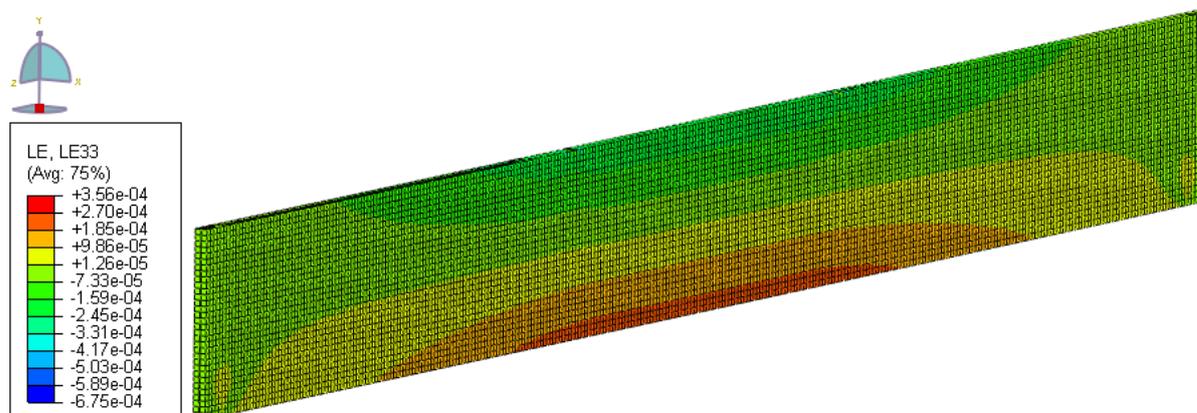


Figura 5.7 - Contornos das extensões longitudinais para  $F = 9,0$  kN.

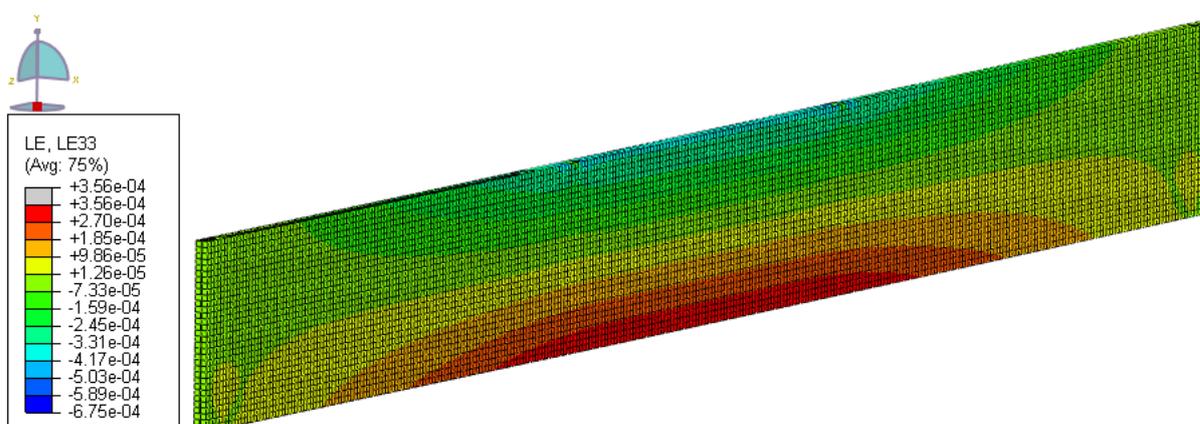


Figura 5.8 - Contornos das extensões longitudinais para  $F = 14$  kN.

### 5.5.2 Comparação com resultados experimentais

É feita uma comparação dos resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente e as curvas analíticas. A Figura 5.9 mostra os resultados experimentais de força vs. extensão para o agrupamento 1, sendo os restantes resultados relativos aos extensómetros longitudinais representados no Anexo F– Resultados numéricos do sistema de referência.

Os resultados numéricos apresentados na Figura 5.9 nas figuras em anexo, relativos aos agrupamentos P1 e P3 mostram uma semelhança notável com os obtidos experimentalmente, sendo esses os resultados obtidos em posições simétricas. No entanto, o mesmo não acontece para os resultados relativos ao agrupamento P2 (Anexo F), em que os resultados numéricos mostram que a extensão a meia altura da secção é nula, sendo esse resultados coincidentes com os obtidos analiticamente. Esta diferença pode explicar-se pelo facto de a viga modelada numericamente não conter imperfeições e não existir desalinhamento no sistema de carregamento, pelo que os esforços se encontram distribuídos de forma simétrica fazendo com que o eixo neutro esteja a meia altura da secção, o que não acontece na viga ensaiada

experimentalmente. O mesmo acontece nos resultados obtidos para o agrupamento P5 (Anexo F). Os resultados obtidos para o agrupamento P7, sendo esses referentes às extensões verticais (Anexo F), mostram que as extensões na direcção vertical, obtidas através do modelo numérico, apesar de serem menores que as obtidas experimentalmente não são nulas. Este facto indica que, existe no modelo numérico alguma flexão fora do plano da viga, o que acontece também a nível experimental.

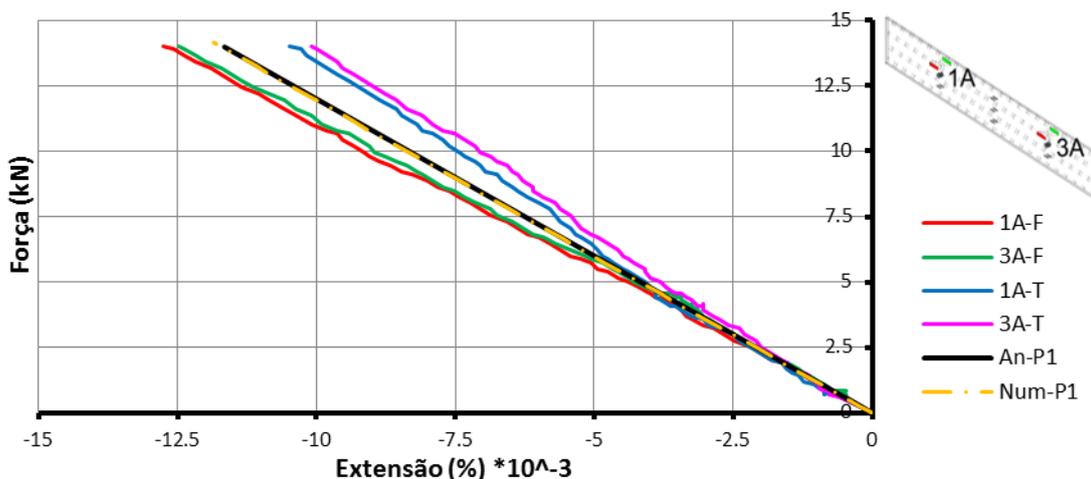


Figura 5.9 -Extensão para o Agrupamento P1.

Os gráficos das figuras seguintes mostram os resultados dos deflectómetros verticais obtidos numericamente e a sua comparação com os respectivos valores experimentais e analíticos. Pode verificar-se que tanto para o deslocamento a meio vão (Figura 5.11) como para os deslocamentos nas seções 1 e 3 (Figura 5.10), os resultados obtidos através do programa *Abaqus* são bastante próximo dos obtidos experimentalmente.

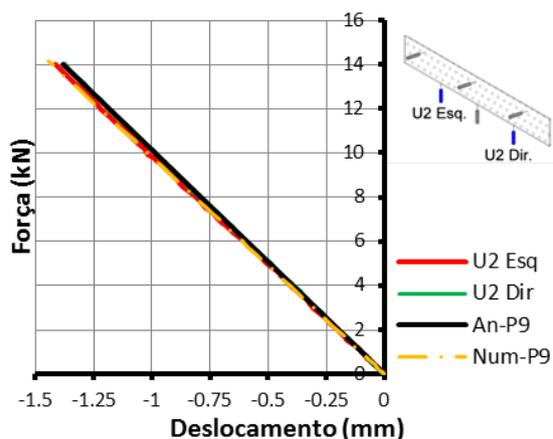


Figura 5.10 -Deslocamento para o Agrupamento P9.

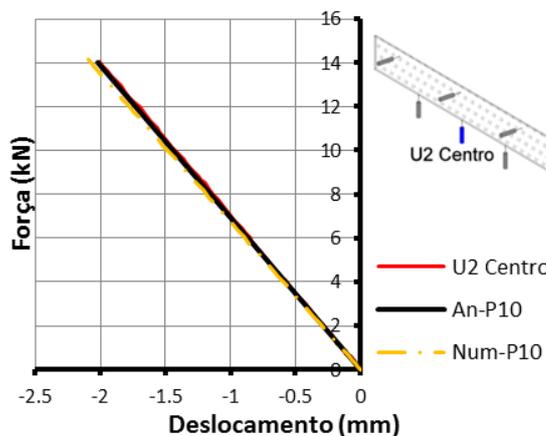


Figura 5.11 -Deslocamento para o Agrupamento P10.

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 mostram os resultados dos deslocamentos fora do plano obtidos a partir do modelo numérico e a sua comparação com os obtidos experimentalmente e analiticamente. Assim, verifica-se a existência de uma disparidade entre os resultados obtidos a partir do modelo com os obtidos experimentalmente, que se deve ao facto de não se considerar imperfeições geométricas da viga híbrida no modelo numérico, o que não acontece a nível experimental.

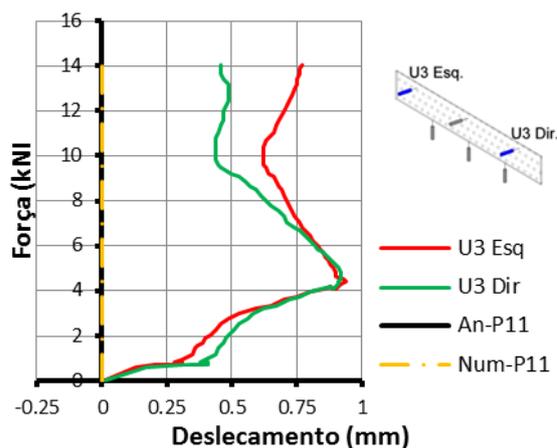


Figura 5.12 -Deslocamento para o Agrupamento P11.

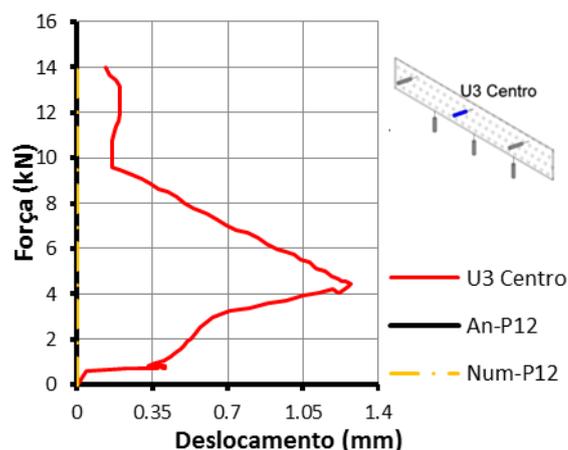


Figura 5.13 -Deslocamento para o Agrupamento P12.

## 5.6 Sistema híbrido

Na realização do modelo de EF para a viga híbrida optou-se por considerar uma interação constituída de elementos finitos distintos. As propriedades do vidro recozido e do SGP adoptadas para o modelo híbrido foram as mesmas que as descritas no modelo do sistema de referência e encontram-se representadas no Quadro 5.5. Para além disso, o aço usado nos banzos metálicos possui um comportamento dúctil, apresentando um comportamento elástico linear até à cedência. No entanto, considera-se que possui um comportamento elástico linear e isotrópico. Esta escolha fundamenta-se, tal como acontece para a película de SGP, com o facto de que quando o vidro entra em rotura a tensão no aço ainda não atingiu o final da sua fase elástica. A camada adesiva possui igualmente um comportamento elástico linear e isotrópico, para além disso, definiu-se o adesivo como um material hiperelástico tendo-se introduzido a curva tensão vs. extensão obtida nos ensaios a escala reduzida, nomeadamente do provete 3, no programa numérico de modo a definir-se melhor o comportamento do adesivo. Para além disso, introduziu-se também o valor do coeficiente de Poisson obtido através dos mesmos ensaios. As principais propriedades dos materiais que constituem a viga híbrida vidro-aço são indicadas no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Propriedades dos materiais intervenientes na constituição da viga híbrida.

Elemento	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Vidro	70	0.22
SentryGlas Plus	0.3	0.5
Adesivo (SikaForce)	-	0.29
Aço	210	0.3

As condições de apoio e de contraventamento, tal como para o modelo do sistema de referência, correspondem às do ensaio experimental da segunda viga. Para além disso, as condições de carregamento também seguem o procedido experimentalmente. A Figura 5.14 mostra a o sistema de EF considerado.

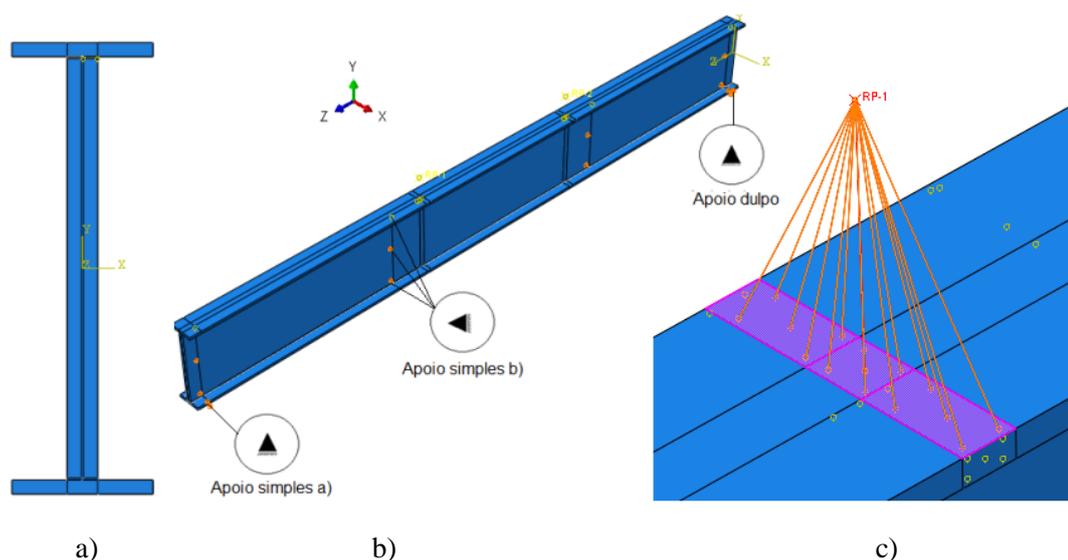


Figura 5.14 - Representação do modelo de EF; a) seção transversal; b) condições de apoio e de contraventamento; c) pormenor da aplicação da carga.

Por fim, a execução e refinamento da malha de elementos finitos foi efetuada tendo em conta o estudo apresentado em 5.4. No entanto, para o modelo do sistema híbrido falta definir a malha para a camada adesiva e para os banzos metálicos. Assim optou-se pelo mesmo tipo de elemento (C3D8), sendo cada camada dividida em dois elementos ao longo da espessura, para a obtenção de resultados mais precisos. A Figura 5.15 mostra a malha usada para o modelo da viga híbrida de vidro e aço bem como uma pormenorização da malha aplicada à camada adesiva e aos banzos metálicos.

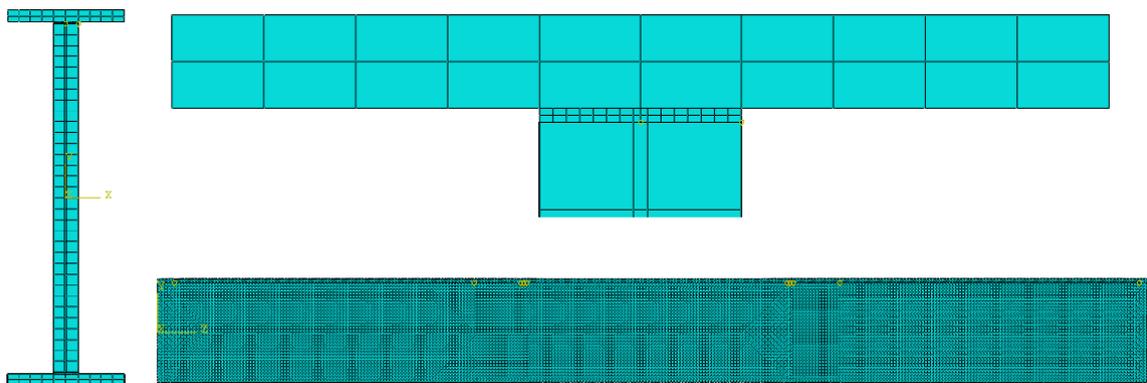


Figura 5.15 – Discretização das malhas usadas no modelo híbrido.

### 5.6.1 Modelação da laminação

Na elaboração do modelo numérico híbrido manteve-se a secção compósita (vidro e SGP) para que a ligação entre o vidro e o SGP não sofresse deslocamento relativo entre elas. No entanto, optou-se por considerar uma interação constituída de elementos finitos distintos atribuindo interações de contacto entre a viga de vidro laminado e a camada adesiva e entre a mesma camada adesiva e os banzos metálicos. Essa opção permite manter a geometria da viga próxima do real, de forma a não alterar a inércia e a posição relativa dos elementos finitos. Para além disso, a modelação do adesivo como um elemento distinto permite atribuir-lhe as suas propriedades reais, tal situação não seria possível de realizar caso se considerasse a viga híbrida como uma secção compósita. A Figura 5.16 mostra as interações consideradas para o modelo híbrido.

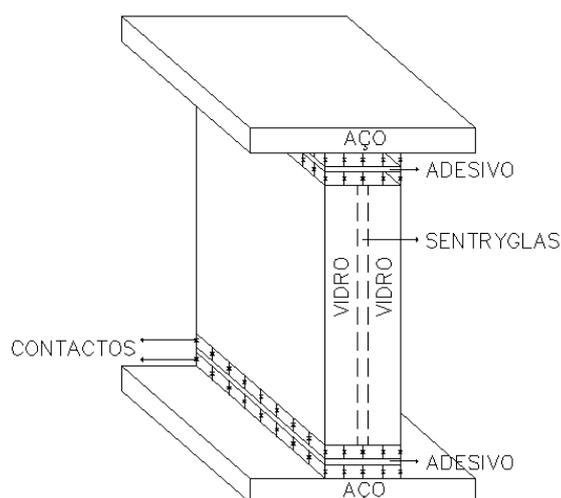


Figura 5.16 - Representação esquemática das interações entre os materiais do sistema híbrido.

### 5.6.2 Resultados

Na análise de resultado, tal como apresentado para o sistema de referência, apresenta-se a evolução dos contornos das extensões longitudinais na viga híbrida de vidro e aço para três níveis de carregamento. A Figura 5.17 mostra a evolução da curva numérica da força vs. deslocamento a meio vão bem como os níveis de carregamento considerados para a análise de resultados.

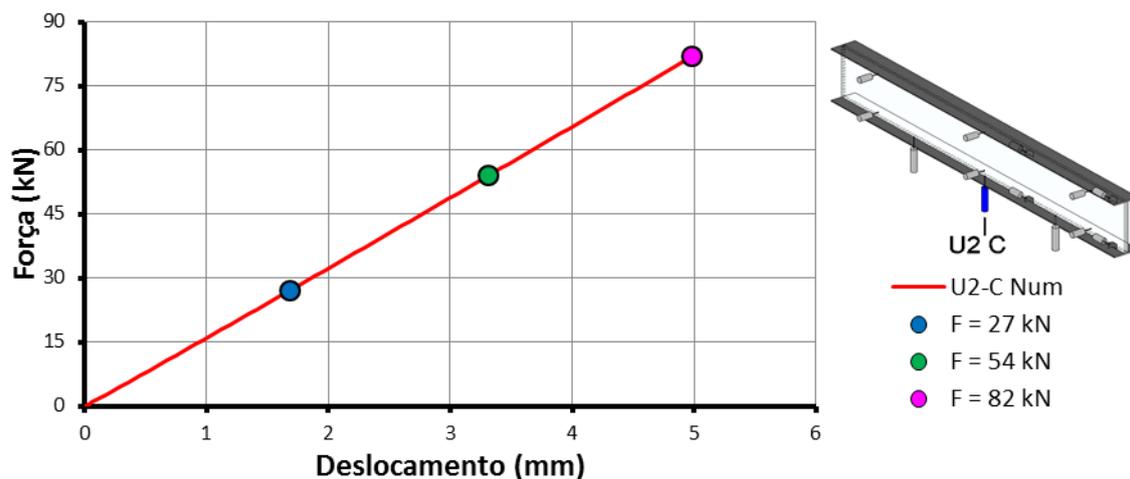


Figura 5.17 - Curva força vs. deslocamento a meio vão e níveis de carregamento considerados.

As figuras seguintes mostram a evolução crescente das extensões longitudinais ao longo dos três níveis de carregamento representados no gráfico anterior (Figura 5.18 à 5.20). Verifica-se que existe uma evolução de extensões consistente com o estado de extensões instalado na viga.

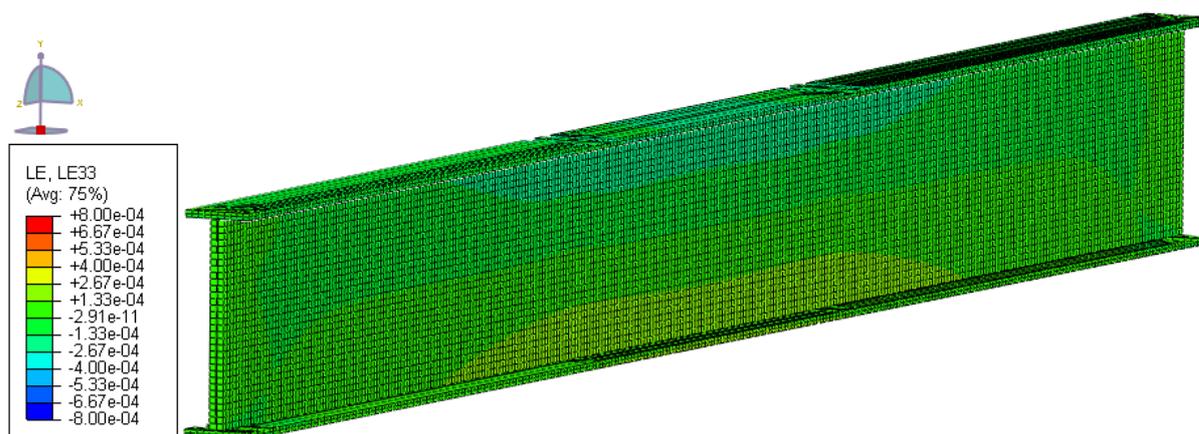


Figura 5.18 - Contornos das extensões longitudinais para  $F = 27$  kN.

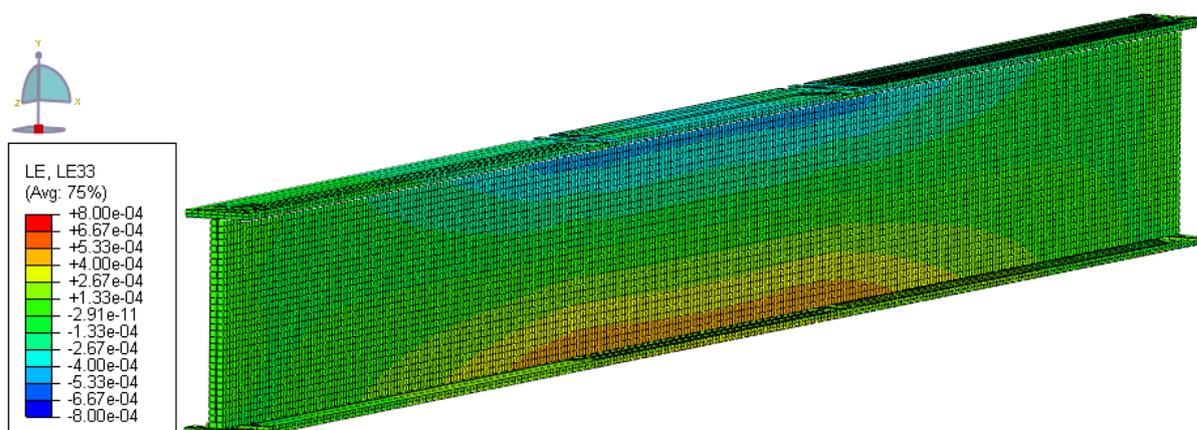


Figura 5.19 - Contornos das extensões longitudinais para  $F = 54$  kN.

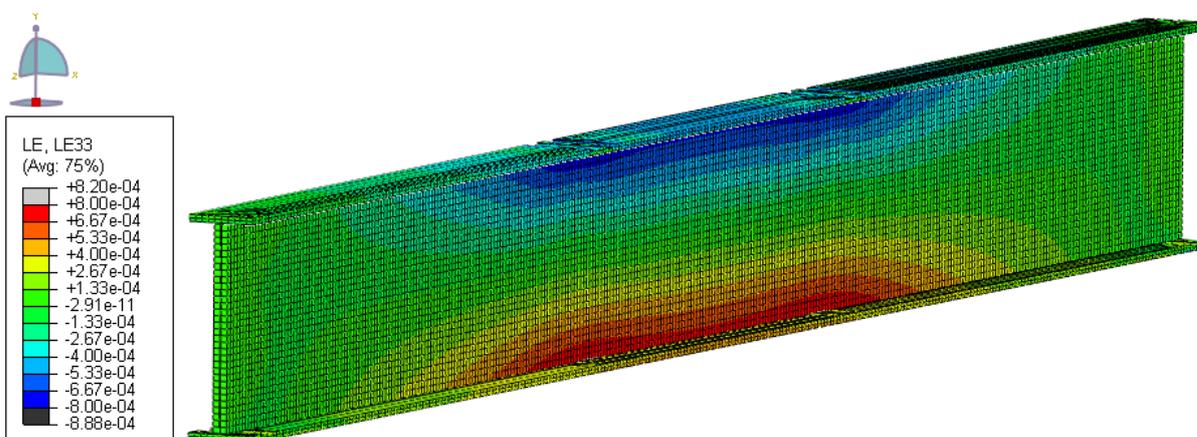


Figura 5.20 - Contornos das extensões longitudinais para  $F = 82$  kN.

### 5.6.3 Comparação com resultados experimentais

Na análise de comparação de resultados, tal como é realizado no modelo de referência, é feita uma comparação dos resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente e também com as curvas analíticas. Analisando os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, relativos aos agrupamentos P1 e P3, verifica-se que há uma semelhança notável (Figura 5.21 e Figura 5.23). Para além disso, verifica-se igualmente uma semelhança nos resultados para o agrupamento P4 e P6, o que mostra a existência de simetria em faces opostas da viga híbrida na seção a meio vão da viga híbrida (Figura 5.24 e Figura 5.25). Analisando os resultados obtidos para o agrupamento P2, verifica-se que o eixo neutro da viga híbrida, tanto experimentalmente como numericamente, não se encontra a meia altura da seção (Figura 5.22).

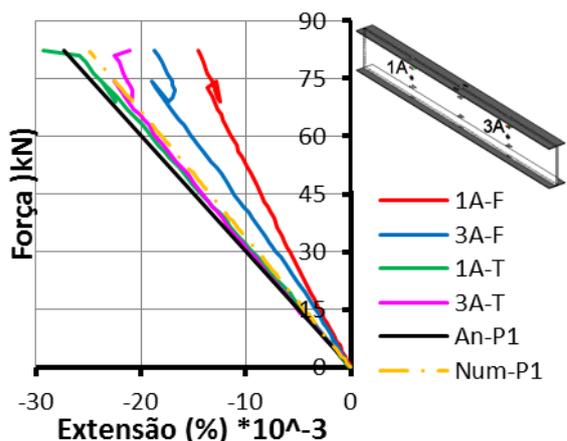


Figura 5.21 -Extensão para o Agrupamento P1.

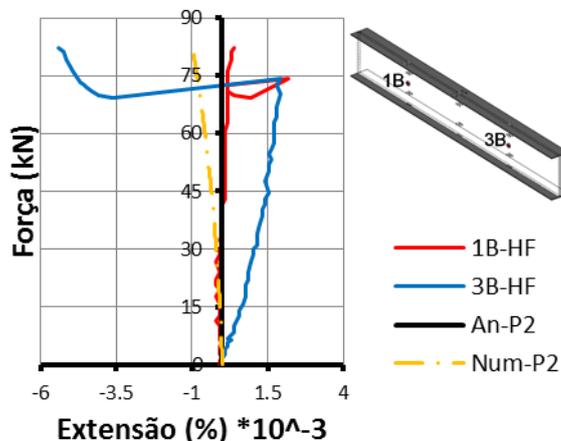


Figura 5.22 -Extensão para o Agrupamento P2.

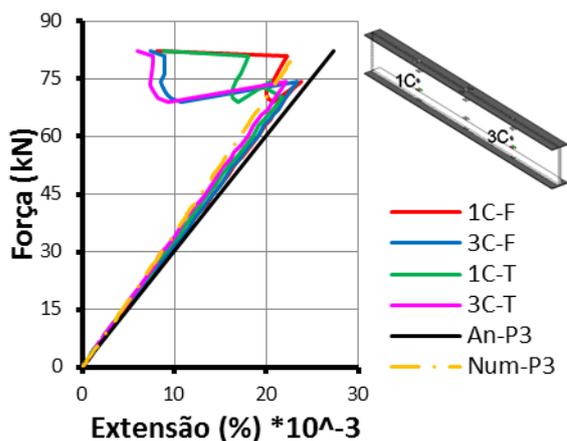


Figura 5.23 -Extensão para o Agrupamento P3.

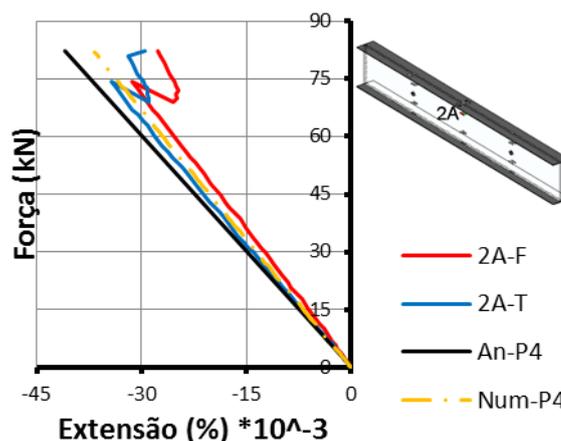


Figura 5.24 -Extensão para o Agrupamento P4.

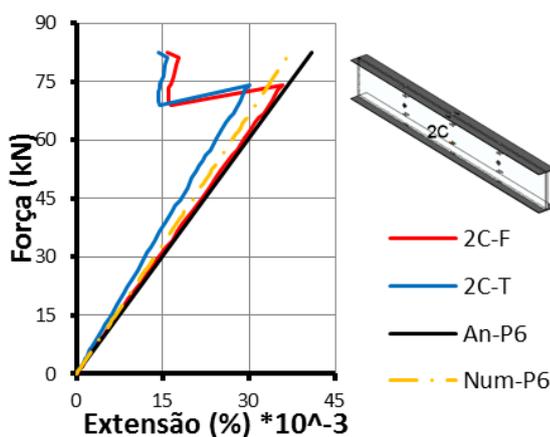


Figura 5.25 - Extensão para o Agrupamento P6.

Os resultados apresentados de seguida (Figura 5.26 à Figura 5.30) mostram as curvas força vs. extensão obtidos numericamente, experimentalmente e analiticamente no banzo superior e

inferior da viga híbrida. Tal como para as extensões existentes na chapa de vidro laminado, verifica-se que as extensões nos banzos obtidos a partir do modelo apresentam resultados semelhantes aos obtidos experimentalmente, evidenciando assim uma simetria de esforços existentes na viga.

Na Figura 5.31 e na Figura 5.32 encontram-se os resultados obtidos para o agrupamento P7 e P8 sendo esses referentes as extensões verticais e diagonais respetivamente. Assim, verifica-se e que as extensões na direcção vertical obtidas através do modelo numérico, tal como no modelo do sistema de referência, apesar de serem menores que as obtidas experimentalmente, não são nulas. Este facto indica que existe alguma flexão fora do plano da viga, que acontece também a nível experimental.

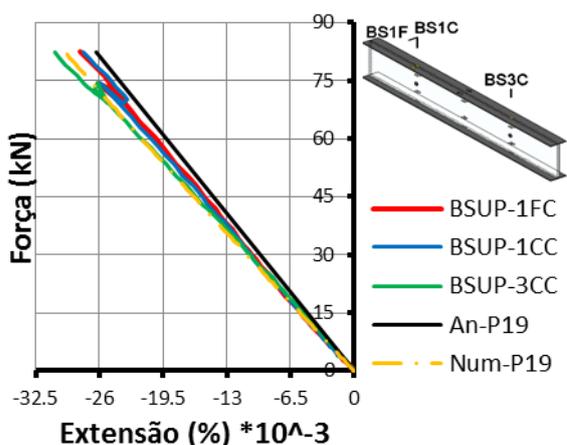


Figura 5.26-Extensão para o Agrupamento P19.

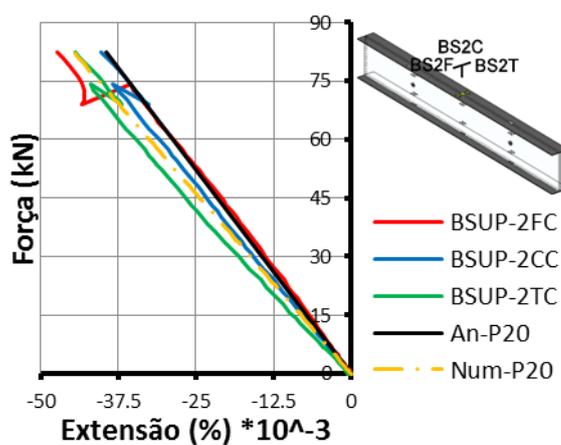


Figura 5.27-Extensão para o Agrupamento P20.

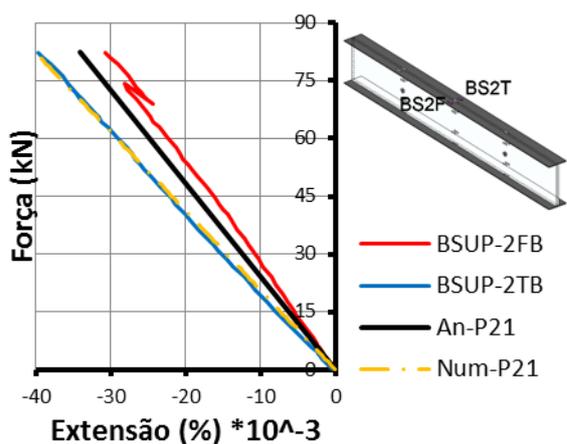


Figura 5.28-Extensão para o Agrupamento P21.

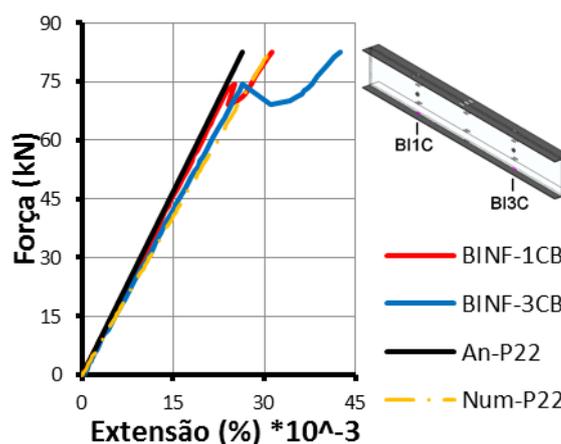


Figura 5.29-Extensão para o Agrupamento P22.

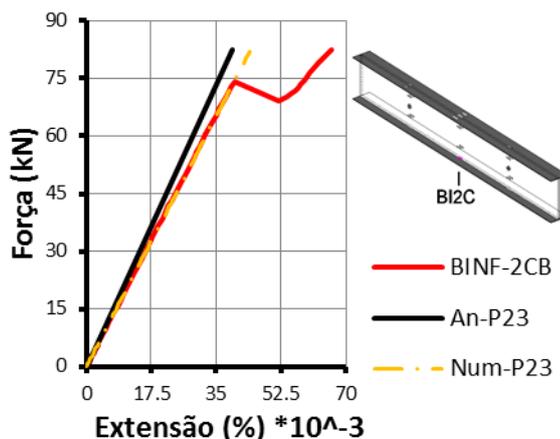


Figura 5.30-Extensão para o Agrupamento P23.

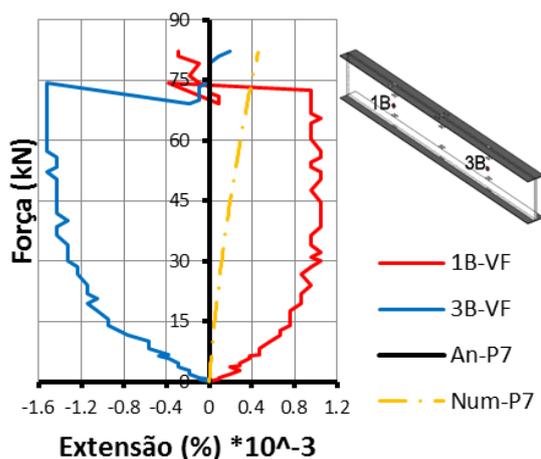


Figura 5.31 -Extensão para o Agrupamento P7.

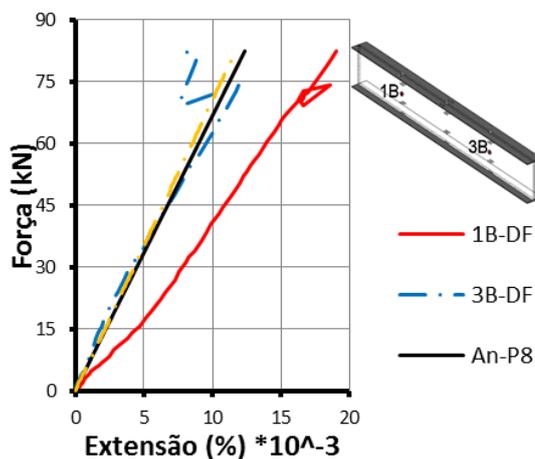


Figura 5.32 -Extensão para o Agrupamento P8.

Os gráficos das figuras seguintes mostram os resultados dos deflectómetros verticais obtidos numericamente e a sua respetiva comparação com os valores experimentais e analíticos. Pode verificar-se que tanto para o deslocamento a meio vão (Figura 5.34) como para os deslocamentos nas seções 1 e 3 (Figura 5.33), os resultados obtidos através do programa *Abaqus* são bastante próximo dos obtidos analiticamente e experimentalmente, até a formação da primeira fenda ( $F=75$  kN). Este acontecimento deve-se seguramente ao facto de se considerar apenas uma análise linear no modelo numérico.

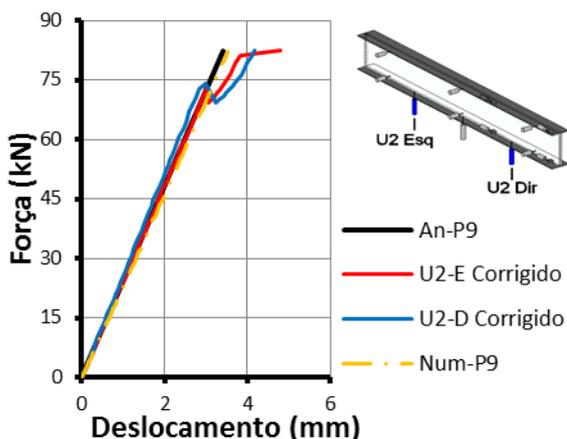


Figura 5.33-Deslocamento para o Agrupamento P9.

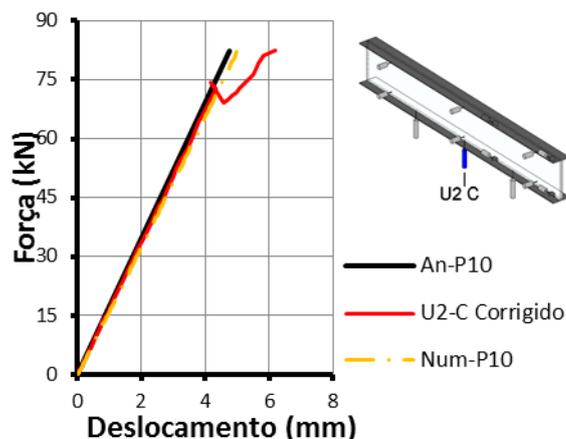


Figura 5.34-Deslocamento para o Agrupamento P10.

Os resultados numéricos seguintes (Figura 5.35 à Figura 5.38) referentes aos deslocamentos fora do plano da estrutura mostram uma disparidade entre os resultados obtidos a partir do modelo com os obtidos experimentalmente. Tal discrepância deve-se ao facto de não se considerar imperfeições geométricas da viga híbrida no modelo numérico, o que não acontece a nível experimental. As imperfeições das vigas ensaiadas experimentalmente encontram-se referidas no Anexo A. No entanto, como era de esperar, os valores numéricos são semelhantes aos analíticos, uma vez que nestes também não se tem em conta as imperfeições da viga.

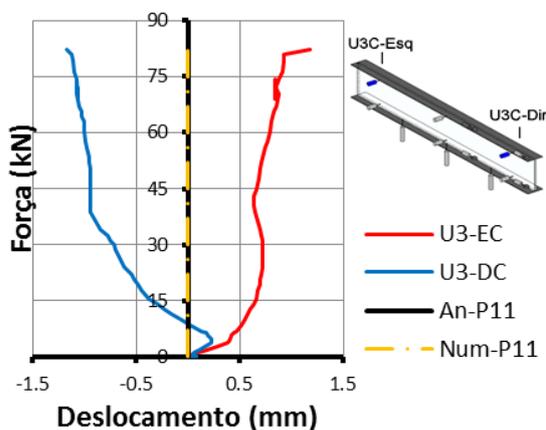


Figura 5.35-Deslocamento para o Agrupamento P11.

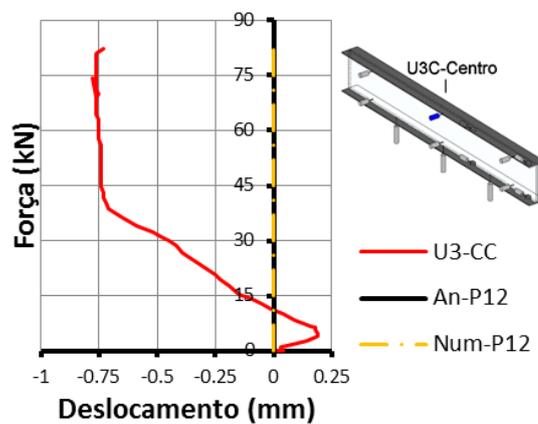


Figura 5.36-Deslocamento para o Agrupamento P12.

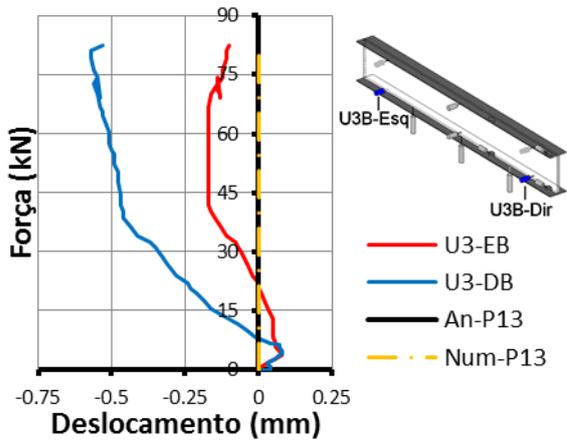


Figura 5.37-Deslocamento para o Agrupamento P13.

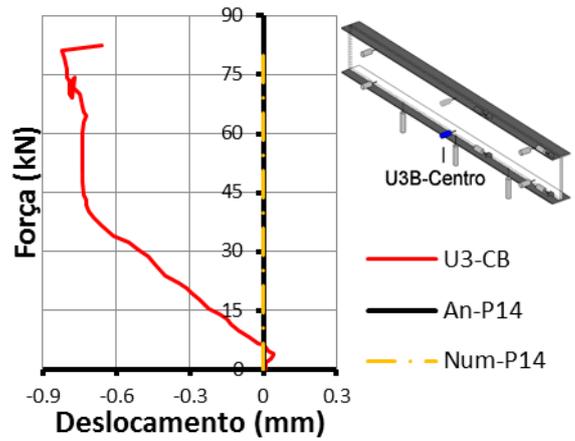


Figura 5.38-Deslocamento para o Agrupamento P14.

Os resultados seguintes mostram o escorregamento existente entre a alma de vidro e os banzos metálicos obtidos a partir do modelo numérico e do ensaio experimental (Figura 5.39 e Figura 5.40). Verifica-se que existe alguma discrepância entre os resultados numéricos e experimentais, devendo-se provavelmente as propriedades do adesivo definidas no programa *Abaqus*.

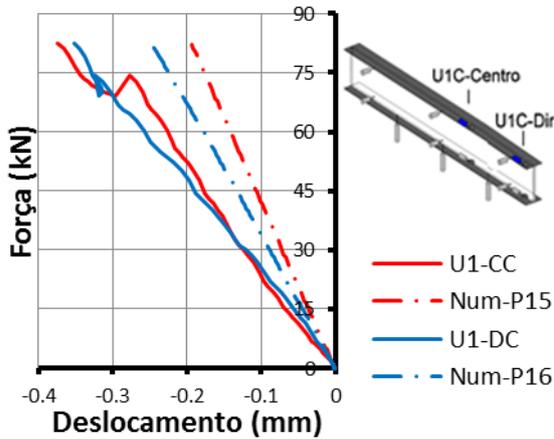


Figura 5.39-Deslocamento para o Agrupamento P15 e P16.

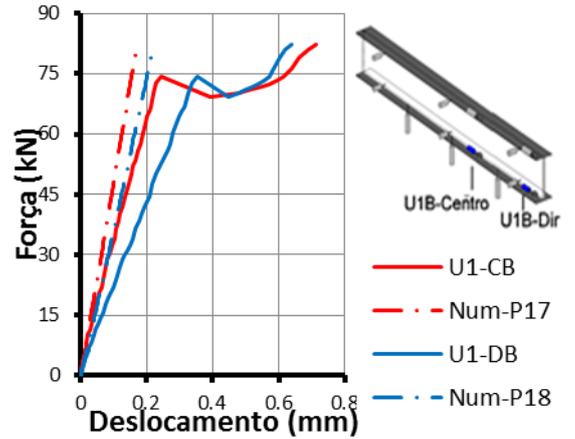


Figura 5.40-Deslocamento para o Agrupamento P17 e P18.

A Figura 5.41 mostra as curva tensão vs. distorção obtidas através dos resultados numéricos, apresentados anteriormente, relativamente ao escorregamento entre os banzos e a alma, bem como a sua comparação com os resultados experimentais. Assim, verifica-se que o adesivo introduzido no programa *Abaqus* é menos deformável que o existente nas vigas ensaiadas experimentalmente. Tal facto, deve-se certamente as características do adesivo introduzidas no modelo. As Figuras 5.42 e 5.43 mostram a comparação dos resultados obtidos

numericamente com os obtidos nos ensaios à escala reduzida bem como os respectivos módulo de distorção.

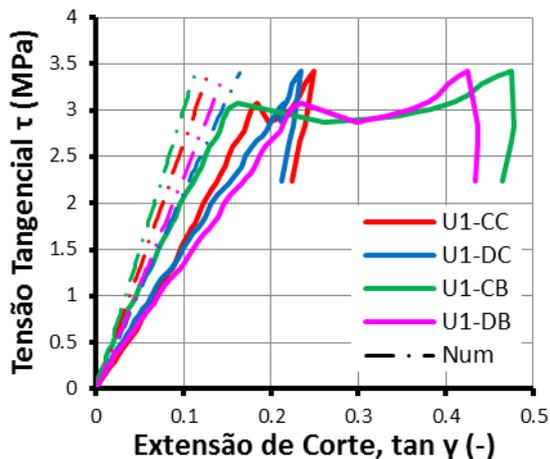


Figura 5.41 - Curvas Tensão tangencial vs. Extensão de corte no adesivo.

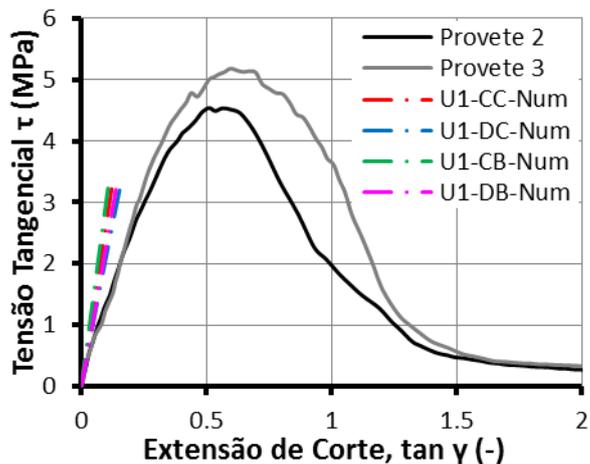


Figura 5.42 - Comparação com os resultados do ensaio de corte à escala reduzida

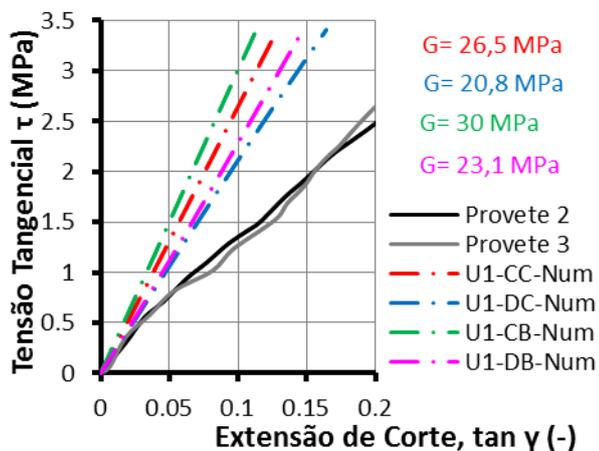


Figura 5.43 – Pormenorização da comparação com os resultados do ensaio de corte à escala reduzida.

## 6 CONCLUSÕES

Após apresentados os resultados e uma breve discussão sobre eles, apresentam-se as conclusões mais relevantes.

Os resultados experimentais obtidos são consistentes e permitem descrever de forma adequada o comportamento das vigas analisadas. A consistência e qualidade dos resultados experimentais são aferidas por comparação com resultados de análises afins, mas principalmente pela análise de valores marcadores e pontos de medição redundantes previstos na campanha experimental.

Os resultados analíticos e numéricos são consistentes com os resultados experimentais em regime linear, quer em termos de extensões como em termos de deformações. Desta forma têm-se modelos numéricos validados experimentalmente que descrevem o real comportamento das vigas em estudo. De igual forma, têm-se modelos analíticos que podem ser usados para análise, dimensionamento e verificação de segurança de tais estruturas.

Os resultados obtidos permitiram qualificar e quantificar o real benefício conseguido ao adicionar os banzos metálicos à viga de vidro, ou seja, o benefício da solução híbrida em relação à solução não híbrida. De facto, a inclusão dos banzos metálicos permite ultrapassar as desvantagens inerentes à utilização das vigas de vidro simples, proporcionando-lhes um aumento de resistência, adicionando-lhe uma rotura dúctil. Para além disso, verificou-se que os banzos oferecem uma maior estabilidade à viga, diminuindo as suas deformações fora do plano.

## 7 PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTUROS

Neste capítulo é apresentado algumas sugestões de desenvolvimentos futuros no âmbito de aprofundar os conhecimentos na temática das vigas híbridas vidro-aço.

Sendo nesta dissertação o estudo de vigas híbridas de vidro e aço efectuado através de uma ligação por colagem direta e linear dos dois materiais, seria interessante analisar, para a mesma geometria da viga, estudar novas tipologias da ligação entre os banzos metálicos e a alma de vidro e analisar as possíveis diferenças face à ligação adoptada.

A ligação dos banzos metálicos com a alma de vidro das vigas híbridas estudada neste documento é realizada através do adesivo Sikaforce 7710 L100. Sendo este adesivo um poliuretano (elástico), seria interessante estudar o comportamento das mesmas vigas híbridas, alterando o tipo de adesivo usado na ligação.

Sendo já realizado no âmbito do projecto S-GLASS, um estudo paramétrico do tipo de acção aplicada à viga de vidro laminado, seria também interessante realizar o mesmo estudo paramétrico aplicado a viga híbrida estudada nesta dissertação, ou seja, analisar o seu comportamento face à acção térmica bem como à acção cíclica, comparando os resultados obtidos para cada caso com os obtidos no âmbito do projecto S-GLASS.

Sendo o estudo numérico apresentado nesta dissertação apenas correspondente à fase linear do comportamento das vigas seria interessante realizar uma análise sobre a ductilidade e a resistência residual das mesmas. Para isso, seria necessário modelar o comportamento pós-fendilhação das vigas nomeadamente através da introdução da sub-rotina “brittle cracking” existente na biblioteca do *Abaqus*, ou outra que incorpore a mecânica de fratura do vidro.

Sendo os resultados numéricos referentes ao escorregamento entre os banzos metálicos e a alma de vidro ligeiramente diferentes dos resultados experimentais e sendo esta diferença provavelmente relacionada com a caracterização do adesivo, seria importante realizar novos ensaios à escala reduzida, ou seja, de corte e de tracção do mesmo adesivo e compara-los com os obtidos nesta dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abeln et al., 2013

Abeln B, Preckwinkel E, Yandzio E, Heywood M, Eliasova M, Netusil M, Grenier C, 'Development of innovative steel-glass structures in respect to structural and architectural design (Innoglast)', Final report, 2013.

Antonelli et al., 2008

Antonelli A, Cagnacci E, Giordano S, Orlando M, Spinelli P, 'Experimental and Theoretical Analysis of C-FRP Reinforced Glass Beams', Proceedings of ISAAG 2008 Conference, pg. 171-182, Munich, 2008.

Belis, 2009

Belis, J. [et al.] - Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature. Engineering Failure Analysis, 16, 1866-1875, 2009.

Cruz & Pequeno, 2008a

Cruz P, Pequeno J, 'Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions', Proceedings of Challenging Glass, pg. 439-448, 2008.

Cruz & Pequeno, 2008b

Cruz P, Pequeno J, 'Structural Timber-Glass Adhesive Bonding', Proceedings of Challenging Glass, pg. 205-214, 2008.

Cruz et al., 2012

Cruz P, Valente I, Alves L, Silva LS, Jordão S, 'Projecto S-GLASS – Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente, Basic-Glass: Regras básicas para o projecto estrutural de vigas de vidro.

Freitag, 2004

Freitag B, 'Glass-Concrete Composite Technology', Structural Engineering International 2/2004, pg. 111-117.

Haldimann, 2006

Haldimann M, 'Fracture Strength of Structural Glass Elements – Analytical and numerical modelling, testing and design', Dissertation No 3671, Lausanne: EPFL, 2006.

Jordão et al., 2013

Jordão S, Simões LS, Santiago A, Cruz P, Valente I, Carvalho P e Alves L, 'Projeto S-GLASS – Desempenho Estrutural e Regras de Projecto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente', FCTUC e UMinho, 2013.

Jordão et al., 2014

Jordão S, Pinho M, Costa Neves L, Martins P, Santiago A, 'Behaviour of laminated glass beams reinforced with pré-stressed cables', Steel construction, vol. 7, September 2014, ISSN1867-0520.

Kennedy, 1997

Kennedy R, 'The history and future of the flat glass industry', Jan Belis (Eds.), Glass Processing days, 13-15 Sept. 1997, Tampere, Finland, ISBN 952-90-8959-7, pg. 28-36.

Kozlowski, 2012

Kozlowski M, 'Hybrid Glass Beams. Review of Research Projects and Applications', Architecture Civil Engineering Environment, pg. 53-62. The Silesian University of Technology, 2012.

Louter, 2004

Louter PC, 'Ontwikkeling van een glazen overkapping constructie', Mater Thesis. TU Delft, 2004.

Louter et al., 2005

Louter PC, Belis J, Veer FA, Hobbelman GJ, 'Reinforced glass cantilever beams', In J Vitkala (Ed.), Glass processing days, pg. 429-433, 2005.

Louter, 2011

Louter PC, 'Fragile yet Ductile, Structural Aspects of Reinforced Glass Beams', Technische Universiteit Delft, 2011.

Netusil, 2011

Netusil, M. (2011). “Hybrid Steel-Glass Beams”. Tese de Doutorado, Department of Steel and Timber Structures, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, Prague.

Netusil & Eliasova, 2011

Netusil M, Eliasova M, ‘Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive’, Glass Processing Days, 2011.

Nielsen, 2009

Nielsen JH, ‘Tempered Glass: bolted connections and related problems’, Dissertation, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2009.

Palumbo, Palumbo & Mazzuchelli, 2005

Palumbo D, Palumbo M, Mazzuchelli M, ‘A New Roof for the XIIIth Century “Loggia de Vicari” (Arquà Petrarca - PD - Italy) Based on Structural Glass Trusses: a Case Study’, Glass processing days, 2005.

Ungermann & Preckwinkel, 2010

Ungermann D, Preckwinkel E, ‘Structural Behaviour of Hybrid Steel-Glass Beams’, Proceedings of Challenging Glass 2, pg. 485-495, 2010.

Valarinho, 2010

Valarinho LG, Construção em vidro Estrutural – Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP. IST.

Wellershoff & Sedlacek, 2003

Wellershoff F, Sedlacek G, ‘Structural Use of Glass in Hybrid Elements: Steel-Glass Beams, Glass-GFRP-Plates’, Proceedings of Glass processing days, pg 228-270, 2003.

## ANEXOS

### Anexo A – Medição das imperfeições das vigas híbridas

Neste anexo encontram-se as medições das imperfeições relativamente a largura e espessura do banzo inferior e superior bem como as imperfeições da ortogonalidade da alma de vidro em relação aos banzos. As medições das espessuras dos banzos foram efectuadas em vários pontos ao longo dos seus comprimentos e encontram resumidas no Quadro A.1 e no Quadro A.2, correspondente respectivamente aos banzos da primeira e segunda viga híbrida.

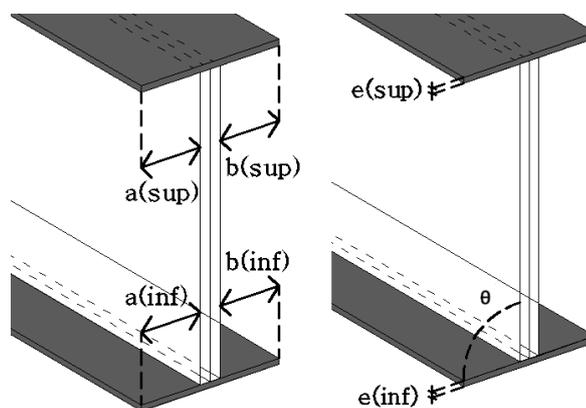


Figura A.1 - Representação das medições consideradas.

A Figura A.1 ilustra o tipo de medições efectuadas para uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

Quadro A.1 - Medições da espessura dos banzos (Viga 1).

Elemento	Medição (mm)	Localização da medição (mm)								
		0	375	750	1125	1500	1875	2250	2650	3000
Banzo Inferior	25	-	10,02	10,03	10,05	10,07	10,04	10,00	10,00	-
	50	-	10,04	10,03	10,05	10,07	10,05	10,00	10,01	-
	75	-	10,03	10,02	10,07	10,04	10,05	10,00	10,01	-
Banzo Superior	25	-	10,01	10,03	10,05	10,02	10,03	10,02	10,01	-
	50	-	10,04	10,01	10,05	10,01	10,04	10,01	10,04	-
	75	-	10,02	10,02	10,03	10,02	10,02	10,01	10,03	-

Quadro A.2 - Medições da espessura dos banzos (Viga 2).

Elemento	Medição (mm)	Localização da medição (mm)								
		0	375	750	1125	1500	1875	2250	2650	3000
Banzo Inferior	25	-	10,00	9,92	9,95	9,94	10,04	9,94	10,00	-
	50	-	10,02	9,90	9,95	9,92	9,98	9,96	10,02	-
	75	-	10,03	9,95	9,95	9,92	9,99	9,94	10,00	-
Banzo Superior	25	-	10,00	9,94	10,07	9,95	10,12	9,94	10,02	-
	50	-	9,97	9,90	10,00	9,93	10,05	9,91	9,98	-
	75	-	10,00	9,92	10,02	9,95	10,07	9,91	10,00	-

O Quadro A.3 contém as medições das imperfeições correspondentes ao comprimento “a” e “b” representados na Figura A.1. Para além disso também contém as medições a ortogonalidade da alma de vidro em relação aos banzos metálicos. No entanto é de referir que estas medições não foram efectuadas para o ensaio da primeira viga.

Quadro A.3 - Medições das imperfeições (Viga 2).

Elemento	Medição	Localização da medição (cm)								
		0	25	50	75	100	125	150	175	200
Banzo Inferior	a (mm)	40	39	39,5	40	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
	b (mm)	39	39	39,5	38,5	39	39	39	39	39
	L (mm)	100,52	99,52	100,52	100,02	100,02	100,02	100,02	100,02	100,02
Banzo Superior	a (mm)	39,5	39,5	39,5	38,5	41	41	41	41	41
	b (mm)	39,5	39	39	40	38	38	38	38	38
	L (mm)	100,52	100,02	100,02	100,02	100,52	100,52	100,52	100,52	100,52
Alma de Vidro	$\theta$ (°)	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5

## Anexo B – Caracterização das propriedades do aço

Neste anexo encontra-se a definição da geometria dos provetes para a caracterização das propriedades do aço bem como o procedimento de cálculo relativo ao tratamento de resultados.

### B1. Geometria dos provetes de aço

Os provetes são planos, proporcionais e definidos pela norma ISO 6892-1 preconizadas nas equações representadas no Quadro B.1. A geometria dos provetes em aço é representada na Figura B.1.

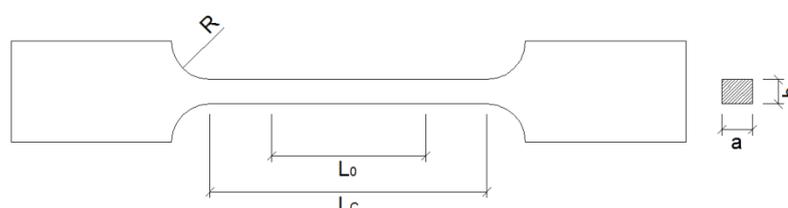


Figura B.1 - Geometria dos provetes usados nos ensaios de tracção.

Quadro B.1 – Equações preconizadas pela ISO 6892-1 para a definição da geometria dos provetes.

Dimensões	Descrição	Equação	Valor
$L_0$ (mm)	Comprimento inicial do	$= 5,65 \times \sqrt{ab}$ (1)	50
$L_0$ (mm)	Comprimento inicial do	$> 20mm$ (2)	
$L_c$ (mm)	Comprimento da zona útil do	$\geq L_0 + 1,5 \times \sqrt{ab}$ (3)	65
$R$ (mm)	Raio de transição do provete	$> 12mm$ (4)	12,5
$a$ (mm)	Espessura do provete	-	10
$b$ (mm)	Largura do provete	$< 8a$ (5)	8

O comprimento total dos provetes encontra-se limitado às dimensões da chapa da qual foram retirados os provetes e da abertura mínima entre garras da prensa utilizada para os ensaios. Sendo as dimensões da chapa de 500 x 150 mm e sendo a largura necessária para um provete de  $8+12,5+12,5=33mm$ , optou-se por cortar as chapas em quatro elementos na sua largura de 500 x 37,5 mm.

A norma ISO 6892-1 recomenda ainda a medição dos valores “a” e “b” em pelo menos três secções diferentes entre o comprimento  $L_c$ . Assim realizaram-se medições através de um paquímetro cuja precisão é de 0,05mm. As medidas lidas em cada provete encontram-se localizadas na Figura B.2 e as medições obtidas encontram-se registadas no Quadro B.2.

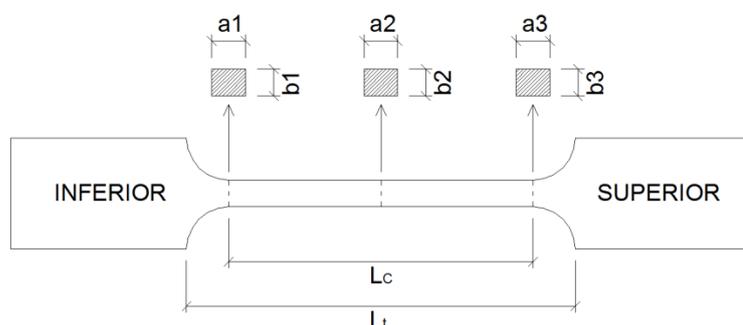


Figura B.2 - Localização das medições dos provetes.

Quadro B.2 - Medições dos provetes.

Proвете	a1	a2	a3	b1	b2	b3
1	10.00	9.95	9.95	8.15	8.15	8.15
2	10.00	10.00	10.00	8.05	8.00	8.05
3	10.00	10.00	10.00	8.05	8.00	8.10

## B2. Procedimento de cálculo

A Figura B.3 ilustra, a vermelho, a curva tensão com a extensão obtida do ensaio experimental, na qual a tensão é obtida pelo coeficiente entre a força e a área inicial do provete. Esta curva é denominada por curva aparente, dado que não corresponde à verdadeira curva constitutiva do material. Na curva verdadeira, a azul, a tensão é calculada tendo em conta a área real em cada instante.

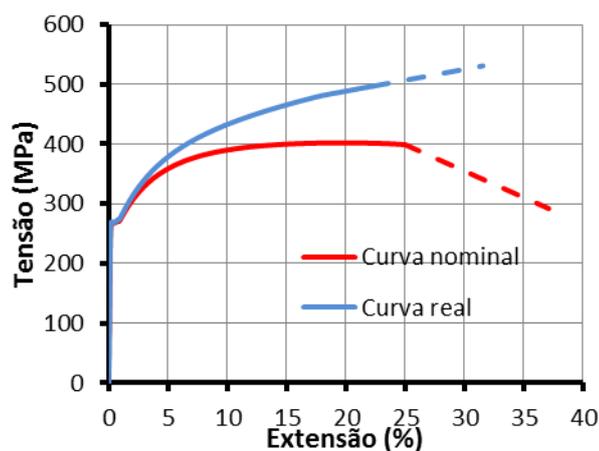


Figura B.3 - Curva tensão vs. extensão.

A avaliação efectiva da área em cada instante do ensaio requer a utilização de equipamentos e procedimentos mais complexos, pelo que importa recorrer a procedimentos mais acessíveis. Considerando volume constante e distribuição homogénea de deformação ao longo da zona útil do provete, podem ser deduzidas equações para a tensão e para a extensão verdadeira que levam à determinação da secção em cada instante.

$$\sigma^* = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon)$$

Onde  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma^*$  e  $\varepsilon^*$  representam a tensão e extensão aparente e verdadeira, respectivamente. Dados os princípios considerados na dedução das equações anteriores (volume constante e distribuição homogénea de deformação), o seu campo de aplicabilidade fica limitado ao ponto ao campo correspondente ao início da estricção. A partir daí o material entra num estado de instabilidade mecânica. Nessa situação verifica-se a formação de uma região estriccionada, correspondente a uma irregularidade, que conduz a um estado de tensão triaxial, a partir do qual é relativamente complexo determinar a lei constitutiva com rigor. No entanto, existem várias expressões de aproximação à curva constitutiva para o troço pós instabilidade, sendo que se optou por usar a formulação preconizadas pelo RILEM, apêndice C: Mathematical expression for true stress logarithmic strain relation [21 Cap.2, 1990], exposta em seguida.

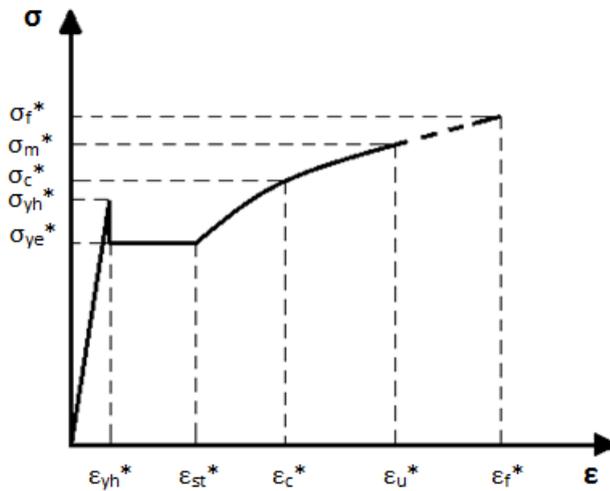


Figura B.4 - Curva real de um material dúctil com patamar de cedência e endurecimento

A formulação para a curva real depende da zona da curva representada na Figura 4.6, assim:

- |                        |  |
|------------------------|--|
| 1. Domínio elástico    | $0 < \varepsilon^* < \varepsilon_{yh}^* \dots \dots \dots \sigma^* = E\varepsilon^*$                           |
| 2. Patamar de cedência | $\varepsilon_{yh}^* < \varepsilon^* < \varepsilon_{st}^* \dots \dots \dots \sigma^* = \sigma_{st}^*$           |
| 3. Endurecimento       | $\varepsilon_{st}^* < \varepsilon^* < \varepsilon_u^* \dots \dots \dots \sigma^* = C_1(\varepsilon^* - C_2)^n$ |
| 4. Estricção           | $\varepsilon_u^* < \varepsilon^* < \varepsilon_f^* \dots \dots \dots \sigma^* = C_3\varepsilon^* + C_4$        |

Onde:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{yh}^* &= \frac{f_{yh}}{(E-2\nu f_{yh})} & \sigma_{yh}^* &= E\varepsilon_{yh}^* & \varepsilon_{st}^* &= \ln(1 + \varepsilon_{st}) \\ \sigma_{st}^* &= (1 + \varepsilon_{st})\sigma_{st} & \varepsilon_u^* &= \ln(1 + \varepsilon_u) & \sigma_u^* &= (1 + \varepsilon_u)f_{max} \\ \sigma_c^* &= \sqrt{\sigma_{st}^*\sigma_u^*}\end{aligned}$$

Com:

$$\begin{aligned}C_2 &= \frac{\varepsilon_{st}^*\varepsilon_u^* - (\varepsilon_c^*)^2}{\varepsilon_{st}^* + \varepsilon_u^* - 2\varepsilon_c^*} & n &= \frac{\ln(\sigma_u^*) - \ln(\sigma_{st}^*)}{2[\ln(\varepsilon_u^* - \varepsilon_{st}^*) - \ln(\varepsilon_u^* - \varepsilon_c^*)]} & C_1 &= \frac{\sigma_{st}^*}{(\varepsilon_{st}^* - C_2)} \\ \varepsilon_f^* &= \ln\left(\frac{A_0}{A_F}\right) & \sigma_f^* &= \frac{F_r}{A_f} & C_3 &= \frac{\sigma_f^* - \sigma_u^*}{\varepsilon_f^* - \varepsilon_u^*} \\ C_4 &= \frac{\sigma_u^*\varepsilon_f^* - \sigma_f^*\varepsilon_u^*}{\varepsilon_f^* - \varepsilon_u^*}\end{aligned}$$

$C_1, C_2, C_3, C_4$  - Constantes da expressão matemática de aproximação à curva real  $\sigma^* - \varepsilon^*$

$n$  - Constante exponencial da expressão matemática de aproximação à curva real  $\sigma^* - \varepsilon^*$

$\varepsilon^*$  - Extensão logarítmica (real)

$\varepsilon_{yh}^*$  - Extensão logarítmica correspondente à tensão de cedência superior

$\varepsilon_{st}^*$  - Extensão logarítmica correspondente à tensão para a qual se inicia o endurecimento na curva aparente

$\varepsilon_c^*$  - Extensão logarítmica correspondente à tensão máxima da curva aparente

$\varepsilon_u^*$  - Extensão logarítmica correspondente à tensão para a qual se inicia a estricção na curva aparente

$\varepsilon_f^*$  - Extensão logarítmica correspondente à tensão de rotura da curva aparente

$\sigma^*$  - Tensão real na secção transversal do provete

$\sigma_c^*$  - Tensão real que corresponde à extensão máxima da curva aparente

$\sigma_{yh}^*$  - Tensão real que corresponde à tensão de cedência superior da curva aparente

$\sigma_{st}^*$  - Tensão real que corresponde à tensão para a qual se inicia o endurecimento na curva aparente

$\sigma_c^*$  - Tensão real que corresponde à tensão máxima da curva aparente

$\sigma_u^*$  - Tensão real que corresponde à tensão para a qual se inicia a estricção na curva aparente

$\sigma_f^*$  - Tensão real que corresponde à tensão de rotura da curva aparente

## Anexo C – Caracterização das propriedades do adesivo

Neste anexo encontra-se a definição da geometria dos provetes para a caracterização das propriedades do adesivo para os ensaios de tracção.

### C1. Geometria dos provetes do adesivo à tracção

A geometria dos provetes foi realizada segundo a norma ASTM D 638 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, que para a caracterização do adesivo faz uma distinção entre materiais rígidos e semi-rígidos com materiais não rígidos e materiais de compósitos reforçados. O adesivo em questão é um poliuretano (material rígido e semi-rígido). Para esta categoria a norma permite a possibilidade de escolha de entre 5 tipos de geometrias predefinidas. Analisando cada tipo de geometria e, dado que não se possui informação suficiente sobre a possível localização da rotura, optou-se pela geometria do tipo 2, no entanto de modo a garantir que a rotura se dê na zona mais diminuta do provete procedeu-se a alteração da dimensão  $W_0$  de 19 mm para 25 mm. A geometria e as respectivas dimensões do provete encontram-se indicadas na Figura C.1.

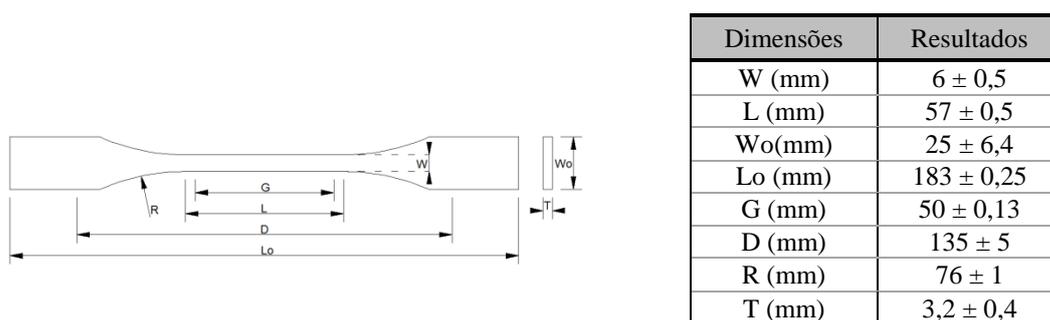


Figura C.1 - Geometria dos provetes.

Quanto à espessura do provete a norma referida indica que para provetes moldados, esta seja de  $3.2 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm}$ . No entanto a espessura dos provetes foi limitada pela espessura da madeira usada nos moldes, que foi de 3 mm. As dimensões W e T dos provetes foram medidas previamente antes do ensaio e encontram-se no Quadro C.1.

Quadro C.1 - Medições dos provetes.

Provete	Dimensão	Superior	Médio	Inferior
Provete 1	W	12,70	12,85	12,85
	T	2,55	2,80	3,00
Provete 2	W	13,20	13,20	13,00
	T	3,00	3,00	2,90
Provete 3	W	12,65	12,80	12,80
	T	2,80	2,70	2,70

## Anexo D – Caracterização das propriedades do vidro

Neste anexo encontra-se a definição da geometria dos provetes para a caracterização das propriedades do vidro para os ensaios de flexão em quatro pontos.

### D1. Geometria dos provetes do vidro

A geometria do provete foi baseada na norma EN 1288-3:2000 Glass in buildings – Determination of the bending strength of glass – Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending). No entanto, foi condicionada pelas características do equipamento disponível em laboratório. Na impossibilidade de realizar os ensaios de caracterização com as dimensões recomendadas na norma EN 1288, optou-se por realizar os referidos ensaios em provetes de menores dimensões, mantendo uma relação  $L/b$  relativamente próxima (Norma:  $L = 1000$  mm e  $b = 360$  mm | Ensaio:  $L = 300$  mm e  $b = 100$  mm) (Figura D.1).

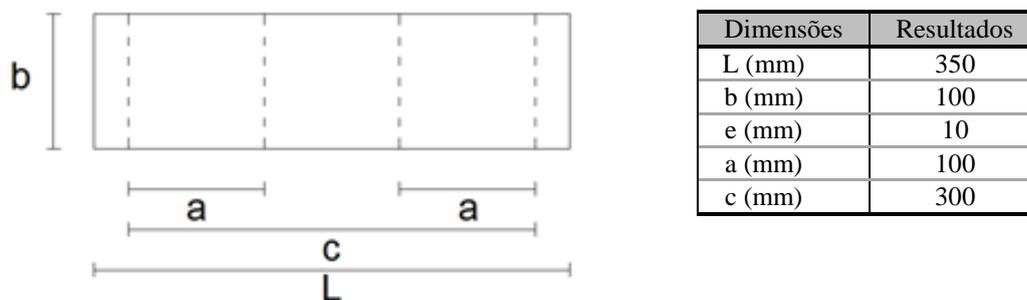


Figura D.1 - Representação dos provetes em planta (Jordão, 2013).

## Anexo E – Instrumentação dos ensaios à escala real

### E1. Instrumentação do sistema de referência

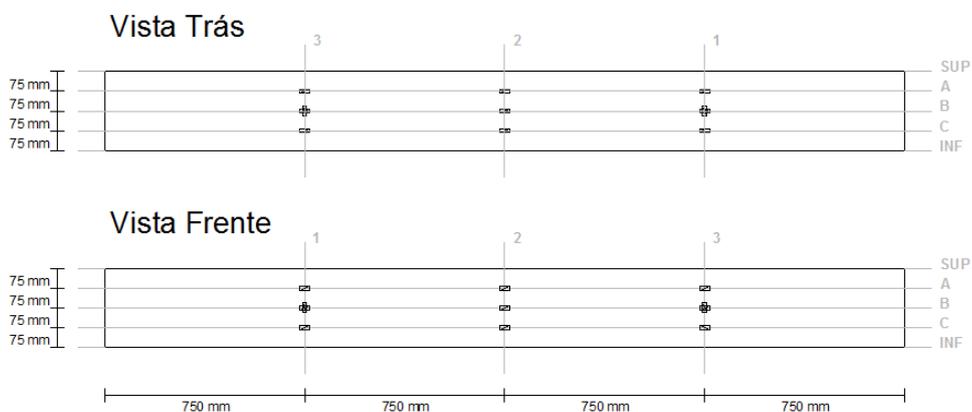


Figura E.1-Representação esquemática da instrumentação com extensómetros eléctricos (Jordão, 2013)

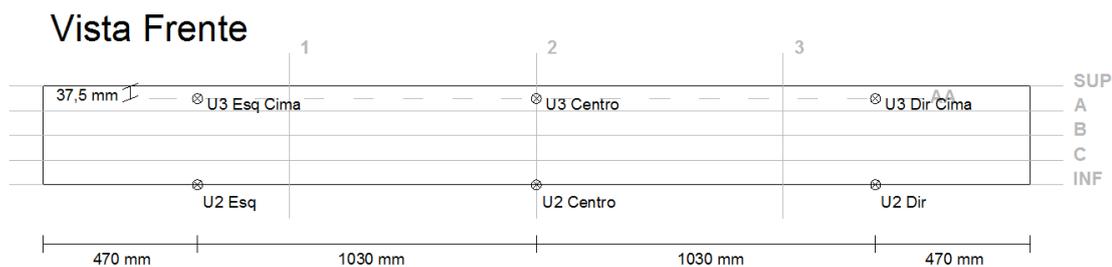


Figura E.2 - Representação esquemática da instrumentação com deflectómetros (Jordão, 2013)

### E2. Instrumentação do sistema híbrido

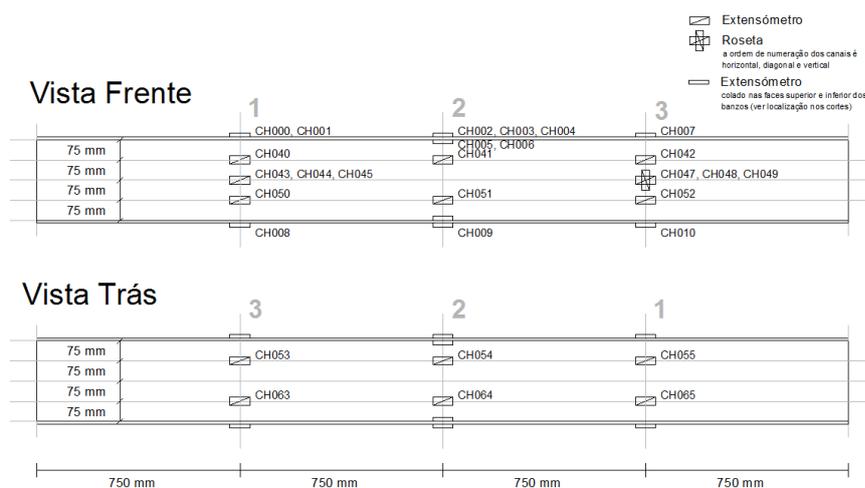


Figura E.3 - Representação esquemática da instrumentação com extensómetros eléctricos.

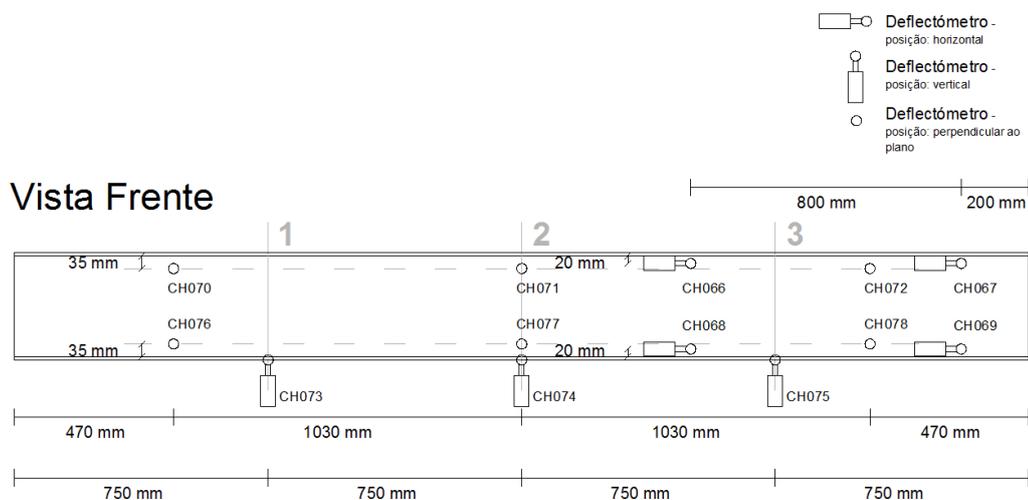


Figura E.4 - Representação esquemática da instrumentação com deflectómetros

Quadro E.1 - Definição da Instrumentação usada nos ensaios.

Nome do agrupamento	Pontos de leitura (Viga de referência)	Pontos de leitura (Viga híbrida)	Parâmetro medido
P1	1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás	1A-Frente 3A-Frente 1A-Trás 3A-Trás	Extensão na horizontal
P2	1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás	1B-Horizontal-Frente 3B-Horizontal-Frente 1B-Horizontal-Trás 3B-Horizontal-Trás	Extensão na horizontal
P3	1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás	1C-Frente 3C-Frente 1C-Trás 3C-Trás	Extensão na horizontal
P4	2A-Frente 2A-Trás	2A-Frente 2A-Trás	Extensão na horizontal
P5	2B-Frente 2B-Trás	2B-Frente 2B-Trás	Extensão na horizontal
P6	2C-Frente 2C-Trás	2C-Frente 2C-Trás	Extensão na horizontal
P7	1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Trás 3B-Trás	1B-Vertical-Frente 3B-Vertical-Frente 1B-Trás 3B-Trás	Extensão na vertical
P8	1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás	1B-Diagonal-Frente 3B-Diagonal-Frente 1B-Diagonal-Trás 3B-Diagonal-Trás	Extensão na diagonal (45°)
P9	U2-Esq. U2-Dir.	U2-Esq. U2-Dir.	Deformação vertical
P10	U2-Centro	U2-Centro	Deformação vertical
P11	U3-Esq. U3-Dir.	U3-Esq-Cima U3-Dir-Cima	Deformação horizontal
P12	U3-Centro	U3-Centro-Cima	Deformação horizontal

---

Nome do agrupamento	Pontos de leitura (Viga de referência)	Pontos de leitura (Viga híbrida)	Parâmetro medido
P13	-	U3-Esq-Baixo U3-Dir-Baixo	Deformação horizontal
P14	-	U3-Centro-Baixo	Deformação horizontal
P15	-	U1-Centro-Cima	Deformação horizontal
P16	-	U1-Dir-Cima	Deformação horizontal
P17	-	U1-Centro-Baixo	Deformação horizontal
P18	-	U1-Dir-Baixo	Deformação horizontal
P19	-	BSUP1-Frente-Cima BSUP1-Centro-Cima BSUP3-Centro-Cima	Extensão na horizontal
P20	-	BSUP2-Frente-Cima BSUP2-Centro-Cima BSUP2-Trás-Cima	Extensão na horizontal
P21	-	BSUP2-Frente-Baixo BSUP2-Trás-Baixo	Extensão na horizontal
P22	-	BINF1-Centro-Baixo BINF3-Centro-Baixo	Extensão na horizontal
P23	-	BINF2-Centro-Baixo	Extensão na horizontal

## Anexo F – Resultados

### F1. Resultados experimentais do sistema de referência

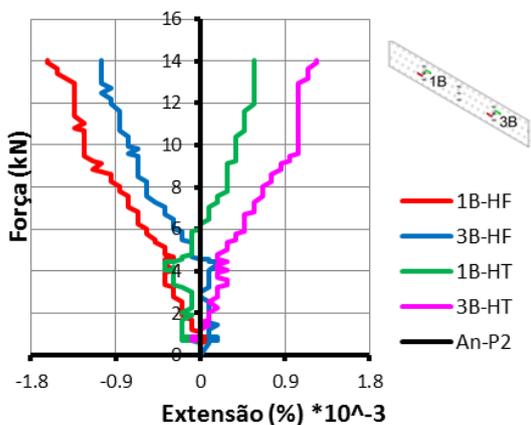


Figura F.1 -Extensão para o Agrupamento P2.

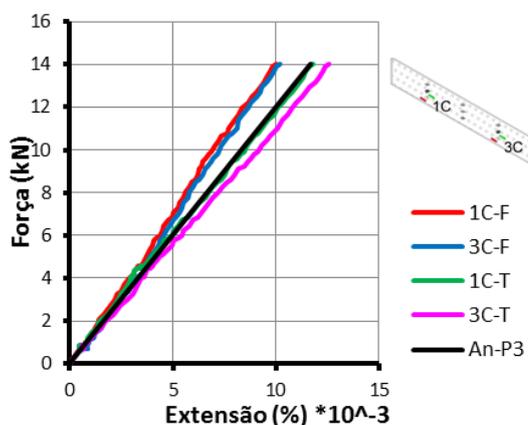


Figura F.2 -Extensão para o Agrupamento P3.

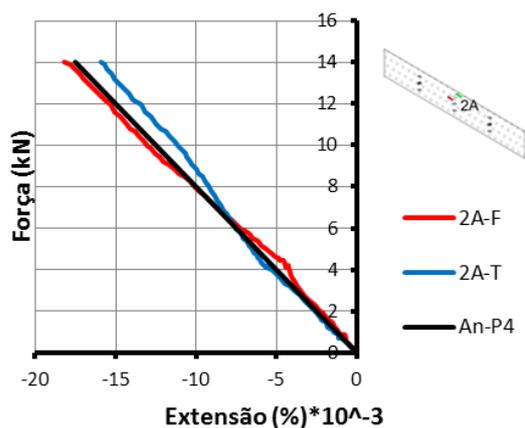


Figura F.3 -Extensão para o Agrupamento P4.

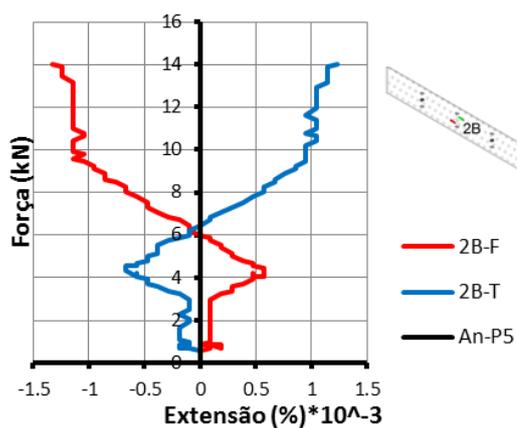


Figura F.4 -Extensão para o Agrupamento P5.

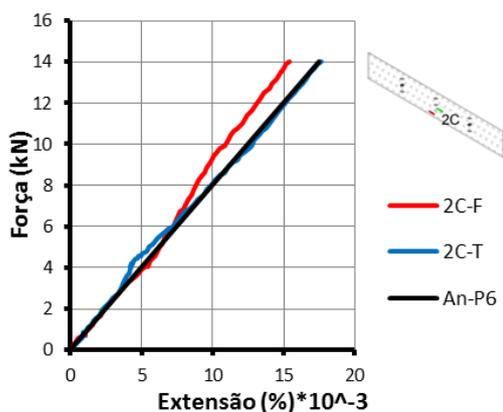


Figura F.5 -Extensão para o Agrupamento P6.

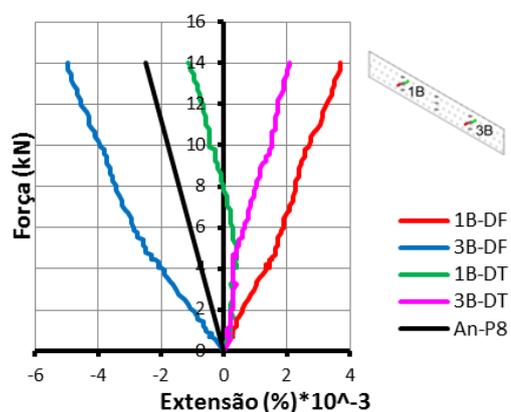


Figura F.6 -Extensão para o Agrupamento P8.

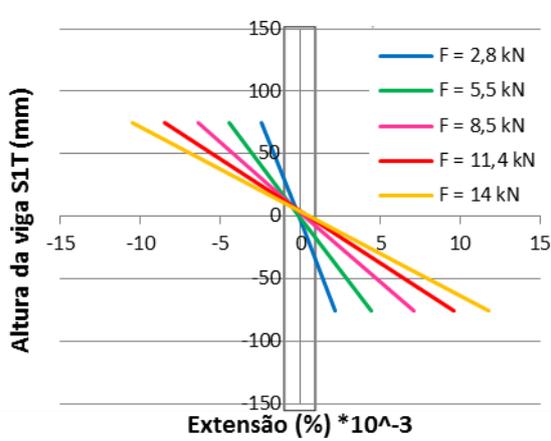


Figura F.7 - Secção 1 trás.

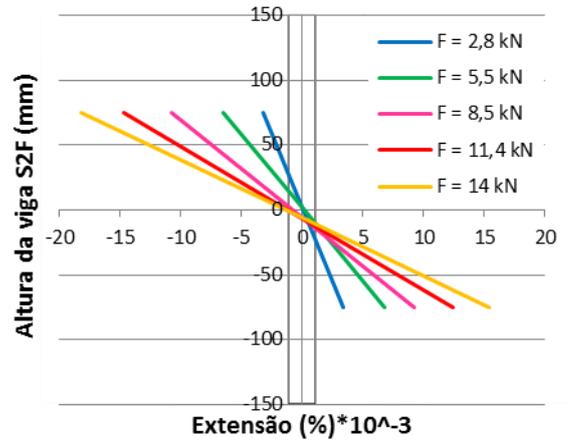


Figura F.8 - Secção 2 frente.

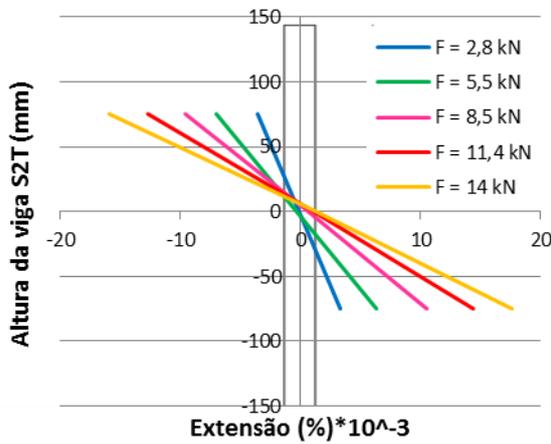


Figura F.9 - Secção 2 trás.

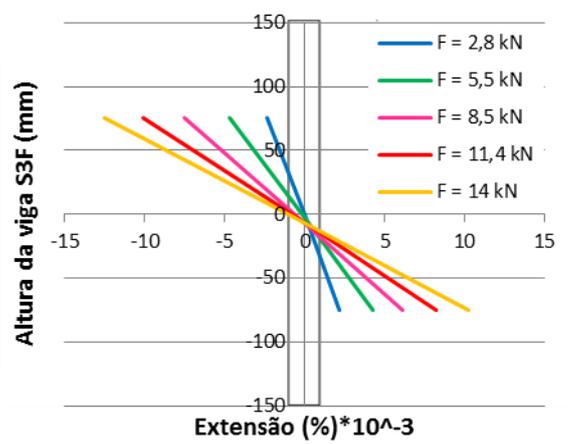


Figura F.10 - Secção 3 frente.

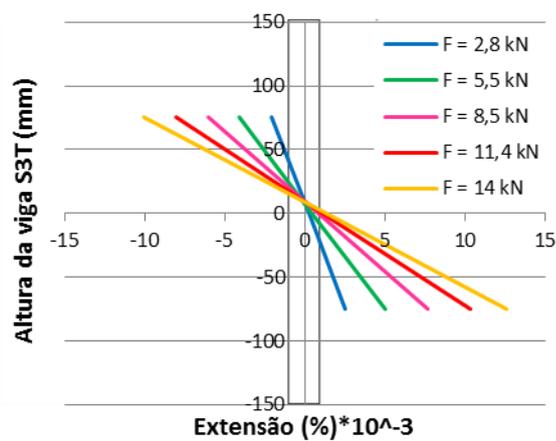


Figura F.11 - Secção 3 trás.

**F2. Resultados numéricos do sistema do sistema de referência**

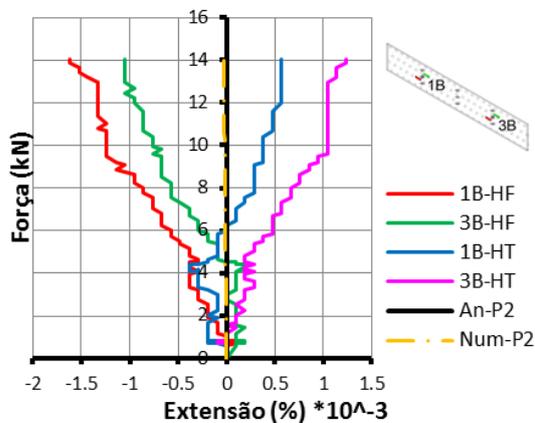


Figura F.12 -Extensão para o Agrupamento P2.

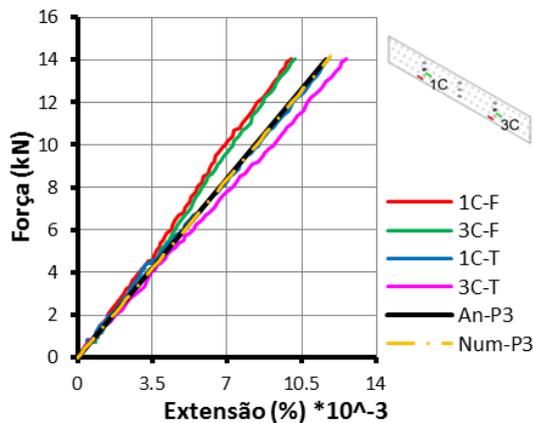


Figura F.13 -Extensão para o Agrupamento P3.

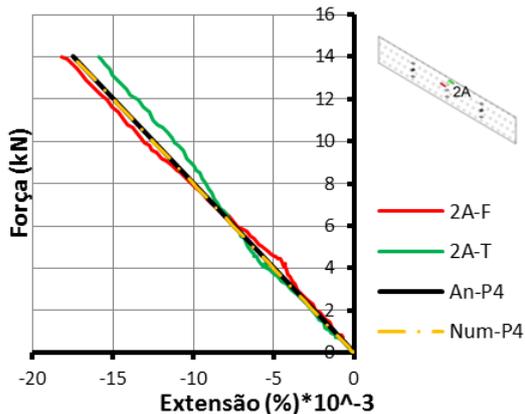


Figura F.14 -Extensão para o Agrupamento P4.

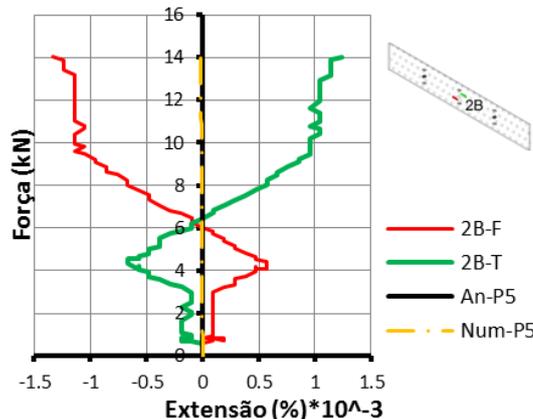


Figura F.15 -Extensão para o Agrupamento P5.

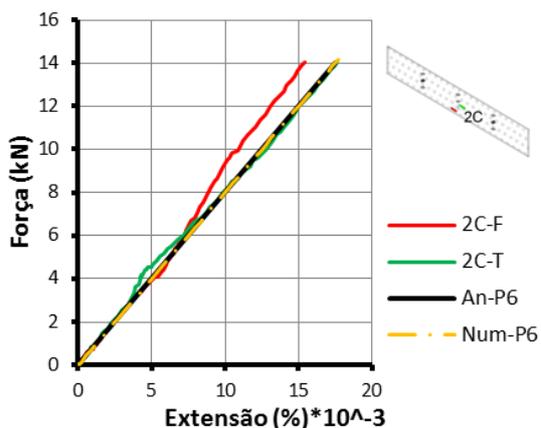


Figura F.16 -Extensão para o Agrupamento P6.

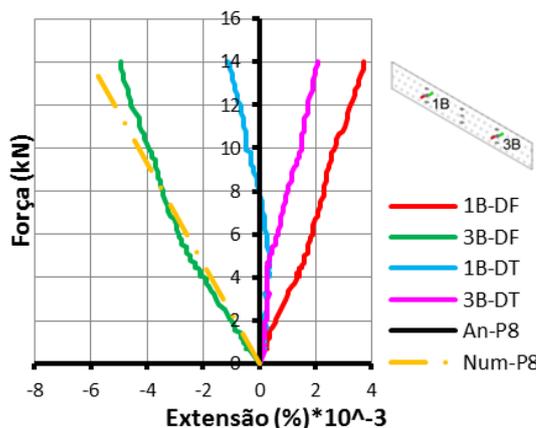


Figura F.17 -Extensão para o Agrupamento P8.

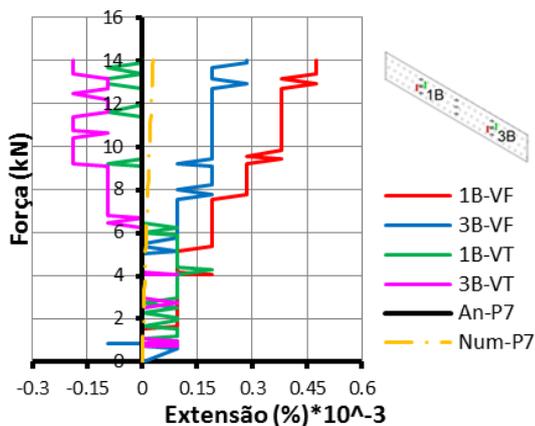


Figura F.18 -Extensão para o Agrupamento P7.

**F3. Resultados experimentais do sistema híbrido 1**

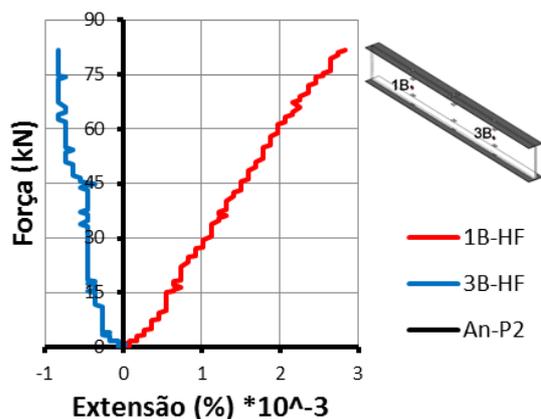


Figura F.19 -Extensão para o Agrupamento P2.

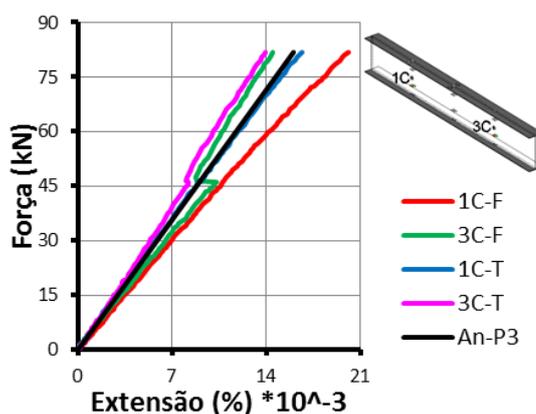


Figura F.20 -Extensão para o Agrupamento P3.

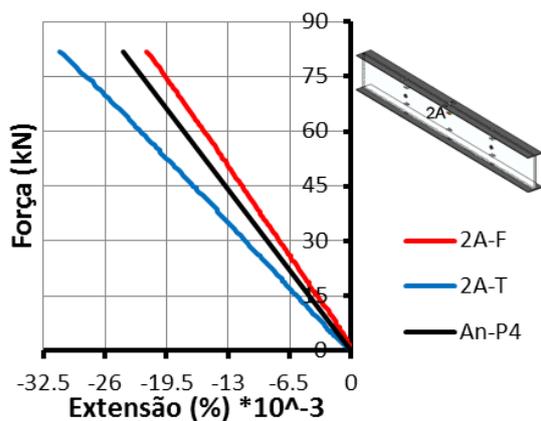


Figura F.21 -Extensão para o Agrupamento P4.

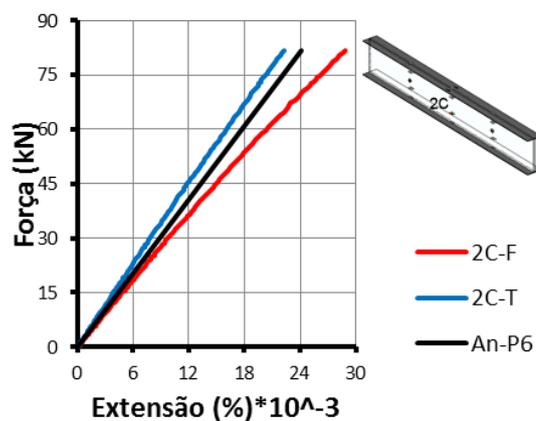


Figura F.22 -Extensão para o Agrupamento P6.

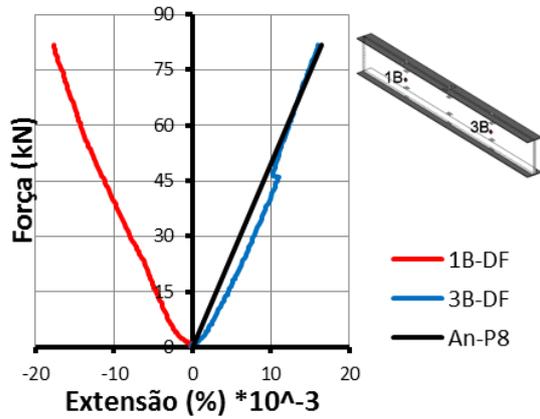


Figura F.23 - Extensão para o Agrupamento P8.

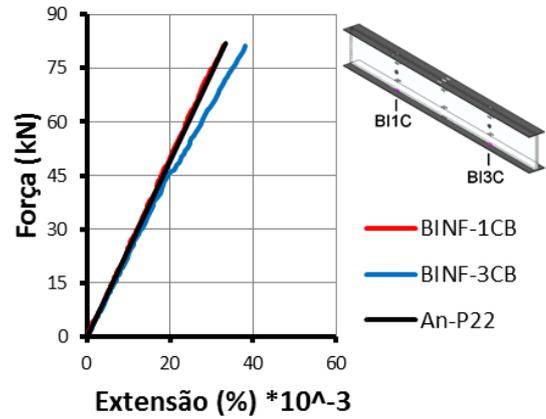


Figura F.24 - Extensão para o Agrupamento P22.

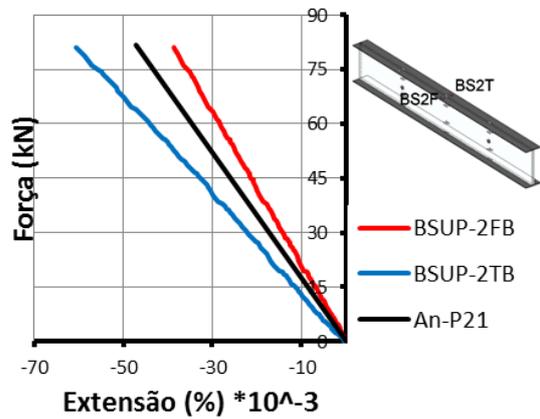


Figura F.25 - Extensão para o Agrupamento P21.

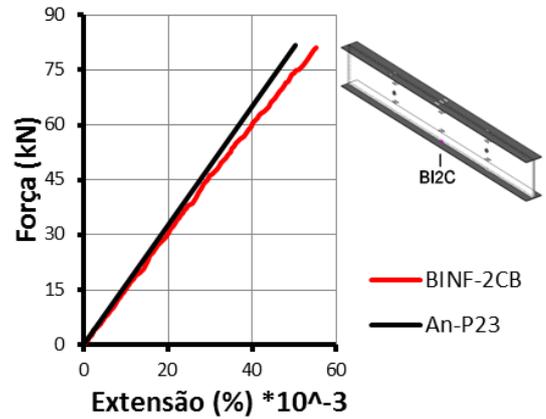


Figura F.26 - Extensão para o Agrupamento P23.

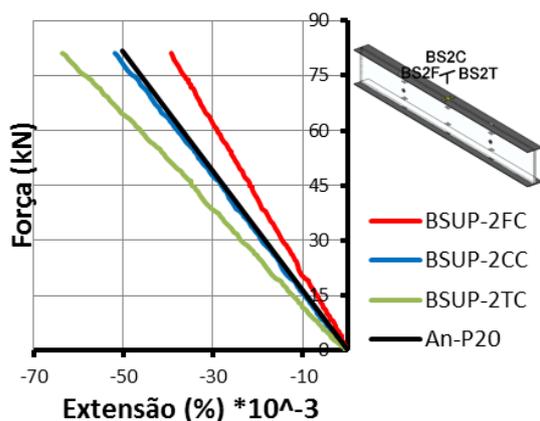


Figura F.27 - Extensão para o Agrupamento P20.

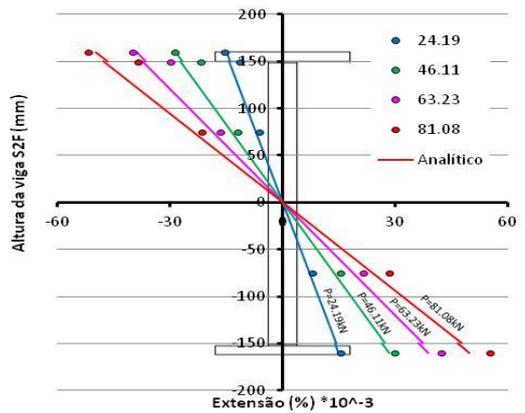


Figura F.28 - Variação da extensão com a altura da viga (S2-Frente).

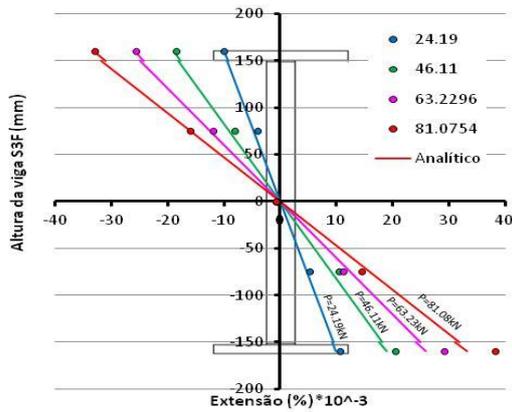


Figura F.29 - Variação da extensão com a altura da viga (S3-Frente).

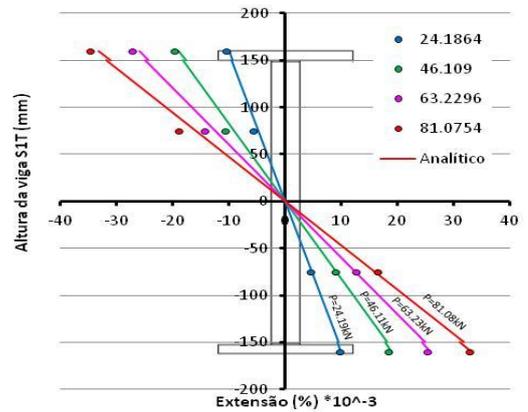


Figura F.30 - Variação da extensão com a altura da viga (S1-Trás).

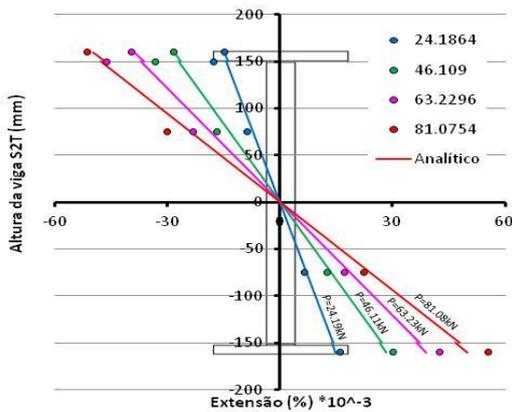


Figura F.31 - Variação da extensão com a altura da viga (S2-Trás).

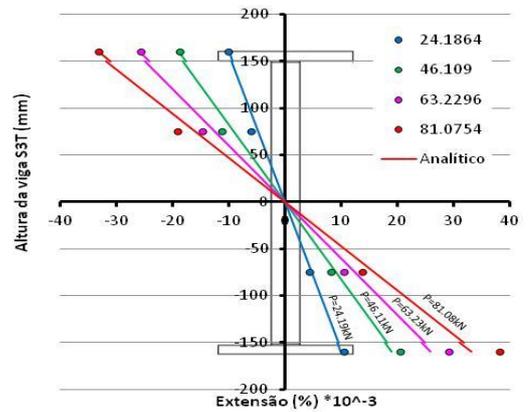


Figura F.32 - Variação da extensão com a altura da viga (S3-Trás)

**F4- Resultados experimentais do sistema híbrido 2**

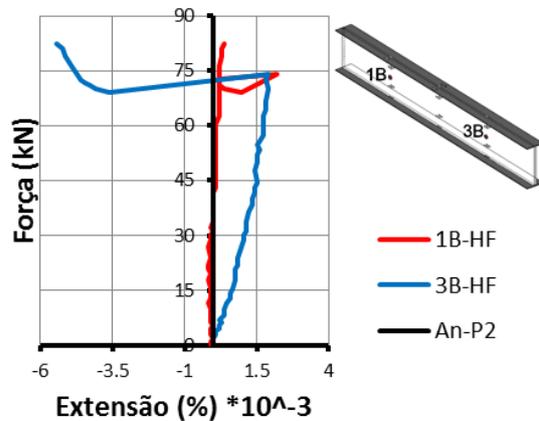


Figura F.33 -Extensão para o Agrupamento P2.

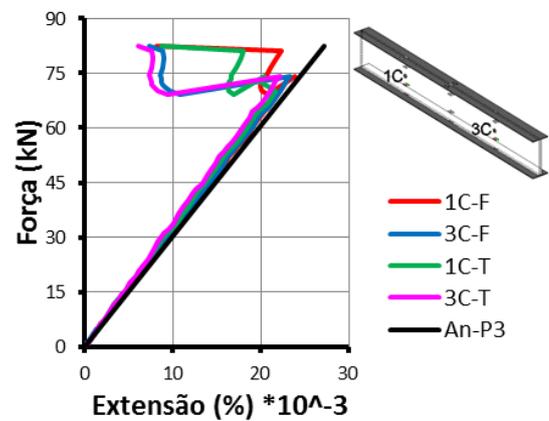


Figura F.34 -Extensão para o Agrupamento P3.

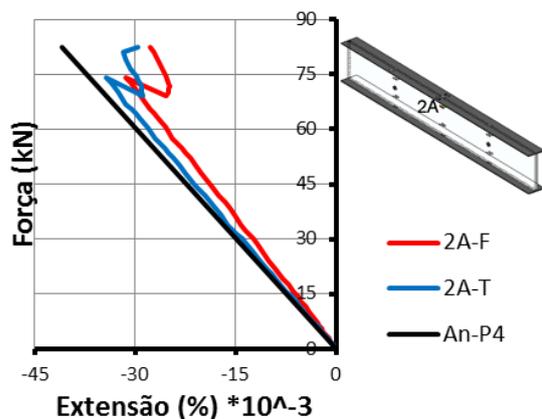


Figura F.35 -Extensão para o Agrupamento P4.

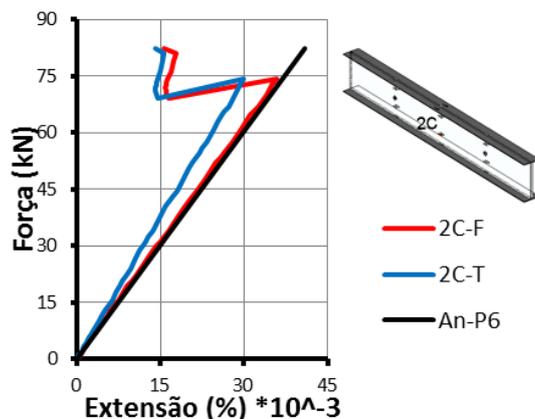


Figura F.36 -Extensão para o Agrupamento P6.

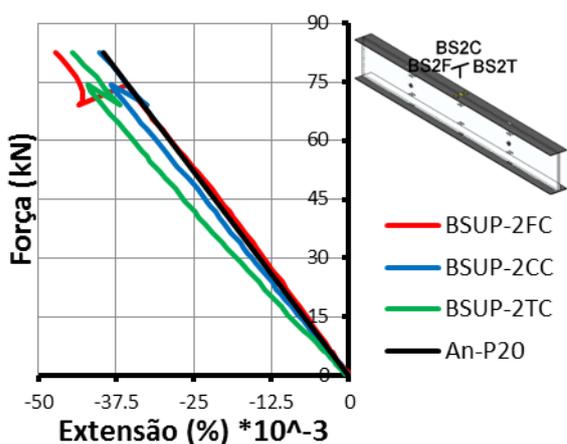


Figura F.37 -Extensão para o Agrupamento P20.

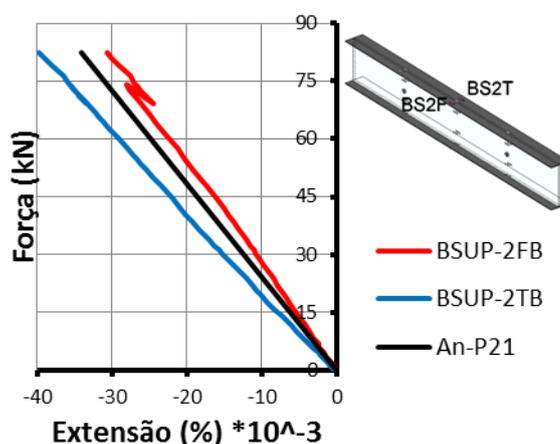


Figura F.38 -Extensão para o Agrupamento P21.

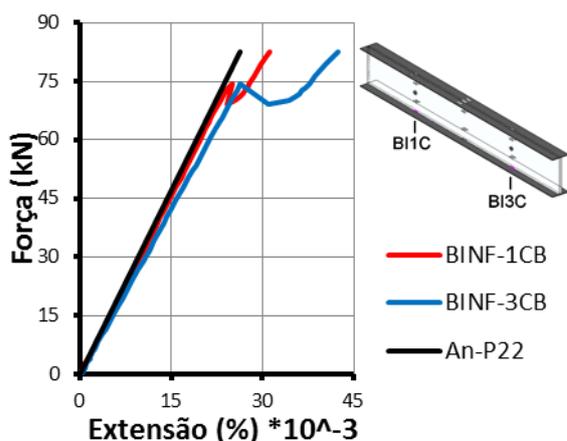


Figura F.39 -Extensão para o Agrupamento P22.

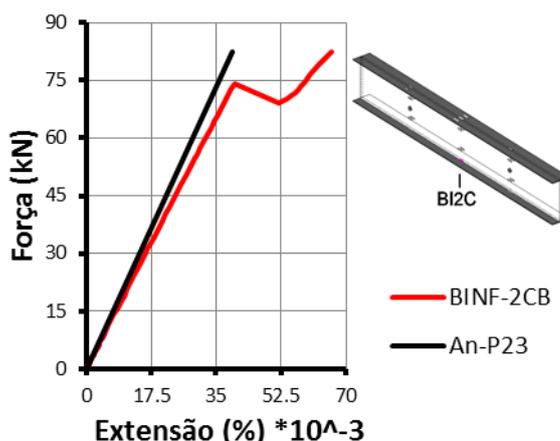


Figura F.40 -Extensão para o Agrupamento P23.

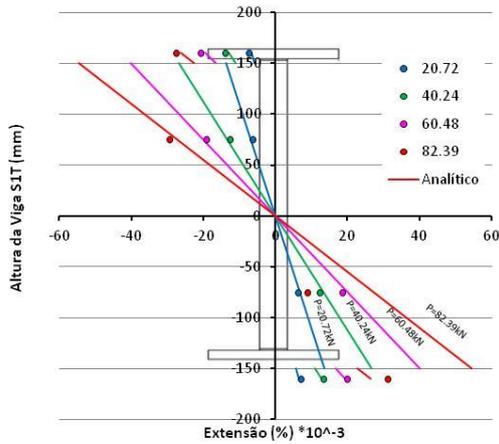


Figura F.41 - Variação da extensão com a altura da viga (S1-Trás).

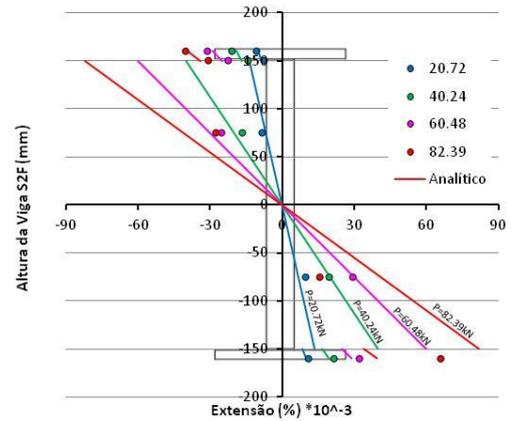


Figura F.42 - Variação da extensão com a altura da viga (S2-Frente).

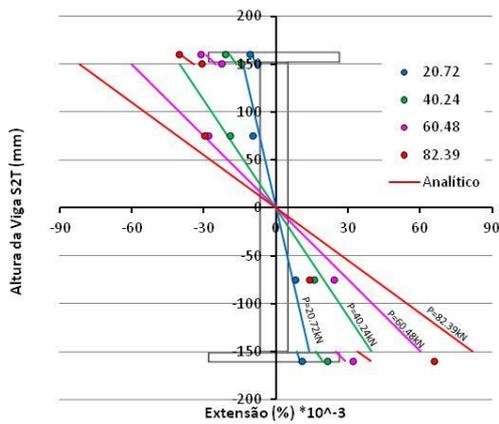


Figura F.43 - Variação da extensão com a altura da viga (S2-Trás).

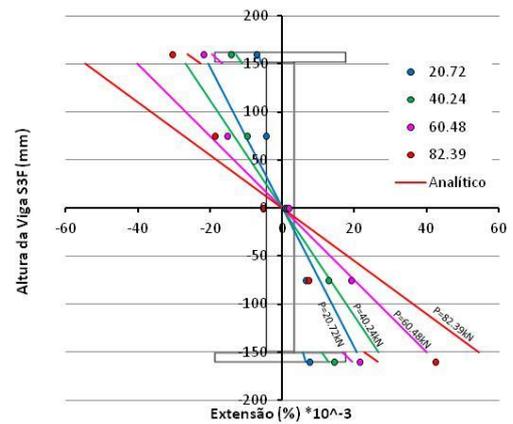


Figura F.44 - Variação da extensão com a altura da viga (S3-Frente).

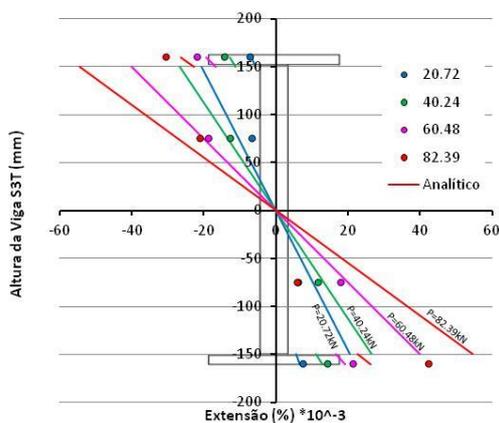


Figura F.45 - Variação da extensão com a altura da viga (S3-Trás).

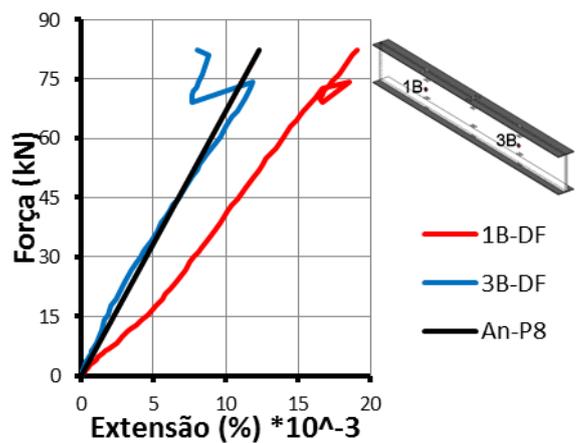


Figura F.46 - Extensão para o Agrupamento P8.

