



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2013

**TELMO MIGUEL
JORGE MARQUES**

ENSAIO BIAXIAL SOB TENSÕES NORMAIS



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2013

**TELMO MIGUEL
JORGE MARQUES**

ENSAIO BIAXIAL SOB TENSÕES NORMAIS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e Professor Alfredo Manuel Balacó de Morais, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada por todo o apoio e compreensão.

o júri

presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

orientador

Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Professor Doutor José Luís Soares Esteves
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

agradecimentos

Gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos os que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira e Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais, pelo apoio, interesse e disponibilidade demonstrados ao longo da realização desta dissertação.

Em especial à minha família e namorada pelo apoio, compreensão e motivação que ao longo de todo o meu percurso académico me deram força nos momentos mais difíceis.

palavras-chave

Ensaio mecânico; Ensaio biaxial; Célula de carga; Vídeo-extensómetro; Provet cruciforme; Polipropileno.

resumo

A presente Dissertação teve como primeiro objetivo testar e validar uma máquina de ensaios biaxiais concebida e construída no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. A realização de ensaios biaxiais reveste-se de grande importância para a caracterização do comportamento mecânico complexo apresentado por certos materiais, tais como os polímeros e os compósitos.

Após uma fase inicial de estudo do funcionamento da máquina e dos seus sistemas de carregamento e de medição, procedeu-se a algumas alterações nos componentes e às calibrações de sistemas de modo a conseguir ensaiar amostras de polipropileno, o material polimérico escolhido para este estudo. Em seguida realizaram-se ensaios uniaxiais de tração numa máquina universal de ensaios e na máquina de ensaios biaxiais que permitiram validar esta última.

Posteriormente, efetuaram-se ensaios uniaxiais de compressão e ensaios biaxiais de tração-compressão e de tração-tração. Os resultados obtidos revelaram-se consistentes, mas são ainda necessários estudos complementares aos níveis analítico e experimental para interpretar os resultados e para caracterizar integralmente o comportamento mecânico do material.

keywords

Mechanical tests; Biaxial tests; Load cell; video-extensometer; cruciform specimen; Polypropylene.

abstract

The first objective of the present work was to evaluate and validate a biaxial testing machine designed and built at the Mechanical Engineering Department of the University of Aveiro. Biaxial testing is of great importance for characterising the complex mechanical behaviour of materials such as polymers and composites.

The initial stage consisted of studying the operation mode and the loading and measurement systems of the biaxial testing machine. Then, some changes in the components were made and system calibrations were carried out in order to test polypropylene specimens. Uniaxial tensile tests conducted in a universal testing machine and in the biaxial testing machine enabled the validation of the latter.

Finally, uniaxial compressive and biaxial tensile-compressive and tensile-tensile tests were performed. The results obtained proved to be consistent, but further analytical and experimental studies are required to interpret the results and to fully characterise the mechanical behaviour of the material.

Índice

1. Enquadramento.....	1
1.1. Objetivos da dissertação	2
1.2. Estrutura da dissertação	2
2. Revisão do estado de conhecimento relativo a ensaios biaxiais	3
2.1. Caracterização do material	4
2.2. Ensaio biaxiais	6
2.3. Máquinas de ensaios biaxiais	8
3. Máquina de ensaios biaxiais.....	14
3.1. Estrutura e sistema de carregamento.....	15
3.2. Sistema de medição	20
4. Procedimentos experimentais.....	23
4.1. Provetes ensaiados.....	24
4.2. Preparativos para ensaios biaxiais.....	26
4.3. Aquisição e tratamento de dados dos ensaios biaxiais.....	29
4.4. Ensaio uniaxiais	30
4.5. Ensaio biaxiais	33
5. Resultados e discussão	35
5.1. Ensaio uniaxiais	36
5.2. Ensaio biaxiais	40
6. Conclusões e trabalhos futuros.....	44
Referências bibliográficas	47
Anexos.....	50
Anexo 1 – Ficha técnica da célula de carga.....	51
Anexo 2 – Propriedades do material utilizado para os provetes [14].	52
Anexo 3 – Desenho técnico dos calços de amarração.	53

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplos de estados de tensão (a) tração uniaxial e (b) tração biaxial [1].	4
Figura 2.2 – Representação de estados biaxiais de tensão no plano [2].....	5
Figura 2.3 – Diagrama limite de deformação (a) deformações de cedência esperadas, (b) deformações reais aplicando tensão uniaxial seguida de tensões biaxiais e (c) deformações reais aplicando tensões biaxiais seguidas de tensão uniaxial [1].....	5
Figura 2.4 – Testes (a) de pressão hidrostática, (b) de punção e (c) de provete cruciforme (imagem adaptada de [6]).	6
Figura 2.5 – Provette cruciforme solicitado em (a) quatro e (b) dois braços [3].....	7
Figura 2.6 – Provette cruciforme (a, b) zona de rebaixo e (c) raios de concordância entre braços [3].	7
Figura 2.7 – Diferentes geometrias de provetes (imagem adaptada de [1].	8
Figura 2.8 – Máquina biaxial de Makinde e outros [2].	9
Figura 2.9 – Máquina biaxial de Kuwabara e outros [9].	10
Figura 2.10 – Mecanismo biaxial do Instituto Fraunhofer [10].	10
Figura 2.11 – Mecanismo biaxial de Ferron e Makinde [11].	11
Figura 2.12 – Mecanismo biaxial da Universidade de Tecnologia de Eindhoven [1].....	12
Figura 2.13 – Mecanismo biaxial de tração de materiais compósitos e polimérico [5].	12
Figura 3.1 – Máquina de ensaios biaxiais.....	15
Figura 3.2 – Sistema de acionamento.	16
Figura 3.3 – Controlo do sistema de acionamento.	16
Figura 3.4 – Cilindro hidráulico e braços de carregamento.	17
Figura 3.5 – Acionamento de braço por rolamento.	17
Figura 3.6 – Cunhas com diferentes inclinações da face de trabalho.....	18
Figura 3.7 – Maxila de alojamento de cunhas para cargas de tração.	18
Figura 3.8 – Visualização de cunhas na maxila.	19
Figura 3.9 – Sistema de compressão (a) fotografia de bloco rígido de compressão e (b) imagem de ensaio de compressão (imagem adaptada de [13]).	19

Figura 3.10 – Vídeo-extensómetro <i>Messphysic ME 46 NG</i>	20
Figura 3.11 – Suporte do vídeo-extensómetro.....	20
Figura 3.12 – Suporte do vídeo-extensómetro montado na máquina.	21
Figura 3.13 – Vídeo-extensómetro montado na máquina com condições de luz ideais.....	21
Figura 3.14 – Célula de carga.	22
Figura 3.15 - <i>Spider8</i>	22
Figura 4.1 – Provette para ensaios de tração uniaxial e biaxiais tração-compressão (a) fotografia (b) desenho.....	24
Figura 4.2 – Provette para ensaios de compressão uniaxial (a) fotografia (b) desenho.	25
Figura 4.3 – Provette cruciforme para ensaios biaxiais tração-tração (a) desenho (b) fotografia.	26
Figura 4.4 – Amarração do provete de ensaios biaxiais tração-tração.	27
Figura 4.5 – Cunha de amarração à tração.	27
Figura 4.6 – Gráficos de calibração das células de carga (a) célula X à tração (b) célula X à compressão (c) célula Y à tração (d) célula Y à compressão.	28
Figura 4.7 – Marcas óticas para leitura de deformações (a) pontos (b) marcas retangulares.	29
Figura 4.8 – Pontos de medição de deformações.	30
Figura 4.9 – Máquina universal <i>Shimadzu 50kN-AG</i>	31
Figura 4.10 – Fotografia de ensaio de tração na <i>Shimadzu 50kN-AG</i>	31
Figura 4.11 - Medição de deformações entre pontos (a) e entre marcas retangulares (b)...	32
Figura 4.12 – Fotografia de ensaio de compressão.	33
Figura 4.13 - Fotografia de ensaio biaxial tração-compressão.....	34
Figura 4.14 – Fotografia de ensaio biaxial tração-tração.	34
Figura 5.1 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na <i>Shimadzu 50kN-AG</i> com medição de deformações por pontos (curvas contínuas) e com medição de deformações por marcas óticas retangulares (curvas a interrompido).	36
Figura 5.2 – Curvas deformação transversal-deformação longitudinal medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na <i>Shimadzu 50kN-AG</i> com medição de deformações por	

pontos (curvas contínuas) e com medição de deformações por marcas óticas retangulares (curvas a interrompido).	37
Figura 5.3 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaios de tração uniaxial.	38
Figura 5.4 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na máquina biaxial (linhas pontilhadas) e na <i>Shimadzu 50kN-AG</i> (mesmas linhas apresentadas na Figura 5.1).....	38
Figura 5.5 – Curvas deformação transversal-deformação longitudinal medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na máquina biaxial (linhas pontilhadas) e na <i>Shimadzu 50kN-AG</i> (mesmas linhas apresentadas na Figura 5.1).	39
Figura 5.6 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de compressão uniaxial realizados na <i>Shimadzu 50kN-AG</i>	39
Figura 5.7 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaios uniaxiais de compressão.....	40
Figura 5.8 – Curvas tensão aparente-deformação segundo cada eixo medidas em ensaios biaxiais de tração-compressão. Para facilitar a comparação das curvas, a tensão de compressão no eixo Y é representada como positiva.	41
Figura 5.9 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaio biaxial de tração-compressão.....	41
Figura 5.10 – Curvas carga-deformação obtidas nos ensaios biaxiais tração-tração. As curvas contínuas são relativas ao eixo X e as interrompidas ao eixo Y.....	42
Figura 5.11 – Fotografia de provete cruciforme que mostra as zonas de concentração de tensões em branco mais vivo.	43
Figura 5.12 – Fotografia de provete cruciforme após o ensaio.	43

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Elementos técnicos do equipamento de ensaios biaxiais.....	15
Tabela 5.1 – Principais propriedades medidas nos ensaios de tração.	37

1. Enquadramento

1.1. Objetivos da dissertação

Os objetivos principais desta Dissertação eram:

- testar e validar a máquina de ensaios biaxiais concebida e construída no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro;
- realizar ensaios uniaxiais e biaxiais tendo em vista a caracterização do comportamento tensão-deformação de um material polimérico.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta Dissertação de Mestrado está organizada em 6 capítulos:

- capítulo 1: apresentação dos objetivos gerais desta tese;
- capítulo 2: revisão bibliográfica do estado do conhecimento relativo a ensaios biaxiais;
- capítulo 3: descrição da metodologia utilizada neste trabalho, com especial destaque para os equipamentos, provetes e métodos de tratamentos de dados utilizados;
- capítulo 4: descrição da máquina biaxial e de outros equipamentos usados no trabalho;
- capítulo 5: apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- capítulo 6: conclusões e sugestões sobre possíveis trabalhos futuros.

2. Revisão do estado de conhecimento relativo a ensaios biaxiais

2.1. Caracterização do material

Para que qualquer indústria de ponta singre na economia atual tem necessariamente que criar produtos economicamente competitivos. Isto consegue-se fazendo um uso eficiente dos recursos energéticos, humanos e fabris, mas também reduzindo o desperdício de matérias-primas [1]. É aqui que o conhecimento aprofundado do comportamento dos materiais a utilizar se torna essencial para reduzir a quantidade de material no produto final sem comprometer a sua funcionalidade e durabilidade [2].

Os materiais podem ser sujeitos a diferentes tipos de tensões, sendo elas tração, compressão e corte, aplicadas de forma individual ou combinada (Figura 2.1).

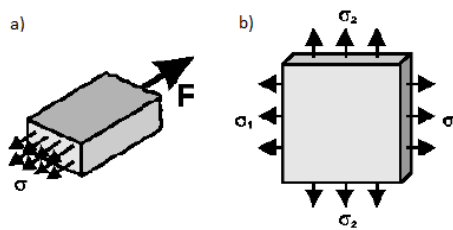


Figura 2.1 – Exemplos de estados de tensão (a) tração uniaxial e (b) tração biaxial [1].

A caracterização dos materiais é geralmente efetuada através de ensaios uniaxiais [2] [3]. Estes ensaios podem ser suficientes quando há modelos bem estabelecidos que permitam o dimensionamento perante estados de tensão multiaxiais, por exemplo, o critério de *von Mises* para metais. Todavia, muitos materiais apresentam comportamento mecânico complexo, como é o caso dos polímeros, cujo comportamento à tração difere do comportamento à compressão [4], e dos materiais compósitos, que são altamente anisotrópicos [5]. Os ensaios uniaxiais tornam-se então insuficientes para descrever o comportamento destes materiais.

Além disso, mesmo nas ligas metálicas, os ensaios uniaxiais não proporcionam um conhecimento aprofundado do comportamento plástico. Vários estudos demonstram que as deformações máximas obtidas em ensaios biaxiais (Figura 2.2b) podem ser bastante diferentes das que se preveem com base em resultados de ensaios uniaxiais [1] [2] [5].

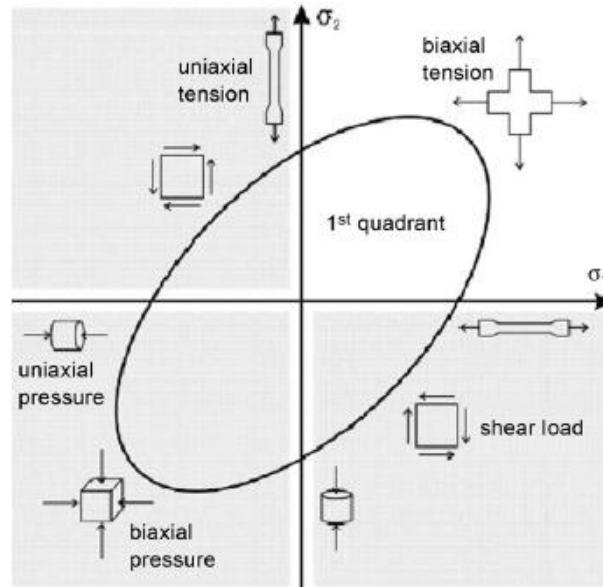


Figura 2.2 – Representação de estados biaxiais de tensão no plano [2].

As deformações limite são particularmente importantes nas operações de conformação de chapa metálica. Citando um exemplo ilustrativo referido em [1], eram inicialmente esperadas deformações máximas nas diferentes direções segundo o respetivo diagrama limite de deformação (Figura 2.3a). Porém, ao aplicar tensão uniaxial seguida de tensões biaxiais obtiveram-se deformações maiores (Figura 2.3b), verificando-se situação inversa quando se aplicaram as tensões biaxiais primeiro (Figura 2.3c).

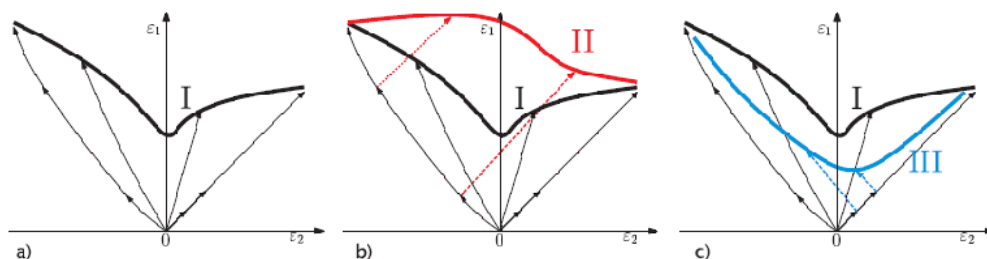


Figura 2.3 – Diagrama limite de deformação (a) deformações de cedência esperadas, (b) deformações reais aplicando tensão uniaxial seguida de tensões biaxiais e (c) deformações reais aplicando tensões biaxiais seguidas de tensão uniaxial [1].

Portanto, os ensaios multiaxiais são fundamentais para conhecer aprofundadamente o comportamento mecânico de um material e para aproveitar todo o seu potencial [1]. Como a dificuldade de preparação, execução e análise deste tipo de ensaios é diretamente proporcional ao número de eixos utilizados, os ensaios biaxiais têm sido considerados o

melhor compromisso entre complexidade e importância dos resultados [5].

2.2. Ensaaios biaxiais

Existem vários tipos de ensaios biaxiais, que podem ser divididos entre ensaios em que os esforços são aplicados no plano da amostra, ou fora deste [1], Como exemplos destes últimos temos os ensaios de pressão hidrostática (Figura 2.4a), nos quais se promove a deformação de uma chapa através da pressão exercida por um fluido, e ensaios de deformação por punção (Figura 2.4b), como é o caso do teste de Marciniak. De notar que estes ensaios induzem flexão na amostra, adicionando tensões de corte que influenciam os resultados no plano da espessura, tido como mais importante. São por isso geralmente preteridos em relação aos ensaios que envolvem apenas solicitações no plano da amostra [1].

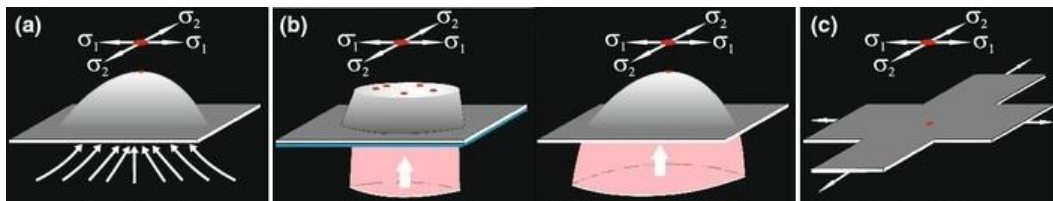


Figura 2.4 – Testes (a) de pressão hidrostática, (b) de punção e (c) de provete cruciforme (imagem adaptada de [6]).

Também existem ensaios em que se combina tração ou compressão com torção, e que são normalmente usados para provetes cilíndricos. Porém, os resultados não podem ser diretamente aplicados a materiais sob a forma de chapa plana ou com ligeiras curvaturas, que constituem a grande maioria [3].

Relativamente aos ensaios com solicitações no plano, são os ensaios de provetes cruciformes sob duas tensões normais os mais relevantes (Figura 2.4c). Neste tipo de ensaios a zona de interesse está no centro do provete, onde se dá a união dos dois braços do mesmo. Três características ideais a atingir neste ensaio são [3]:

- haver um estado de tensões uniforme na zona de interesse do provete;
- a rutura ocorrer na zona central e não nos braços do provete;

- os resultados serem repetíveis.

Para que o ensaio ocorra nestas condições ideais esta zona de interesse deve permanecer imóvel promovendo assim ensaios onde os quatro braços do provete são acionados (Figura 2.5a) em detrimento de apenas dois onde além do movimento são induzidas tensões adicionais que nada têm a ver com a sollicitação biaxial em estudo (Figura 2.5b)

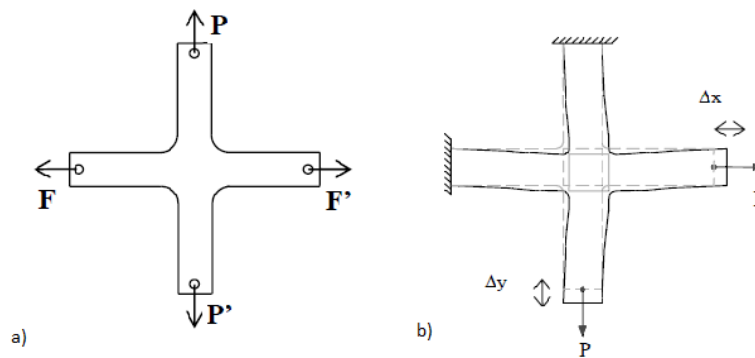


Figura 2.5 – Provete cruciforme sollicitado em (a) quatro e (b) dois braços [3].

A geometria do provete tem um papel muito importante na garantia dessas condições, pelo que merece um estudo inicial cuidadoso. Nesse sentido, têm sido consideradas zonas de menor espessura no centro do provete (Figura 2.6a) com diferentes formas e raios de concordância entre braços (Figuras 2.6b e Figura 2.6c), e mesmo vários tipos de “rasgos” ao longo dos braços (Figura 2.7) [3].

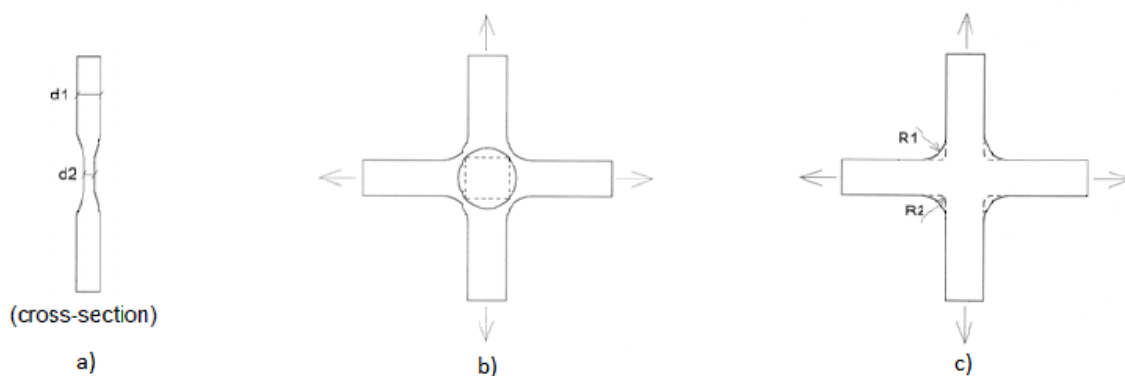


Figura 2.6 – Provete cruciforme (a, b) zona de rebaixo e (c) raios de concordância entre braços [3].

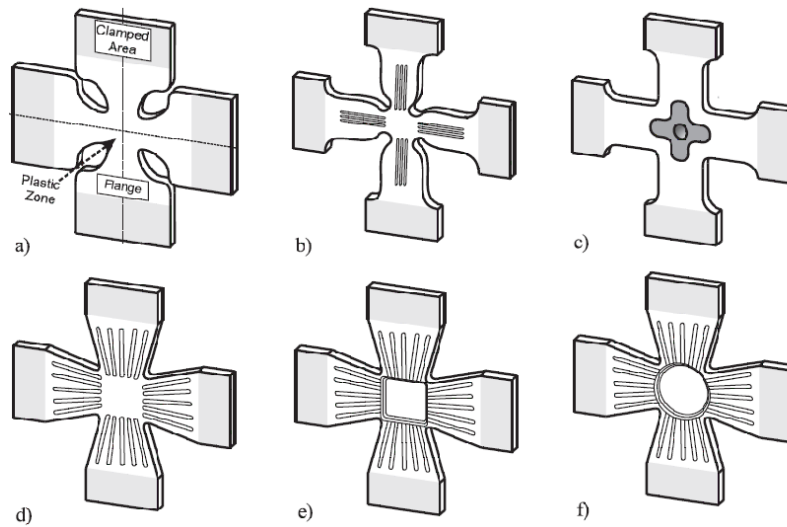


Figura 2.7 – Diferentes geometrias de provetes (imagem adaptada de [1]).

Os estudos relativos à geometria do provete são atualmente efetuados mediante simulações numéricas [1], assunto que não era objeto deste trabalho.

2.3. Máquinas de ensaios biaxiais

Têm sido usadas várias máquinas biaxiais de provetes cruciformes com graus de complexidade diferentes, se bem que assentes em princípios semelhantes. As máquinas podem ser divididas em duas categorias, máquinas autónomas e não autónomas, ou mecanismos [2].

No que diz respeito às máquinas autónomas, foi apresentada por Makinde e outros [7] (Figura 2.8) uma máquina biaxial constituída por um sistema de acionamento com dois servo-atuadores hidráulicos, um por eixo, cujo controlo assegurava que o centro do provete permanecia imóvel. A máquina possuía também uma célula de carga por eixo [2].

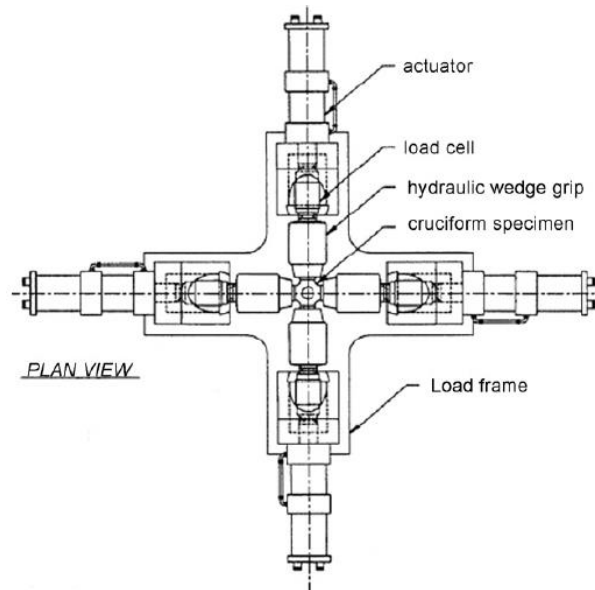


Figura 2.8 – Máquina biaxial de Makinde e outros [2].

Baseado na máquina de Makinde e outros [7], Bohler e outros [8] desenvolveram uma máquina disposta verticalmente que facilitava o acesso à zona de montagem do provete e à captação de imagem durante os ensaios. Contudo, o peso morto do sistema de amarração induzia tensões espúrias no provete. Esta máquina era acionada por quatro parafusos sem-fim através de motores elétricos, que promoviam acionamentos iguais entre eixos, garantindo assim que o centro do provete se mantinha imóvel [2].

Kuwabara e outros [9] apresentaram posteriormente uma máquina biaxial (Figura 2.9) acionada por um sistema hidráulico com servocontrolo, dotada de dois cilindros ligados em paralelo para que ambos exercessem a mesma força entre eixos. Para garantir que o centro do provete se mantivesse estacionário ao longo de todo o ensaio foi criada uma estrutura de ligação entre os braços da máquina que garantia que a sollicitação do provete era igual nas quatro direções. O sistema de medição de forças era constituído por duas células de carga, uma por eixo [2].

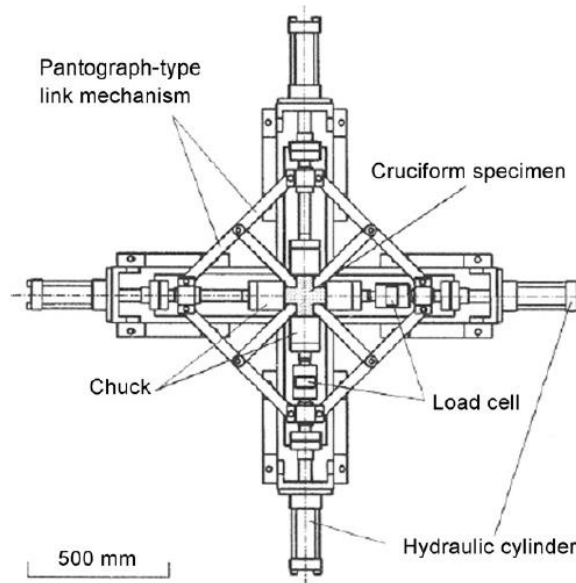


Figura 2.9 – Máquina biaxial de Kuwabara e outros [9].

Por seu turno, as máquinas não autónomas necessitam de atuação externa para o seu funcionamento. Foram construídas sobretudo no intuito de reduzir custos, podendo ser consideradas mecanismos a adaptar a máquinas universais de ensaios uniaxiais, de modo a aproveitar o seu movimento e a convertê-lo em solicitações biaxiais. Uma máquina deste género foi construída no Instituto de Fraunhofer na Alemanha [10] (Figura 2.10). O movimento vertical descendente é convertido em dois eixos horizontais perpendiculares, que promovem tração de igual grandeza num provete cruciforme [2].



Figura 2.10 – Mecanismo biaxial do Instituto Fraunhofer [10].

Outro mecanismo que transforma um movimento uniaxial em solicitações biaxiais foi desenvolvido por Ferron e Makinde [11] (Figura 2.11). Neste mecanismo a carga é transmitida aos elementos H1 e H2 que, através de quatro elos de ligação verticais (Av), quatro horizontais (Ah) e dos elementos C1 e C2, promovem um movimento de tração aos elementos H3 e H4 de igual magnitude aos dos elementos H1 e H2. As células de carga posicionadas nos elementos H1 e H4 permitem medir as cargas aplicadas entre eixos. Este mecanismo foi também usado por Terriault e outros [12], mas à compressão, aplicada entre os elementos C1 e C2, o que era conseguido de forma análoga à anterior. Neste último caso as deformações eram medidas por vídeo-extensómetro [12].

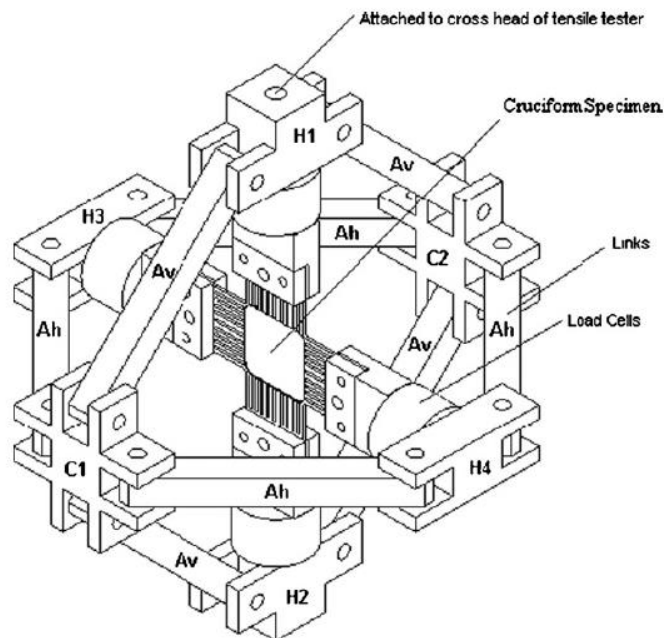


Figura 2.11 – Mecanismo biaxial de Ferron e Makinde [11].

Um exemplo de mecanismo mais simples foi desenvolvido na Universidade de Tecnologia de Eindhoven, mas que apenas pode ser usado para produzir tração biaxial num provete cruciforme disposto horizontalmente (Figura 2.12). Este mecanismo é sujeito a compressão uniaxial entre os pontos 1 e 2 que, pelos tirantes e rótulas (5), promovem tração biaxial no plano horizontal dos quatro braços do provete (7) pelo sistema de amarração 6. A medição de deformações é efetuada por vídeo-extensómetro que, através de um espelho colocado em 3 tem acesso visual ao provete pela zona 4 [1].

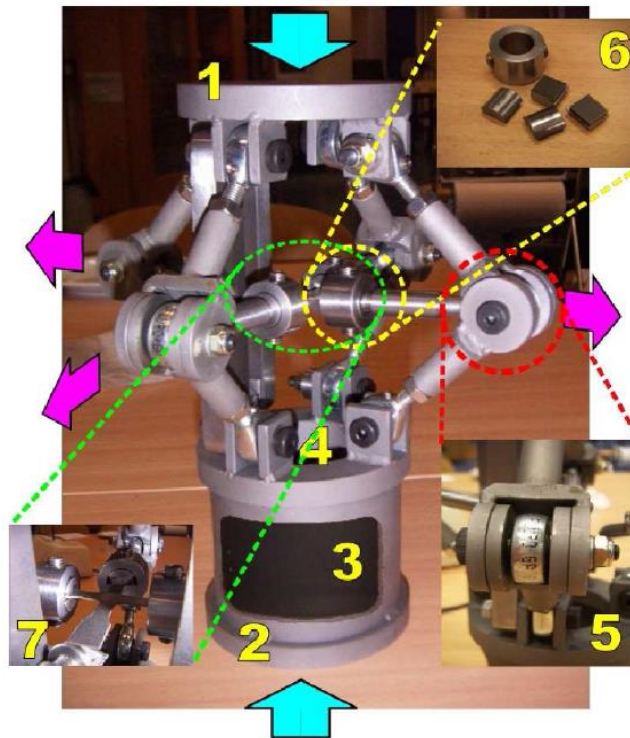


Figura 2.12 – Mecanismo biaxial da Universidade de Tecnologia de Eindhoven [1].

Por último, refere-se o mecanismo desenvolvido para testar materiais compósitos e poliméricos da Figura 2.13. O mecanismo é acionado por tração no eixo vertical, sendo que os tirantes ligados à peça de carregamento vertical permitem gerar tração no eixo horizontal. Atingem-se diferentes rácios de tração entre eixos com pequenos ajustes de tirantes [5].

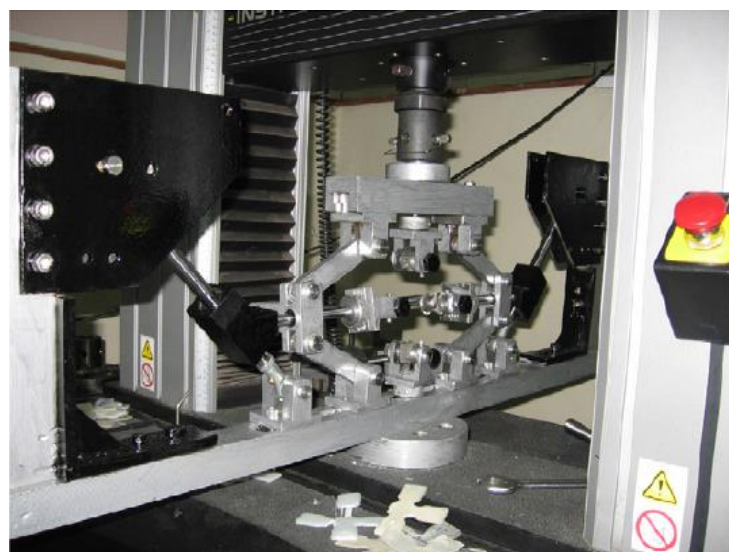


Figura 2.13 – Mecanismo biaxial de tração de materiais compósitos e polimérico [5].

Tendo em conta o elevado interesse nos ensaios biaxiais e a necessidade de obter combinações diversas de tração e de compressão segundo dois eixos num equipamento com custos comportáveis, foi recentemente desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro a máquina que foi usada neste trabalho, e que é descrita nos próximos capítulos.

3. Máquina de ensaios biaxiais

3.1. Estrutura e sistema de carregamento

O presente trabalho recorreu principalmente à máquina de ensaios biaxiais desenvolvida e construída no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro [13] (Figura 3.1). Esta máquina pode ser utilizada para ensaios biaxiais de tração-tração, compressão-compressão ou tração-compressão. A Tabela 3.1 apresenta algumas características da máquina.

Tabela 3.1 – Elementos técnicos do equipamento de ensaios biaxiais.

Área útil de trabalho	400x400 mm ²
Deslocamento máximo do provete	25+25 mm
Espessura dos provetes	0-10 mm
Carga máxima	100 kN
Janela de visão de deslocamentos com vídeo-extensómetro	10x10 mm

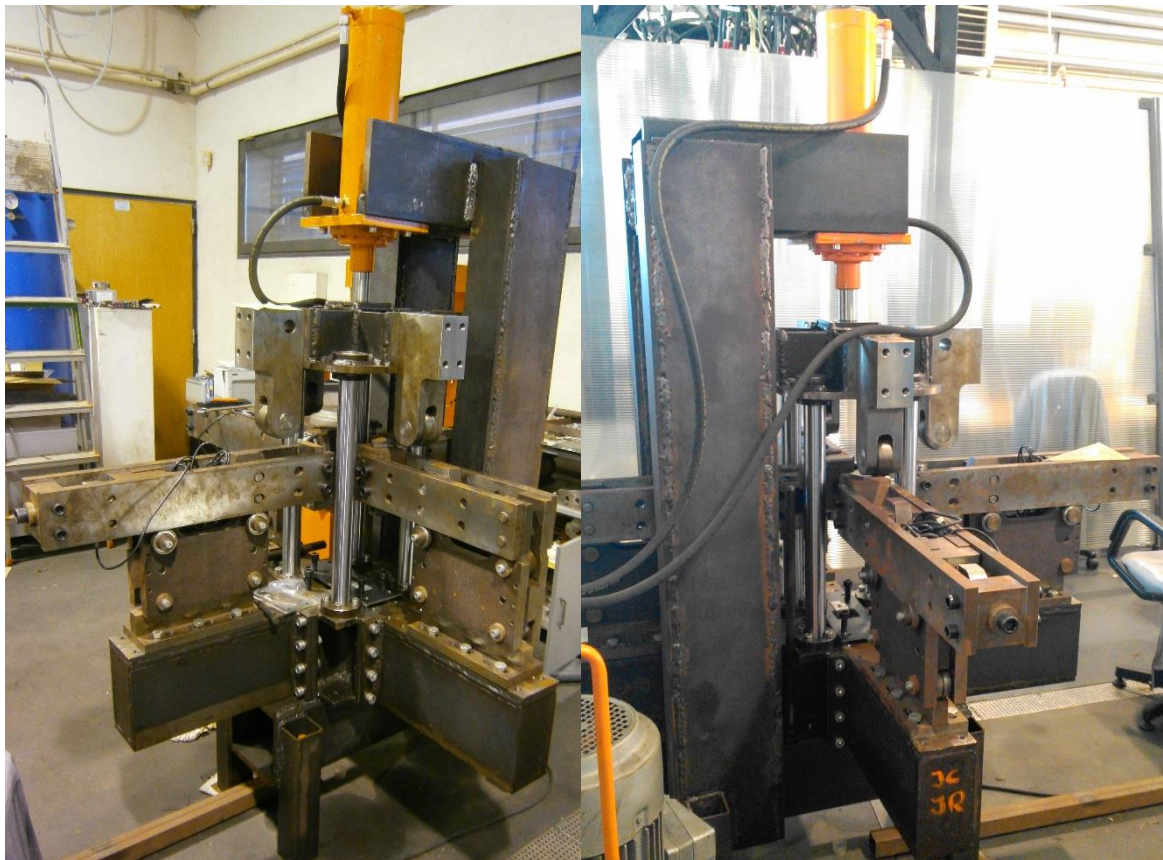


Figura 3.1 – Máquina de ensaios biaxiais.

A máquina é acionada por um cilindro situado no seu topo (Figura 3.2). Deste modo, existe apenas um movimento vertical ascendente ou descendente cujo controlo é realizado por uma alavanca, onde é seleccionado o sentido do movimento, e por uma válvula reguladora de caudal que controla a velocidade do mesmo (Figura 3.3).



Figura 3.2 – Sistema de acionamento.

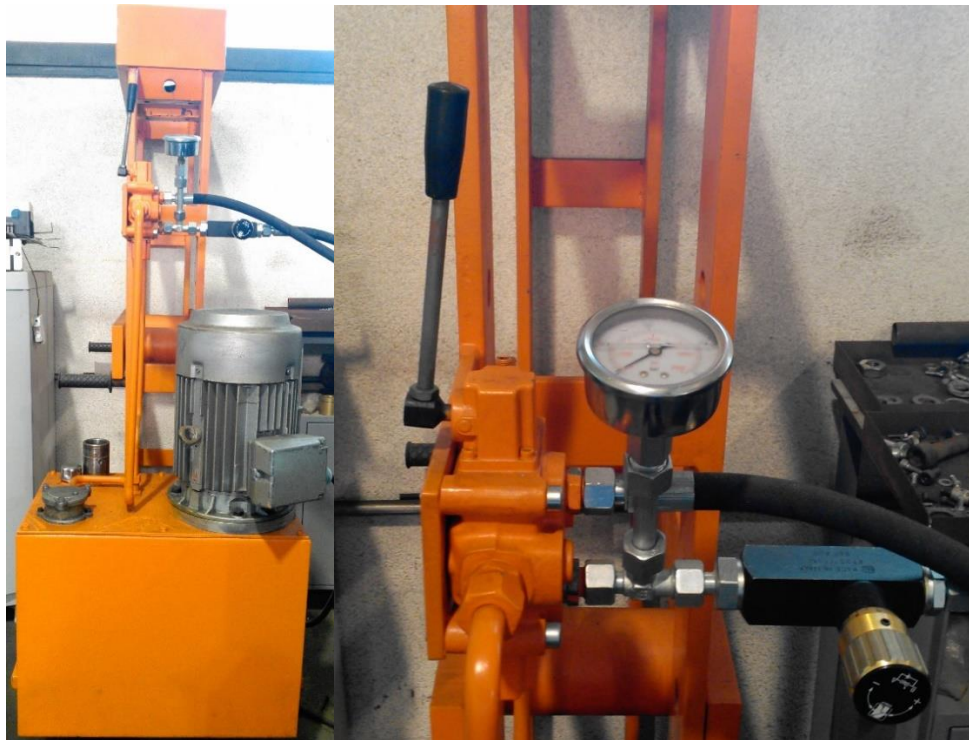


Figura 3.3 – Controlo do sistema de acionamento.

O movimento gerado pelo cilindro hidráulico transmitido a um bloco cruciforme que lhe está rigidamente ligado faz deslocar horizontalmente as amarras que prendem as quatro extremidades do provete (Figuras 3.4 e 3.5). Para essa conversão de movimento as extremidades do bloco cruciforme têm rolamentos que atuam em cunhas ligadas às amarras.

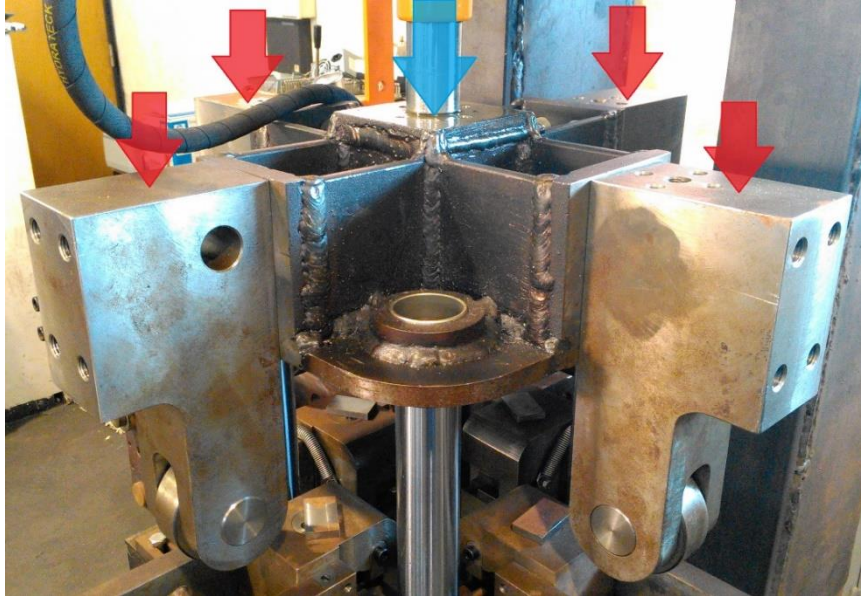


Figura 3.4 – Cilindro hidráulico e braços de carregamento.

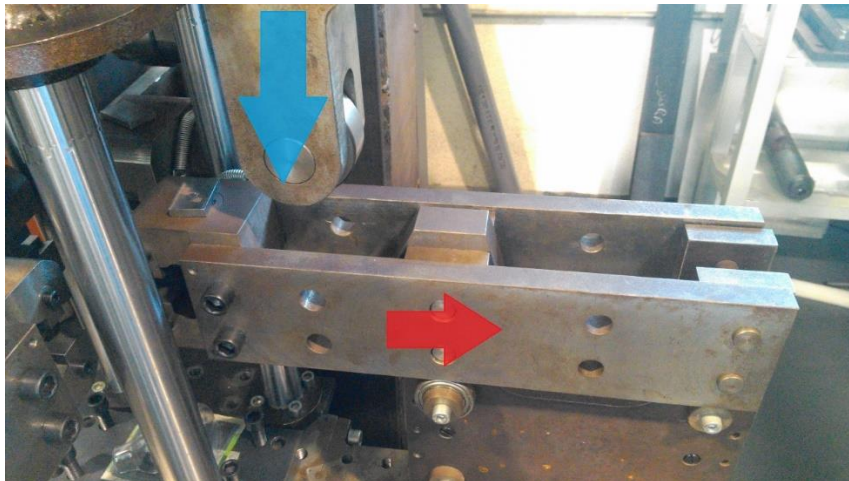


Figura 3.5 – Acionamento de braço por rolamento.

Dependendo da posição de montagem das cunhas e dos seus ângulos de inclinação (Figura 3.6), conseguem-se movimentos de aproximação ou de afastamento dos quatro braços ao centro geométrico da máquina. Assim, é possível realizar diferentes combinações de

carregamento biaxial tração-tração, compressão-compressão e tração-compressão de provetes, permitindo uma grande versatilidade de ensaios.



Figura 3.6 – Cunhas com diferentes inclinações da face de trabalho.

No que concerne à amarração do provete, existem duas formas distintas de o fazer, consoante se trate de eixo à tração ou compressão. Para aplicar tração usam-se as comuns amarras de cunha (Figuras 3.7 e 3.8), enquanto que as cargas de compressão são aplicadas ao provete através do contacto com blocos rígidos (Figura 3.9).

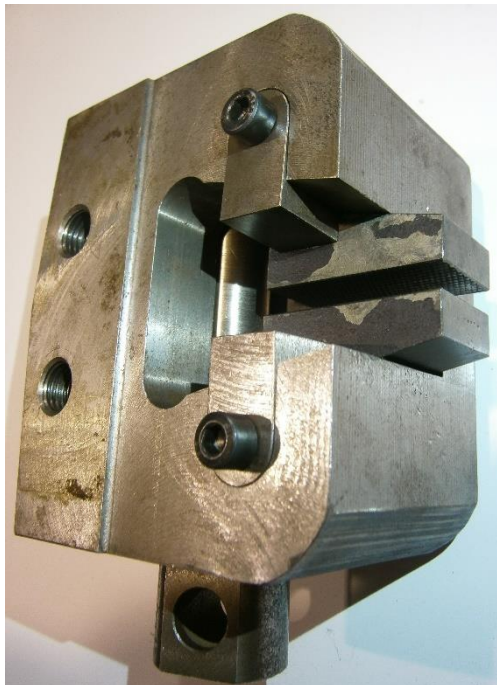


Figura 3.7 – Maxila de alojamento de cunhas para cargas de tração.

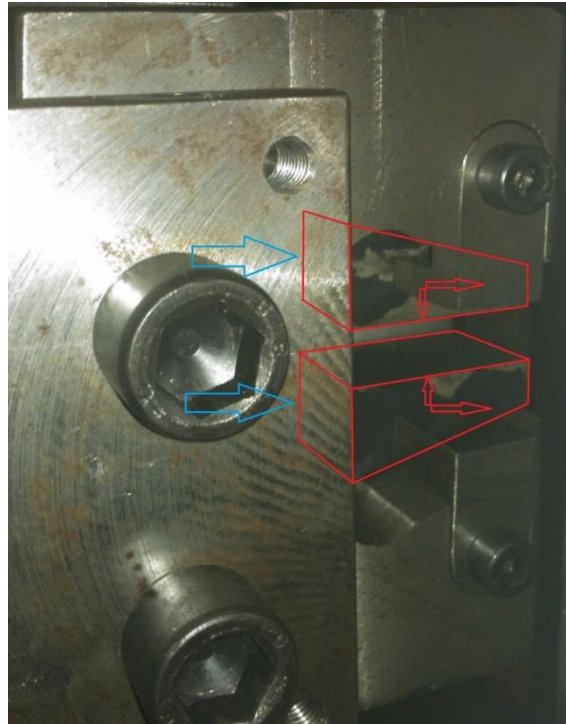


Figura 3.8 – Visualização de cunhas na maxila.

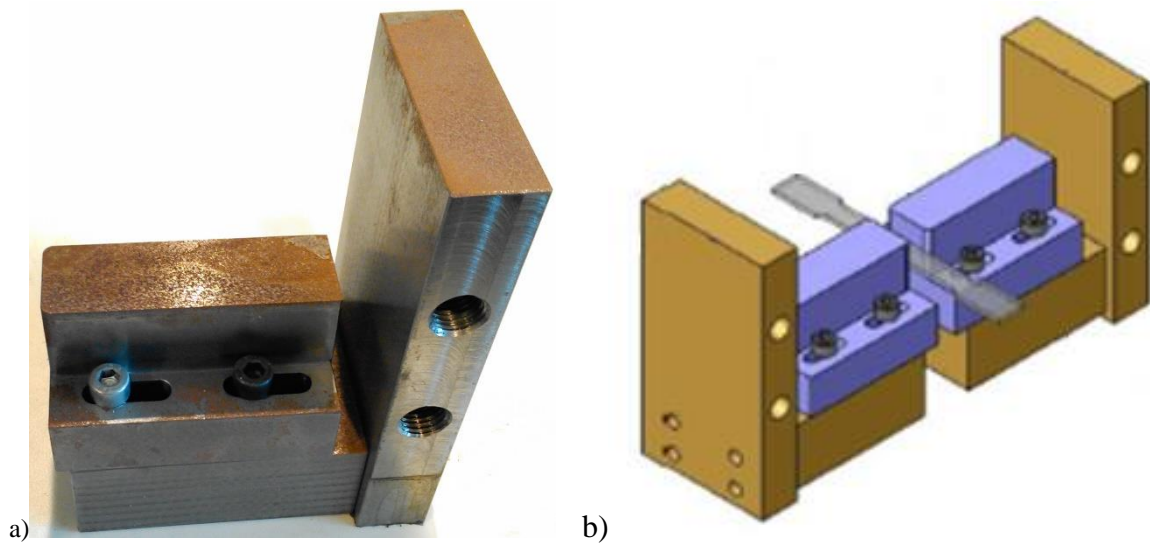


Figura 3.9 – Sistema de compressão (a) fotografia de bloco rígido de compressão e (b) imagem de ensaio de compressão (imagem adaptada de [13]).

3.2. Sistema de medição

O vídeo-extensómetro *Messphysic ME 46 NG* (Figura 3.10) é basicamente uma câmara de aquisição de imagem com um *software* integrado. Neste trabalho usou-se o *DotMeas*, que permite medições estáticas e dinâmicas na casa dos micrómetros, e que se baseia no seguimento de trajetória de pontos e no registo das suas coordenadas ao longo do tempo. De facto, os provetes usados neste trabalho foram dotados de pontos óticos para efeitos de medição das deformações.



Figura 3.10 – Vídeo-extensómetro *Messphysic ME 46 NG*.

O vídeo-extensómetro é montado na parte inferior da máquina num suporte feito para o acomodar. Para funcionar corretamente necessita de parâmetros de luminosidade ótimos que são alcançados com fontes de luz artificiais (Figuras 3.11 a 3.13).

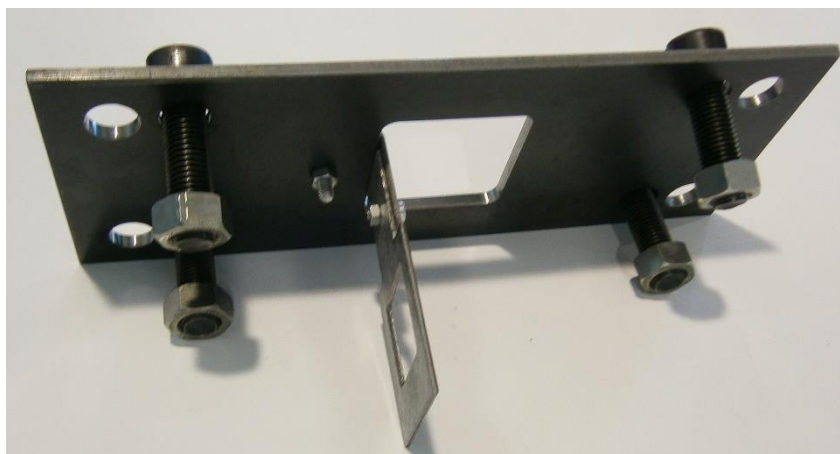


Figura 3.11 – Suporte do vídeo-extensómetro.



Figura 3.12 – Suporte do vídeo-extensómetro montado na máquina.

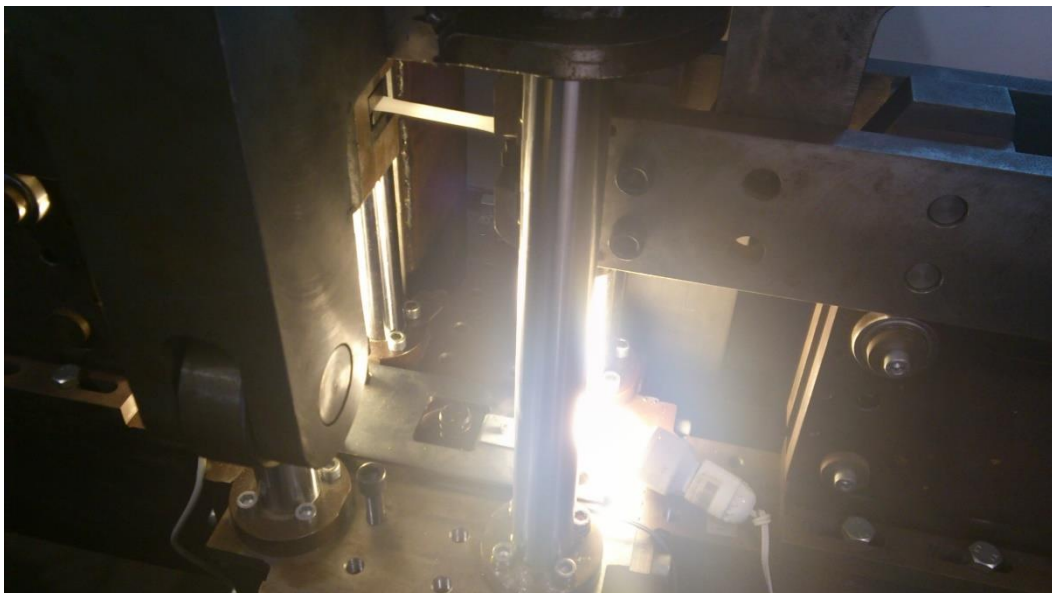


Figura 3.13 – Vídeo-extensómetro montado na máquina com condições de luz ideais.

As células de carga (Figura 3.14) da marca *Xinlan*, referência *XL8111-2T*, com capacidade

de 20kN (Anexo 1), possuem internamente extensómetros de resistência elétrica montados em ponte de *Wheatstone*. Baseiam-se portanto no princípio da variação de resistência à passagem de corrente elétrica com a deformação dos extensómetros. Para a leitura e registo dos seus valores é utilizado o equipamento *Spider8* (Figura 3.15) com o *software* integrado *Catman*, que permite as leituras de carga nas células ao longo do tempo.



Figura 3.14 – Célula de carga.



Figura 3.15 - *Spider8*.

4. Procedimentos experimentais

4.1. Provetes ensaiados

Neste trabalho optou-se por utilizar um material polimérico devido principalmente ao baixo custo, boa maquinabilidade e baixa rigidez, que facilita a medição das deformações numa zona central relativamente pequena, onde era suposto dar-se a rotura. Concretamente, escolheu-se o polipropileno (PP), polímero termoplástico reciclável cujas propriedades são dadas no Anexo 2.

Todos os provetes utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de uma chapa de 5 milímetros de espessura nominal. Para isso recorreu-se ao equipamento disponível nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, nomeadamente serras manual e de fita, fresadora e centro de maquinagem CNC.

Fabricaram-se provetes para ensaios de tração uniaxial e biaxial tração-compressão (Figura 4.1), provetes para ensaios de compressão uniaxial (Figura 4.2), assim como provetes cruciformes para ensaios biaxiais tração-tração (Figura 4.3).

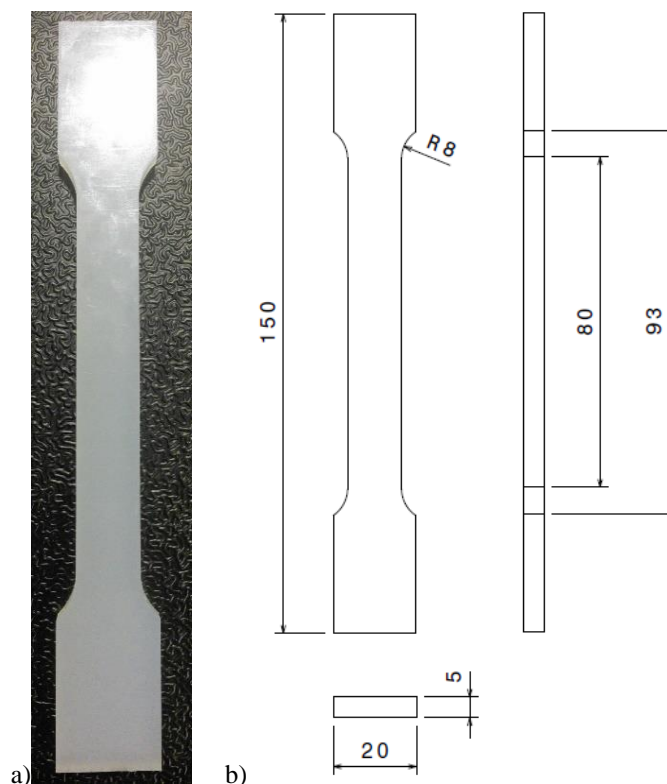


Figura 4.1 – Provede para ensaios de tração uniaxial e biaxiais tração-compressão (a) fotografia (b) desenho.

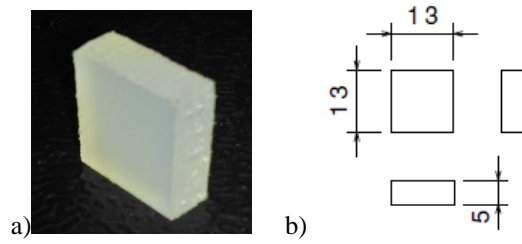
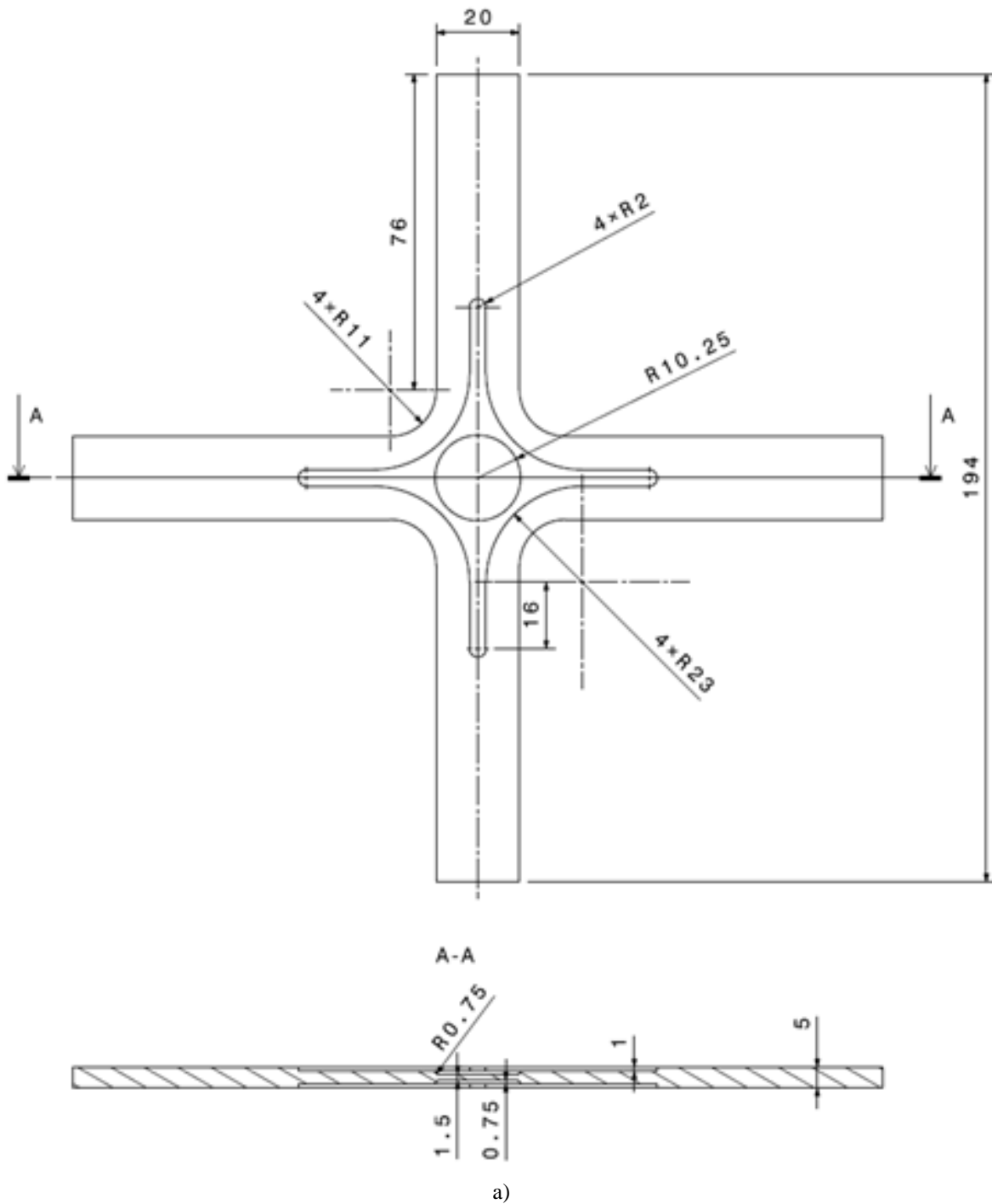
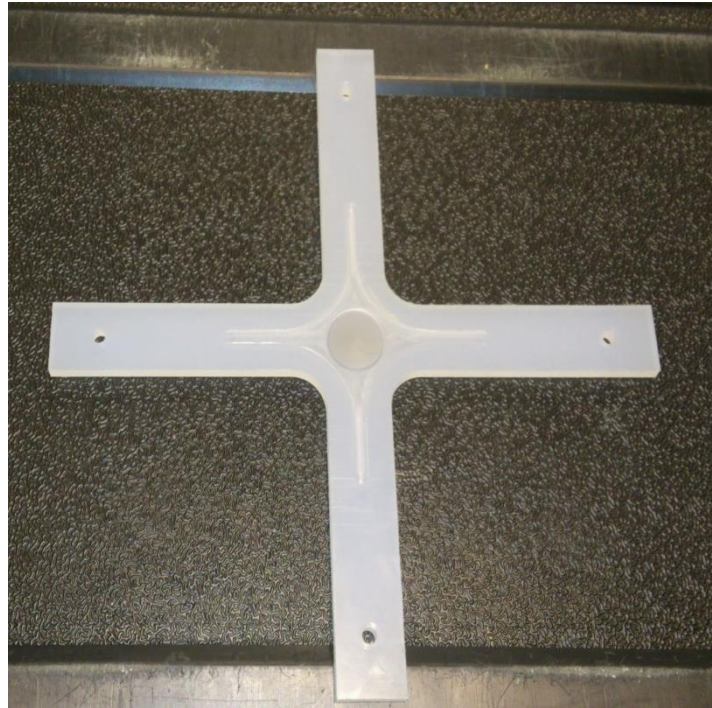


Figura 4.2 – Provede para ensaios de compressão uniaxial (a) fotografia (b) desenho.





b)

Figura 4.3 – Provete cruciforme para ensaios biaxiais tração-tração (a) desenho (b) fotografia.

É de salientar que a geometria do provete cruciforme resultou de um trabalho numérico [15] que decorreu em paralelo com esta Dissertação. Notar a existência de rebaixos no provete junto à zona central, no intuito de aumentar localmente as tensões e promover a rotura na zona de medida.

4.2. Preparativos para ensaios biaxiais

Tendo sido definida a geometria dos provetes para ensaios biaxiais tração-tração, foi necessário projetar e fabricar novas cunhas de amarração (Figura 4.4), dotadas de faces recartilhadas para evitar escorregamento do provete (Figura 4.5), cujo desenho pode ser visto no Anexo 3.

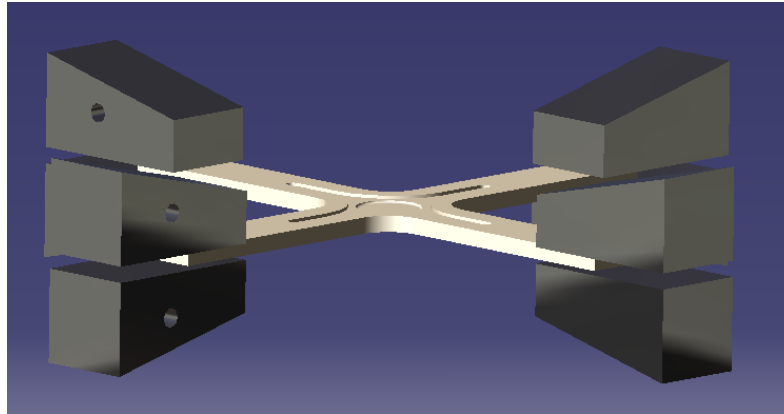
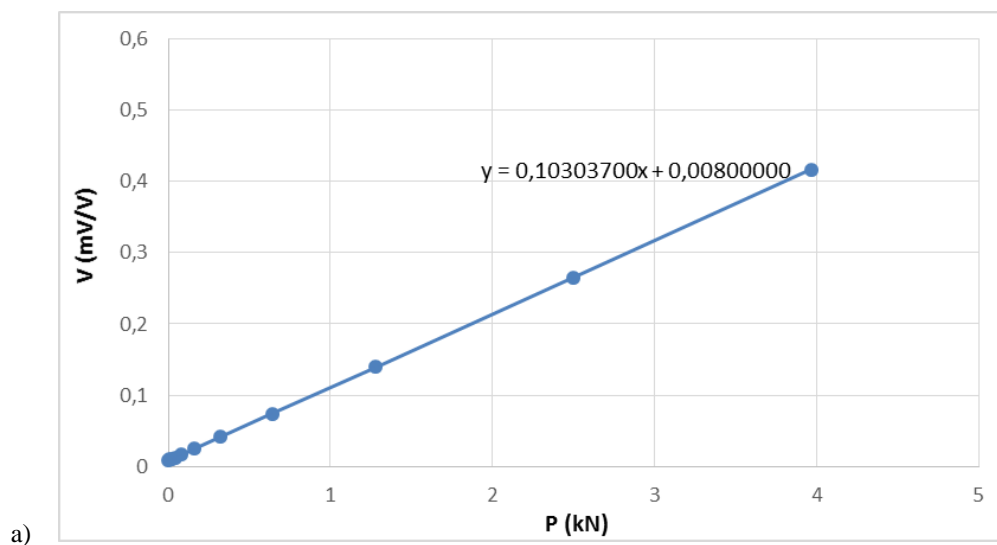


Figura 4.4 – Amarração do provete de ensaios biaxiais tração-tração.



Figura 4.5 – Cunha de amarração à tração.

Para se obterem valores de carga reais em todos os tipos de ensaios, ambas as células de carga foram calibradas quer à tração quer à compressão. Registaram-se os valores da tensão elétrica que a célula retorna ao aplicar cargas previamente conhecidas até 5 kN (Figura 4.6), carga estimada como máximo que os provetes suportariam.



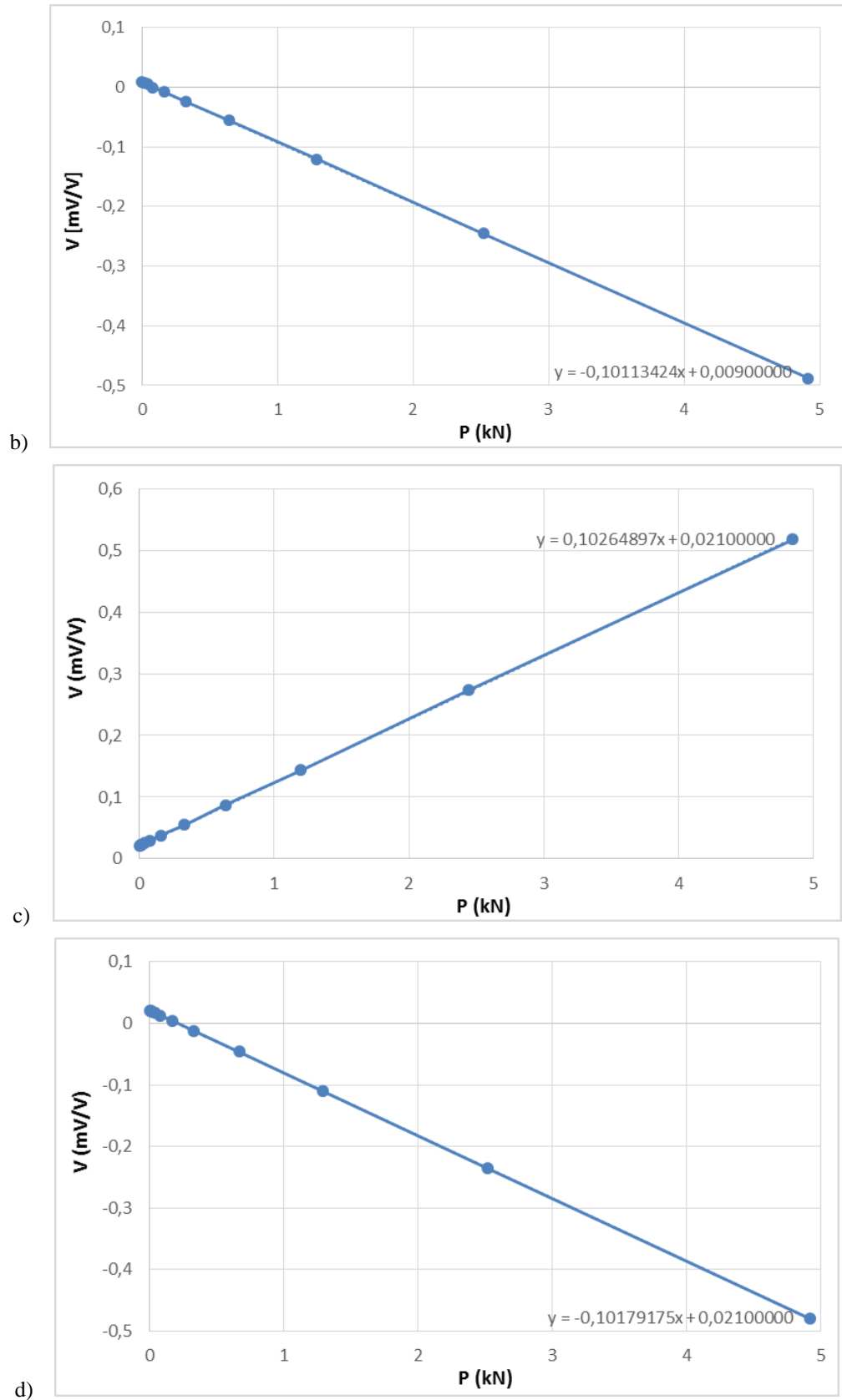


Figura 4.6 – Gráficos de calibração das células de carga (a) célula X à tração (b) célula X à compressão (c) célula Y à tração (d) célula Y à compressão.

Para que o vídeo-extensômetro possa efetuar medidas rigorosas das deformações, são necessárias marcas óticas de alto contraste. Neste trabalho foram utilizadas marcas circulares, que doravante serão designadas por pontos óticos, e marcas retangulares. Os pontos óticos pretos foram impressos em papel branco e colados segundo as direções X e Y à volta do centro geométrico do provete (Figura 4.7a). Os pontos têm diâmetro inferior a trezentos micrómetros ($300 \mu\text{m}$) e estão distanciados entre si aproximadamente cinco milímetros (5 mm). Depois de colados, as distâncias reais entre pontos são medidas ao microscópio, servindo como referência para calibração do vídeo-extensômetro antes de cada ensaio.

Já as marcas retangulares foram realizadas por colagem de tiras de papel, definindo o comprimento de referência em torno do centro do provete (Figura 4.7b). As dimensões das barras não são relevantes para os ensaios, mas é importante que uma das suas faces transversais ao provete seja o mais retilínea possível, e que sobressaia em ambas as faces dos provetes.

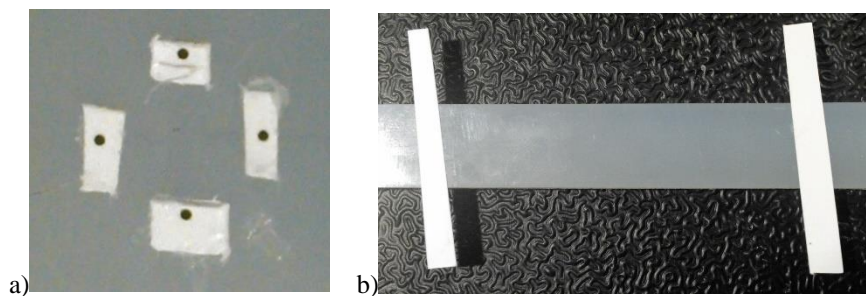


Figura 4.7 – Marcas óticas para leitura de deformações (a) pontos (b) marcas retangulares.

4.3. Aquisição e tratamento de dados dos ensaios biaxiais

Em cada ensaio biaxial são obtidos dois tipos fundamentais de dados ao longo do tempo: carga e posição dos pontos previamente objeto de marcas óticas, distantes inicialmente de $L_{x,0} = L_{y,0} = 5 \text{ mm}$ (Figura 4.8), aproximadamente.

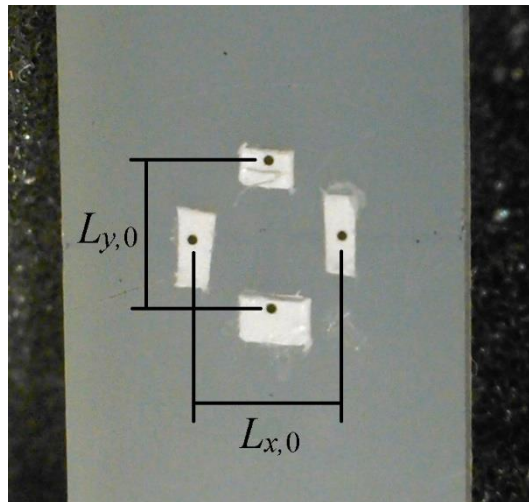


Figura 4.8 – Pontos de medição de deformações.

As cargas foram obtidas do *Spider8* a cada duas décimas de segundo (0.2 s) após aplicação das curvas de calibração das células acima descritas. Já as posições dos pontos (mm) vieram do vídeo-extensómetro através do *Catman* com intervalos de tempo de aquisição de três décimas de segundo (0.3 s). Estes tempos de aquisição foram escolhidos de forma a serem próximos e a conferirem uma boa resolução final dos dados, este intervalo de tempo não foi igual em ambos os *softwares* por impossibilidade de seleção. A combinação dos dados cargas-deslocamentos baseou-se numa interpolação no tempo dos valores das cargas para que estes correspondessem aos instantes de medição das posições dos pontos das marcas óticas. Seguiu-se o cálculo das deformações segundo os dois eixos,

$$\varepsilon_x = \frac{L_x - L_{x,0}}{L_{x,0}}, \quad \varepsilon_y = \frac{L_y - L_{y,0}}{L_{y,0}} \quad (1)$$

4.4. Ensaios uniaxiais

Realizaram-se ensaios uniaxiais de tração e de compressão no sentido de obter resultados complementares essenciais relativos ao comportamento mecânico do material escolhido. Estes ensaios foram efetuados na máquina universal *Shimadzu 50kN-AG* (Figura 4.9).



Figura 4.9 – Máquina universal *Shimadzu 50kN-AG*.

Os ensaios de tração foram realizados a 3 mm/min com uma célula de carga com 50 kN de capacidade e com os provetes (Figura 4.1) presos pelas amarras de cunha disponibilizadas pelo fabricante (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Fotografia de ensaio de tração na *Shimadzu 50kN-AG*.

A medição das deformações foi novamente efetuada com o vídeo-extensómetro *Messphysic ME 46 NG* (Figura 4.9), usando pontos de referência (Figura 4.11a) como nos ensaios

biaxiais, ou marcas óticas retangulares (Figura 4.11b) distantes de 50 mm. No primeiro método, a iluminação incide na face dos pontos, enquanto que no segundo método o foco de iluminação está por trás do provete, promovendo assim uma zona de sombra onde deve haver um claro contraste entre o fundo a branco (iluminado), o provete e as marcas (zona escura não iluminada).

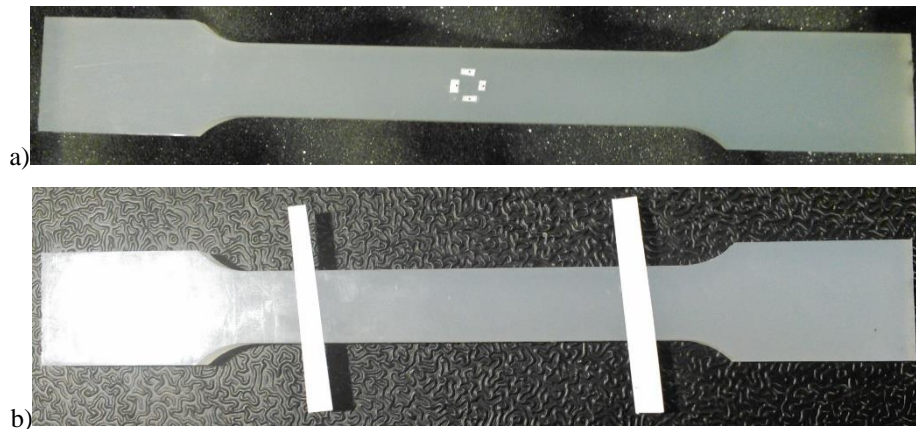


Figura 4.11 - Medição de deformações entre pontos (a) e entre marcas retangulares (b).

A utilização destes dois métodos permitiu uma verificação adicional das medições das deformações. Naturalmente, esta dupla medição servia exclusivamente para averiguar se o facto de os $L_{x,0}$ e $L_{y,0}$ (Figura 4.8) serem tão pequenos conduzia a erros ou efeitos de forma na obtenção da deformação. Na verdade, não é usual medir a deformação com comprimentos entre marcas tão pequenos pois qualquer falha local, um pequeno defeito, por exemplo, é crítico. De referir que se realizaram também alguns ensaios de tração uniaxial com pontos no dispositivo biaxial para efeitos de verificação dos sistemas de medição do mesmo.

Nos ensaios de compressão, realizados a 2 mm/min, a carga foi aplicada diretamente às faces superior e inferior dos provetes (Figura 4.2) por blocos rígidos (Figura 4.12). Dado o pequeno comprimento (13 mm) dos provetes, usado para evitar encurvadura, registaram-se os deslocamentos impostos ao travessão da máquina, depois convertidos em deslocamentos dos provetes. Essa conversão necessitou de uma medição prévia da flexibilidade do sistema de carregamento, que consistiu na realização de ensaios sem qualquer provete. Isto é, os próprios blocos rígidos contactavam entre si (Figura 4.9).



Figura 4.12 – Fotografia de ensaio de compressão.

4.5. Ensaio biaxiais

Realizaram-se ensaios biaxiais de tração-compressão e de tração-tração na máquina de ensaios biaxial (Figura 3.1), cujos resultados permitirão futuramente determinar o comportamento do material polimérico escolhido. Estes ensaios revestem-se de dificuldades acrescidas no que diz respeito à garantia que não há tensões iniciais no provete devidos à amarração com sistema de cunhas (Figura 4.4) e que os movimentos entre eixos se iniciam no mesmo momento. Estas são duas premissas necessárias à obtenção de resultados válidos.

Os ensaios de tração-compressão (Figura 4.13) foram realizados com um rácio de velocidades entre eixos de 2.64:1. Especificamente, adotaram-se velocidades de 7 mm/min e de 2.7 mm/min para os eixos à tração e à compressão, respetivamente.

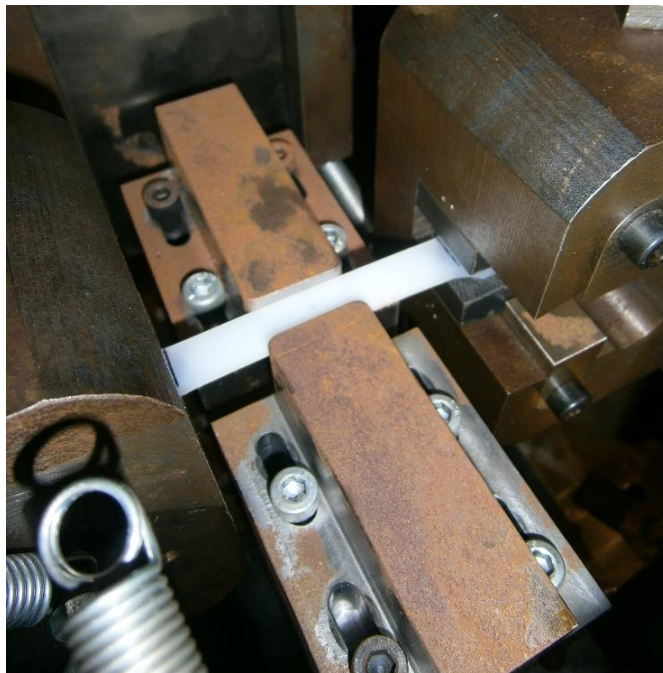


Figura 4.13 - Fotografia de ensaio biaxial tração-compressão.

Os ensaios de tração-tração (Figura 4.14) foram realizados com um rácio de deslocamentos de eixos de 1:1, com velocidades aproximadas de 7 mm/min em cada eixo.



Figura 4.14 – Fotografia de ensaio biaxial tração-tração.

5. Resultados e discussão

5.1. Ensaios uniaxiais

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam curvas tensão-deformação e deformação transversal-deformação longitudinal obtidas nos ensaios de tração uniaxial realizados na *Shimadzu 50kN-AG*, enquanto que a tabela 5.1 resume as principais propriedades medidas.

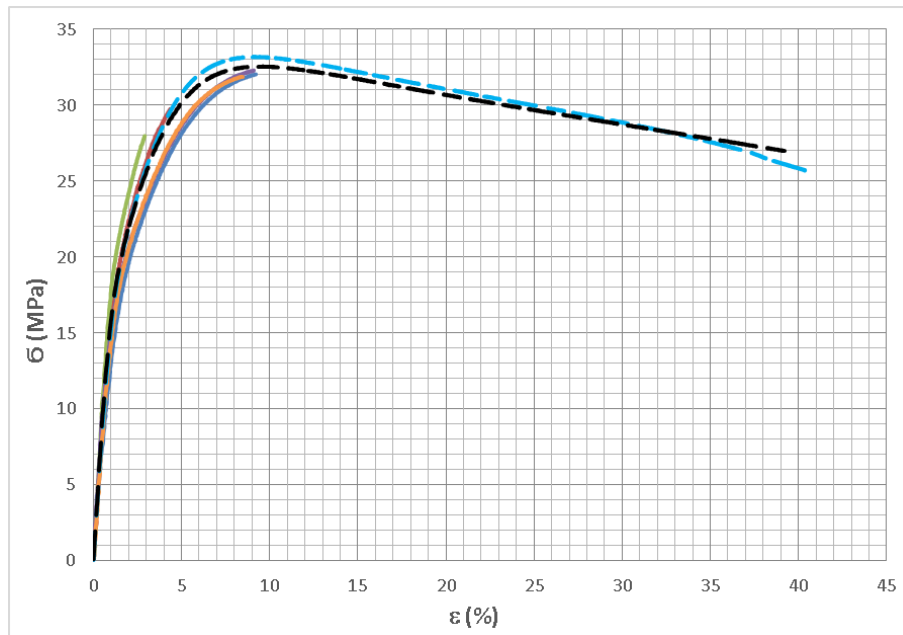


Figura 5.1 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na *Shimadzu 50kN-AG* com medição de deformações por pontos (curvas contínuas) e com medição de deformações por marcas óticas retangulares (curvas a interrompido).

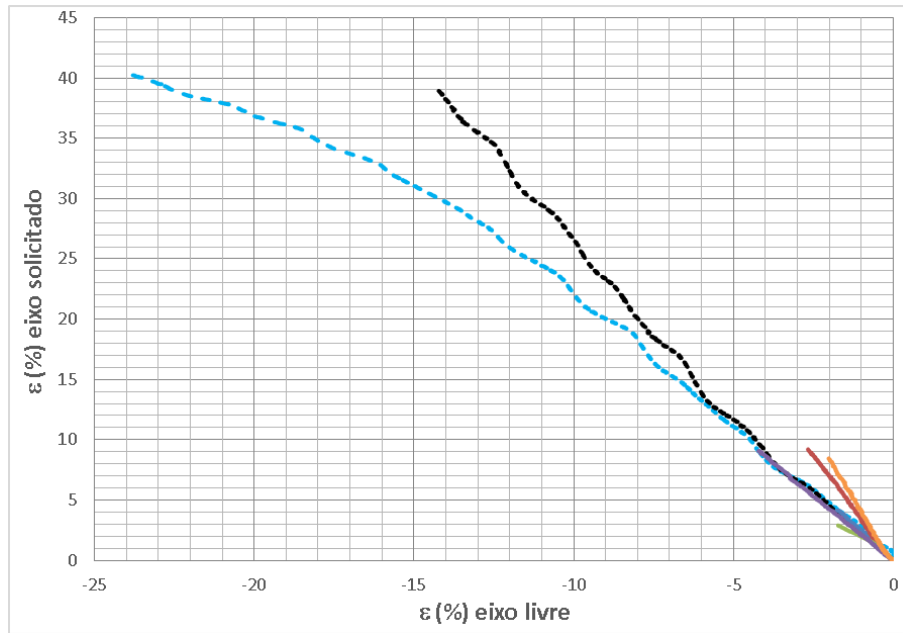


Figura 5.2 – Curvas deformação transversal-deformação longitudinal medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na *Shimadzu 50kN-AG* com medição de deformações por pontos (curvas contínuas) e com medição de deformações por marcas óticas retangulares (curvas a interrompido).

Tabela 5.1 – Principais propriedades medidas nos ensaios de tração.

	Média	Desvio padrão (%)
Módulo de elasticidade (GPa)	1.73	4.14
Tensão de rotura (MPa)	32.6	1.20
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.42	6.09

As curvas da Figura 5.1 mostram um comportamento típico de um material polimérico, com uma zona linear inicial muito limitada. Os métodos de medição de deformações deram resultados muito semelhantes, mas a medição com base em pontos não permitiu chegar a deformações tão elevadas como as que se conseguiram medir com marcas retangulares. Isso deveu-se ao facto dos pontos saírem do campo de visão do vídeo-extensómetro pois, ao contrário do que sucede na máquina biaxial, o centro do provete move-se no sentido do travessão da *Shimadzu*. Em qualquer caso, não era objetivo deste trabalho medir a deformação à rotura deste material, que é muito elevada (Anexo 2), envolvendo já estrição pronunciada. Relativamente às especificações do fornecedor, os valores médios do módulo de elasticidade medido e da tensão de rotura foram superiores em cerca de 33% e 9%, respetivamente. As razões para estas discrepâncias não são claras, mas os resultados obtidos são consistentes, com dispersões estatísticas bastante baixas. Como mostram as fotografias da Figura 5.3, as zonas mais solicitadas, com tom branco mais vivo, localizaram-se na zona

central.

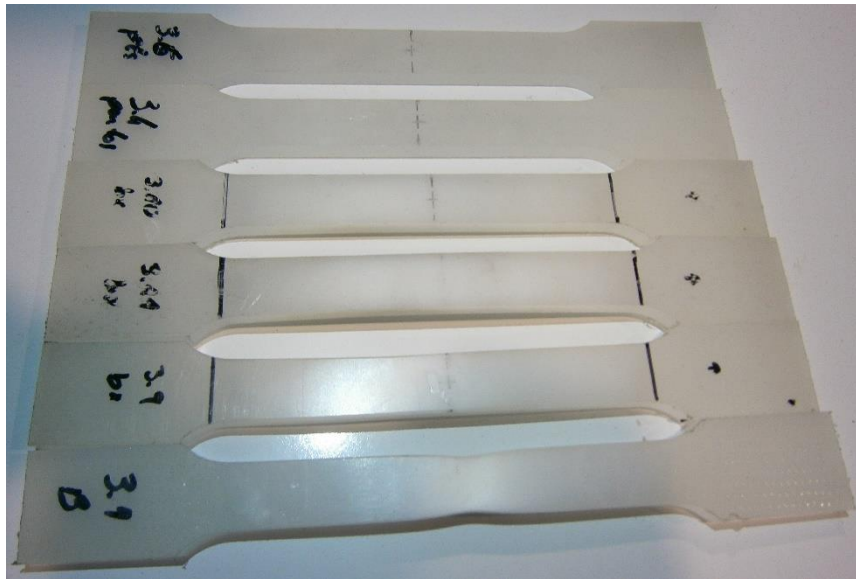


Figura 5.3 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaios de tração uniaxial.

Quanto aos ensaios de tração uniaxial realizados na máquina biaxial, os resultados revelaram-se consistentes com os obtidos na *Shimadzu* (Figura 5.4 e 5.5). Isto reforçou a confiança nos sistemas de medição da máquina biaxial.

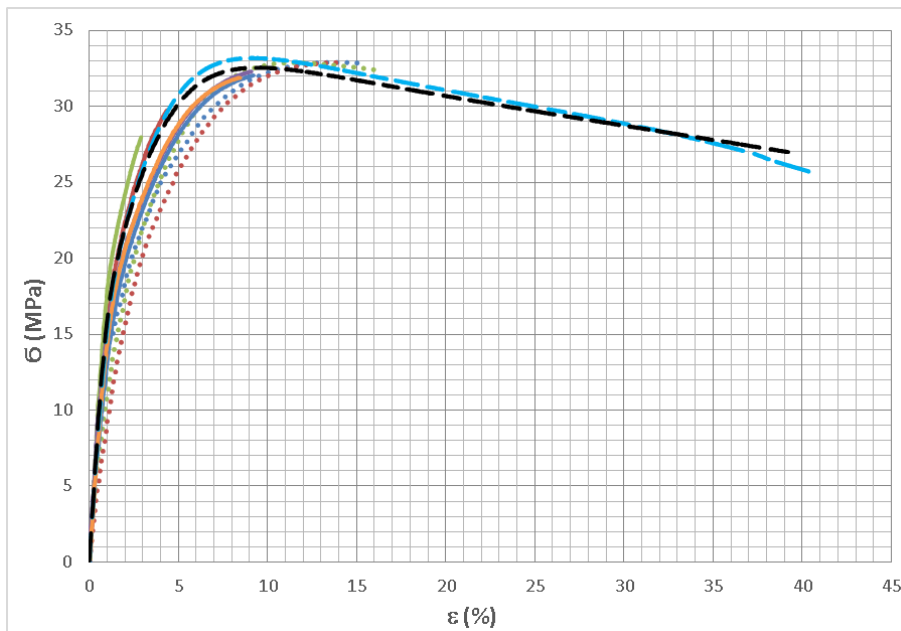


Figura 5.4 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na máquina biaxial (linhas pontilhadas) e na *Shimadzu 50kN-AG* (mesmas linhas apresentadas na Figura 5.1).

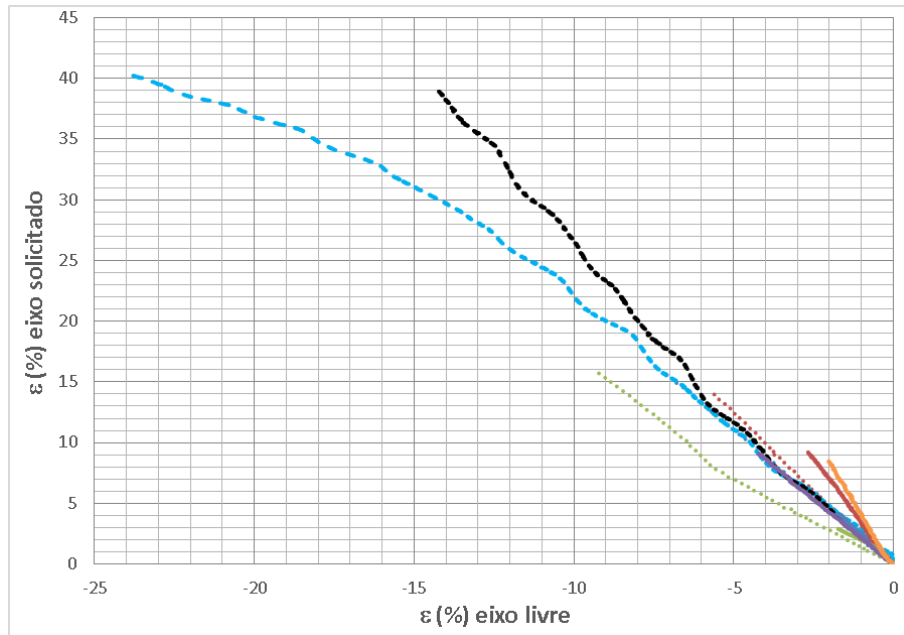


Figura 5.5 – Curvas deformação transversal-deformação longitudinal medidas em ensaios de tração uniaxial realizados na máquina biaxial (linhas pontilhadas) e na *Shimadzu 50kN-AG* (mesmas linhas apresentadas na Figura 5.1).

Finalmente, a Figura 5.6 apresenta curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios uniaxiais de compressão realizados na *Shimadzu 50kN-AG*.

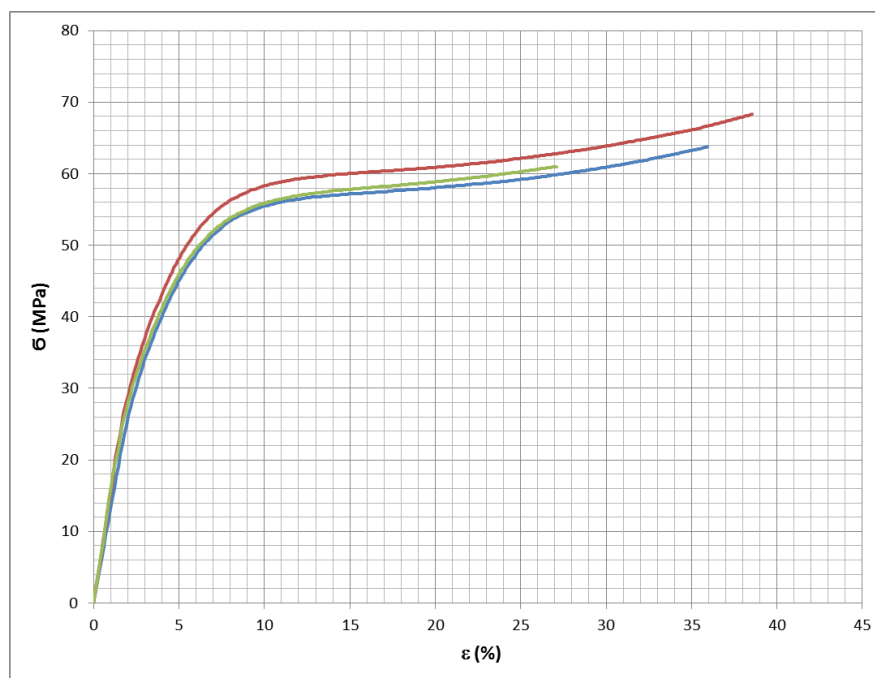


Figura 5.6 – Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de compressão uniaxial realizados na *Shimadzu 50kN-AG*.

As curvas estiveram novamente em concordância com o comportamento habitual de um material polimérico, nomeadamente na não-linearidade pronunciada desde tensões relativamente baixas e no acréscimo da tensão a deformações elevadas devido a embarrilamento do provete (Figura 5.7). Mediram-se módulos de elasticidade de 1.71 e 1.78 GPa consistentes com os obtidos em ensaio de tração (Tabela 5.1). Mesmo antes do efeito do embarrilamento, as tensões atingidas foram bastante superiores às tensões de rotura medidas nos ensaios de tração. Por exemplo, a 15% de deformação, as tensões ficaram entre 57.3 e 60 MPa (Figura 5.6).



Figura 5.7 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaios uniaxiais de compressão.

5.2. Ensaios biaxiais

Foram validados quatro ensaios biaxiais de tração-compressão cujas curvas tensão aparente-deformação segundo os dois eixos são apresentadas na Figura 5.8. Notar que a conversão das cargas em tensões necessita de uma análise mais profunda do ensaio, com recurso a técnicas numéricas, tarefa que está a ser realizada num trabalho de Dissertação a decorrer [15]. Daí adotar-se a designação “tensão aparente”, que é calculada dividindo simplesmente a força num eixo pela área resistente inicial.

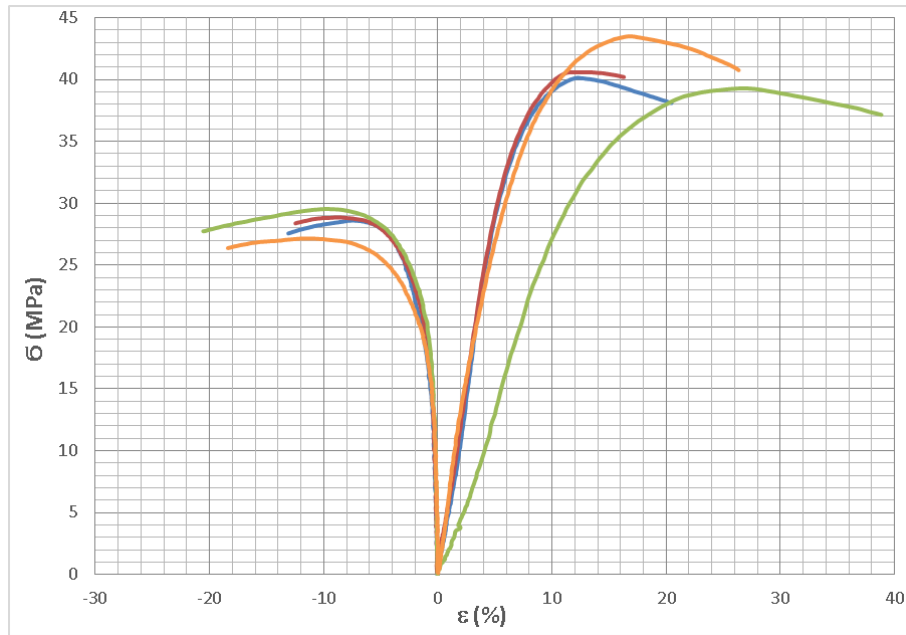


Figura 5.8 – Curvas tensão aparente-deformação segundo cada eixo medidas em ensaios biaxiais de tração-compressão. Para facilitar a comparação das curvas, a tensão de compressão no eixo Y é representada como positiva.

Apesar das incertezas na análise e da complexidade dos ensaios biaxiais, as curvas da Figura 5.8 são consistentes entre si e com as curvas tensão-deformação à tração uniaxial (Figura 5.1) e à compressão uniaxial (Figura 5.6). De facto, a forma das curvas é semelhante e as tensões máximas atingidas em cada eixo não excedem as tensões de rotura medidas em ensaios uniaxiais. Além disso, como se pode observar na Figura 5.9 – área mais clara – as zonas mais solicitadas foram efetivamente as sujeitas simultaneamente à compressão e tração.

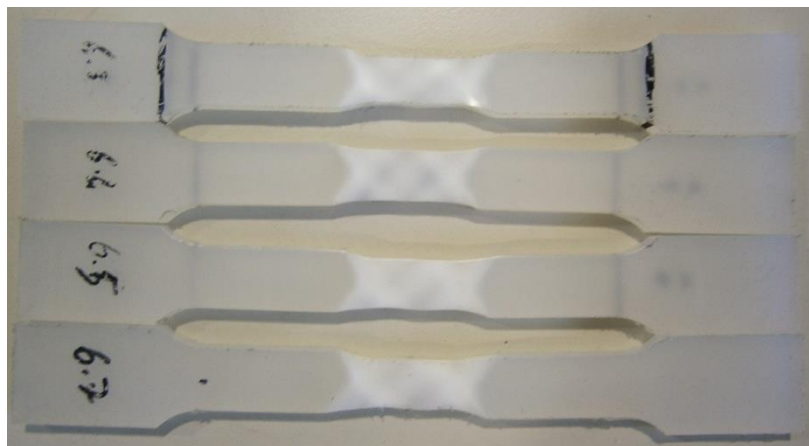


Figura 5.9 – Fotografia de provetes sujeitos a ensaio biaxial de tração-compressão.

Quanto aos ensaios tração-tração em provetes cruciformes, foram validados seis ensaios, estando as curvas carga-deformação segundo os eixos representadas na Figura 5.10. As referidas curvas são semelhantes, como seria de esperar das velocidades idênticas impostas aos dois eixos. Como foi antes referido, também aqui a conversão das cargas em tensões requer modelação numérica que está a ser efetuada noutra trabalho de Dissertação [15].

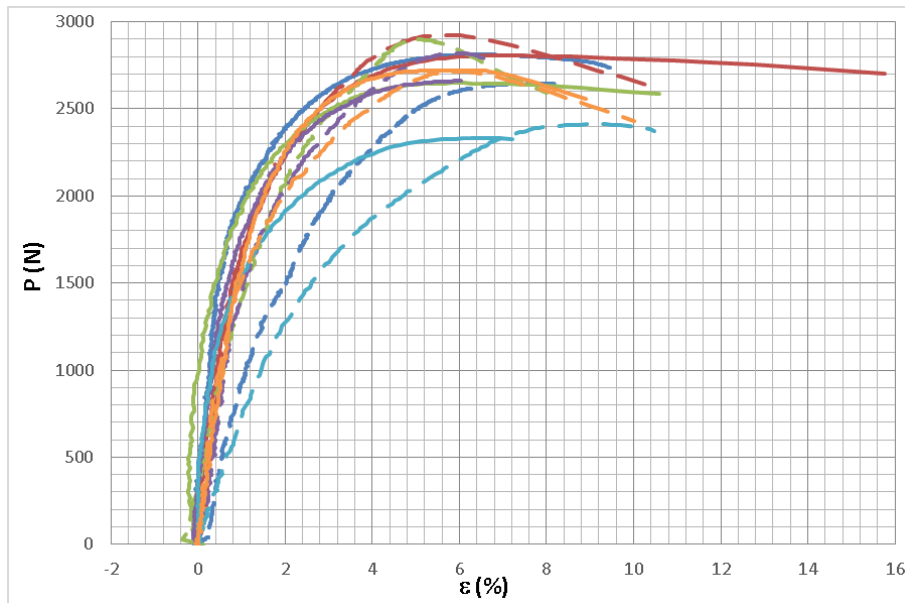


Figura 5.10 – Curvas carga-deformação obtidas nos ensaios biaxiais tração-tração. As curvas contínuas são relativas ao eixo X e as interrompidas ao eixo Y.

As observações dos provetes ensaiados antes (Figura 5.11) e depois da rotura (Figura 5.12) mostraram linhas de concentração de tensões a 45° relativamente aos eixos, sendo que a rotura acabava por ocorrer ao longo de uma delas. Além disso, as referidas linhas são mais notórias nas zonas externas do provete, e não na zona central rebaixada. Logo, a rotura deve iniciar-se nessa zona, o que indica que este provete não é adequado para estudar o comportamento até à rotura do material.



Figura 5.11 – Fotografia de provete cruciforme que mostra as zonas de concentração de tensões em branco mais vivo.



Figura 5.12 – Fotografia de provete cruciforme após o ensaio.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Em primeiro lugar, conseguiu-se neste trabalho validar a máquina de ensaios biaxiais concebida e construída no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro através dos vários ensaios uniaxiais e biaxiais efetuados. Mais concretamente, os resultados de ensaios de tração uniaxial do material escolhido (polipropileno) estiveram em boa concordância com os resultados de ensaios realizados numa máquina universal de ensaios. Além disso, os resultados de ensaios biaxiais tração-tração e tração-compressão revelaram-se consistentes com os resultados dos ensaios uniaxiais de tração e de compressão.

Em segundo lugar, os resultados dos ensaios efetuados correspondem ao comportamento esperado para um material polimérico, e constituem uma etapa para a caracterização integral do seu comportamento mecânico.

Não obstante, para completar a caracterização do material há que, em trabalhos futuros:

- conceber novas geometrias de provetes cruciformes, já que, na geometria ensaiada neste trabalho, a rotura não se iniciou na zona de medida;
- realizar estudos numéricos que permitam definir os estados de tensão na zona de medida perante solicitações biaxiais.

No que diz respeito à máquina de ensaios biaxiais e aos procedimentos de ensaios, há ainda alguns aspetos que podem ser melhorados, tendo sobretudo em mente reduzir os tempos de preparação de ensaios:

- alteração da geometria dos braços para que a troca de amarras num eixo se consiga efetuar sem necessidade de retirar todos os componentes do eixo, o que atualmente é trabalho para duas pessoas, devido ao seu peso;
- criação de sistema de alinhamento dos eixos da máquina que dê informação visual ao operador;
- elaboração de sistema de monitorização da posição dos eixos da máquina que forneça também informação visual ao operador;
- adoção de sistema de iluminação fixo que proporcione condições apropriadas de luminosidade;
- definição de um método mais simples e eficaz para efetuar os pontos óticos, substituindo a colagem de pontos individuais;

- alteração da posição de montagem das maxilas de tração, dotando-as de aberturas laterais todas no mesmo lado para permitir a colocação de um provete cruciforme por rotação do mesmo.


Referências bibliográficas

- [1] Quaak, G., 2008. Biaxial testing of sheet metal: An experimental-numerical analysis, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Computational and Experimental Mechanics, p. 1-33.
- [2] Hannon, A., Tiernan, P., 2008. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 198: 1-8.
- [3] Hemelrijck, D. V., Smits, A., 2003. Biaxial testing of fibre reinforced composites. Disponível em: http://www.wmc.eu/public_docs/10096_000.pdf [Data da consulta: 01/02/2013].
- [4] Altenbach, H., Tushtev, K., 2001. A new static failure criterion for isotropic polymers. *Mechanics of Composite Materials*, 37 5/6: 475-482.
- [5] Bhatnagar, N., Bhardwaj, R., Selvakumar, P., Brieu, M., 2007. Development of a biaxial tensile test fixture for reinforced thermoplastic composites. *Polymer Testing*, 26: 154–157.
- [6] Tasan, C. C., Hoefnagels, J. P. M., Dekkers, E. C. A., Geers, M. G. D., 2012. Multi-Axial Deformation Setup for Microscopic Testing of Sheet Metal to Fracture. Disponível em: http://www.springerimages.com/Images/Engineering/1-10.1007_s11340-011-9532-x-0 [Data da consulta: 01/02/2013].
- [7] Makinde, A., Thibodeau, L., Neale, K.W., 1992. Development of an apparatus for biaxial testing for cruciform specimens. *Experimental Mechanics*, 32: 138–144.
- [8] Boehler, J.P., Demmerle, S., Koss, S., 1994. A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials. *Experimental Mechanics*, 34: 1–9.
- [9] Kuwabara, T., Ikeda, S., Kuroda, K., 1998. Measurement and analysis of differential work hardening in cold rolled steel sheet under biaxial tension. *Journal of Materials Processing Technology*, 80–81: 517–523.

- [10] Fraunhofer, 2005. Dynamic material testing. Disponível em: <http://www.emi.fraunhofer.de> [Data da consulta: 01/02/2013].
- [11] Ferron, G., Makinde, A., 1988. Design and development of a biaxial strength testing device. *Journal of Testing and Evaluation*, 16: 253–256.
- [12] Terriault, P., Settoutane, K., Brailovski, V., 2003. Biaxial testing at different temperatures of cruciform TI–NI samples. *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST)*, Pacific Grove, USA, 247-257.
- [13] Araújo, J. T A, 2013. Dispositivo de ensaio biaxial de provetes cruciformes. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- [14] Plásticos de uso geral, Disponível em: <http://www.lanema.pt> [Data da consulta: 01/02/2013].
- [15] Batista, P. M R, 2013. Conceção de amostras para ensaios biaxiais. Relatório de Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica em curso, Universidade de Aveiro.

Anexos

Anexo 1 – Ficha técnica da célula de carga

Certificate of Calibration	
Model	ST-7
Capacity	2T
Serial No	09050605
Output	1.9998 mv/v
Zero	< 2 % of Full Scale
Creep(30min)	< 0.02 % of Full Scale
Non-linearity	< 0.02 % of Full Scale
Hysteresis	< 0.02 % of Full Scale
Repeatability	< 0.02 % of Full Scale
Temperature effect on Output	< 20 ppm/°C of Applied Load
Temperature effect on Zero	< 20 ppm/°C of Applied Load
Operating Temperature Range	-40°C to 80°C
Compensated Temperature Range	-10°C to 40°C
Safe overload	1.5×Capacity
Input Impedance	385 ± 3 ohms
Output Impedance	350 ± 2 ohms
Insulation Resistance	>5000 Meg-ohms
Recommended Excitation	10VDC/AC
Maximum Excitation	20VDC/AC
Color code:	
Red	+Input
Black	-Input
Green	+Output
White	-Output
 Inspector	
Date: 2009. 05. 06	

Anexo 2 – Propriedades do material utilizado para os provetes [14].

PROPRIEDADES	Ensaio DIN	Unidades	PP
Cor			Natural
Densidade	53479	g/cm ³	0.91
Absorção da água			
Até à saturação no ar a 23° C / 50 % RH	53495	%	0
Até à saturação na água a 23° C	-	%	0
Propriedades Térmicas			
Temperatura de fusão	-	° C	165
Temperatura de transição vítrea	53460	° C	90
Condutibilidade térmica a 23° C	52612	w/(K.m)	0.22
Coefficiente de expansão térmica: entre 23 e 60° C	-	10E -6m/(m,.k)	
Coefficiente de expansão térmica: entre 23 e 100° C		10E 6m/(m,.k)	200
Temperatura máxima de serviço (ao ar)			
Períodos curtos	-	° C	135
Em contínuo	-	° C	90
Temperatura mínima de serviço	-	° C	0
Inflamabilidade:			
- Índice de oxigénio	-	%	18
- De acordo com UL 94 (espessura 1,6 mm)	-	-	
Propriedades Mecânicas			
Ensaio de tracção :			
Resistência à tracção - deformação	53455	MPa	30
Deformação à ruptura	53455	%	70
Módulo de elasticidade	53457	MPa	1300
Ensaio de compressão :			
Resistência à compressão com 2% de deformação	53454	MPa	11
Ensaio de fluência á tracção :			
Esforço p/ produzir 1 % de alongamento em 23°C/100°C	53461	MPa	22
Resistência ao impacto sem entalhe - CHARPY	53453	KJ/m ²	8
Resistência ao impacto com entalhe - CHARPY	53453	KJ/m ²	Sem ruptura
Dureza por bola de aço	53456	N/mm ²	65
Dureza Shore	53305	-	D 65
Propriedades Eléctricas			
Rigidez eléctrica	53481	kV/mm	58
Resistividade volumétrica	53482	Ohm. cm	> 10 ¹⁷
Resistividade superficial	53482	Ohm	10 ¹⁴
Constante dieléctrica - a 50Hz	53483	-	2.25
- a 1MHz	53483	-	
Factor de dissipação dieléctrica tan. δ : - a 100 Hz	53483	-	0.0002
- a 1 MHz		-	
Resistência á descarga superficial	IEC 112	-	

NOTA: 1 g/cm³ = 1.000 kg/m³; 1 Mpa = 1 N/mm²; 1KV/mm = 1 MV/m

Anexo 3 – Desenho técnico dos calços de amarração.

