

**Ensaaios mecânicos de
tração-compressão em provetes
metálicos miniaturizados
Desenvolvimento de um equipamento
especializado**

Daniel Jácome da Cruz



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Abel Dias dos Santos

Co-orientador: Prof. Joaquim Gabriel e Eng. Sara Miranda

26 de Setembro de 2019

**Ensaio mecânico de tração-compressão em provetes
metálicos miniaturizados
Desenvolvimento de um equipamento especializado**

Daniel Jácome da Cruz

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

Os ensaios mecânicos uniaxiais em provetes miniaturizados são ensaios simples, mas poderosos, para caracterizar o comportamento de um material. Com base nessa técnica, foi desenvolvido um sistema experimental para determinar as propriedades mecânicas de materiais metálicos sob a forma de chapa metálica. Assim, foi projetado um equipamento para solicitações uniaxiais de tração e compressão capaz de atingir uma taxa de deformação de cerca de 10^{-3} s^{-1} na seção de referência do provete. Como a encurvadura do provete é um fenômeno importante em ensaios de compressão, a sua geometria foi devidamente estudada e otimizada para minimizar e evitar esse efeito. O equipamento inclui amarras personalizadas que garantem o alinhamento correto do provete em relação ao eixo de solicitação e é composto por três grupos de componentes com a sua função bem definida: o primeiro é o grupo motor, que inclui um fuso de esferas acionado por um motor de passo que garante um movimento contínuo e preciso do provete; o segundo é o grupo condutor responsável pelo guiamento dos diversos componentes; por último o grupo de instrumentação constituído por um elemento de medição de força e outro de deslocamento. Para medir a força durante o ensaio, é utilizada uma célula de carga do tipo "S", enquanto a avaliação dos campos de deformação no plano da chapa é realizada pela técnica de correlação de imagem digital. Após estas medições avaliam-se as curvas de encruamento para alguns materiais metálicos estudando-se fenómenos característicos deste material tais como o efeito de *Bauschinger* ou o diferencial de tensão.

Palavras-chave: ensaio de tração, caracterização mecânica de materiais, *Bauschinger effect*, diferencial de tensão.

Abstract

The miniature uniaxial tensile testing is a simple yet powerful method to characterize the behavior of a material. Based on this technique, an experimental system was developed aiming the determination of sheet metal mechanical properties. A tensile-compression loading device was designed capable to achieve a strain rate of about 10^{-3} s^{-1} at the gauge area. Being the buckling behavior an important phenomenon, a miniature sample geometry was studied and optimized to minimize and to avoid such effect. The device includes custom-made clamps that guarantee the alignment of the sample with respect to the loading axis, and is generally composed of three groups of components with their function well-defined: the first is the motor group, which includes a ball-screw, driven by a stepper motor that ensures continuous and precise movement of the sample; the second is the conducting group responsible for guiding the various components; finally, the instrumentation group consists of a force measuring element and a displacement element. To measure force during the test, an "S" type load cell is used, while the evaluation of strain fields in the specimen plane is performed by the digital image correlation technique. After these measurements, the hardening curves for some metallic materials are evaluated by studying characteristic phenomena such as the *Bauschinger* effect and the stress differential.

KeyWords: tensile test, material mechanical characterization, Bauschinger effect, stress differential.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradecer ao professor Abel Dias dos Santos por todo o apoio e partilha de conhecimento no desenvolvimento da presente dissertação. O seu espírito crítico foi fundamental para o trabalho realizado. Agradecer também ao professor Joaquim Gabriel pela disponibilidade e por todas as sugestões pertinentes Joaquim Gabriel. Agradecer também à professora Marta Oliveira pelo seu espírito crítico na análise dos resultados obtidos.

Ao Rui Amaral e à Sara Miranda pela contínua ajuda, orientação e partilha de conhecimentos ao longo do semestre.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Bessa Pacheco e ao Engenheiro António Azevedo, pela partilha de conhecimento no projecto e construção do equipamento, fruto de muitos anos de experiência.

Ao Sahand Pourhassan por toda a ajuda na realização dos ensaios experimentais. O seu conhecimento foi essencial e uma mais valia para o trabalho realizado.

Aos meus colegas e amigos de laboratório Miguel, João e Rogério pela inter-ajuda e companhia ao longo do semestre, sempre com partilha de opiniões mas sobretudo boa disposição.

À minha melhor amiga e namorada Beatriz, por tudo o que vivemos nesta aventura pessoal e académica ao longo dos últimos cinco anos.

A todos os meus amigos, que muitas vezes foram sacrificados pela minha ausência durante os momentos mais críticos destes anos.

Agradecer à minha família, por tudo o que fizeram por mim até ao dia de hoje. Devo-vos tudo o que sou.

Por fim, um agradecimento especial pelo apoio do DEMec e SMPT e o financiamento no âmbito dos projetos P2020-PTDC/EMS-TEC/6400/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016876), POCI-01-0145-FEDER-031243, POCI-01-0145-FEDER-030592, POCI-01-0145-FEDER-032466, NORTE-01-0145-FEDER-000022, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (Compete2020) e Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da sua componente do Orçamento de Estado.



Daniel Jácome da Cruz

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Ensaaios uniaxiais miniaturizados	5
2.1	Ensaio de tração	9
2.1.1	Correlação digital de imagem	11
2.2	Ensaio de compressão	13
3	Ensaio de tração à escala macro	19
3.1	Caraterização do ensaio	19
3.1.1	Curva tensão - extensão convencional	20
3.1.2	Curva tensão-extensão real	26
3.2	Análise experimental	28
3.2.1	Materiais utilizados	28
3.2.2	Condições de ensaio	30
3.2.3	Resultados experimentais - liga de alumínio AA5754-T4	30
3.2.4	Resultados experimentais - liga de magnésio AZ31B	32
3.3	Modelação numérica do ensaio de tração	34
3.3.1	Leis de encruamento	34
3.3.2	Resultados numéricos	37
4	Ensaio de tração com provetes miniaturizados	39
4.1	Caraterização do equipamento existente	39
4.1.1	Mesa linear	40
4.1.2	Motor	41
4.1.3	Célula de carga	41
4.2	Adaptação do protótipo	42
4.2.1	Projeto do sistema de amarração	42
4.2.2	Implementação do transdutor de deslocamento	44
4.3	Ensaaios experimentais	46
4.3.1	Caraterísticas dos provetes	46
4.3.2	<i>Setup</i> experimental	47
4.3.3	Preparação dos provetes	48
4.3.4	Parâmetros dos ensaios	50
4.3.5	Resultados experimentais	51
4.3.6	Conclusões	63

5	Desenvolvimento do protótipo - <i>Mini Sample Tester Device</i>	65
5.1	Revisão bibliográfica	65
5.2	Requisitos do MSTD (<i>Mini Sample Tester Device</i>)	67
5.3	Versões	69
5.4	<i>Mini Sample Tester Device</i> - protótipo final	70
5.4.1	Considerações sobre o novo protótipo	73
5.5	Ensaaios experimentais	74
5.5.1	Contextualização	75
5.5.2	Metodologia	79
5.5.3	Resultados experimentais	84
6	Considerações finais	97
6.1	Conclusões	97
6.2	Perspetivas de trabalhos futuros	98
	Referências	101

Lista de Figuras

2.1	Ensaio mecânico para a caracterização de chapas metálicas e correspondentes estados de tensão nos eixos principais (σ_1 e σ_2).	5
2.2	Geometria do provete normalmente utilizado em ensaios de tração.	6
2.3	Classificação de diferentes escalas de fabrico.	6
2.4	Representação de exemplos de provetes miniaturizados utilizados em ensaios uniaxiais: (a) macro provete; (b) meso provete; (c) micro provete.	7
2.5	Exemplo do uso de provetes miniaturizados na avaliação das propriedades de uma junta soldada.	8
2.6	Exemplo do uso de micro provetes em fabrico aditivo para análise do comportamento mecânico de camadas em diferentes direções de construção.	8
2.7	Imagem <i>SEM</i> de um provete de cobre nanocristalino com uma área transversal de $0.5 \times 0.015 \text{ mm}^2$	9
2.8	Representação esquemática de uma projétil de cobre de onde foram removidos micro provetes para teste.	9
2.9	Micro amostra de silício policristalino testada a 670°C	9
2.10	Geometria característica dos provetes para o ensaio de tração.	10
2.11	Esquema de montagem típico de um sistema DIC.	12
2.12	Exemplos de padrões <i>speckles</i>	12
2.13	Exemplo de aplicação do software de pós processamento num ensaio de tração convencional.	13
2.14	Representação esquemática do ensaio de compressão de cilindro e do efeito de barril.	14
2.15	Exemplos de tipos de encurvadura possíveis num ensaio de compressão em chapa metálica.	14
2.16	Representação do efeito de uma carga compressiva excêntrica.	15
2.17	Exemplo de soluções construtivas para realização de ensaios de compressão no plano.	16
3.1	Esquema de equipamento utilizado em ensaios de tração uniaxiais.	19
3.2	Exemplos de provetes utilizados em ensaios de tração uniaxiais à escala macro.	20
3.3	Representação da curva tensão-extensão convencional, obtida num ensaio de tração uniaxial de um material dúctil.	21
3.4	Diferentes tipos de curvas tensão-extensão convencional, (a) com fenómeno de cedência e (b) sem fenómeno de cedência.	23
3.5	Curva tensão convencional-extensão convencional com patamar de cedência.	24
3.6	Tensões limite de proporcionalidade para materiais sem patamar de cedência.	24
3.7	Parâmetros referentes à ductilidade de um material.	25
3.8	Representação esquemática das curvas tensão-extensão convencional e real.	26
3.9	Parâmetros e condições de ensaio.	30

3.10	Representação da evolução da força em função da variação do comprimento de referência para a liga AA5754.	31
3.11	Diferentes tipos de bandas de deformação plástica localizada devido ao efeito Portevin-Le Chatelier.	31
3.12	Representação da curva (a) tensão-extensão convencional e (b) tensão-extensão real da liga AA5754.	32
3.13	Representação da força convencional em função da variação do comprimento de referência para a liga AZ31B.	33
3.14	Representação da curva (a) tensão-extensão convencional e (b) tensão-extensão real da liga AZ31B.	33
3.15	Representação da aproximação analítica do comportamento plástico da liga AA5754 pela lei de <i>Voce</i>	35
3.16	Caraterização analítica por <i>Johnson-Cook</i> da liga AZ31B e respetiva comparação com os resultados experimentais e lei de <i>Voce</i>	36
3.17	Representação da distribuição da (a) tensão e (b) da deformação no provete de tração da liga AA5754.	37
3.18	Representação gráfica do resultado obtido por simulação numérica e respetiva comparação com os valores experimentais para a liga AA5754.	37
3.19	Representação da distribuição da (a) tensão e (b) da deformação no provete de tração da liga AZ31B.	38
3.20	Representação gráfica do resultado obtido por simulação numérica e respetiva comparação com os valores experimentais para a liga AZ31B.	38
4.1	Representação da máquina existente para ensaios de células solares.	39
4.2	Constituição do protótipo inicial	40
4.3	Mesa Linear igus® e respetivas especificações.	40
4.4	Motor passo a passo da <i>Oriental Motors</i> e respetivas especificações.	41
4.5	Celula de Carga da <i>HBM</i> e respetivas especificações.	41
4.6	Arquitetura de sistema do protótipo inicial adaptado.	42
4.7	Conjunto final das amarras no protótipo inicial.	43
4.8	Análise estrutural da amarra fixa.	43
4.9	Análise estrutural da amarra móvel.	43
4.10	LVDT da <i>RDP Electronics Ltd</i> e respetivas especificações.	44
4.11	Sinal de saída do LVDT.	44
4.12	Filtros utilizados para reduzir o ruído do LVDT.	45
4.13	Sinal tratado de saída do LVDT e respetivos valores dos componentes utilizados nos circuitos.	45
4.14	Representação da influência do campo magnético do motor no sinal do LVDT. . .	46
4.15	Representação da influência do campo magnético do motor no sinal do LVDT (b) estando montado como representado em (a).	46
4.16	Representação das duas geometrias de provetes miniaturizados.	47
4.17	<i>Setup</i> experimental utilizado na realização dos ensaios.	48
4.18	Protótipo devidamente instalado numa mesa ótica.	48
4.19	Representação dos equipamentos utilizados no fabrico dos provetes miniaturizado. .	49
4.20	(a) Provetes após a aplicação do primário e (b) após a aplicação do <i>speckle</i>	49
4.21	Representação gráfica da repetibilidade dos ensaios de tração utilizando: (a) provetes do Tipo 1, (b) provetes do Tipo 2, da liga AA5754.	51
4.22	Representação (a) da distribuição da deformação e (b) da extensão obtida antes da rotura, dos provetes do Tipo 1 da liga de AA5754.	52

4.23	Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 1 da liga AA5754.	52
4.24	Representação gráfica (a) da curva força nominal-extensão convencional e (b) da curva tensão-extensão convencionais para os provetes do Tipo 1 da liga AA5754.	53
4.25	Representação (a) da distribuição da deformação e (b) da extensão máxima obtida antes da rotura, dos provetes do Tipo 2 da liga de AA5754.	54
4.26	Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 2 da liga AA5754.	54
4.27	(a) Equipamento utilizado na medição dos provetes e (b) representação da irregularidade dos provetes do Tipo 2.	55
4.28	Representação gráfica da curva tensão-extensão convencionais para os provetes do Tipo 2 da liga AA5754.	55
4.29	Representação gráfica das curvas de engenharia dos provetes Tipo 1, Tipo 2 e respetiva comparação com os ensaios de tração à escala macro, da liga AA5754.	56
4.30	Representação gráfica da repetibilidade dos ensaios de tração utilizando: (a) provetes do Tipo 1, (b) provetes do Tipo 2, da liga AZ31B.	58
4.31	Representação (a) da extensão obtida antes da rotura e (b) da rotura dos provetes do Tipo 1 da liga de AZ31B.	58
4.32	Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 1 da liga AZ31B.	59
4.33	Representação gráfica da curva tensão-extensão convencional para os provetes do Tipo 1 da liga AZ31B.	59
4.34	Representação (a) da extensão obtida antes da rotura e (b) da rotura dos provetes do Tipo 2 da liga de AZ31B.	60
4.35	Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do tipo 2 da liga AZ31B.	61
4.36	Representação gráfica da curva tensão-extensão convencional para os provetes do Tipo 2 da liga AZ31B.	61
4.37	Representação gráfica das curvas de engenharia dos provetes Tipo 1, Tipo 2 e respetiva comparação com os ensaios de tração à escala macro, da liga AZ31B.	62
5.1	Equipamento, desenvolvido por Gorji e Mohr.	66
5.2	Equipamento desenvolvido por Rego.	66
5.3	Equipamento utilizado por Lim e Kim.	67
5.4	Equipamento desenvolvido pela universidade de <i>Dallas</i>	68
5.5	Diferentes versões do MSTD projetadas antes do protótipo final.	69
5.6	Medidas gerais de atravancamento do MSTD.	70
5.7	Representação das posições extremas de trabalho do MSTD.	71
5.8	Representação do conceito final do MSTD e a sua constituição geral.	72
5.9	Representação da furação complementar realizada no MSTD.	73
5.10	Análise estrutural do suporte da esquerda (1).	73
5.11	Representação da versatilidade de posições de utilização do MSTD.	74
5.12	Resultado final do MSTD após maquinaria e montagem dos componentes.	74
5.13	Representação do efeito de Baushinger.	75
5.14	Curvas de encruamento cíclico para um aço HSLA-50 com a utilização de um controlo de força e extensão.	77
5.15	Curva experimental de um ensaio cíclico do aço DP1000 e DC01.	77
5.16	Curva experimental de um ensaio cíclico dos aços inoxidáveis 316L e 430BA.	78

5.17	Curva experimental de um ensaio cíclico da liga de alumínio AA5754 e da liga de magnésio AZ31.	78
5.18	Parâmetros de ensaio e geometria do provete utilizada nos ensaios experimentais.	79
5.19	Carga crítica, $P_{sim} = 17\,504\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (a).	81
5.20	Carga crítica, $P_{sim} = 8544\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (b).	81
5.21	Carga crítica, $P_{sim} = 3596\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (c).	81
5.22	Representação da câmara específica utilizada para o controlo visual do provete.	82
5.23	Representação do valor da flecha y em função da carga P	83
5.24	Setup experimental utilizado nos ensaios, constituído por: (1) monitor para análise específica do comportamento do provete; (2) controlador do MSTD; (3) computador; (4) iluminação; (5) câmara CCD; (6) câmara de análise lateral do provete; (7) MSTD.	84
5.25	Curva resultante do ensaio cíclico CF-CT2 (ver Tabela 5.4) para o aço HC220.	85
5.26	Curva resultante do ensaio cíclico CF-TC2T1 (ver Tabela 5.4) para o aço HC220.	85
5.27	Comparação dos valores absolutos de tensão e extensão reais, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-CT2 (compressão); CF-TC2T1 (tração).	86
5.28	Distribuição da extensão ao longo da área de interesse do provete quando solicitado (a) à compressão e (b) à tração para o ciclo de solicitação CF-CT2.	87
5.29	Localização dos extensómetros virtuais E_L-L , E_L-R e E_L-Tot para avaliação da extensão ao longo do comprimento de referência do provete.	87
5.30	Variação temporal da extensão real longitudinal para os três extensómetros em análise.	88
5.31	Representação do provete à compressão (a) antes e (b) e depois de se atingir a força máxima.	89
5.32	Comparação dos valores absolutos de força e extensão, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-TC2T1 (tração), CF-CT2 (compressão);	89
5.33	Localização dos extensómetros virtuais E_w-L e E_w-R para avaliação da extensão nas zonas da esquerda e direita do provete.	90
5.34	Variação temporal da extensão real transversal, ϵ_w , para os dois extensómetros em análise.	90
5.35	Representação da trajetória de deformação para a primeira etapa de cada ciclo de solicitação: CF-TC2T1 (tração) e CF-CT2 (compressão).	91
5.36	Variação temporal da extensão real segundo a espessura, ϵ_t , para a zona da esquerda e da direita.	92
5.37	Variação temporal da área da zona da esquerda e direita e respetiva comparação com a área da zona total.	93
5.38	Comparação dos valores absolutos de tensão e extensão real, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-TC2T1 (tração), CF-CT2 (compressão); para esta última etapa está também representada a curva da zona da esquerda e da direita.	93
5.39	Curva tensão-extensão real plástica para a sequência (a) CF-CT2 e (b) CF-TC2T1.	94
5.40	Evolução do encruamento para a sequência (a) CF-CT2 e (b) CF-TC2T1.	94
6.1	Representação de ensaios cíclicos de corte com a inversão do sentido a ocorrer para níveis diferentes de extensão.	99
6.2	Sensor de medição de deslocamento.	100

Lista de Tabelas

3.1	Composição química da liga AA5754-T4.	28
3.2	Composição química da liga AZ31B.	29
3.3	Propriedades mecânicas de referência dos materiais em estudo.	29
3.5	Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas experimentalmente.	32
3.6	Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas experimentalmente.	33
3.7	Parâmetros da lei de <i>Voce</i> para as ligas AA e AZ31.	35
3.8	Parâmetros usados na equação de <i>Johnson-Cook</i> para a liga AZ31B.	36
4.6	Resumo dos parâmetros de ensaio para os dois tipos de provetes miniaturizados. .	50
4.7	Parâmetros utilizados no software VIC-2D.	51
4.8	Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas com os provetes miniaturizados do Tipo 1.	53
4.9	Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 2.	56
4.10	Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos provetes à escala macro, do Tipo 1 e do Tipo 2, para a liga AA5754.	56
4.11	Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 1.	60
4.12	Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 2.	61
4.13	Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos provetes à escala macro, do Tipo 1 e do Tipo 2, para a liga AZ31B.	62
5.2	Representação da carga crítica de <i>Euler</i> para diferentes condições de fronteira. . .	80
5.3	Representação da carga crítica obtida por simulação numérica para diferentes condições de fronteira.	82
5.4	Etapas das sequências de ensaio realizadas para o aço HC220.	83
5.5	Tensão de cedência, σ_{ced} , relativas à primeira etapa de cada sequência.	86
5.6	Tensão de cedência, σ_{ced} , e σ_{inv} para as diferentes etapas de cada ciclo de solicitação. .	95

Acrónimos e Nomenclatura

Acrónimos

PLC	Portevin-Le Chatelier
AM	Fabrico Aditivo (Additive Manufacturing)
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
MSTD	Mini Sample Tester Device
NIST	National Institute of Standards and Technology
DSA	Dynamic Strain Ageing
DIC	Correlação Digital de Imagem
BE	Bauschinger Effect
BEF	Bauschinger Effect Factor
CCD	Dispositivo de carga acoplada
SEM	Scanning electron microscope
FSW	Friction stir welding (Soldadura por fricção)

Nomenclatura

Δ_L	Variação do comprimento de referência
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação
ϵ_m	Taxa de deformação
ϵ	Extensão real
ν	Coefficiente de Poisson
σ_{ced}	Tensão de cedência real
σ_m	Tensão de rotura real
ϵ_L	Extensão real longitudinal
ϵ_t	Extensão real segundo a espessura
ϵ_w	Extensão real transversal
a_0	Espessura de referência do provete
A_0	Área de referência do provete
A_e	Extensão convencional no ponto de cedência
A_g	Extensão convencional no ponto de cedência
A_g^t	Extensão convencional total no ponto de rotura
A_m	Área da secção transversal do provete no ponto de rotura
A_t	Extensão convencional total após rotura
A_u	Área da secção transversal do provete após fratura
A	Extensão convencional plástica após rotura
b_0	Largura de referência do provete
c	Distância ao eixo

e_L	Extensão convencional axial
e_t	Extensão convencional segundo a espessura
e_w	Extensão convencional transversal
e	Extensão convencional
E	Módulo de elasticidade
e	Excentricidade da carga
F_{max}	Força Máxima
F	Força nominal
I	Momento de Inercia
L_0	Comprimento de referência do provete
L_c	Comprimento da zona calibrada do provete
L_e	Comprimento efetivo
L_t	Comprimento total do provete
L_u	Comprimento de referência após fratura
L	Comprimento do provete
P_{cr}	Carga crítica de Euler
P	Carga axial
$R_{p0.2}$	Tensão limite de elasticidade convencional a 0,2%
R_{pH}	Tensão limite de elasticidade convencional superior
R_{pL}	Tensão limite de elasticidade convencional inferior
R_m	Tensão de rotura convencional
R_p	Tensão limite de elasticidade convencional
S	Tensão convencional
T	Temperatura
v	Velocidade de ensaio
Z	Coefficiente de estrição
r	Raio de giração

Capítulo 1

Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Neste capítulo é realizada uma contextualização inicial da temática desta dissertação, assim como a identificação dos seus principais objetivos. Por fim, é descrita a linha condutora do documento e resumida a sua estrutura.

1.1 Motivação

Os ensaios mecânicos uniaxiais são amplamente utilizados na determinação das propriedades mecânicas e no controlo de qualidade de materiais metálicos, quer estes se encontrem na forma de matéria prima ou produto acabado. São utilizados universalmente e, como tal, são normalizados por diversas entidades reguladoras [1]. Para este tipo de ensaio, os provetes - corpos de prova que vão ser ensaiados e cujas propriedades se pretende medir - são desenhados numa escala macro, uma vez que ocupam uma área de 40 a 50 cm^2 , dimensões definidas pelas entidades referidas anteriormente.

Em alguns casos não é desejável que as amostras tenham este tipo de escala. O primeiro exemplo é quando se pretende estudar, com rigor, uma das fases de um material bifásico onde a dimensão dos provetes deve estar numa gama próxima do tamanho de grão. Outro caso, é quando se pretende avaliar a vida de um determinado componente mecânico em serviço onde não é possível, nem conveniente, remover uma grande quantidade de material. Outra situação é quando se deseja realizar ensaios de compressão ou dinâmicos de fadiga em chapa metálica, onde um comprimento elevado propicia a ocorrência de fenómenos de encurvadura na chapa.

Neste sentido surge a necessidade de reduzir a escala dimensional dos provetes, passando de uma escala macro para uma escala inferior. Este processo, chamado de miniaturização, é uma técnica simples e poderosa na caracterização mecânica dos materiais.

1.2 Objetivos

Com esta tese pretende-se estudar o comportamento de provetes miniaturizados, sob a forma de chapa metálica, a solicitações de tração e compressão, avaliando adicionalmente as principais diferenças entre estes e os resultados obtidos numa escala macro. Para tal, pretende-se desenvolver um equipamento especializado na realização deste tipo de ensaios, especialmente desenhado e concebido para escalas mais pequenas. Sumariando, a presente dissertação foca os seguintes pontos:

- análise dos resultados do ensaio de tração à escala macro para dois materiais distintos;
- realização de ensaios de tração à escala miniaturizada com os mesmos materiais;
- comparação dos resultados obtidos para as duas escalas de ensaio;
- desenvolvimento de um equipamento específico para a realização de ensaios de tração e compressão em provetes miniaturizados;
- validação experimental do equipamento desenvolvido através de ensaios de tração e compressão.

1.3 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo (Capítulo 1), onde se faz uma breve introdução ao tema deste trabalho, esta dissertação é constituída por mais cinco capítulos. No Capítulo 2 faz-se uma breve contextualização dos ensaios miniaturizados, dando a conhecer o estado da arte, assim como alguns exemplos concretos de aplicações tanto à tração como à compressão.

No Capítulo 3 descreve-se o ensaio de tração à escala macro, identificando-se as suas principais características, assim como os seus parâmetros mais relevantes. Posteriormente, analisam-se os resultados experimentais efetuados a duas ligas. Estes valores serão uma referência para análises posteriores. Ainda neste capítulo, é feita a modelação numérica deste ensaio comparando os resultados obtidos com os experimentais.

No Capítulo 4 são apresentados os ensaios de tração miniaturizados. Inicialmente, apresenta-se o protótipo utilizado e descreve-se as suas principais características, assim como as modificações necessárias para a realização dos ensaios. Posteriormente são apresentados os resultados experimentais obtidos, para os materiais usados no capítulo anterior. Por fim são comparados os resultados à escala miniaturizada com os da escala macro e são retiradas as respetivas conclusões.

No Capítulo 5 apresenta-se o desenvolvimento do novo protótipo. Inicialmente realiza-se uma pesquisa bibliográfica sobre equipamentos similares ao projetado. De seguida definem-se os requisitos que este tem de verificar e apresetentam-se algumas versões preliminares do mesmo. Por fim, descreve-se sucintamente a constituição e funcionamento do equipamento final. Ainda neste capítulo apresentam-se resultados experimentais obtidos no novo protótipo desenvolvido. É dada especial relevância aos ensaios cíclicos de tração-compressão e são analisados aspetos

caraterísticos de materiais metálicos para este tipo de solicitação, como por exemplo o efeito de *Bauschinger*.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões da presente dissertação e algumas perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Ensaio uniaxiais miniaturizados

O presente capítulo define ensaios uniaxiais miniaturizados e esclarece a necessidade da sua utilização, assim como as suas principais vantagens e desvantagens através de exemplos de aplicação.

Atualmente, existem diversos testes normalizados utilizados na caracterização de materiais sob a forma de chapa metálica. Na Figura 2.1 estão representados alguns deles, assim como os respectivos estados de tensão nos eixos principais (σ_1 e σ_2).

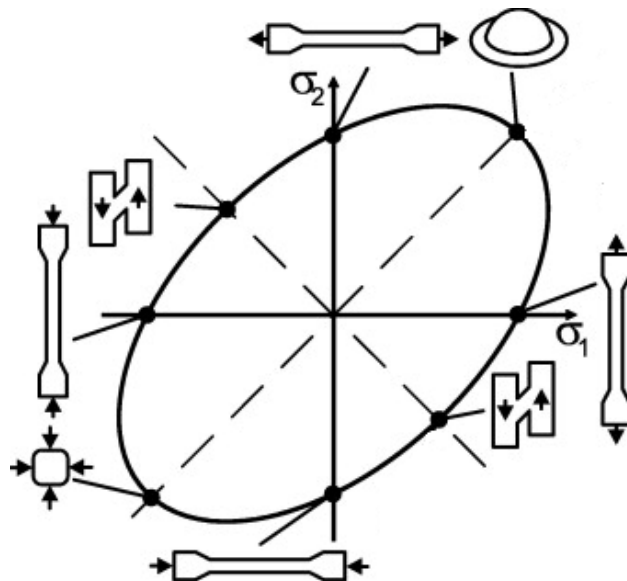


Figura 2.1: Ensaio mecânicos para a caracterização de chapas metálicas e correspondentes estados de tensão nos eixos principais (σ_1 e σ_2); adaptado de [2].

No primeiro e terceiro quadrantes estão localizados, respetivamente, os ensaios biaxiais de tração e compressão. Já no segundo e quarto, os ensaios biaxiais de corte. Nos eixos principais, σ_1 e σ_2 , estão representados os testes uniaxiais de tração na parte positiva do eixo e compressão na parte negativa [2]. Os ensaios uniaxiais são, entre muitos outros, uma forma simples e direta de caracterizar o comportamento mecânico dos materiais.

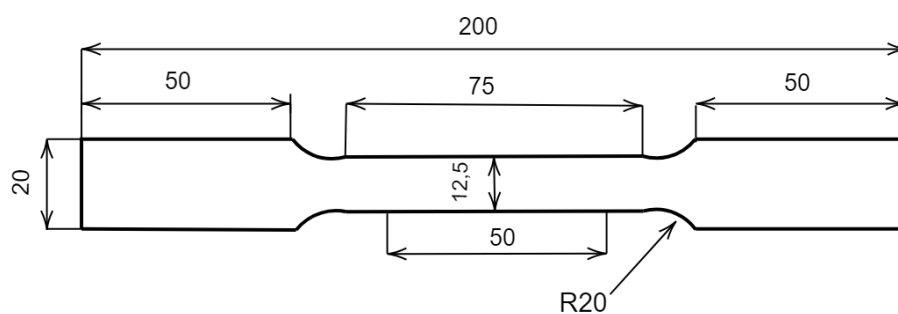


Figura 2.2: Geometria do provete normalmente utilizado em ensaios de tração [3].

Os provetes utilizados nestes tipos de testes estão normalmente a uma escala considerada macro. Na Figura 2.2 está representado um exemplo comum utilizado num ensaio de tração uniaxial. A informação obtida através destes é suficiente para caracterizar o comportamento mecânico de materiais que apresentem uma microestrutura homogênea [1]. Contudo, nem todos os materiais metálicos apresentam este tipo de característica. A título de exemplo, alguns métodos de fabrico, como o fabrico aditivo (AM) e a soldadura por fricção (FSW), conferem microestruturas anisotrópicas e inhomogeneidades aos seus produtos finais. Neste sentido os testes à escala macro podem ser incapazes de caracterizar corretamente o comportamento do material para estes casos, uma vez que o que é medido em cada ensaio é uma média das propriedades das diferentes estruturas presentes.

A solução para dar resposta a este problema passa por reduzir a escala dos provetes para uma dimensão mais adequada, não só ao material que se deseja estudar, como ao fim que se pretende. Assim, ao miniaturizar um provete é possível analisar detalhadamente uma porção específica de material e avaliar com mais rigor as suas propriedades mecânicas. A miniaturização pode tomar duas principais escalas: alguns autores reduzem o provete a uma escala meso, enquanto que outros vão mais além e utilizam uma escala micro. A designação destas escalas tem como base o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [4] e a suas classificações estão sumariadas na Figura 2.3. Na Figura 2.4 estão representados exemplos de provetes das três escalas, macro, meso e micro, assim como a ordem de grandeza de uma das suas dimensões característica.

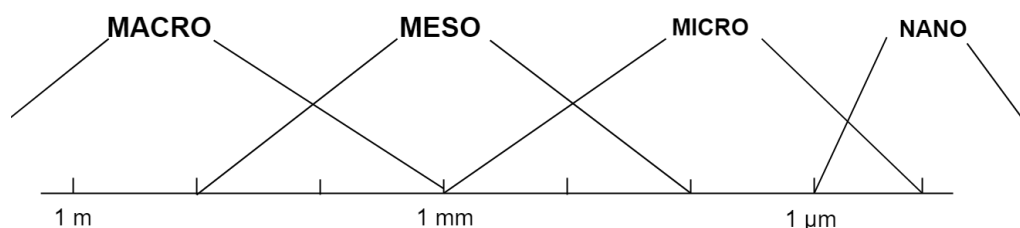


Figura 2.3: Classificação de diferentes escalas de fabrico segundo o NIST. [4].

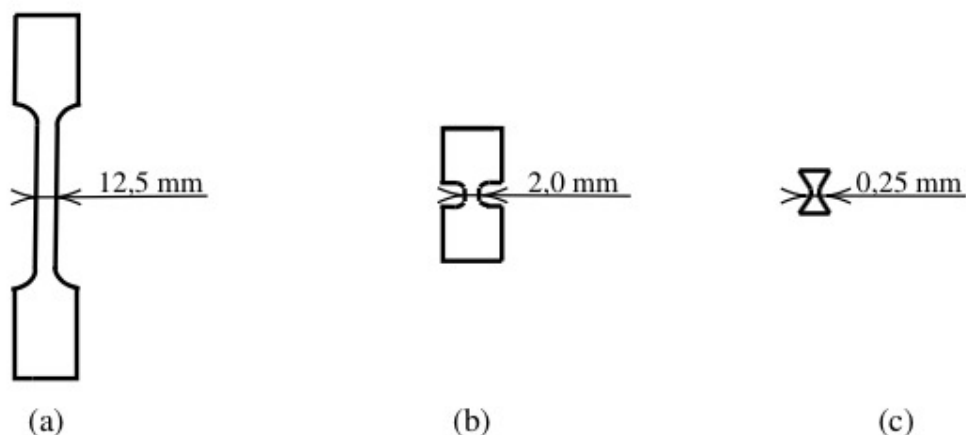


Figura 2.4: Representação de exemplos de provetes miniaturizados utilizados em ensaios uniaxiais: (a) macro provete; (b) meso provete; (c) micro provete.

Além de ser usada nos ensaios uniaxiais de tração e compressão, esta técnica é utilizada em outros tipos de ensaios e metodologias, como por exemplo, a medição de dureza *Vickers* e nanoindentação, realização de ensaios cíclicos térmicos, estudos de difração Raio-X, ensaios biaxiais em chapas finas entre outros [5].

A utilização de ensaios com provetes miniaturizados apresenta diversas vantagens face aos ensaios à escala macro. Como já foi referido, o uso desta técnica torna possível estudar e caracterizar o comportamento mecânico de materiais com microestruturas anisotrópicas ou homogêneas. Assim, consegue-se construir bases de dados mais específicas de diversos materiais, utilizando quantidades reduzidas de matéria. Além disso, o comportamento mecânico de materiais caros ou materiais obtidos através de processos extremamente rigorosos, dispendiosos e difíceis de replicar pode também ser estudado [6].

Vários autores concordam que a técnica de miniaturização é eficaz para a análise de uma elevada gama de materiais e processos. Como já referido, em processos de soldadura a miniaturização é especialmente vantajosa, Figura 2.5. A heterogeneidade é inerente a este método de união, uma vez que para fundir o metal de adição com o metal base é necessário aplicar calor localmente. Esta aplicação resulta numa alta suscetibilidade do material apresentar descontinuidades, falhas e tensões residuais que, se presentes, podem levar a falhas estruturais e redução da vida dos componentes onde estão empregues. Muitas vezes, especialmente em juntas profundas, é necessário aplicar diversos passes, o que se traduz numa sucessão de aquecimentos e arrefecimentos. Estes ciclos térmicos também influenciam a microestrutura da junta soldada e a sua resistência. Neste sentido, utilizando provetes miniaturizados é possível avaliar, não só as propriedades do metal base, como também do metal de adição e da zona afetada pelo calor. Assim, consegue-se verificar a zona mais débil e caracterizar corretamente a resistência da junta soldada [7, 8].

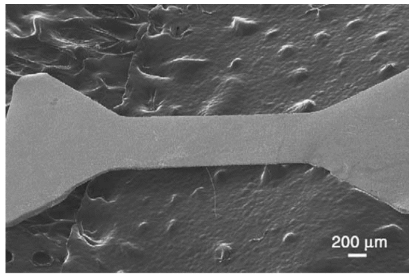


Figura 2.7: Imagem SEM de um provete de cobre nanocristalino com uma área transversal de $0.5 \times 0.015 \text{ mm}^2$ [9].

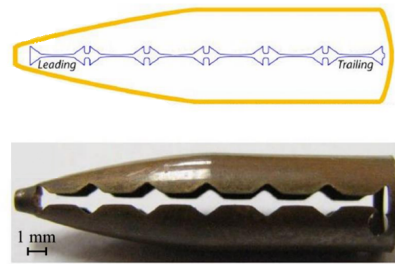
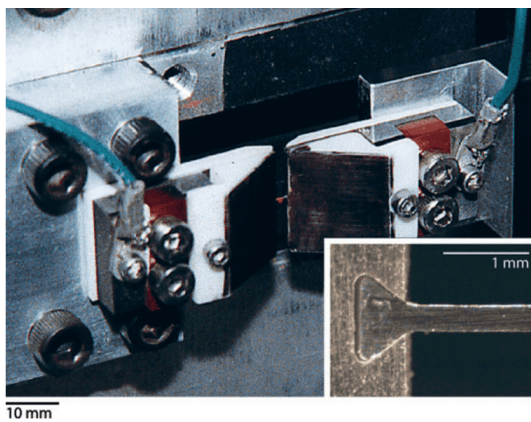
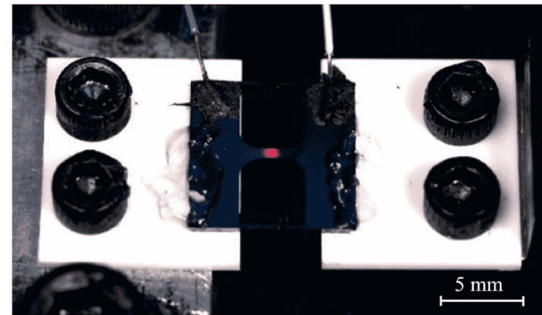


Figura 2.8: Representação esquemática de uma projétil de cobre de onde foram removidos micro provetes para teste [6].



(a)



(b)

Figura 2.9: Micro amostra de silício policristalino testada a 670°C [10].

Em suma, a técnica de miniaturização de provetes é uma ferramenta poderosa e útil para a obtenção do comportamento de materiais em diversas aplicações específicas. Embora seja muito utilizada, existem desafios a ultrapassar nas diversas etapas do processo. Devido à fragilidade e tamanho dos provetes, a preparação, manipulação, o teste e a medição das grandezas características, sobretudo a deformação, constitui um grande desafio.

Como já referido, a miniaturização pode tomar diversas escalas. Os provetes utilizados na presente dissertação vão ser de uma escala meso (denominados daqui em diante por mini provetes), descartando-se assim a escala micro. As seguintes secções vão ter como foco os ensaios de tração e compressão em provetes miniaturizados, explicitando alguns exemplos de aplicação concretos.

2.1 Ensaio de tração

Num ensaio de tração, uma amostra de material ou provete é submetido a um esforço que tende a alongá-lo até à rotura. Geralmente, o ensaio é realizado numa amostra de geometria e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Diversas instituições especializadas: DIN (Alemanha), BS (Inglaterra), ASTM

(EUA), NP (Portugal), ISO, etc, têm definidas normas de regulação para este tipo de ensaio. Esta standardização é relativa a vários pontos tais como, a geometria do provete, as condições necessárias para a realização do ensaio (amarração, taxa de deformação, temperatura, etc.) e o método de determinação das várias propriedades mecânicas [2].

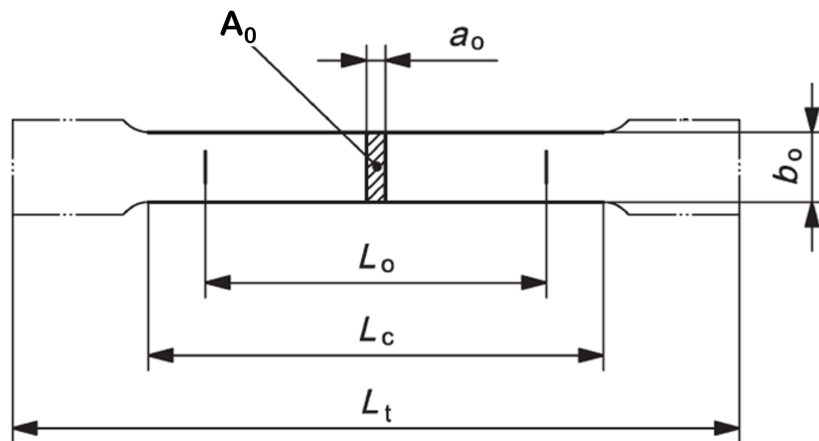


Figura 2.10: Geometria característica dos provetes para o ensaio de tração [3].

Na Figura 2.10 está representada a geometria de um provete de tração segundo a norma ISO 6892-1:2016 [3]. As dimensões características podem ser identificadas da seguinte forma:

- a_0 - Espessura de referência do provete;
- b_0 - Largura de referência do provete;
- L_0 - Comprimento de referência do provete;
- L_c - Comprimento da zona calibrada do provete;
- L_t - Comprimento total do provete;
- A_0 - Área de referência do provete.

Ao contrário do ensaio de tração à escala macro, para escalas mais reduzidas não existem normas estabelecidas para reger os ensaios. Assim, as dimensões adotadas para os provetes a testar são muitas vezes de acordo com a necessidade ou disponibilidade de material.

Por vezes, a miniaturização provoca um "efeito de tamanho" ou "efeito de escala", que leva a diferentes comportamentos à tração na micro, meso e macroescala. Este fenómeno intensifica-se sobretudo quando se utilizam escalas micro e pode relacionar-se não só com o tamanho e a geometria do provete, mas também com fatores como restrições microestruturais, espessura, tamanho de grão, anisotropia devido à microestrutura e à textura cristalográfica, homogeneidade microestrutural e química, efeito de superfície, tensões residuais, entre outros [11]. A outra questão relevante do uso de provetes de tração miniaturizados é a fiabilidade e repetibilidade dos resultados do teste, que necessitam de uma validação cuidadosa. Isso levou a vários estudos paramétricos tais como: a

seleção do comprimento, largura e espessura de referência; do tamanho de grão e do número de grãos na área de análise; do método de fabrico das amostras; dos parâmetros de teste, entre outros.

No início dos anos 80 foi relatado por Panayotou et al. [12] que as tensões de cedência e de rotura de provetes miniaturizados eram comparáveis com provetes macro, no entanto, os dados precisavam de algum tratamento. Um estudo levado a cabo por Sergueeva et al. [13] concluiu que os resultados de tração são dependentes não só das propriedades do material e das condições de ensaio mas também do tamanho e geometria do provete. Especificamente, estudou-se a influência que o comprimento de referência tinha nos resultados. Resumidamente, concluiu-se que este influencia significativamente as tensões de cedência e de rotura. Já em relação aos alongamentos uniforme e total, observou-se que este último diminuía com o aumento da relação comprimento largura de referência. Fülöp et al.[14] estudaram os efeitos do tamanho de grão em chapas metálicas ultrafinas e concluíram que o comportamento do material depende essencialmente do número de grãos na direção da espessura. Outra questão associada à miniaturização é a escolha do volume mínimo necessário na zona calibrada do provete. Fülöp et al.[14] concluiu que, devido às diferentes orientações dos grãos no plano da chapa, as deformações podem em certa medida deixar de ser uniformes, mesmo para condições de ensaio constantes.

Todos os exemplos mostrados concluíram que a redução das dimensões dos provetes pode ser feita, contudo deve ser realizada com ponderação, de modo que as propriedades medidas sejam satisfatoriamente semelhantes às propriedades obtidas com as condições definidas nas normas. Liu et al. [15] definiu alguns pontos a ter em consideração quando se pretende miniaturizar um provete para ensaios de tração:

- a geometria escolhida deve representar corretamente as propriedades do material;
- os resultados do teste devem apresentar uma boa repetibilidade ao longo dos ensaios;
- a montagem dos provetes no equipamento de teste deve ser feita de uma forma cuidada de modo a induzir no provete o mínimo de distorção e flexão possível;
- se for necessário realizar uma conversão de resultados da escala miniaturizada para a macro escala, deve ser possível de aplicar um método confiável.

2.1.1 Correlação digital de imagem

O conhecimento quantitativo da deformação associada a um ensaio mecânico de caracterização de um material é crucial para a determinação das suas propriedades essenciais, tais como módulo de elasticidade, tensão de cedência e tensão de rotura [6]. Os extenmetros são, tradicionalmente, os instrumentos de medição preferenciais em ensaios de tração convencionais [16]. Contudo, em ensaios de pequena escala, a sua utilização é quase impossível devido à dimensão reduzida da amostra. Neste sentido, torna-se necessário recorrer a métodos de medição sem contacto, como técnicas óticas [6]. Existem diferentes possibilidades dentro deste tipo de solução mas o uso de lasers ou vídeo tem já uma grande aplicação prática. Uma vez que o rigor de medição é fulcral

nos ensaios de tração, foi provado por vários autores que os melhores resultados são obtidos com um sistema de correlação digital de imagem - DIC [17, 18].

Este sistema é portanto, um método ótico não destrutivo para a determinação e análise de deformações na superfície de um objeto. Os resultados são obtidos pela comparação entre imagens digitais gravadas antes e após a deformação do material [19]. O esquema de montagem de um sistema deste tipo é relativamente simples e está representado na Figura 2.11. Consiste numa câmara fixa para captar as imagens digitais durante o teste, uma luz branca para iluminar o corpo e um sistema de pós processamento de dados [6].

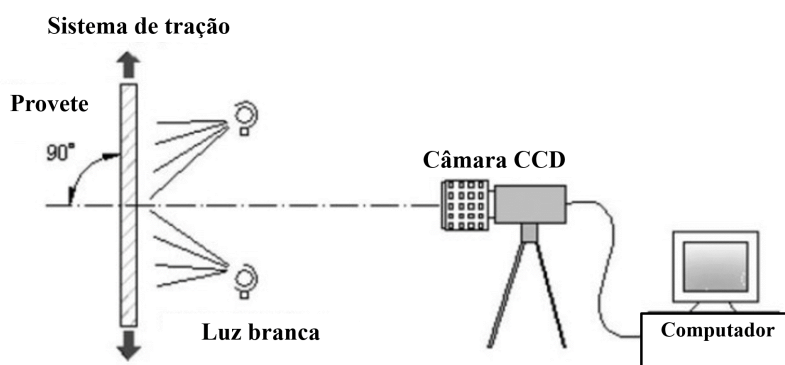


Figura 2.11: Esquema de montagem típico de um sistema DIC; adaptado de [20].

Para ser possível analisar as imagens com esta tecnologia, é necessário que os provetes possuam um revestimento específico - *speckle*. Este pode ser pintado ou depositado na superfície do material e a sua qualidade é um parâmetro importante para a precisão dos resultados. Na Figura 2.12 estão representados alguns tipos de *speckles* normalmente utilizados. A disposição dos pigmentos deve ter um caráter aleatório e garantir um contraste alto com o material a analisar. Outro ponto importante a considerar é que o material que compõe o *speckle* deve possuir todo o mesmo tamanho e ser pequeno o suficiente para que seja possível medir a deformação desejada.

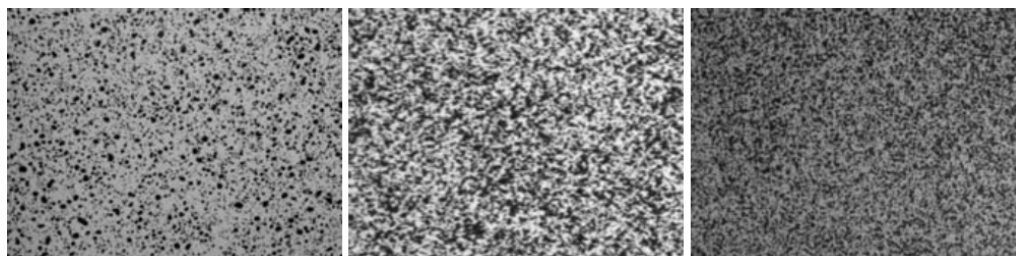


Figura 2.12: Exemplos de padrões *speckles* [19].

Após a aplicação do *speckle* no provete, o ensaio já pode ser realizado. É importante que a câmara esteja corretamente alinhada com o local de medição, assim como a intensidade luminosa regulada, para que a precisão dos resultados seja a melhor possível. As extensões no plano do

provetes podem ser obtidas por comparação entre as imagens captadas durante o ensaio com a imagem de referência, onde o provete não tem deformação alguma. Esta comparação é feita com recurso a um software dedicado de pós-processamento. O VIC-2D [21], disponibilizado pela *Correlation Solutions* é um exemplo deste tipo de software e foi o utilizado neste trabalho.

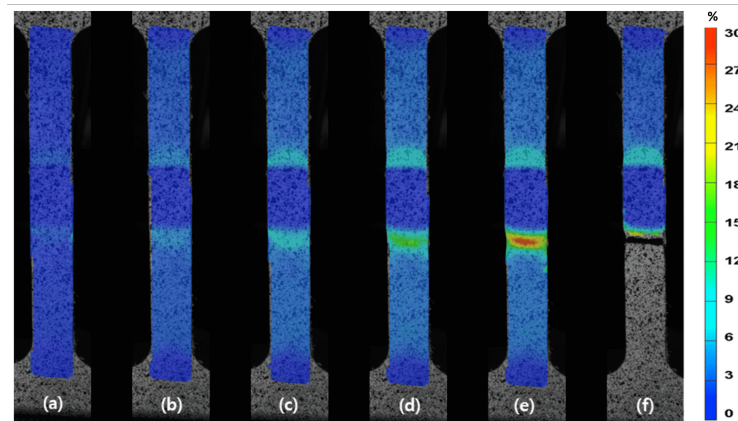


Figura 2.13: Exemplo de aplicação do software de pós processamento num ensaio de tração convencional [22].

Para processamento de imagem neste software, o primeiro passo é criar uma região de análise onde as extensões vão ser medidas, normalmente correspondente à zona calibrada do provete. Esta região contempla várias sub-regiões denominadas por *subsets*. Cada *subset* contém uma distribuição de *speckles* própria e única de modo a que não existam dois *subsets* iguais. Assim, é possível seguir e analisar a movimentação de cada sub-região independentemente. De realçar que cada *subset* deve ser suficientemente largo para conter um número de *speckles* suficientes de modo a ser único. Contudo, deve ser adotada uma solução de compromisso, uma vez que quanto menor for a sua dimensão, menor é o erro de resolução espacial. Na Figura 2.13 está representado um exemplo de aplicação deste tipo de software num ensaio de tração à escala macro.

2.2 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão uniaxial está normalizado na comunidade científica, segundo a norma ASTM E9-89a, 2000 [23]. Esta rege as condições de ensaio tanto para provetes cilíndricos como sob a forma de chapa. Relativamente ao primeiro, o ensaio é normalmente designado por ensaio de compressão de cilindro e consiste em submeter a amostra a cargas compressivas entre dois pratos, tal como se pode observar na Figura 2.14. Um dos inconvenientes deste tipo é a formação de uma geometria anelar à medida que o ensaio progride: o movimento radial do material provoca que a superfície lateral do provete adquira uma forma semelhante a um barril [1].

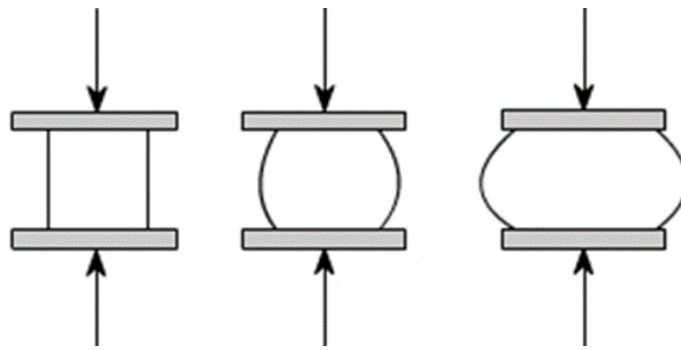


Figura 2.14: Representação esquemática do ensaio de compressão de cilindro e do efeito de barril.

Para chapas metálicas, a realização de ensaios de compressão uniaxiais constitui um verdadeiro desafio. Na realidade, quando uma chapa é submetida a cargas compressivas, os fenómenos de encurvadura tendem a ser mais significativos, devido à sua própria natureza esbelta. Este fenómeno intensifica-se, sobretudo quando a razão entre o comprimento e espessura de referência da chapa é elevada. Para estes casos, é fácil que o ensaio prossiga até elevadas extensões, pois torna-se prematuramente não planar. Na Figura 2.15 estão representados exemplos de diferentes tipos de encurvadura: segundo a espessura (*t-Buckling*), segundo o comprimento (*L-Buckling*) e segundo a largura (*W-Buckling*). A encurvadura segundo a espessura e a largura são facilmente compreensíveis. Segundo o comprimento, a compreensão não é tão direta e por isso será esclarecida mais adiante. Tal como para os ensaios de compressão de cilindro, para chapas metálicas o efeito de barril também pode existir [24].

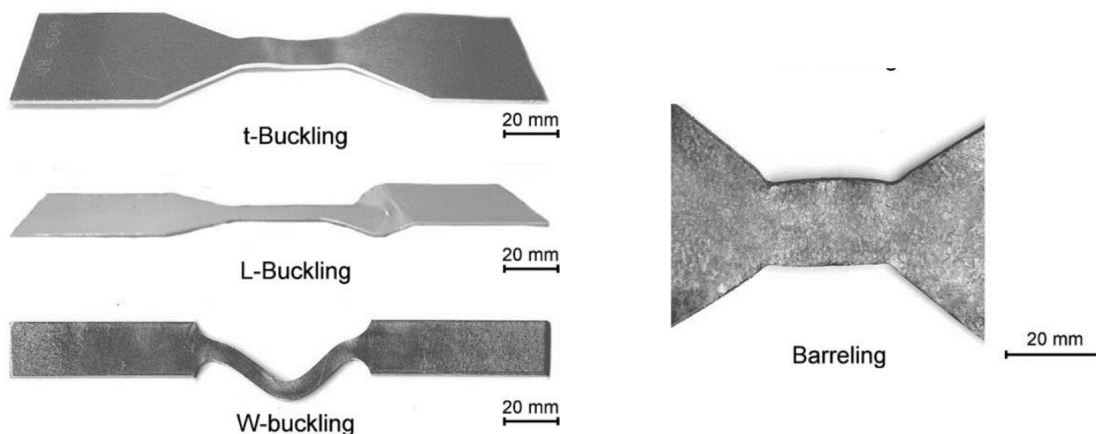


Figura 2.15: Exemplos de tipos de encurvadura possíveis num ensaio de compressão em chapa metálica [24].

Genericamente o fenómeno de encurvadura pode ser definido pela fórmula secante [24], Equação 2.1, que calcula a tensão máxima, σ_{max} , numa viga pela combinação dos efeitos de uma força

axial e um momento fletor. Este momento fletor é normalmente criado pela excentricidade e da carga aplicada, Figura 2.16.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{ec}{r^2} \sec \left(\frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (2.1)$$

onde,

- P Carga axial;
- A Área transversal da secção de aplicação da carga;
- e Excentricidade da carga;
- c Distância do eixo neutro ao ponto onde a tensão é máxima;
- L_e Comprimento efetivo da coluna no plano de flexão - depende das condições de fronteira;
- E Módulo de elasticidade do material;
- r Raio de giração, $r^2 = I/A$, onde I representa o momento de inércia sobre o eixo de flexão.

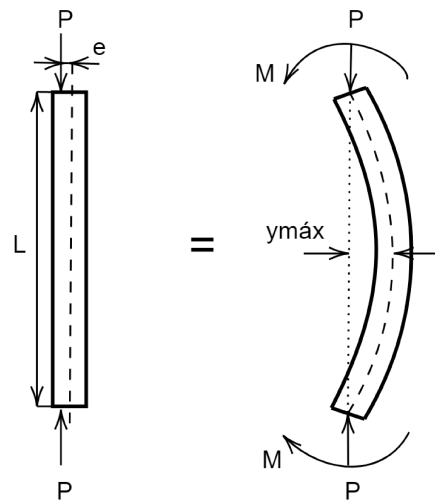


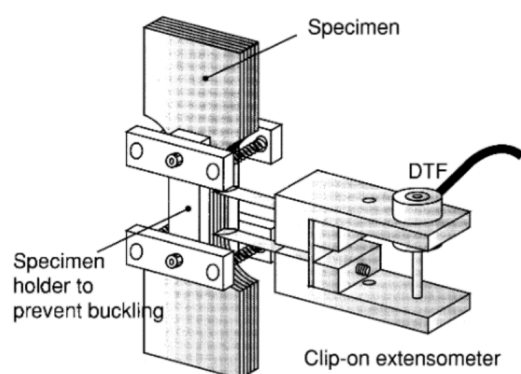
Figura 2.16: Representação do efeito de uma carga compressiva excêntrica.

No caso concreto de ensaios uniaxiais, a excentricidade traduz o desalinhamento que possa existir entre as duas amarras. Segundo a Equação 2.1 a tensão máxima tende para infinito sempre que a secante for igual a $\pi/2$. A carga, P , para este caso é igual à carga crítica, P_{cr} , definida pelo método de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (2.2)$$

Esta carga crítica define assim, a força máxima que a viga consegue suportar sem que se dê o fenómeno de encurvadura.

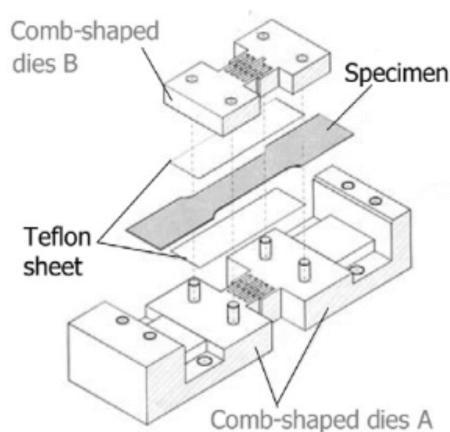
Nos últimos anos, vários investigadores propuseram diversas soluções para ultrapassar a questão da encurvadura nos ensaios de compressão. Os objetivos gerais em todas elas passam por maximizar a extensão admissível à compressão e uniformizar ao máximo a distribuição da extensão e tensão ao longo da secção calibrada. Essencialmente existem dois tipos de soluções para esse fim. A primeira consiste em modificar a geometria dos provetes, recorrendo à sua miniaturização. Abel and Ham [25] e Bate and Wilson [26] utilizaram provetes com uma relação entre o comprimento de referência e espessura entre 16 e 2. Para estas razões, a extensão compressiva atingida foi de 0,01 e 0,15, respetivamente. Como seria de esperar quanto maior é a razão entre o comprimento e a espessura, menor é a extensão admissível possível de atingir sem que instabilidades ocorram no material. Estes resultados são interessantes contudo, como já foi referido, a utilização de provetes miniaturizados em ensaios mecânicos tem inerentes diversas dificuldades, sobretudo na medição precisa das propriedades de força e extensão.



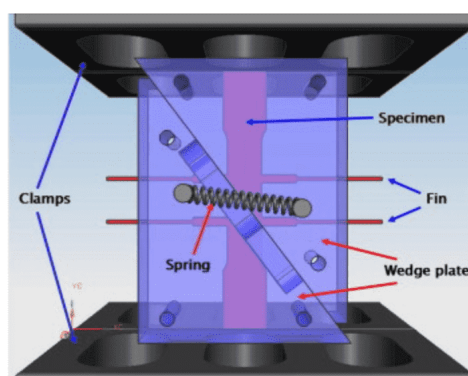
(a) [27]



(b) [24]



(c) [28]



(d) [29]

Figura 2.17: Exemplo de soluções construtivas para realização de ensaios de compressão no plano.

Neste sentido, diversos autores utilizam um segundo método, que consiste no uso de uma força lateral para estabilizar a deformação compressiva para provetes macro. Na Figura 2.17 estão representados alguns dispositivos utilizados para aplicação desta técnica. O método mais antigo denomina-se por método de empacotamento, "*pack method*", e foi apresentado inicialmente por Aitchison and Tuckerman [30]. Consiste em agrupar vários provetes, num único conjunto e submetê-los ao ensaio de compressão. Durante o teste, a estabilidade lateral é conseguida com a utilização de suportes entre os provetes mais exteriores. Este método é incapaz de avaliar o comportamento do material até grandes deformações devido à encurvadura da região suportada lateralmente, *L-Buckling*, definida anteriormente. Yoshida et al. [27] utilizaram uma variação deste método, Figura 2.17a, onde se conseguiram atingir deformações entre 0,13 e 0,25. Boger et al. [24], Figura 2.17b, utilizaram também suportes lidos, mas neste caso sem empacotamento de chapas. Atingiram um máximo de deformação de cerca de 0,08 em testes cíclicos. Outro dispositivo utilizado, Figura 2.17c, desenvolvido por Kuwabara [28] utiliza dois suportes com um formato em "pente" ou "garfo" de forma a reduzir a região do provete que está suportada. Este design é uma melhoria em relação aos suportes lidos porque, à medida que a amostra é comprimida, os modelos macho e fêmea passam uns pelos outros, permitindo que todo o comprimento da amostra seja suportado. Ao eliminar o problema de interferência entre as placas e o dispositivo de suporte, foram obtidas deformações na ordem de 0,15 a 0,20 para chapas à compressão. Alternativamente podem ser usados blocos deslizantes para suportar o provete rigidamente, Figura 2.17d, onde se atingiu uma deformação à compressão de 0,10 [29].

O equipamento que se pretende desenvolver nesta dissertação tem como base apenas a miniaturização dos provetes não sendo utilizado qualquer tipo de mecanismo para conferir suporte lateral ao provete. Assim ultrapassa-se alguns dos inconvenientes dos provetes macro quando usados em compressão, como leitura das deformações ou influência dos suportes laterais no rigor da caracterização obtida.

Capítulo 3

Ensaio de tração à escala macro

Neste capítulo analisa-se o ensaio de tração convencional à escala macro. Inicialmente, identificam-se e caracterizam-se as curvas de tração esperadas e as propriedades características resultantes. Posteriormente, é realizada uma análise experimental ao comportamento de dois materiais à tração, e comparam-se os resultados com simulação numérica.

3.1 Caraterização do ensaio

O ensaio de tração uniaxial é um ensaio fundamental para a caraterização de materiais. Este consiste em submeter uma amostra ou provete, a uma carga de tração, F , continuamente crescente até que se atinja a fratura. Durante o ensaio, regista-se simultaneamente a variação do comprimento de referência, normalmente por meio de um extensómetro aplicado diretamente sobre o provete, e a força exercida pelo travessão da máquina, através de uma célula de carga, tal como está representado na Figura 3.1.

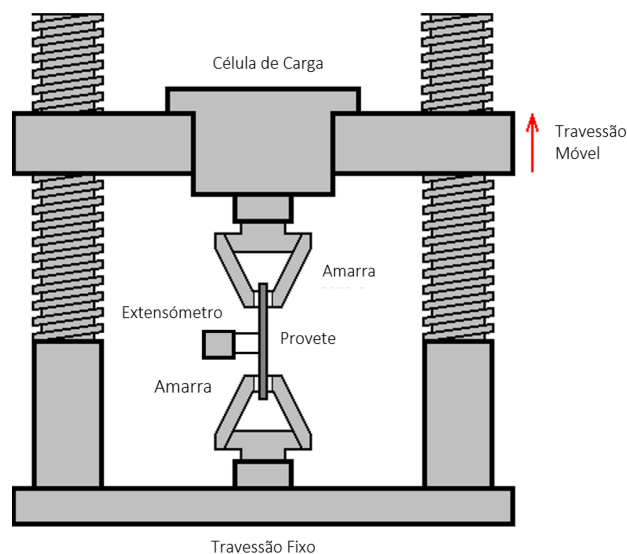


Figura 3.1: Esquema de equipamento utilizado em ensaios de tração uniaxiais; adaptado de [31].

Este ensaio permite medir o comportamento mecânico de um material de uma forma satisfatória, uma vez que para baixas velocidades de ensaio, as deformações são uniformemente distribuídas por todo o comprimento de referência, até ser atingida a carga máxima [1]. Esta homogeneidade consegue-se com a utilização de uma geometria específica, bem definida pelas normas regentes deste tipo de ensaios. Para materiais sob a forma de chapa metálica, os provetes utilizados têm normalmente a geometria definida pelo provete da esquerda na Figura 3.2, que se designa por provete de tração não entalhado. Além desta, outras geometrias podem ser utilizadas. O provete de tração largo não entalhado conduz a trajetórias de deformação tanto mais próximas da deformação plana quanto maior for a relação entre a largura e o comprimento de referência, b_0 e L_0 respetivamente. Já nos provetes de tração entalhados é possível, variando a geometria do entalhe, modificar a trajetória de deformação na vizinhança desta. Esta aproxima-se tanto mais da deformação plana quanto menor for o raio do entalhe. Convém notar que estes entalhes provocam fortes gradientes de deformação nos provetes na zona entalhada. A obtenção dos parâmetros mecânicos a partir da curva de tração só deve ser realizada com provetes não entalhados, uma vez que nos entalhados o campo de deformações não é suficientemente homogêneo [32].

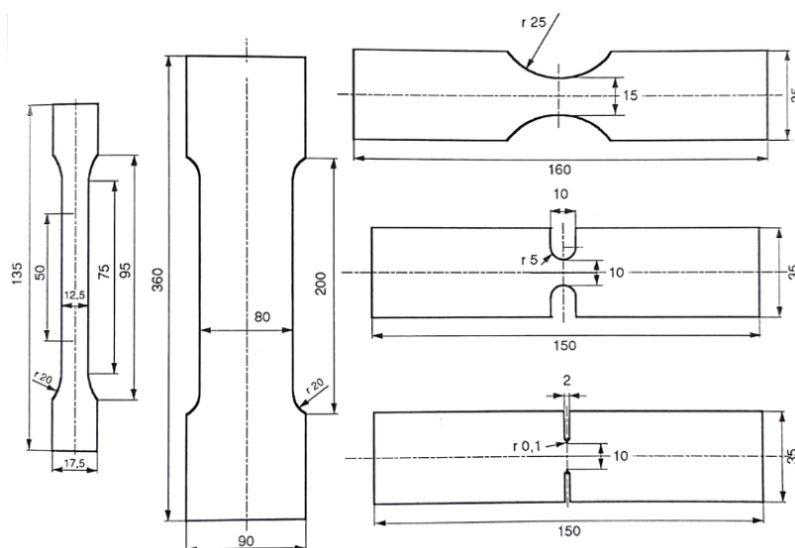


Figura 3.2: Exemplos de provetes utilizados em ensaios de tração uniaxiais à escala macro [33].

3.1.1 Curva tensão - extensão convencional

A curva obtida no ensaio é uma curva força-alongamento e exprime a evolução da força aplicada, F , em função da variação do comprimento de referência, ΔL . Com base nesta, surge a curva convencional (ou de engenharia) que expressa a variação da tensão convencional em função da extensão convencional.

A tensão convencional, S , representa a tensão média que atua na zona de referência do provete e obtém-se dividindo a força F pela área inicial da secção A_0 :

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

A extensão convencional, e , representa a extensão média linear e é dada pela razão entre a variação do comprimento, ΔL , e o respetivo comprimento de referência, L_0 (Equação 3.2). Por convenção, este parâmetro é expresso em percentagem.

$$e(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

As curvas força-alongamento e tensão-extensão convencional são equivalentes, variando apenas as grandezas de medição utilizadas.

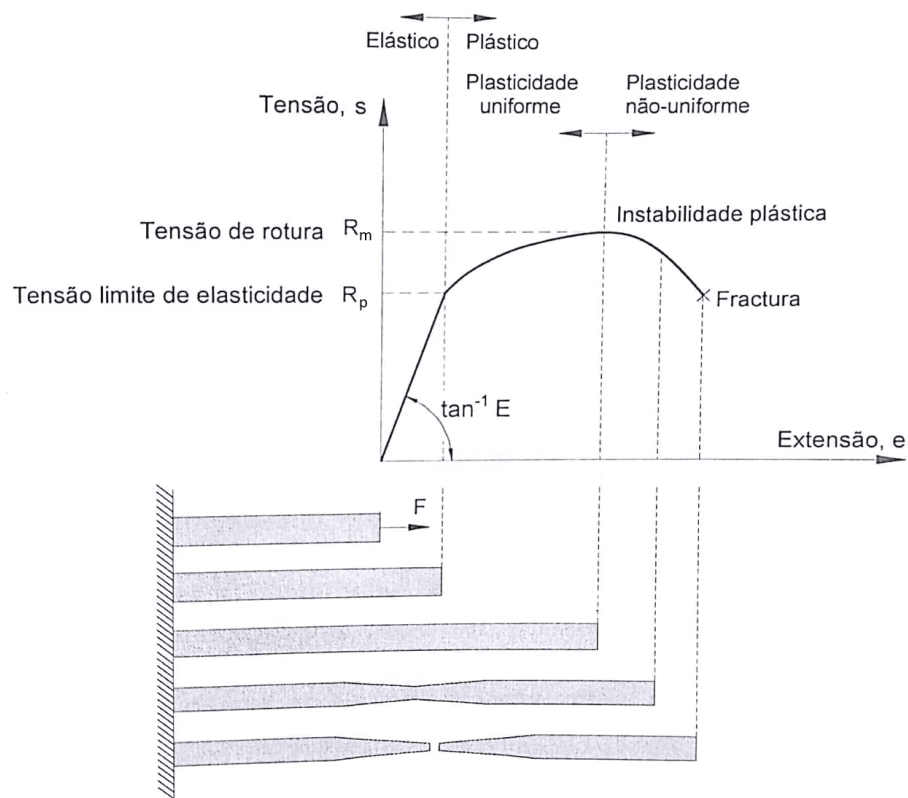


Figura 3.3: Representação da curva tensão-extensão convencional, obtida num ensaio de tração uniaxial de um material dúctil; adaptado de [1].

Na Figura 3.3 está representada uma curva de engenharia, obtida num ensaio de tração uniaxial de um material dúctil. Inicialmente, existe uma região elástica onde a tensão é proporcional à extensão, sendo o declive da reta designado por módulo de elasticidade ou módulo de *Young*, E . A região elástica termina no ponto da tensão limite de elasticidade, R_p , onde se inicia uma região plástica. Esta inclui duas zonas diferentes: plasticidade uniforme e plasticidade não-uniforme.

Na primeira, tal como na região elástica, a tensão aumenta com a extensão, mas agora de

uma forma não proporcional, fenómeno conhecido como encruamento. Do ponto de vista cristalográfico, pode-se explicar o encruamento pela dificuldade crescente que as deslocações têm em movimentar-se com a deformação. Isto acontece, não só porque estas começam a atuar entre si, mas também porque encontram barreiras ao seu movimento, como por exemplo limites de grão. Assim, a densidade de deslocações cresce significativamente com a deformação, levando a que existam mais sistemas de escorregamento ativos. Deste modo, é necessário fornecer mais energia para que as deslocações possam ultrapassar as barreiras que se opõem ao seu movimento e prosseguir com a deformação plástica do material. Outra explicação para o fenómeno de encruamento é a alteração da textura cristalográfica durante a deformação. De facto, os grãos tendem a rodar e assumir posições cristalográficas mais estáveis. Qualquer uma das possibilidades mencionadas acima explica a alteração do valor da tensão de corte necessária para a ativação dos sistemas de escorregamento, onde se dá a movimentação das deslocações.

A zona uniforme termina no ponto onde a curva atinge o seu máximo, o que define a tensão máxima ou de rotura, R_m , que o provete pode suportar no ensaio. A partir deste ponto inicia-se uma zona plasticamente instável, caracterizada pela existência de uma zona de deformação localizada. Esta surge no local de menor resistência do provete, que normalmente representa uma área de elevada concentração de defeitos superficiais ou internos do material. A deformação localizada conduz a uma estricção, também localizada, que se traduz numa diminuição da área resistente do provete. Neste sentido, o estado de tensão após estricção torna-se triaxial levando a que a fratura ocorra rapidamente [1].

Na secção seguinte, são apresentados os parâmetros característicos mais relevantes do ensaio de tração, sendo eles indicadores tanto da resistência como da ductilidade de um dado material.

3.1.1.1 Parâmetros de resistência

Módulo de elasticidade

A relação entre a tensão, S , e a extensão, e , para valores inferiores ao da tensão limite de elasticidade, R_p , é dada pela lei de *Hooke*, Equação 3.3, em que E representa o módulo de elasticidade e expressa o declive da curva tensão-extensão em regime elástico.

$$S = E \cdot e \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade, também designado por módulo de *Young*, é considerado um parâmetro de rigidez do material, uma vez que quanto maior for o seu valor, menor será a extensão que resulta da aplicação de uma dada tensão. É também característico de cada material uma vez que o seu valor não é afetado (de forma assinalável) com a adição de elementos de liga, tratamentos térmicos ou trabalho a frio.

Coefficiente de Poisson

Como já foi referido, num ensaio de tração uniaxial, o alongamento do provete na direção longitudinal é acompanhado pela contração lateral da secção transversal. Define-se coeficiente de Poisson, ν , como o valor absoluto do quociente entre os valores das extensões longitudinal e transversal. Como a extensão longitudinal (e_l) é positiva e a transversal (e_w) é negativa, o coeficiente de Poisson é dado por:

$$\nu = -\frac{e_w}{e_l} \quad (3.4)$$

Tensão limite de proporcionalidade

A zona de transição entre as regiões elástica e plástica é diferente consoante o tipo de material. A curva apresentada na Figura 3.4a apresenta uma transição com patamar de cedência e é característica dos aços macios. Já a curva da Figura 3.4b apresenta uma transição contínua entre as zonas elástica e plástica e é característica das ligas de alumínio, de aços de elevada resistência e dos aços inoxidáveis.

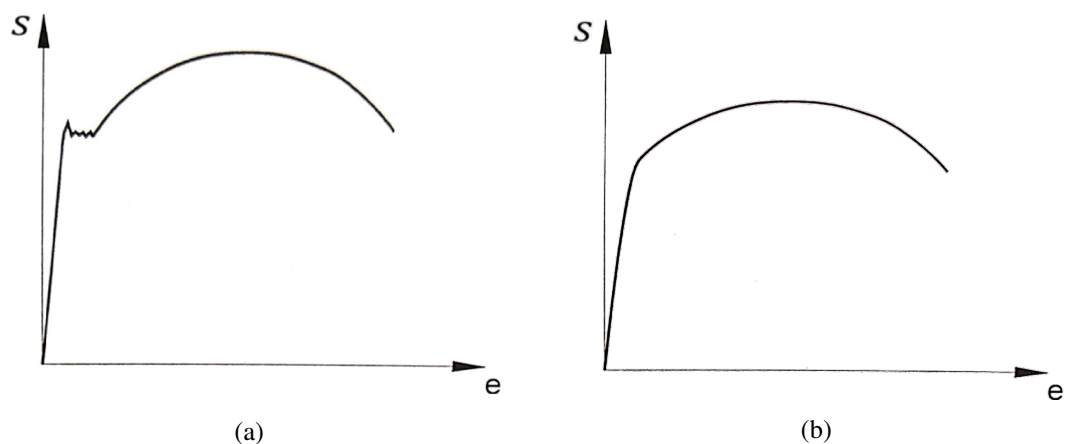


Figura 3.4: Diferentes tipos de curvas tensão-extensão convencionais, (a) com fenómeno de cedência e (b) sem fenómeno de cedência; adaptado de [1].

Para materiais que exibem fenómenos de cedência, Figura 3.5, a transição entre os regimes elástico e plástico tem início no ponto A, cuja tensão R_{pH} e R_{pL} são conhecidas por tensões limite de proporcionalidade superior e inferior, respetivamente. Porém, antes que se inicie a zona de deformação plástica uniforme, no ponto C, surge uma zona de instabilidade, designada por patamar de cedência ou extensão de Lüders. Este fenómeno é de natureza metalúrgica e tem origem nas impurezas do material. Estas impurezas têm tendência a concentrarem-se na vizinhança das deslocações, interferindo com o seu movimento e, consequentemente, com a deformação plástica.

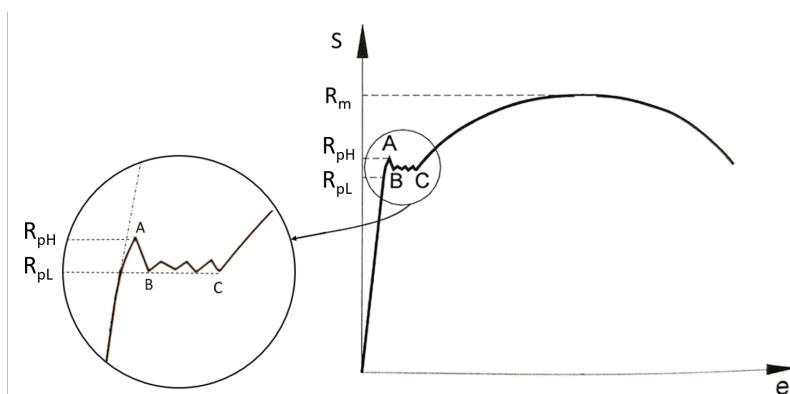


Figura 3.5: Curva tensão convencional-extensão convencional com patamar de cedência; adaptado de [1].

Para materiais que não possuam este fenómeno de cedência, a tensão limite de proporcionalidade, R_p , é o ponto de transição notável entre o regime elástico e plástico, Figura 3.6. Contudo, existem materiais que apresentam uma transição, de tal modo progressiva, que se torna difícil estabelecer o valor de tensão preciso a partir do qual se inicia a deformação plástica. Nestas situações utiliza-se como tensão limite de elasticidade o valor de tensão para o qual já ocorreu uma certa deformação plástica. Tal como está representado na Figura, esta tensão é geralmente definida para uma extensão de 0,2% e denomina-se tensão limite de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$.

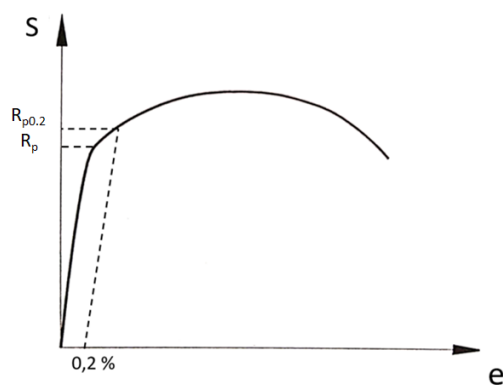


Figura 3.6: Tensões limite de proporcionalidade para materiais sem patamar de cedência; adaptado de [1].

Tensão de rotura

A tensão de rotura, R_m , traduz o valor máximo de tensão da curva tensão-extensão convencional e é dada por:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0}, \quad (3.5)$$

em que F_{max} representa a força nominal máxima que o provete pode suportar e A_0 a área inicial da secção transversal da zona de referência. Como já referido, esta tensão representa o fim da deformação plástica uniforme, não tendo uma relação direta com a fratura do provete.

3.1.1.2 Parâmetros de ductilidade

Genericamente, um material com uma elevada ductilidade possui uma tendência reduzida para concentração de tensões, levando à distribuição uniforme da deformação pelo material. A ductilidade traduz, qualitativamente, a capacidade que um dado material tem em suportar solicitações exteriores no regime plástico, antes que surjam condições para a formação de estricções. Através da curva de tração é possível definir parâmetros que quantifiquem esta propriedade, alguns dos quais representados na Figura 3.7. A extensão no ponto de cedência, A_e , representa a extensão máxima possível sem que ocorra deformação plástica no material. A partir deste valor, a extensão total para uma dada tensão vai ser a soma da extensão no ponto de cedência com uma determinada extensão plástica.

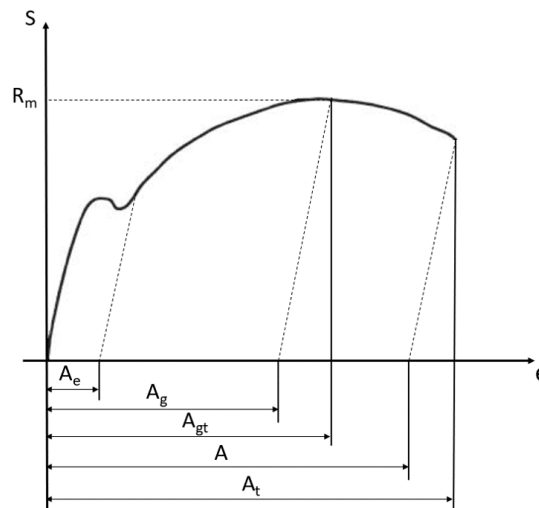


Figura 3.7: Parâmetros referentes à ductilidade de um material; adaptado de [3].

Para o ponto de tensão máxima, R_m , o parâmetro A_{gt} traduz a extensão total enquanto que A_g traduz a extensão plástica para esse valor de tensão. Na verdade, se o ensaio de tração fosse interrompido no ponto de força máxima, o material depois de descarregado iria conseguir recuperar a sua extensão elástica mas teria uma extensão plástica irrecuperável igual a A_g . Este princípio pode ser igualmente aplicado para o ponto onde se dá a rotura do material. Neste caso, define-se A como a extensão após rotura, sendo esta parte uma parte da extensão total, A_t . Assim, a extensão final que o material apresentará no fim do ensaio corresponde à extensão após rotura e expressa-se pela Equação 3.6, sendo L_u o comprimento de referência após fratura.

$$A(\%) = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Outro parâmetro quantificador da ductilidade de um material é o coeficiente de estricção Z . Este expressa a redução de área após fratura e é dado pela Equação 3.7, onde A_0 e A_u representam a área inicial e final da secção transversal do provete, respetivamente.

$$Z(\%) = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100 \quad (3.7)$$

3.1.2 Curva tensão-extensão real

A curva tensão convencional-extensão convencional apresentada anteriormente revela-se inadequada quando se pretende estudar com rigor o comportamento mecânico de um material, especialmente em regime plástico, uma vez que as propriedades assim definidas são calculadas com base nas dimensões iniciais do provete. O que acontece é que, ao longo do ensaio, as dimensões da zona de referência variam continuamente, daí a necessidade de corrigir a curva convencional de modo a considerar estas variações. Surge então a curva tensão-extensão real baseada nas dimensões instantâneas da zona de referência.

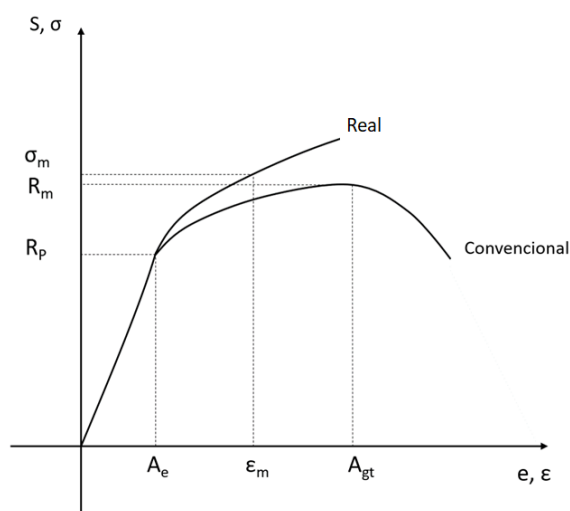


Figura 3.8: Representação esquemática das curvas tensão-extensão convencional e real; adaptado de [1].

Na Figura 3.8 está representada uma curva convencional e a respetiva curva real. Desde já se verifica que a curva real é continuamente crescente, ao contrário da convencional. De facto, como já foi referido na secção 3.1.1, depois da tensão convencional máxima R_m , o material continua a encruar acompanhado por uma diminuição da área transversal. Esta diminuição prevalece sobre o encruamento levando a que haja um decaimento da curva a partir desse ponto. Já na curva real, como as propriedades são referentes às dimensões instantâneas, a curva é sempre crescente. Outra observação que pode ser feita é que a curva real tem os seus pontos significativos mais à esquerda em comparação com a curva convencional. No regime elástico, as duas curvas são coincidentes, uma vez que a secção transversal do provete não sofre reduções significativas. As diferenças mais notórias concentram-se no regime plástico. Admitindo que nesta zona a deformação é homogénea

e que se verifica a conservação de volume na zona de referência (Equação 3.8) a tensão real, σ , pode ser expressa em função da tensão convencional, S , pela Equação 3.9.

$$dV = 0 \rightarrow A_{rea} \cdot L = A_0 \cdot L_0 \rightarrow \frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A_{rea}} \quad (3.8)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_{rea}} = \frac{F}{A_0} \frac{L}{L_0} = S(1 + e) \quad (3.9)$$

O aumento da extensão real, $d\varepsilon$, é dado pela razão entre o incremento do comprimento de referência, dL , e pelo comprimento L . Assim, a extensão real pode ser calculada pela Equação 3.10.

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \Leftrightarrow \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} dL = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + e) \quad (3.10)$$

De salientar que estas equações apenas são aplicáveis na zona de deformação plástica uniforme, uma vez que na zona não uniforme a deformação concentra-se numa área particular da secção uniforme e passa a existir uma deformação localizada (estricção), deixando de existir uma deformação homogénea.

No ponto equivalente à tensão limite de proporcionalidade a tensão real respetiva designa-se por tensão de cedência, σ_{ced} . Para a carga máxima, a tensão de rotura real é dada pela Equação 3.11 onde A_m corresponde à área no ponto de força máxima.

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_m} = R_m \frac{A_0}{A_m} \quad (3.11)$$

Do mesmo modo a extensão real neste ponto é dada por:

$$\varepsilon_m = \ln \frac{A_0}{A_m} = \ln(1 + A_{gt}) \quad (3.12)$$

Combinando as duas equações chega-se à Equação 3.13 ou, alternativamente, à Equação 3.14.

$$\sigma_m = R_m \frac{A_0}{A_m} = R_m \cdot \exp^{\varepsilon_m} \quad (3.13)$$

$$\sigma_m = R_m(1 + A_{gt}) \quad (3.14)$$

Na zona de deformação plástica não uniforme torna-se difícil a determinação da tensão real uma vez que surge um estado de tensão triaxial à medida que a geometria do provete vai sendo alterada. Daí que não é correto apresentar na curva real pontos de tensão superiores à tensão de rotura, σ_m .

Uma outra curva também importante e necessária na caraterização do material em modelação numérica é a curva tensão-extensão real plástica, onde se remove o comportamento elástico do

material. Assim é possível dispor da modelação do comportamento do material em regime plástico [1, 34].

3.2 Análise experimental

Nesta secção são analisados os dados adquiridos em ensaios de tração, à escala macro. Os materiais estudados são a liga de alumínio - AA5754 - e a liga de magnésio - AZ31B. Com estes resultados pretende-se criar um termo de comparação que será extremamente útil para estudar a veracidade dos resultados para os ensaios de tração em provetes miniaturizados.

3.2.1 Materiais utilizados

Atualmente, a redução de peso, mantendo os requisitos funcionais, é um dos objetivos fundamentais da indústria, principalmente no setor automóvel. A constante procura pela redução do consumo de combustível, do peso e dos custos ambientais, torna as ligas de alumínio e magnésio materiais competitivos, como alternativa a materiais como o aço, mais geralmente utilizados [35].

3.2.1.1 Alumínio AA5754

A liga AA5754-T4 é uma liga de alumínio da série 5xxx com um tratamento térmico T4, ou seja, um tratamento de solubilização seguido de envelhecimento natural. É amplamente utilizada na indústria automóvel devido à excelente combinação de densidade, resistência e conformabilidade. É uma liga Al-Mg, cuja composição química está apresentada na Tabela 3.1. O material em estudo foi fornecido na forma de chapa metálica, tendo uma espessura de aproximadamente 1mm.

Tabela 3.1: Composição química da liga AA5754-T4 [36].

Al [%]	Mg [%]	Mn [%]	Fe [%]	Si [%]
94,2-97,4	2,6-3,6	0-0,5	0-0,4	0-0,4
Cr [%]	Zn [%]	Cu [%]	Ti [%]	Outros [%]
0-0,3	0-0,2	0-0,1	0-0,15	0-0,15

3.2.1.2 Magnésio AZ31B

As ligas de magnésio têm uma densidade de dois terços das ligas de alumínio e um quarto das ligas de aço. Apresentam também uma excelente resistência e rigidez específicas, alta capacidade de amortecimento e elevada capacidade de reciclagem. Todas estas características fazem delas soluções promissoras para componentes estruturais. Contudo, a sua conformabilidade, à temperatura ambiente é limitada, o que condiciona em grande parte a sua utilização. Estas ligas têm uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) e como tal, possuem um número limitado

de sistemas de deslizamento para acomodar a deformação plástica. À temperatura ambiente estão disponíveis apenas quatro sistemas de deslizamento independentes, sendo a restante deformação dada por maclagem (*twinning*). Com o aumento da temperatura (100-150°C) são ativados novos planos de deslizamento que se traduzem numa melhoria significativa da ductilidade. O fenómeno de maclagem é responsável também pela existência de uma assimetria no comportamento do material à tração e à compressão. Na verdade, destes dois modos de solicitação resultam tensões limite de elasticidade diferentes, fenómeno denominado de *stress differential* [35]. Todas estas características tornam o estudo deste material interessante em ensaios de tração e compressão.

A liga AZ31B é uma liga Mg-Al-Zn, cuja composição química está representada na Tabela 3.2. O material em estudo é fornecido sob a forma de chapa metálica com aproximadamente 0,6 mm de espessura.

Tabela 3.2: Composição química da liga AZ31B [36].

Mg [%]	Al [%]	Zn [%]	Mn [%]	Si [%]
93,9-96,7	2,5-3,5	0,6-1,4	0,2-1	0-0,1
Cu [%]	Ca [%]	Fe [%]	Ni [%]	Outros [%]
0-0,05	0-0,04	0-0,005	0-0,005	0-0,3

Na Tabela 3.3 apresentam-se algumas propriedades de referência, segundo o software ces edupack [36], dos dois materiais utilizados. Correspondem assim, às características documentadas destes materiais.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas de referência dos materiais em estudo [36].

Propriedade	AA5754-T4	AZ31B
Módulo de Elasticidade E [GPa]	70	45
Coefficiente de Poisson ν	0,33	0,30
Tensão de Cedência $R_{p0.2}$ [MPa]	122	155
Tensão de Rotura σ_m [MPa]	232	240
Extensão após Rotura A [%]	15	11

3.2.2 Condições de ensaio

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina MTS, com uma capacidade máxima de 500 kN. Na Figura 3.9 estão representados os parâmetros e as condições de ensaio utilizadas nos testes. De realçar a utilização de um extensómetro aplicado diretamente no provete para a medição da variação do comprimento de referência.

Parâmetro	AA5754	AZ31B
Comprimento de referência L_0 [mm]	50	60
Largura de referência b_0 [mm]	12,5	14,73
Espessura de referência a_0 [mm]	1,00	0,6
Velocidade de ensaio v [mm/min]	5	5
Temperatura de ensaio T [°C]	25	25



Figura 3.9: Parâmetros e condições de ensaio [37].

3.2.3 Resultados experimentais - liga de alumínio AA5754-T4

A evolução da força em função do comprimento de referência, durante o ensaio, está representada na Figura 3.10. Observa-se que existe uma perfeita distinção entre o regime elástico e plástico do material, e a curva não apresenta qualquer tipo de patamar de cedência. Contudo, a transição entre os dois regimes caracteriza-se pelo aparecimento de um comportamento irregular da força no regime plástico. Este comportamento é comum neste material, e é conhecido como efeito *Portevin-Le Chatelier* (efeito PLC).

Este fenómeno é responsável por problemas estruturais e cosméticos em diversos processos de conformação plástica de chapa. Caracteriza-se por uma instabilidade que alguns materiais apresentam quando são deformados plasticamente e expressa-se através de um serrilhado visível nas curvas tensão-extensão. Segundo o modelo *Dynamic Strain Ageing* (DSA) durante a deformação uniaxial, o movimento das deslocações é bloqueado pelos átomos de magnésio, provocando um aumento na resistência do material. Uma vez atingido um determinado valor de tensão, as deslocações retomam o seu movimento, o que diminui instantaneamente a resistência do material, até que novamente as deslocações sejam bloqueadas causando um novo aumento de resistência. Assim, devido a este ciclo de aumento e diminuição da resistência do material as curvas de tração apresentam irregularidades no domínio plástico [38].

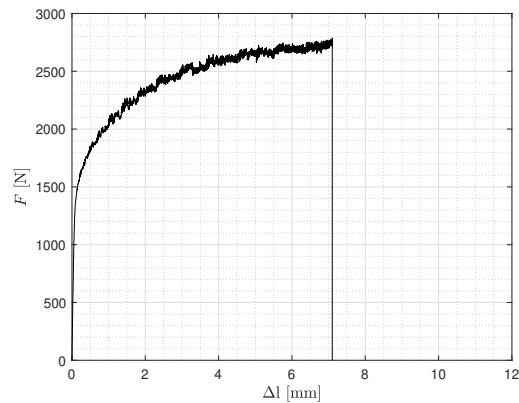


Figura 3.10: Representação da evolução da força em função da variação do comprimento de referência para a liga AA5754.

Pode manifestar-se de três formas diferentes, normalmente designadas por: tipo A, B e C. A diferença entre os vários tipos reside tanto na localização temporal como espacial das bandas de deformação. Tal como ilustrado na Figura 3.11, as bandas do tipo C aparecem aleatoriamente distribuídas, não se propagam ao longo do secção uniforme e a sua curva apresenta um serrilhado com uma amplitude e frequência constante. Já as bandas do tipo B propagam-se ao longo da secção de forma intermitente, com intervalos aproximadamente iguais. A amplitude e frequência do serrilhado nas curvas de tração são irregulares e menores do que o das curvas do tipo C. Por fim, as bandas do tipo A propagam-se continuamente e apresentam pequenas oscilações de tensão arbitrárias [39].

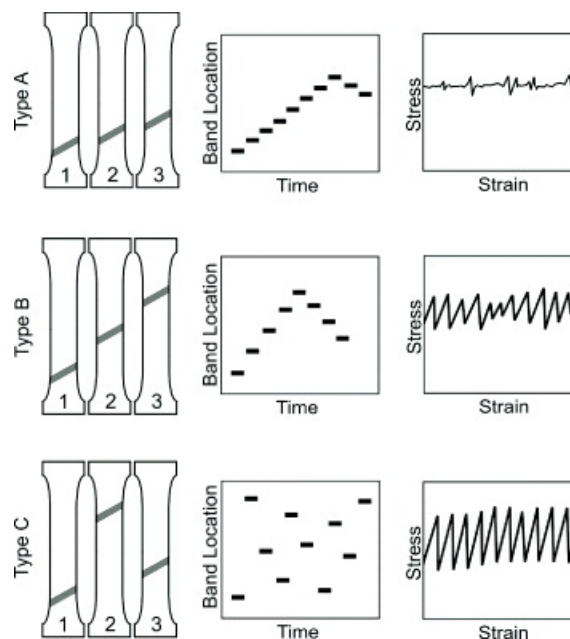


Figura 3.11: Diferentes tipos de bandas de deformação plástica localizada devido ao efeito Portevin-Le Chatelier [39].

Em suma, o efeito PLC faz com que as curvas de tração convencional e real, da liga AA5754 tenham um comportamento característico. Na Figura 3.12a está representada a curva de engenharia, que tal como foi já referido se obtém utilizando as Equações 3.1 e 3.2. De igual forma, utilizando as Equações 3.9 e 3.10 obtêm-se a curva tensão-extensão real, representada na Figura 3.12b. Utilizando estas curvas definem-se os valores quantitativos das propriedades mecânicas da liga de alumínio, representados na Tabela 3.5. Comparando estas propriedades com as anteriormente definidas na Tabela 3.3 constata-se que o módulo de elasticidade obtido é ligeiramente inferior ao valor de referência, enquanto os valores de $R_{p0.2}$, σ_m são semelhantes.

Tabela 3.5: Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas experimentalmente.

E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	σ_m [MPa]	ϵ_m
47	125,3	224,2	14,7	257,2	0,13

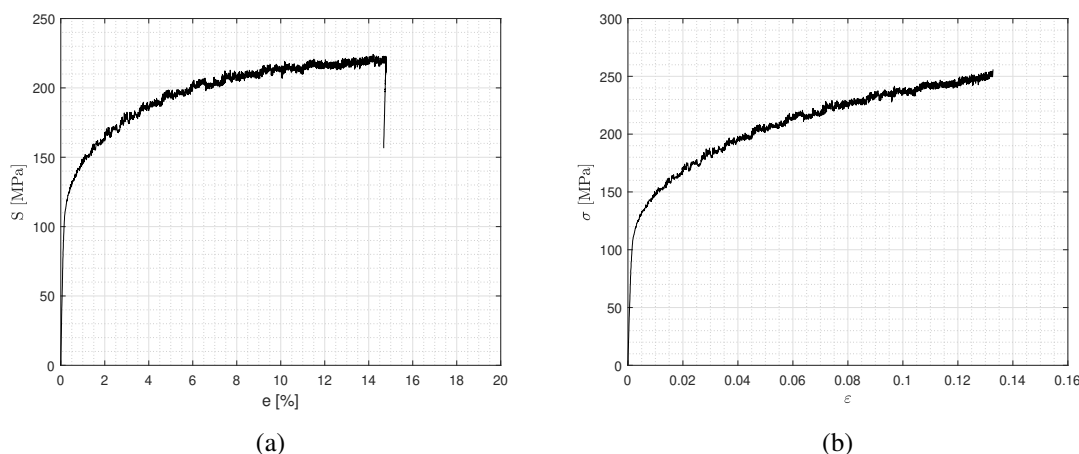


Figura 3.12: Representação da curva (a) tensão-extensão convencional e (b) tensão-extensão real da liga AA5754.

3.2.4 Resultados experimentais - liga de magnésio AZ31B

Analisando agora os resultados da liga de magnésio, apresentados na Figura 3.13, observa-se que a curva deste material tem um comportamento mais contínuo, completamente distinto do material anterior. As curvas tensão-extensão indicam que, comparativamente à liga de alumínio, esta liga apresenta propriedades de resistência e ductilidade superiores. Estas estão expressas numericamente na Tabela 3.6. Comparando os resultados obtidos com os valores de referência, apresentados na Tabela 3.3, verifica-se novamente que o módulo de elasticidade obtido é significativamente inferior e que as propriedades de resistência, $R_{p0.2}$, σ_m , apresentam valores superiores.

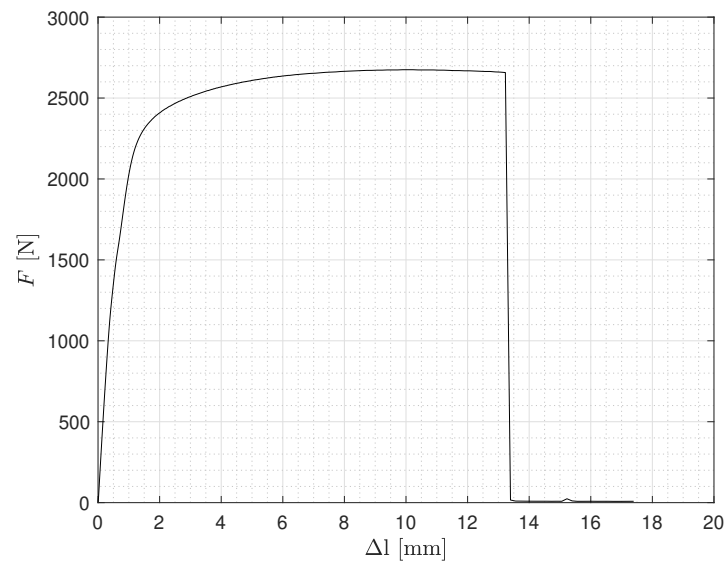


Figura 3.13: Representação da força convencional em função da variação do comprimento de referência para a liga AZ31B.

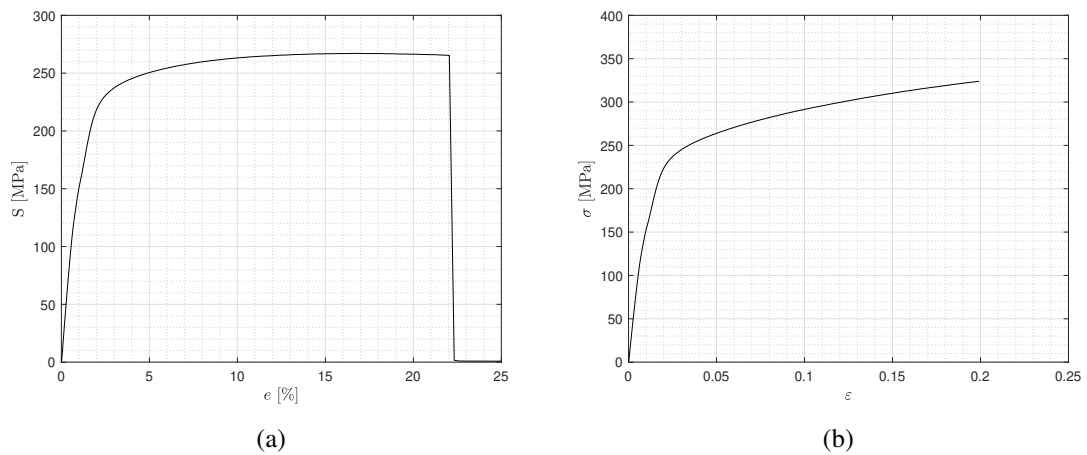


Figura 3.14: Representação da curva (a) tensão-extensão convencional e (b) tensão-extensão real da liga AZ31B.

Tabela 3.6: Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas experimentalmente.

E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	σ_m [MPa]	ϵ_m
14	219,2	267,1	16,5	311,1	0,15

3.3 Modelação numérica do ensaio de tração

3.3.1 Leis de encruamento

De modo a ser possível simular numericamente o comportamento de um determinado material é necessário conhecer e caraterizar o seu comportamento tanto em regime elástico como plástico. O módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson* definem a zona elástica. Contudo, relativamente à parte plástica, não há um único parâmetro que defina totalmente o comportamento do material. Neste sentido, é necessário recorrer a leis de encruamento para aproximar o comportamento plástico do material. As leis de encruamento regem a evolução da dimensão da superfície de plasticidade caracterizada pela tensão equivalente σ_Y , em função da evolução das variáveis internas do material [35]. De seguida serão apresentadas algumas destas leis assim como os seus parâmetros caraterísticos para os diferentes materiais em estudo.

Lei de *Swift*

A lei de *Swift* é a lei mais comum e adequada para descrever o comportamento de materiais que exibam encruamento isotrópico sem saturação. Esta lei é expressa matematicamente por:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (3.15)$$

Os valores de K , n e ϵ_0 representam constantes do material enquanto que σ e ϵ são os valores representativos da tensão e extensão plástica, respetivamente. As ligas AA5754 e AZ31B exibem o fenómeno de saturação da tensão plástica e como tal esta lei não será a mais adequada para a sua caraterização.

Lei de *Voce*

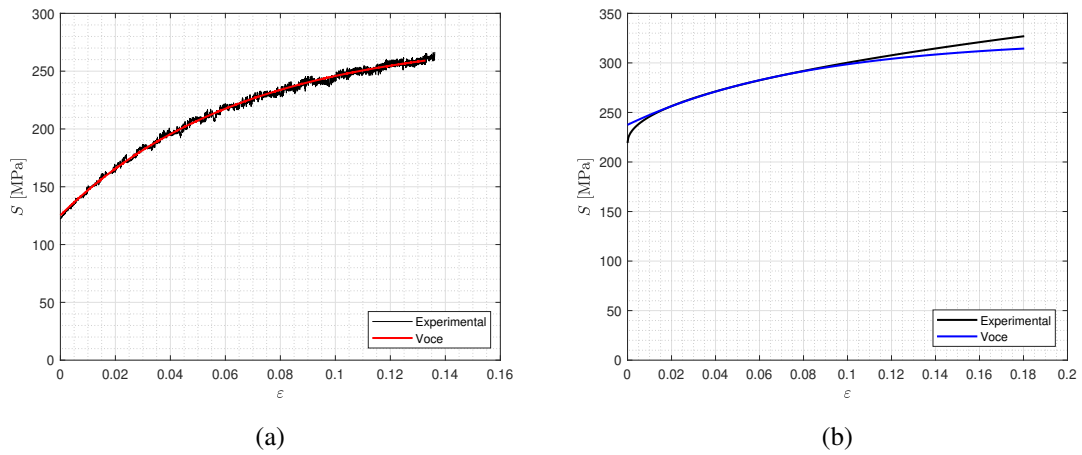
A lei de *Voce* é mais apropriada para descrever o comportamento de materiais que exibam encruamento isotrópico com saturação. A Equação 3.16 traduz a lei de *Voce*:

$$\sigma = A + B \cdot (1 - e^{-C \cdot \epsilon}) \quad (3.16)$$

As constantes do material, A , B e C , são representativas do material e a sua identificação é feita através dos resultados experimentais. Na Tabela 3.3.1 estão representados os parâmetros caraterísticos desta lei para a liga AA5754 e AZ31B. Para a liga de alumínio, esta lei adapta-se perfeitamente, Figura 3.15a. Contudo, tal como é espectável não tem em conta o comportamento instável derivado do efeito PLC, sendo apenas uma média dos valores obtidos. Já para a liga de magnésio, a adaptação da lei de *Voce* aos resultados experimentais não é perfeita. Nota-se, pela Figura 3.15b, que para extensões reais inferiores a 0,02 e superiores 0,1 as curvas tendem a afastar-se. Neste sentido é necessário uma curva de aproximação mais precisa para esta liga.

Tabela 3.7: Parâmetros da lei de *Voce* para as ligas AA e AZ31.

AA5754			AZ31B		
A	B	C	A	B	C
125,3	154,6	15,1	237,1	86,4	12,3

Figura 3.15: Representação da aproximação analítica do comportamento plástico da liga AA5754 pela lei de *Voce*.

Lei de *Johnson-Cook*

O modelo de *Johnson-Cook* foi introduzido por *Johnson e Cook* em 1983. É um modelo empírico que representa não só o efeito da extensão, como também da taxa de deformação e da temperatura sobre a tensão. A formulação matemática deste modelo pode ser vista na Equação 3.17:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}) \quad (3.17)$$

Nesta, σ é a tensão real, ϵ_p é a extensão real plástica, $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação e T^* é a forma homóloga da temperatura, definida na Equação 3.18:

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{fusao} - T_{ref}} \quad (3.18)$$

Os parâmetros A, B, n, C e m são constantes do material e devem ser determinadas experimentalmente. ϵ^* é a taxa de deformação adimensional definida na Equação 3.19, em que ϵ_0 é uma taxa de deformação de referência.

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (3.19)$$

O modelo de *Johnson-Cook* baseia-se assim numa relação de encruamento relacionada com o primeiro termo da Equação 3.17 escalonada pelo segundo e terceiro termos: a tensão aumenta à medida que a taxa de deformação aumenta, e diminui quando a temperatura aumenta. O parâmetro C do material controla a sensibilidade da taxa de deformação logarítmica, enquanto que m descreve o amaciamento exponencial térmico. Os parâmetros da liga AZ31B relativos a este modelo estão representados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Parâmetros usados na equação de *Johnson-Cook* para a liga AZ31B.

A	B	n	C	m	$T_{fusao} [^{\circ}C]$	$T [^{\circ}C]$
219,2	246,9	0,484	0,0223	0,06943	618	25

Os valores de Comparativamente à lei de *Voce*, o modelo de *Johnson-Cook* apresenta resultados mais aproximados dos experimentais, tal como se pode observar na Figura 3.16.

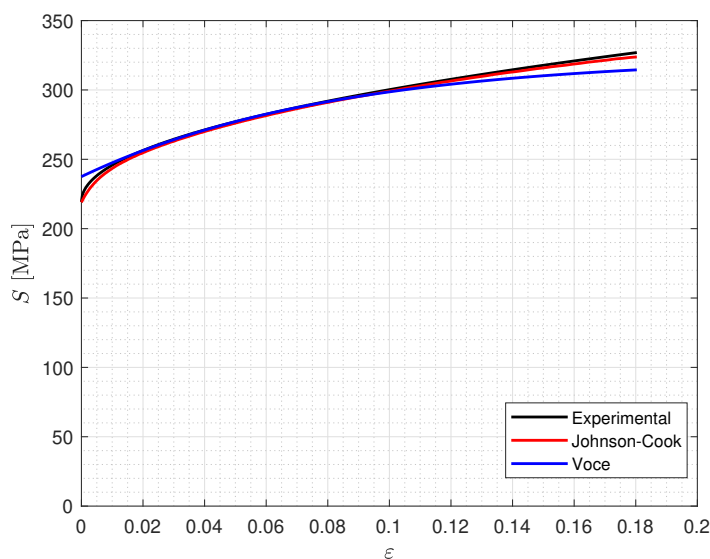


Figura 3.16: Caracterização analítica por *Johnson-Cook* da liga AZ31B e respetiva comparação com os resultados experimentais e lei de *Voce*.

3.3.2 Resultados numéricos

A simulação numérica foi realizada recorrendo ao software comercial *AbaqusTM* [40]. Para tal utilizou-se um modelo *Abaqus/Standard* com elementos de casca. Optou-se por modelar apenas um quarto do provete assumindo que existe simetria no comportamento do material na geometria do provete.

Na Figura 3.17 estão representados os resultados obtidos por simulação para os provetes de tração da liga AA5754. Observa-se que existe uma distribuição uniforme da tensão e da deformação ao longo do comprimento de referência. A curva obtida por simulação, apresenta uma boa relação com os valores experimentais, tal como se pode observar na Figura 3.18. De igual forma os resultados para a liga AZ31B mostram uma boa relação entre os resultados experimentais e numéricos, Figuras 3.19 e 3.20. Note-se que a principal diferença existente está na parte elástica da curva de tração uma vez que se usou na simulação um valor de referência e não o valor experimental. Em suma, pode-se concluir que a modelo numérico definido está adequado e é representativo do ensaio.

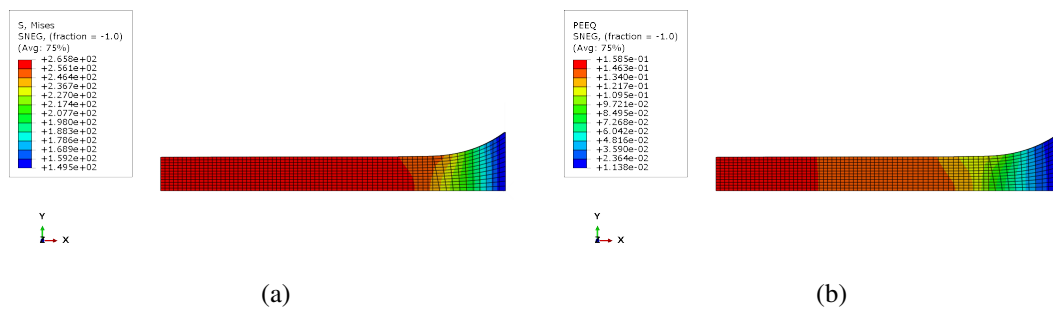


Figura 3.17: Representação da distribuição da (a) tensão e (b) da deformação no provete de tração da liga AA5754.

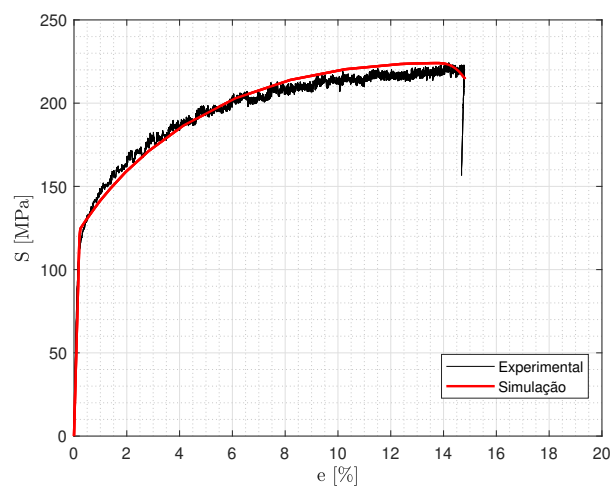


Figura 3.18: Representação gráfica do resultado obtido por simulação numérica e respetiva comparação com os valores experimentais para a liga AA5754.

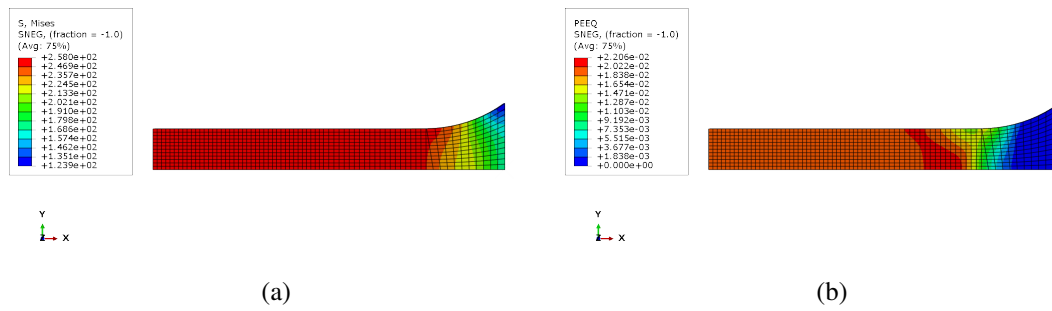


Figura 3.19: Representação da distribuição da (a) tensão e (b) da deformação no provete de tração da liga AZ31B.

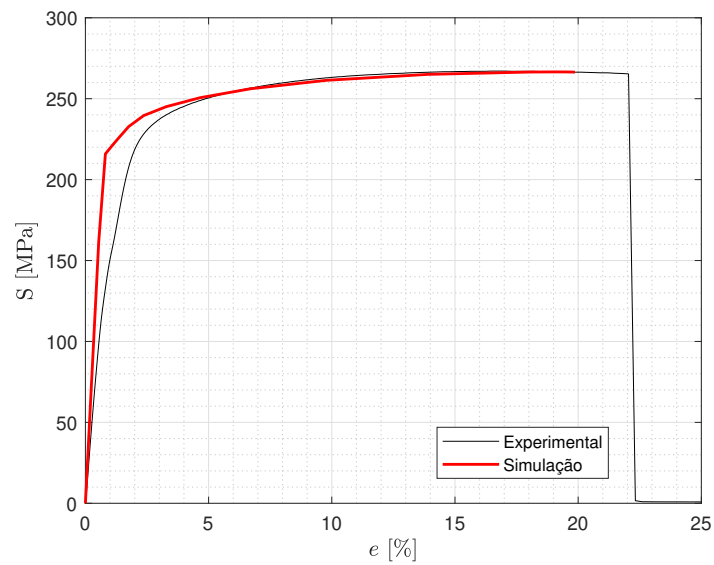


Figura 3.20: Representação gráfica do resultado obtido por simulação numérica e respetiva comparação com os valores experimentais para a liga AZ31B.

Capítulo 4

Ensaio de tração com provetes miniaturizados

O principal objetivo da presente dissertação é o projeto e desenvolvimento de um equipamento especializado para a realização de ensaios uniaxiais de tração e compressão, em provetes miniaturizados. Assim, como protótipo preliminar foi utilizado e adaptado um equipamento já existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DEMec). Com as devidas modificações, foi possível estabelecer um primeiro contacto com os ensaios em escalas reduzidas, identificando-se as barreiras e dificuldades inerentes aos mesmos e possíveis melhorias que poderiam ser feitas no novo protótipo. Neste capítulo é apresentado o equipamento existente, as suas características e alterações, assim como os resultados experimentais resultantes dos ensaios de tração realizados.

4.1 Caraterização do equipamento existente

O protótipo inicial, projetado por Fernandes [41], surgiu no âmbito do estudo de células solares. Este equipamento, representado na Figura 4.1, tem a capacidade medir a resistência ao corte de células solares, até a um limite máximo de 500 N.

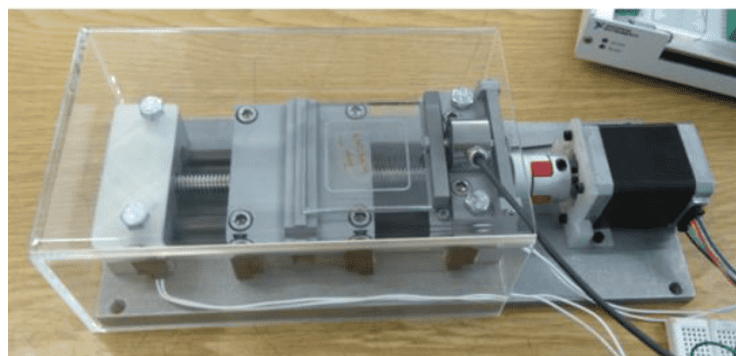


Figura 4.1: Representação da máquina existente para ensaios de células solares [41].

Na Figura 4.2 está representada sumariamente a sua composição: o motor (1), elemento motor do sistema, transmite binário à mesa linear (3) através do acoplamento (2). Através de um fuso presente na mesa o movimento de rotação é convertido em deslocamento linear de uma das amarras (8). Durante o ensaio avalia-se a força de corte necessária para quebrar cada célula solar (4) através da célula de carga (3).

Na secção seguinte apresentam-se e caracterizam-se os principais componentes deste equipamento.

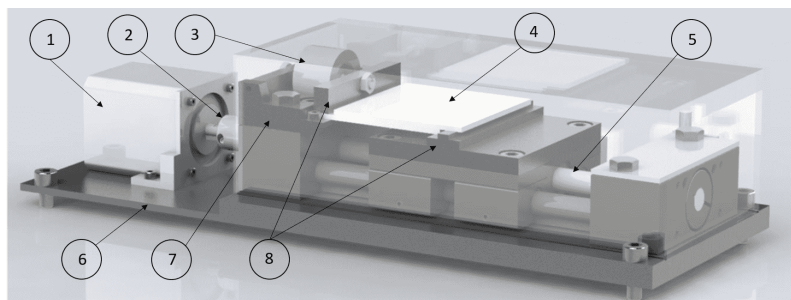
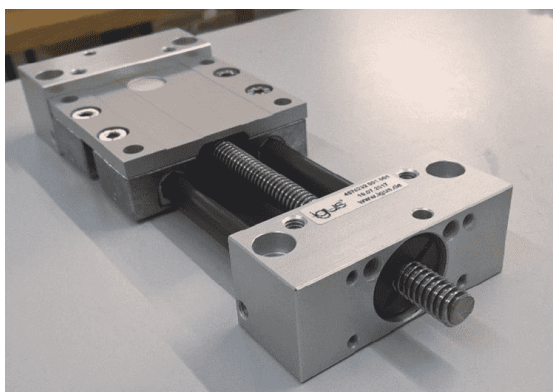


Figura 4.2: Constituição do protótipo inicial: (1) motor; (2) acoplamento; (3) célula de carga; (4) célula solar; (5) mesa linear; (6) base; (7) suporte da célula de carga; (8) amarras; adaptado de [41].

4.1.1 Mesa linear

A mesa linear, fornecida pela igus[®], é o elemento responsável por movimentar linearmente uma das amarras do sistema. Através de um veio roscado, converte movimento rotativo proveniente do motor em movimento linear. Genericamente é composta por um fuso de 10mm de diâmetro, por uma porca polimérica e por dois elementos de guiamento também poliméricos, inseridos na parte móvel da mesa. Na Figura 4.3 está representado isoladamente este componente assim como as suas principais especificações.



Referência	SLWE-BB-1040
Curso [mm]	65
Diâmetro [mm]	10
Passo [mm]	2
Máx Carga Axial [N]	500
Máx Carga Radial	2000
Máx. velocidade [rpm]	1500
Máx. avanço [m/min]	3
Peso [kg]	0,9

Figura 4.3: Mesa Linear igus[®] e respetivas especificações [41].

4.1.2 Motor

O motor utilizado nesta aplicação é um motor passo a passo fornecido pela *Oriental Motors*, Figura 4.4. Este tipo é caraterístico pelo seu posicionamento preciso, pelo seu baixo custo e pelo seu reduzido binário disponível. O seu controlo é realizado através de um controlador - SCX11 - também ele fornecido pela marca.



Referência	PKP546N18A2
Máx. Holding Torque [Nm]	0,5
Holding Torque motor parado [Nm]	0,25
Corrente nominal [A/fase]	1,8
Ângulo básico de passo	0,72°
Entrada fonte de alimentação	24 VDC 2,8 A
Driver	CVD518BR-K

Figura 4.4: Motor passo a passo da *Oriental Motors* e respetivas especificações [41].

4.1.3 Célula de carga

A célula de carga é o componente responsável pela aquisição do valor da força em jogo durante o ensaio. Foi utilizada a célula de carga HBM, representada na Figura 4.5.



Referência	HBM U9C
Capacidade máxima [N]	500
Sensibilidade [mV/V]	1
Tensão de excitação [V]	5
Erro relativo de excitação [mV/V]	± 0,2

Figura 4.5: Celula de Carga da *HBM* e respetivas especificações [41].

4.2 Adaptação do protótipo

Para ser possível ensaiar provetes à tração foram necessárias algumas alterações ao protótipo existente. A primeira etapa passou por desenvolver e projetar duas novas amarras, adequadas a provetes de chapa metálica. Posteriormente, foi necessário introduzir no sistema um transformador diferencial variável linear - LVDT. Ao contrário do que acontece num ensaio de tração macro, o transdutor não tem como objetivo medir a extensão do provete mas sim avaliar o movimento da mesa linear. Para a medição da extensão real da amostra foi utilizada a técnica de correlação digital de imagem referida na secção 2.1.1.

A arquitetura de sistema do novo equipamento está representada na Figura 4.6: o ensaio é controlado por um computador onde está ligado uma placa de aquisição, o controlador do motor e a câmara da correlação digital. À placa de aquisição estão ligados a célula de carga e o LVDT enquanto que o motor passo a passo está conectado ao seu controlador.

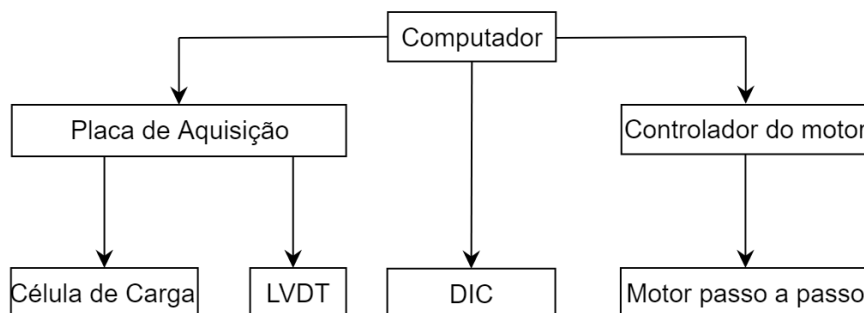


Figura 4.6: Arquitetura de sistema do protótipo inicial adaptado.

4.2.1 Projeto do sistema de amarração

Com as amarras do protótipo existente não era possível fixar corretamente provetes miniaturizados sob a forma de chapa metálica, pelo que surgiu a necessidade de maquinar duas novas interfaces. Na Figura 4.7 está representado o sistema de amarração implementado no protótipo, onde uma das amarras é fixa à célula de carga e a outra é solidária com a parte móvel da mesa linear. As amarras foram produzidas em aço CK45.

De modo a estudar o comportamento à tração dos dois componentes produzidos, foi realizada uma análise estrutural com recurso ao software *Inventor* da *Autodesk* [42]. Assim, avaliaram-se os resultados da tensão e do alongamento máximos, para uma carga aplicada de 500 N, representados nas Figuras 4.8 e 4.9. Como se pode observar os valores de tensão e alongamento estão perfeitamente adequados à aplicação. Nota-se também que são ligeiramente superiores na amarra fixa, e a explicação para tal é o seu modo de fixação: enquanto na amarra móvel existem dois pontos de fixação na amarra fixa há apenas um. Assim é normal que a tensão máxima se distribua pelos dois pontos de fixação na amarra móvel e o alongamento máximo seja também menor.

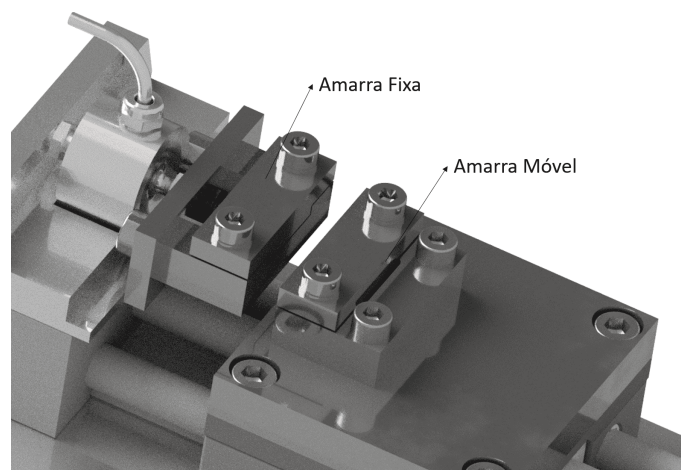
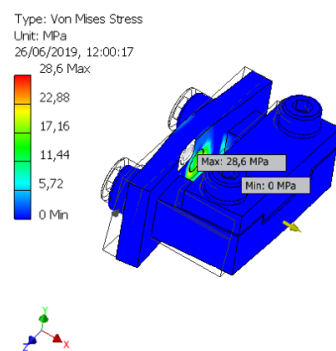
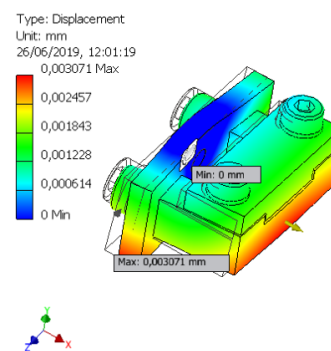


Figura 4.7: Conjunto final das amarras no protótipo inicial.

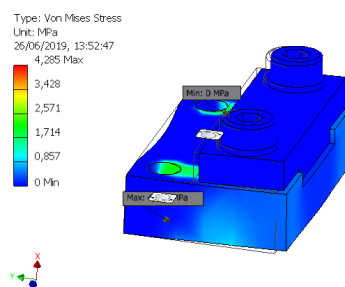


(a)

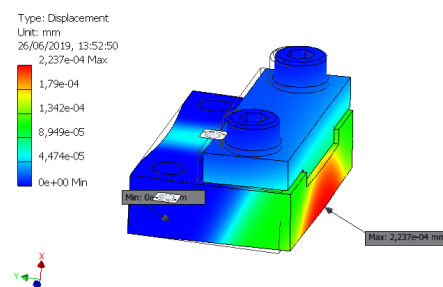


(b)

Figura 4.8: Análise estrutural da amarra fixa: a tensão máxima instalada (a) é de 26,6 MPa e o alongamento máximo (b) de 0,003 mm.



(a)



(b)

Figura 4.9: Análise estrutural da amarra móvel: a tensão máxima instalada (a) é de 4,3 MPa e o alongamento máximo (b) de 0,00024 mm.

4.2.2 Implementação do transdutor de deslocamento

Um LVDT é um equipamento eletromecânico que transforma movimento retilíneo linear em sinal analógico (corrente ou voltagem). Foi utilizado um LVDT fornecido pela *RDP Electronics Ltd*, cujas principais especificações estão representadas na Figura 4.10.



Referência	LDC2000A
Curso [mm]	±50
Sensibilidade mV/mm	44,78
Linearidade %	0,22

Figura 4.10: LVDT da *RDP Electronics Ltd* e respectivas especificações.

Tal como já foi referido, a sua finalidade é a análise do comportamento da mesa linear. Deste modo, durante o ensaio, é possível avaliar se existe alguma anormalidade, como, por exemplo, o escorregamento do provete nas amarras.

Como se trata de um equipamento analógico, teremos associado a existência de algum ruído na sua saída. Na Figura 4.11 está ilustrado o sinal de saída do LVDT utilizado, em milímetros. Note-se que em torno da posição de referência verifica-se uma variação de [-1,5 mm, +1,5 mm]. Este intervalo de ruído foi considerado excessivo para a aplicação em questão, pelo que teve de ser minimizado.

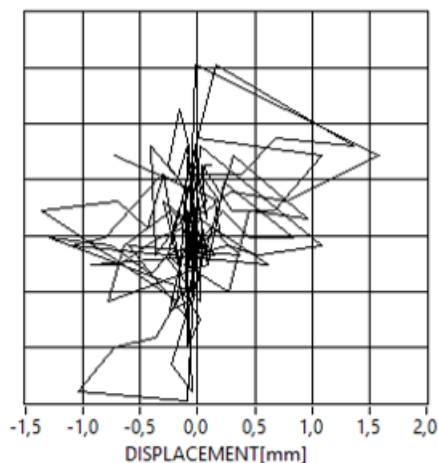


Figura 4.11: Sinal de saída do LVDT.

Para tal recorreu-se a um filtro condicionador de sinal RC, representado na Figura 4.12a. Também designado por passa-baixo, este filtro permite a passagem de baixas frequências sem dificuldade e atenua (ou reduz) a amplitude das frequências maiores que a frequência de corte:

$$Freq.Corte = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (4.1)$$

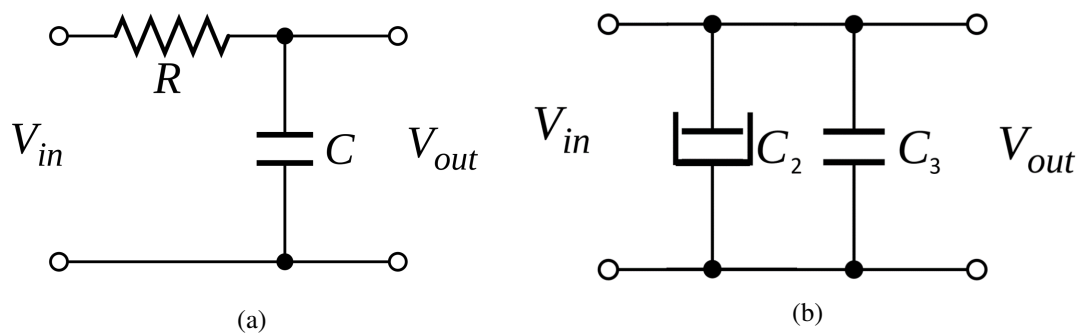
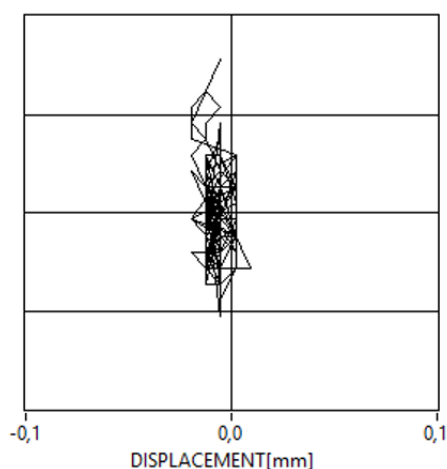


Figura 4.12: Filtros utilizados para reduzir o ruído do LVDT: (a) filtro RC, (b) filtro de fonte de alimentação.

Para além deste filtro, foi introduzido um outro filtro na fonte de alimentação, representado na Figura 4.12b, com o objetivo de estabilizar o sinal da fonte. Este é constituído essencialmente por dois condensadores, um eletrolítico (C2) que tem como função filtrar as variações de baixa frequência e um cerâmico (C3) para filtrar as variações de alta frequência. Assim, com a utilização destes dois circuitos, conseguiu-se reduzir o erro da medição até $\pm 0,0175$ mm, tal como se pode observar na Figura 4.13. Nesta Figura estão também representados os valores numéricos dos componentes utilizados, assim como os da frequência de corte para o filtro passa-baixo.



	Valor
R [$K\Omega$]	82
C [nF]	100
Ref. Corte [Hz]	19,41
C2 [μF]	10
C3 [nF]	100

Figura 4.13: Sinal tratado de saída do LVDT e respetivos valores dos componentes utilizados nos circuitos.

O funcionamento de um LVDT é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Durante a sua implementação notou-se que o seu ruído era fortemente influenciado pela posição onde este se encontrava relativamente ao motor passo a passo. Na verdade, este fenómeno é facilmente explicado: se os dois componentes se encontrarem próximos, Figura 4.14 o campo magnético do motor influencia o campo magnético do LVDT, aumentando o erro de medição. De forma a contornar este problema, optou-se por recolocar o transdutor, Figura 4.15, deixando de haver uma influência notória no ruído de medição.

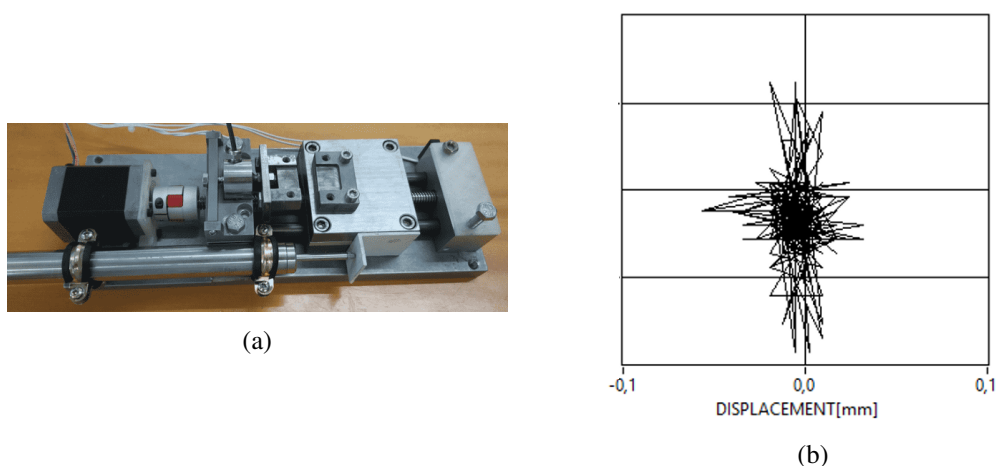


Figura 4.14: Representação da influência do campo magnético do motor no sinal do LVDT (b) estando montado como representado em (a).

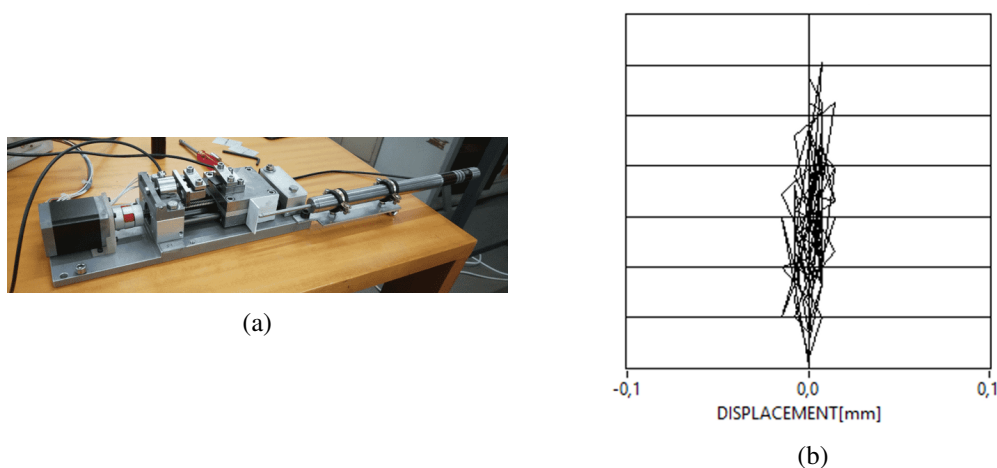


Figura 4.15: Representação da influência do campo magnético do motor no sinal do LVDT (b) estando montado como representado em (a).

4.3 Ensaios experimentais

Neste protótipo foram realizados alguns ensaios de tração em provetes de chapa metálica, que serviram essencialmente como uma primeira abordagem à metodologia de ensaios proposta, tendo em conta os objetivos pretendidos. Neste sentido, foi possível avaliar de que forma é que os resultados obtidos em provetes miniaturizados diferem dos resultados dos testes à escala macro, assim como compreender quais as algumas dificuldades inerentes aos ensaios em escalas reduzidas.

4.3.1 Características dos provetes

Os materiais metálicos utilizados foram, tal como no capítulo anterior, a liga de alumínio AA5754 e a liga de magnésio AZ31B. Como se referiu no Capítulo 2, a escala miniaturizada

utilizada nesta dissertação é a escala meso. Também neste capítulo se referiu que não existe nenhuma norma que defina a geometria dos provetes para ensaios de tração neste tipo de escala. Assim, para cada material, definiram-se duas geometrias de provetes distintas, aplicando técnicas de miniaturização diferentes. Para ambas, a largura de referência escolhida foi de 2 mm, sendo esta imposta pela capacidade máxima do protótipo.

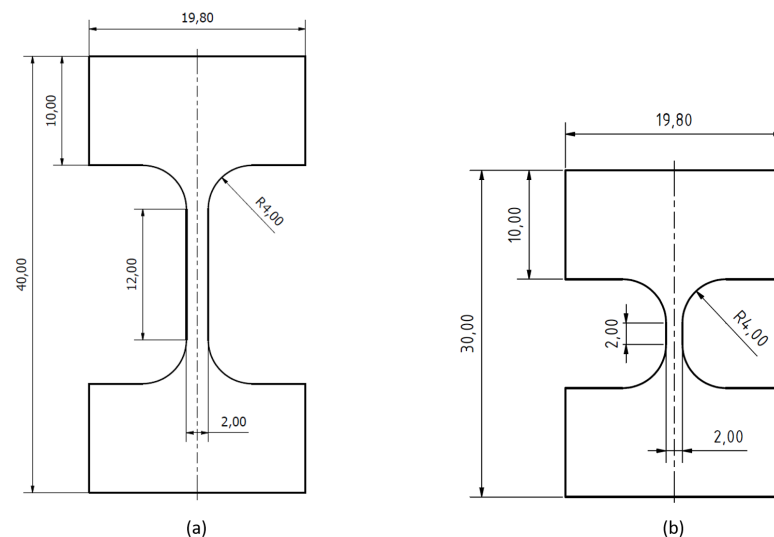


Figura 4.16: Representação das duas geometrias de provetes miniaturizados: (a) Tipo 1, com uma miniaturização proporcional; (b) Tipo 2, com uma miniaturização não proporcional.

A primeira técnica consiste em realizar uma miniaturização proporcional relativa à largura de referência. Num provete de tração à escala macro a razão entre a largura e o comprimento de referência é de seis. Assim, para uma largura de referência de 2 mm o comprimento de referência correspondente será de 12 mm.

A segunda técnica consiste em utilizar um comprimento igual à largura de referência ou seja, 2 mm, não havendo nenhuma relação com a escala macro. Pretende-se então, com estes dois tipos de geometria, analisar os resultados obtidos à tração e compará-los entre si e com valores de referência, ou seja, com os ensaios de tração à escala macro. As duas geometrias de provetes miniaturizados estão representadas na Figura 4.16. Daqui em diante, as geometrias referentes aos primeiro e segundo tipos de miniaturização vão ser designadas como Tipo 1 e Tipo 2, respetivamente.

4.3.2 Setup experimental

O *setup* experimental, apresentado na Figura 4.17, foi instalado numa mesa ótica de laboratório. Assim, fixando o protótipo, Figura 4.18, e a câmara CCD, garantiu-se a estabilidade de captação de imagem necessária para uma correta correlação digital, eliminando-se qualquer movimento relativo indesejado entre o provete e a câmara. Outro aspeto a realçar é que a câmara CCD

foi colocada perpendicularmente ao provete de modo a facilitar a medição correta das deformações no plano da chapa metálica.

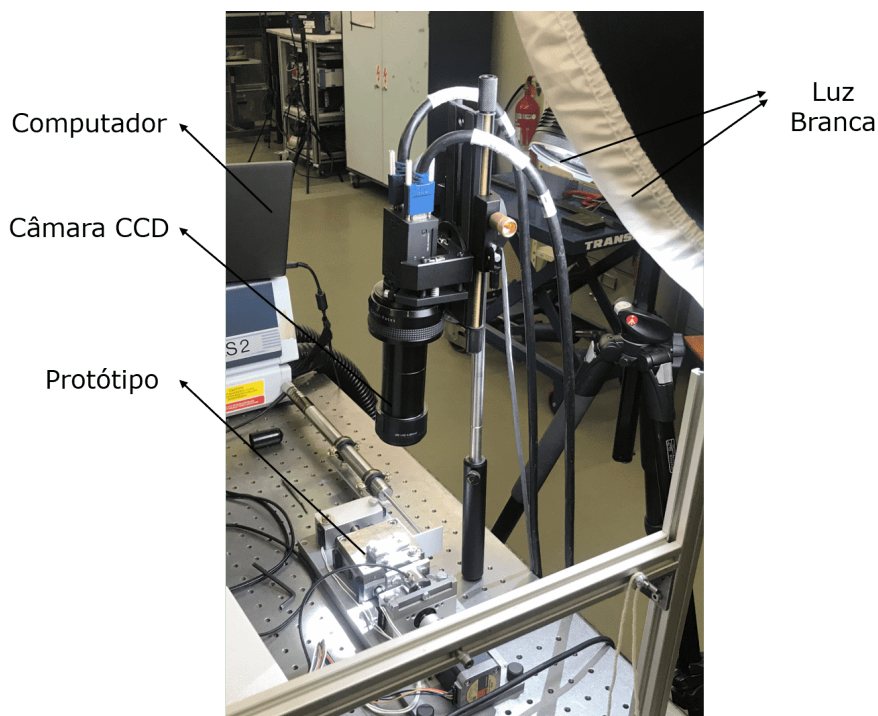


Figura 4.17: *Setup* experimental utilizado na realização dos ensaios.

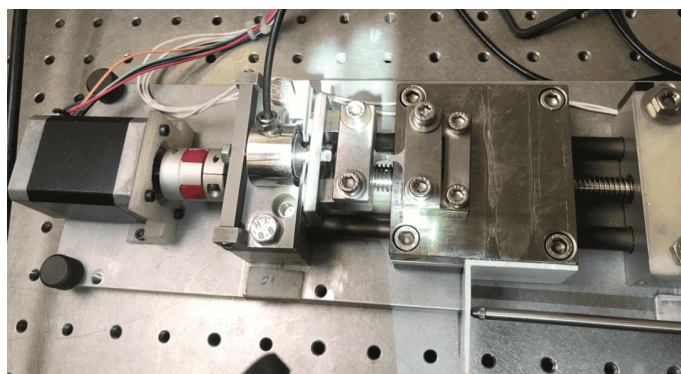


Figura 4.18: Protótipo devidamente instalado numa mesa ótica.

4.3.3 Preparação dos provetes

A preparação dos provetes passou essencialmente por duas fases: inicialmente foi necessário realizar a geometria pretendida por maquinagem e posteriormente preparar os provetes (criar o *speckle*) para a correlação digital. O fabrico de provetes miniaturizados de chapa metálica constitui um verdadeiro desafio para quem os fabrica, sobretudo quando estes têm espessuras abaixo de 1 mm. A escolha do processo de fabrico tem então de ser feita de forma cuidada, de modo que a precisão dimensional obtida seja satisfatória.

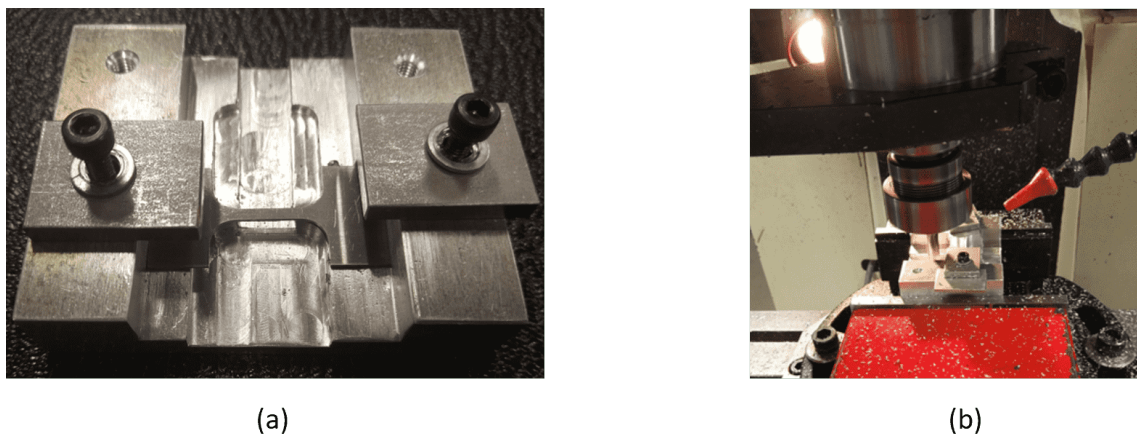


Figura 4.19: Representação dos equipamentos utilizados no fabrico dos provetes miniaturizados: (a) gabarito de fixação e (b) maquinagem dos provetes.

Idealmente o processo de fabrico preferido para este caso seria a eletroerosão por fio. Contudo devido à indisponibilidade deste processo foi utilizada a maquinagem. A partir de chapas previamente cortadas e empilhadas, foi fresada a geometria pretendida para cada tipo de provete. Para a fixação correta das várias chapas sobrepostas durante a maquinagem foi utilizado um gabarito, tal como está representado na Figura 4.19.

A preparação dos provetes para a correlação digital é já um processo mais simples e passa também por duas fases: inicialmente é necessário pintar a face onde vai ser medida a deformação com um primário. Este servirá essencialmente como uma camada de base para ser possível aplicar, posteriormente, o *speckle* da correlação digital, Figura 4.20.

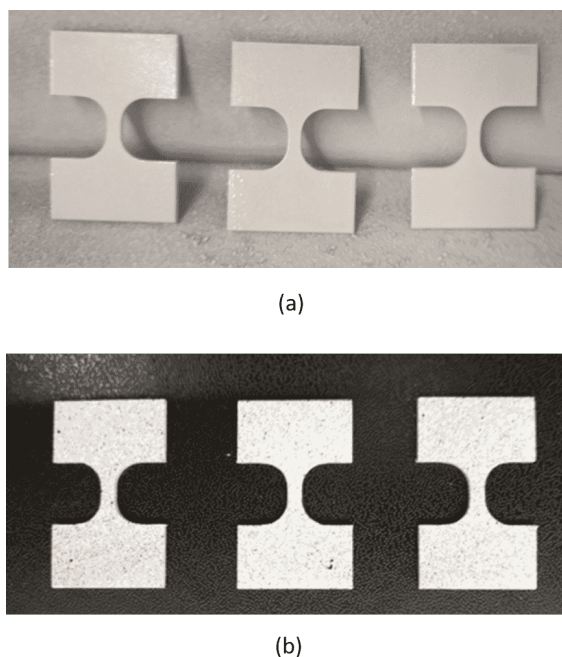


Figura 4.20: (a) Provetes após a aplicação do primário e (b) após a aplicação do *speckle*.

4.3.4 Parâmetros dos ensaios

De modo a avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos foram realizados três ensaios para cada provete. Assim, foi possível observar se os resultados eram coerentes e se representavam corretamente as propriedades conhecidas do material.

De modo a comparar os ensaios miniaturizados com os ensaios de tração à escala macro utilizou-se uma taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$, da mesma ordem de grandeza destes ensaios. Este parâmetro, matematicamente definido pela derivada da extensão em ordem ao tempo traduz a velocidade com que a deformação num dado material ocorre. Nos ensaios de tração convencionais, utilizam-se taxas de deformação na ordem dos $10^{-3}/10^{-4} s^{-1}$. A relação entre a velocidade do travessão e a taxa de deformação pode ser dado pela seguinte equação:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right)}{60} \quad (4.2)$$

onde ΔL traduz a variação do comprimento de referência, L_0 , por minuto que corresponde à velocidade do travessão em mm/min. Na Tabela 4.6 estão sintetizados os parâmetros de ensaio para os dois tipos de geometria. Apenas se conseguiu garantir a taxa de deformação pretendida no provete do Tipo 1 uma vez que no provete do Tipo 2 a velocidade necessária para essa mesma taxa não foi possível com o motor existente.

Tabela 4.6: Resumo dos parâmetros de ensaio para os dois tipos de provetes miniaturizados.

Parâmetro		Tipo 1	Tipo 2
Frequência do motor	[Hz]	10	10
Velocidade Linear	[mm/min]	2,4	2,4
$\dot{\epsilon}$	[s ⁻¹]	3,04e-03	1,31e-02

Relativamente à medição da deformação através da correlação digital de imagem, foi utilizado o software *VIC – 2DTM* [21] com os parâmetros apresentados na Tabela 4.7. De modo a comparar os resultados da correlação digital entre os diferentes ensaios, optou-se por considerar a mesma região de interesse para cada teste. Assim, utilizando um extensómetro virtual com um comprimento igual ao comprimento de referência, 12 mm e 2 mm para o Tipo 1 e 2 respetivamente, garante-se que a área em análise é uniforme e que a extensão medida em cada tipo de provete pode ser comparável.

A aquisição de dados durante o ensaio foi feita de um modo independente, isto é, as variações da força e do deslocamento da mesa linear foram captadas utilizando o software *Labview* [43], enquanto que a extensão foi captada pelo software de correlação digital [21]. Neste sentido, após o ensaio foi necessário relacionar os dados das duas fontes de informação utilizando como variável comum o tempo. Para que a junção dos dois tipos de dados fosse feita de uma forma fidedigna foi, no princípio de cada ensaio, necessário iniciar a aquisição dos dados em simultâneo.

Tabela 4.7: Parâmetros utilizados no software VIC-2D [21].

Opções utilizadas no software VIC-2D	
Critério de correlação	Normalized Squared Differences
Método de Interpolação	Optimized 8-tap
Subset weights	Gaussian
Subset Size	29 Pixel
Step Size	5 Pixel
Low-pass filter images	Sim
Incremental Correlation	Sim
Maximum pixel confidence	0,05 Pixel
Epipolar threshold	0,5 Pixel

4.3.5 Resultados experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração com os provetes miniaturizados. Inicialmente, são exibidos os resultados da liga de alumínio e posteriormente da liga de magnésio, para os dois tipos de provetes. Por fim, os resultados são comparados com a escala macro e são tiradas as respetivas conclusões.

4.3.5.1 Alumínio AA5754

Como já foi referido, para cada tipo de geometria foram realizados três ensaios, de modo a avaliar os resultados e a sua repetibilidade. Nas Figuras 4.21a e 4.21b estão representadas a variação da força em função da extensão convencional para os provetes do Tipo 1 e 2, respetivamente.

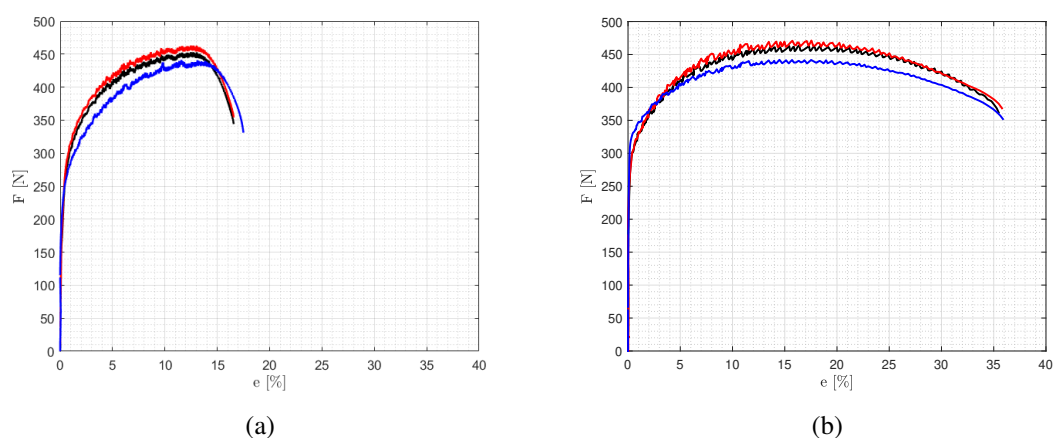


Figura 4.21: Representação gráfica da repetibilidade dos ensaios de tração utilizando: (a) provetes do Tipo 1, (b) provetes do Tipo 2, da liga AA5754.

Estas curvas permitem concluir que a repetibilidade deste material é razoável para as duas geometrias. Na verdade as pequenas diferenças existentes podem ser explicadas por um ligeiro desfasamento que pode existir entre a captação dos dois sinais. De seguida serão apresentados detalhadamente os resultados para cada tipo de provete, e como a repetibilidade é aceitável, apenas vai ser analisada uma das curvas.

Provetes Tipo 1

Como já referido, a medição da extensão longitudinal do provete foi feita com recurso a um extensómetro virtual com um comprimento igual ao comprimento de referência ou seja 12 mm. Tal como se pode observar na Figura 4.22a, durante o ensaio a distribuição da deformação é uniforme ao longo de toda a zona de interesse até ao ponto de tensão máxima. Aqui, começa-se a dar o fenómeno de estrição localizada, tal como representado na Figura 4.22b. A extensão máxima atingida foi de cerca de 17% e a rotura ocorreu no centro do provete. Na Figura 4.23 estão representadas as evoluções temporais da extensão convencional e da força durante o ensaio.

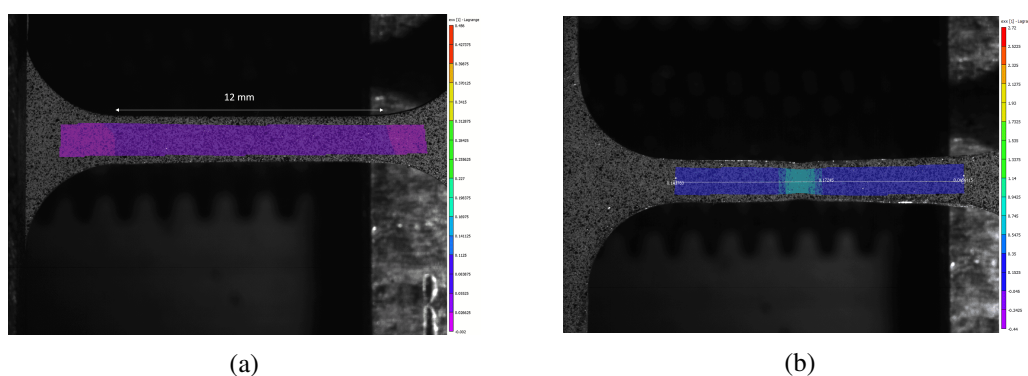


Figura 4.22: Representação (a) da distribuição da deformação e (b) da extensão obtida antes da rotura, dos provetes do Tipo 1 da liga AA5754.

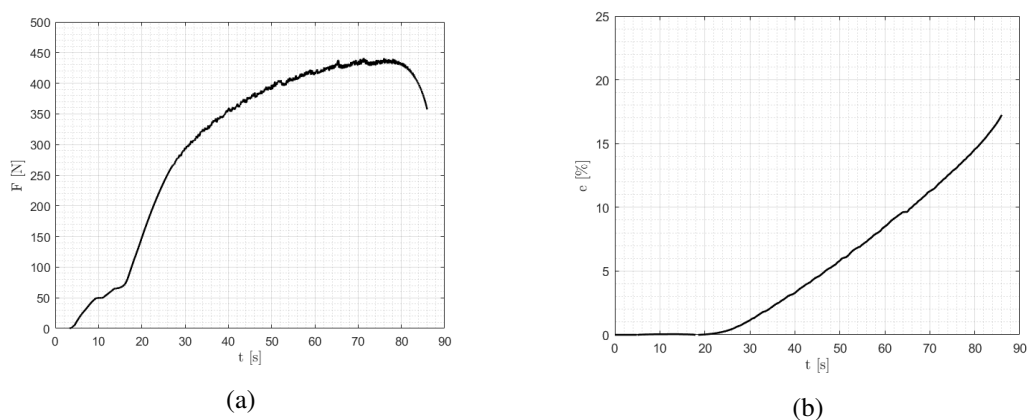


Figura 4.23: Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 1 da liga AA5754.

Analisando estas curvas, observa-se que no intervalo [5 10] s houve um ligeiro aumento irregular da força, não existindo qualquer deformação do provete. Esta irregularidade pode ser explicada pela deformação dos componentes ligados à célula de carga, sobretudo do seu suporte, que ao ser submetido à tração deforma elasticamente. Na verdade, analisando as imagens retiradas nestes instantes, observa-se que existe uma movimentação inicial da amarra fixa no sentido de aplicação da força, e só posteriormente uma movimentação do provete.

Após este intervalo a força aumenta de modo linear até perto dos 30 s e de uma forma não linear de seguida.

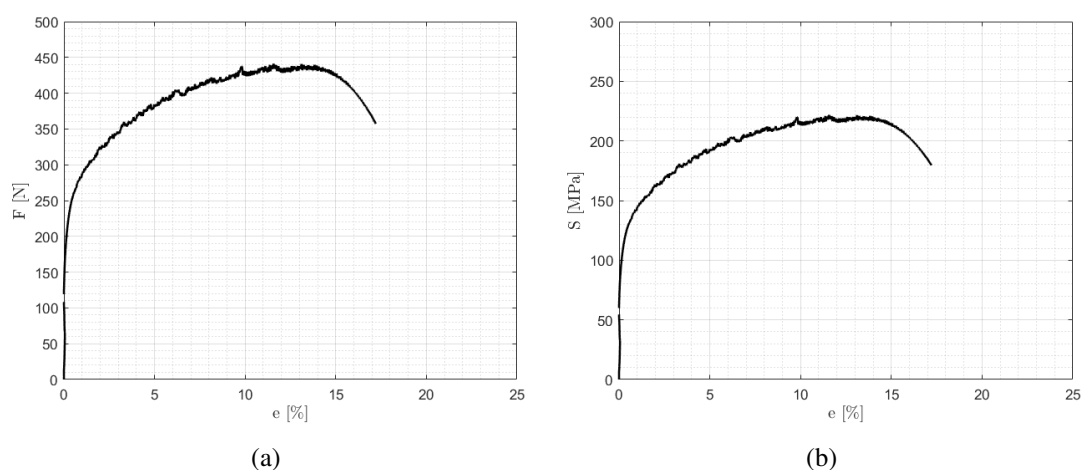


Figura 4.24: Representação gráfica (a) da curva força nominal-extensão convencional e (b) da curva tensão-extensão convencionais para os provetes do Tipo 1 da liga AA5754.

Agrupando estes dados relativamente ao tempo obtém-se o gráfico força-extensão convencional, representado na Figura 4.24a. Dividindo a força pela área transversal do provete obtém-se a curva de engenharia representada na Figura 4.24b.

Observa-se que o efeito de serrilhado está presente na curva do material, em virtude do efeito PLC, também ser visível neste tipo de geometria. Na Tabela 4.8 estão representados os valores numéricos das propriedades características retiradas do ensaio. Optou-se por não avaliar o módulo de elasticidade, uma vez que o seu valor não era comparável com a escala macro, devido à deformação elástica do protótipo.

Tabela 4.8: Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas com os provetes miniaturizados do Tipo 1.

$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
120,4	221,3	13,5	17,3

Provetes Tipo 2

O extensômetro virtual utilizado nesta geometria tem um comprimento de 2 mm. Tal como está representado na Figura 4.25, a distribuição da deformação é uniforme ao longo da zona de interesse novamente até ao ponto de deformação localizada. Neste, a fratura ocorre no centro do comprimento de referência e a extensão total máxima alcançada é cerca de 35%.

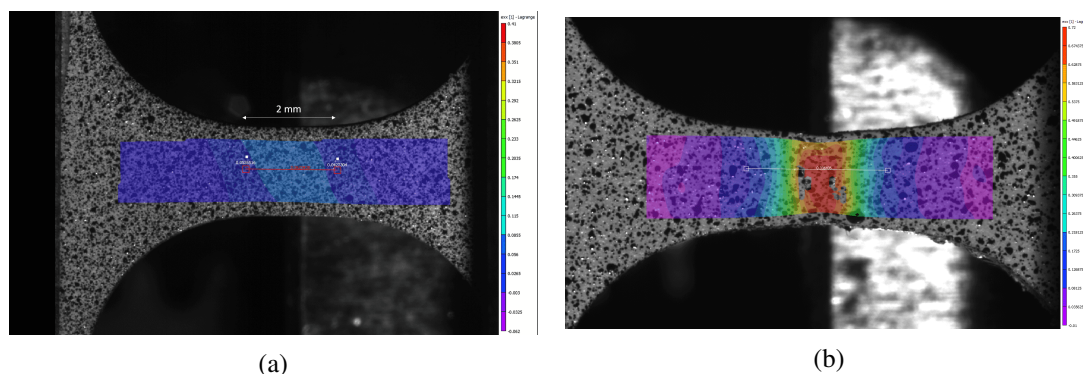


Figura 4.25: Representação (a) da distribuição da deformação e (b) da extensão máxima obtida antes da rotura, dos provetes do Tipo 2 da liga de AA5754.

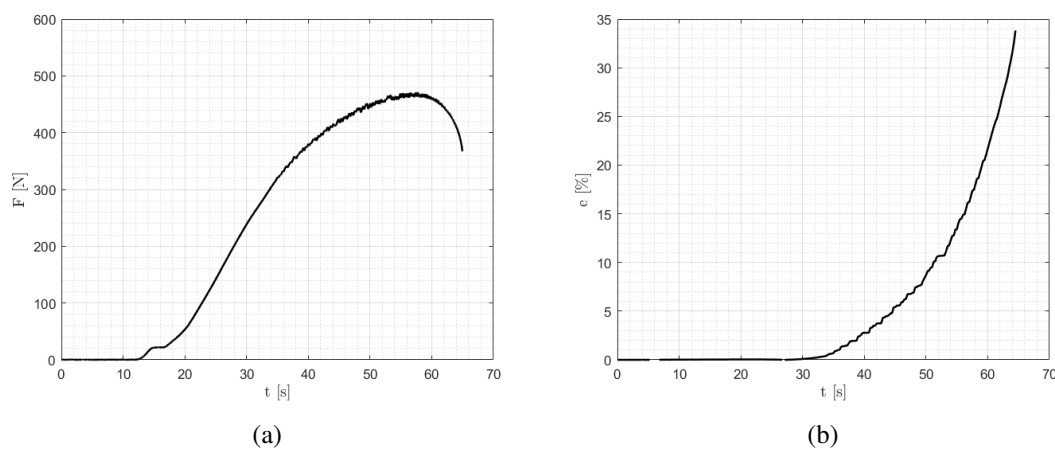


Figura 4.26: Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 2 da liga AA5754.

Analisando as variações temporais da força e da extensão, Figura 4.26, constata-se novamente que no início do ensaio houve uma variação não linear da força, devido à deformação elástica do protótipo. A força máxima atingida, 460 N, foi ligeiramente superior à obtida com os provetes do Tipo 1 (430 N) uma diferença que não deveria existir se as áreas transversais fossem iguais nas duas geometrias. No entanto, após a medição dos provetes com auxílio do projetor de perfis representado na Figura 4.27a, chegou-se à conclusão que a largura de referência dos provetes do Tipo 2 era ligeiramente superior a 2 mm e que a área não era completamente uniforme, havendo algumas irregularidades, tanto no comprimento como na largura de referência (Figura 4.27b).

Estas diferenças podem ser justificadas por erros inerentes ao processo de maquinagem, tais como a utilização de velocidades de rotação e avanço elevadas e falhas na fixação dos provetes durante o processo.

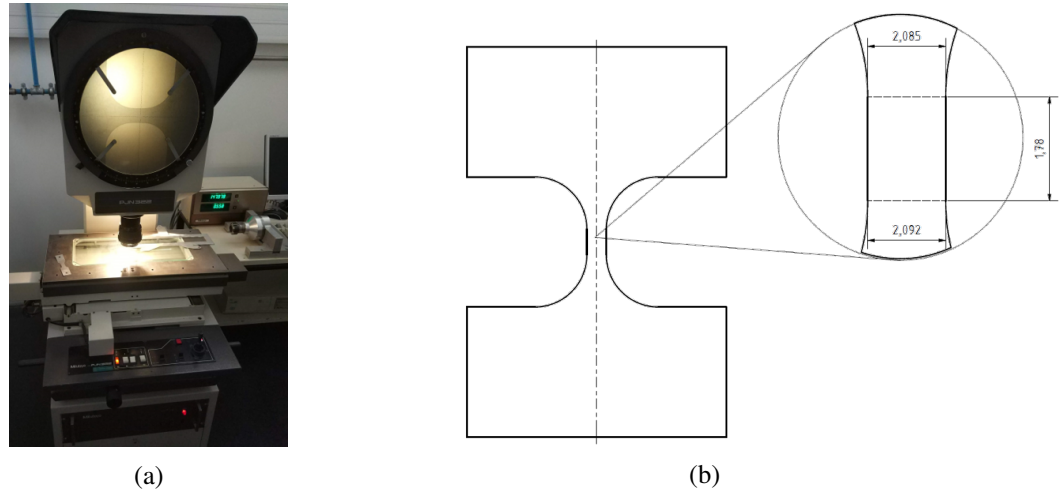


Figura 4.27: (a) Equipamento utilizado na medição dos provetes e (b) representação da irregularidade dos provetes do Tipo 2.

Na Figura 4.28 está representada a curva tensão-extensão convencional obtida. Note-se que esta já apresenta valores de tensão semelhantes à primeira geometria, uma vez que houve uma correção da área no seu cálculo. As propriedades mecânicas obtidas neste ensaio estão descritas na Tabela 4.9.

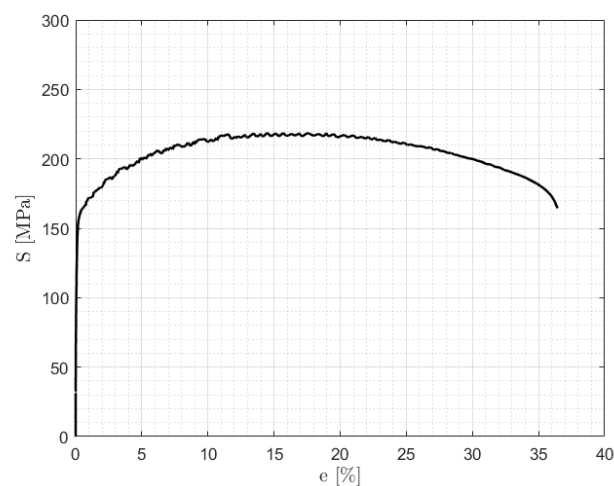


Figura 4.28: Representação gráfica da curva tensão-extensão convencionais para os provetes do Tipo 2 da liga AA5754.

Tabela 4.9: Propriedades mecânicas da liga AA5754 obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 2.

$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
161,2	219,7	17	35,4

Depois de recolhidos os resultados dos dois tipos de provetes miniaturizados tornou-se possível compará-los entre si e com o ensaio de tração à escala macro definido na secção 3.2.3. Esta comparação está apresentada simultaneamente na Figura 4.29 e na Tabela 4.10.

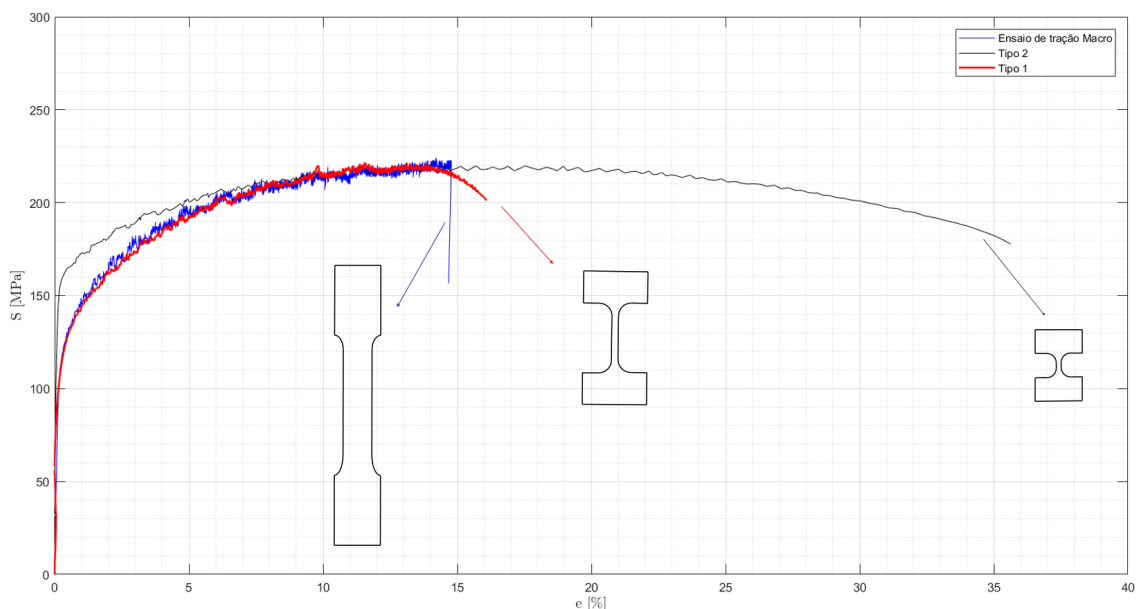


Figura 4.29: Representação gráfica das curvas de engenharia dos provetes Tipo 1, Tipo 2 e respetiva comparação com os ensaios de tração à escala macro, da liga AA5754.

Tabela 4.10: Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos provetes à escala macro, do Tipo 1 e do Tipo 2, para a liga AA5754.

	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
Ensaio de tração macro	125,3	224,2	14,7	14,7
Tipo 1	120,4	221,3	13,5	17,3
Tipo 2	161,2	219,7	17,2	35,4

Analisando os dados podem ser feitas várias considerações:

- A curva do provete do Tipo 1 assemelha-se mais à escala macro do que a curva do provete do Tipo 2.
- A tensão de rotura, R_m , e a extensão, A_{gt} , são semelhantes para os três casos.
- A curva do provete com menor comprimento de referência apresenta um ligeiro afastamento na transição entre as zonas elástica e plástica relativamente às duas outras curvas, explicado por um diferente valor de tensão de cedência. A razão para esta diferença pode estar na taxa de deformação utilizada. Na verdade, Smerd et al. [44] estudaram a influência que a taxa de deformação tem nos resultados de tração da liga AA5754 e concluíram que o valor da tensão de cedência é diretamente proporcional à taxa de deformação. Uma vez que nestes ensaios se utilizaram, para os provetes do Tipo 1 e 2, a mesma velocidade de ensaio, resultaram taxas de deformação distintas, presentes na Tabela 4.6. Como nos provetes do Tipo 2 a taxa de deformação é mais elevada do que nos restantes, esta pode ser a justificação para a diferença de valores de tensão de cedência encontrados.
- Relativamente à extensão total atingida, A_t , concluiu-se que o Tipo 1 tem um valor mais próximo do ensaio de tração macro, do que o Tipo 2. Esta diferença pode ser justificada pela estricção que ocorre após se atingir o ponto de tensão máxima, e que se traduz numa zona de deformação localizada cuja dimensão é independente do comprimento de referência do provete. Como é independente do comprimento, é expectável que a deformação localizada tenha uma influência maior no valor da extensão total medida para comprimentos de referência menores. Assim, a redução da zona de leitura permite obter valores próximos da deformação localizada. Outro fator a considerar é o estado de tensão após a estricção, onde a multiaxialidade pode ser significativa, sobretudo em comprimentos de referência menores [15].

Em suma, a técnica de miniaturização utilizando a liga de alumínio AA5754 como material de estudo, fornece uma boa aproximação às propriedades conhecidas do material, sobretudo nas tensões de cedência e de rotura. Contudo, os parâmetros de ductilidade aproximam-se mais do ensaio macro quando a miniaturização é feita de uma forma proporcional.

4.3.5.2 Magnésio AZ31B

Para a liga de magnésio os resultados apresentados na Figura 4.30, mostram uma repetibilidade aceitável. A diferença entre as curvas reside essencialmente na extensão máxima atingida em cada ensaio que pode ser explicada pela reduzida plasticidade deste material à temperatura ambiente, causada pelos reduzidos planos de deslizamento disponíveis. Contudo a extensão A_{gt} , no ponto de rotura é semelhante em todos os ensaios, sendo esta observação mais perceptível nos provetes do Tipo 1. De modo a comparar os resultados dos diferentes tipos de geometria vai ser utilizada como curva de referência uma média dos três ensaios.

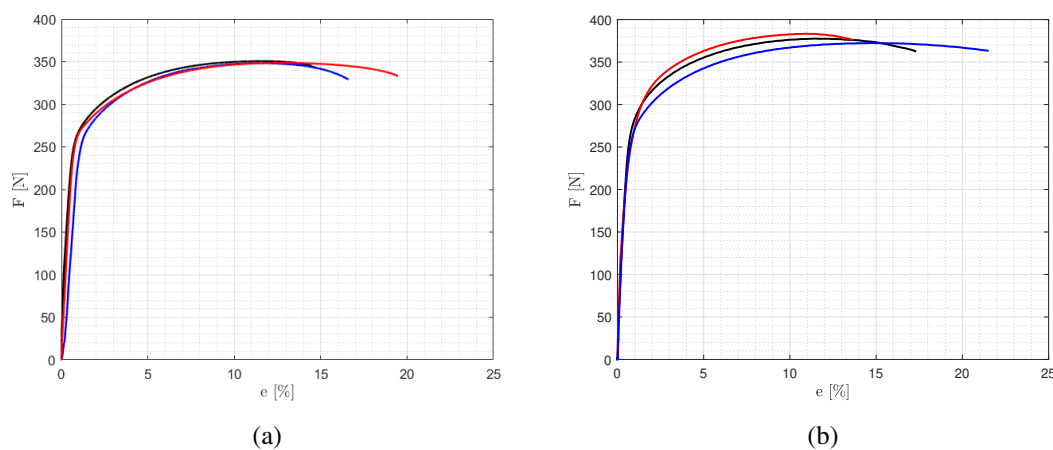


Figura 4.30: Representação gráfica da repetibilidade dos ensaios de tração utilizando: (a) provetes do Tipo 1, (b) provetes do Tipo 2, da liga AZ31B.

Provetes Tipo 1

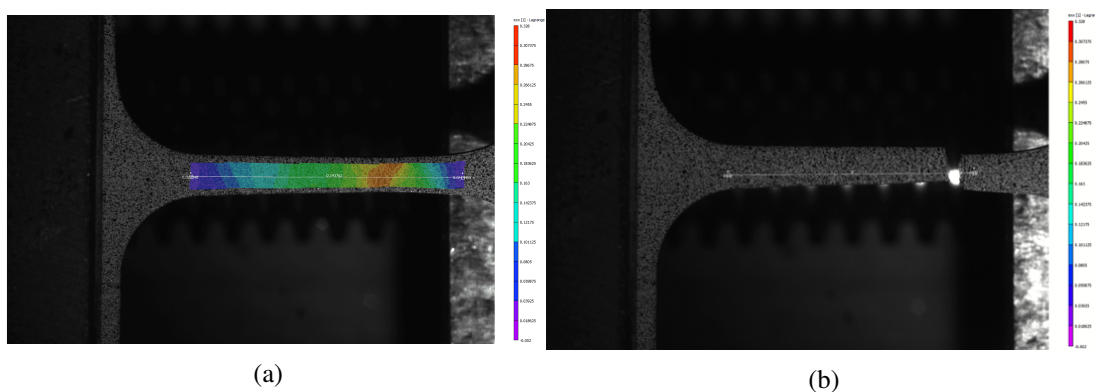


Figura 4.31: Representação (a) da extensão obtida antes da rotura e (b) da rotura dos provetes do Tipo 1 da liga de AZ31B.

Relativamente ao Tipo 1 utilizou-se, tal como no alumínio, um comprimento de análise de 12 mm e a deformação apresentou-se uniforme ao longo deste. Tal como se pode observar na

Figura 4.31 a fratura do provete ocorreu numa zona afastada do centro do comprimento de referência. Normalmente o fenómeno de fratura de um provete ocorre na zona mais fraca que, se não existir qualquer tipo de imperfeição ou defeito, se localiza no seu centro. Neste sentido, como os provetes foram maquinados, e como já se referiu a sua área de referência não é completamente uniforme a zona mais fraca pode não se encontrar no centro. Para provetes com maiores comprimentos a probabilidade da existência de defeitos de maquinagem é maior sendo maior também a probabilidade de ocorrência deste fenómeno.

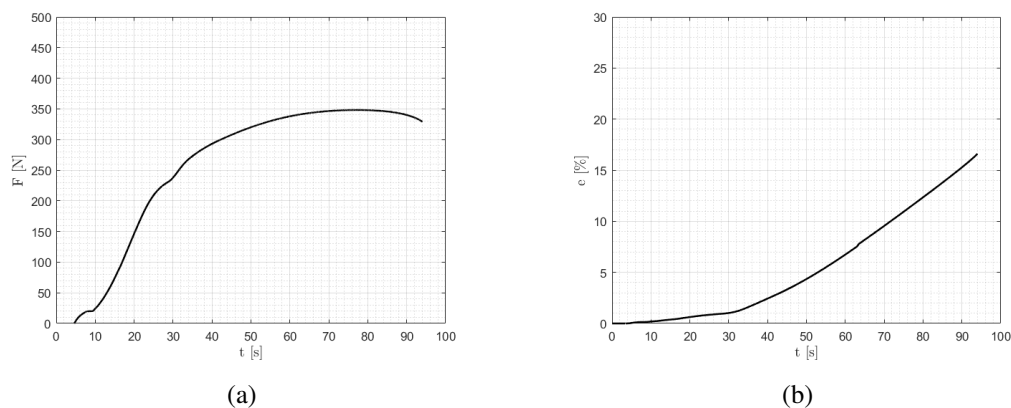


Figura 4.32: Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do Tipo 1 da liga AZ31B.

Analisando os gráficos da evolução temporal da força e da extensão, Figura 4.32, pode-se observar que a força apresenta o mesmo andamento que os casos anteriores: uma parte inicial irregular devida à deformação do protótipo, posteriormente uma parte linear e por fim uma parte não linear. Neste caso específico nota-se uma ligeira irregularidade da força aproximadamente ao segundo 30 que pode ser justificada por um ligeiro escorregamento do provete.

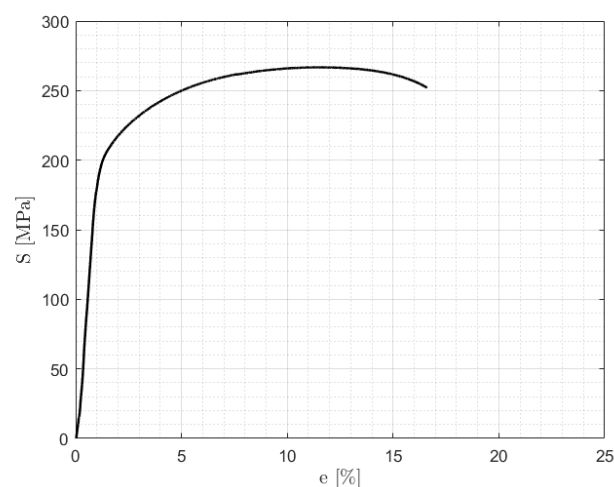


Figura 4.33: Representação gráfica da curva tensão-extensão convencional para os provetes do Tipo 1 da liga AZ31B.

Agrupando as duas variáveis e dividindo a força pela área transversal obtém-se a curva representada na Figura 4.33. As propriedades características retiradas deste ensaio estão apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 1.

$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
210,4	268,1	11,4	16,6

Provetes Tipo 2

Analogamente aos provetes de alumínio do mesmo tipo utilizou-se um comprimento de análise igual a 2 mm. Neste tipo de provete, tal como se pode observar na Figura 4.34, a superfície de fratura também ocorreu no centro do provete o que reforça o argumento anteriormente utilizado relativo aos defeitos de maquinagem.

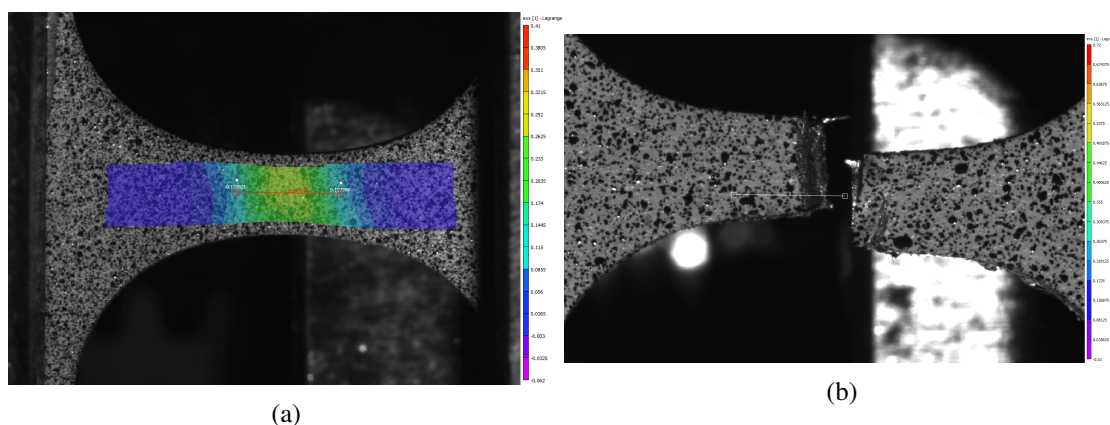


Figura 4.34: Representação (a) da extensão obtida antes da rotura e (b) da rotura dos provetes do Tipo 2 da liga de AZ31B.

Na Figura 4.35 estão representadas as variações temporais da força e deslocamento ao longo do ensaio. O seu comportamento é semelhante ao observado anteriormente. Tal como ocorreu para os provetes de alumínio a força máxima atingida é ligeiramente superior nos provetes do Tipo 2 quando comparado com o Tipo 1 uma vez que a largura de referência para estes é maior, tal como acontece nos provetes de alumínio. A curva tensão-extensão convencional está representada na Figura 4.36 e os valores dos seus parâmetros característicos estão sumariados na Tabela 4.12.

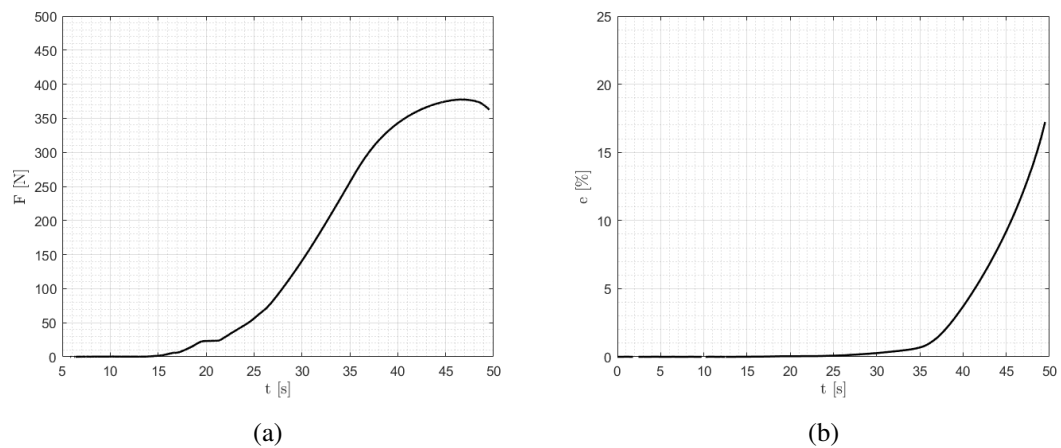


Figura 4.35: Representação da variação temporal (a) da força e (b) da extensão convencional durante o ensaio para os provetes do tipo 2 da liga AZ31B.

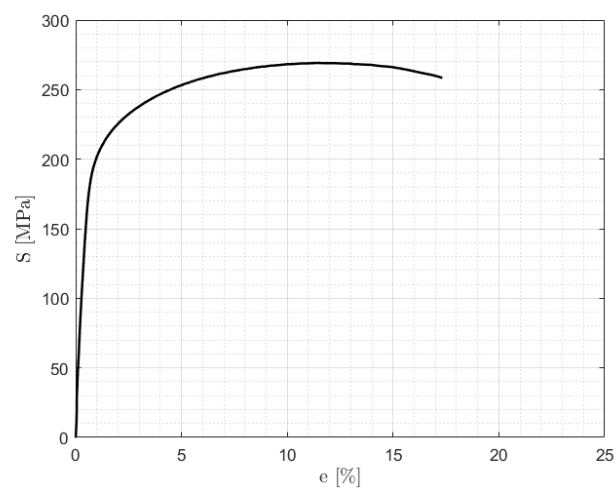


Figura 4.36: Representação gráfica da curva tensão-extensão convencional para os provetes do Tipo 2 da liga AZ31B.

Tabela 4.12: Propriedades mecânicas da liga AZ31B obtidas pelos provetes miniaturizados do Tipo 2.

$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
209,8	270,0	12,1	17,2

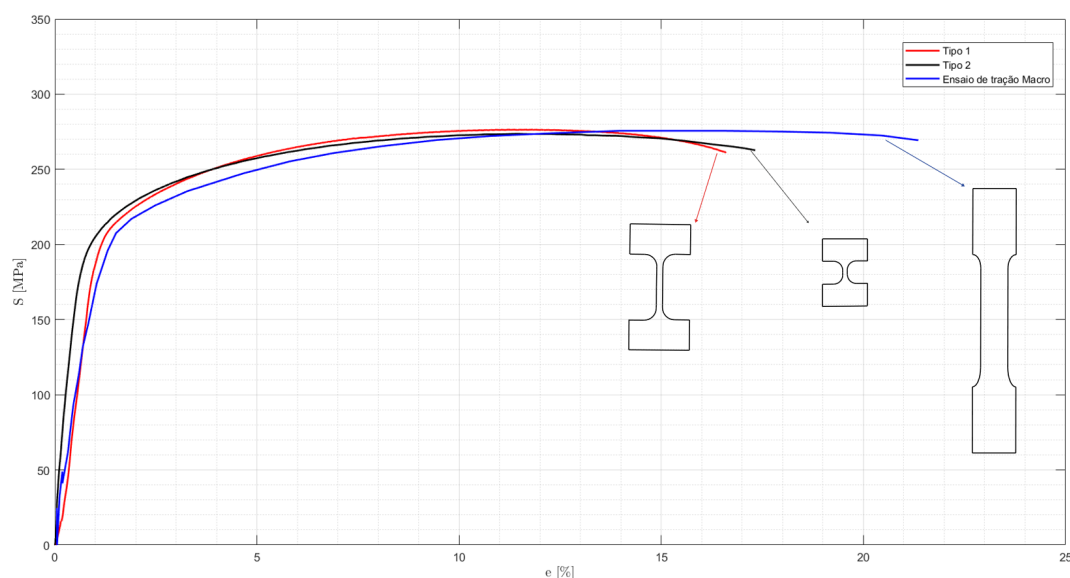


Figura 4.37: Representação gráfica das curvas de engenharia dos provetes Tipo 1, Tipo 2 e respectiva comparação com os ensaios de tração à escala macro, da liga AZ31B.

Tabela 4.13: Comparação das propriedades mecânicas obtidas pelos provetes à escala macro, do Tipo 1 e do Tipo 2, para a liga AZ31B.

	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{gt} [%]	A_t [%]
Ensaio de tração macro	219,2	267,1	16,5	21,4
Tipo 1	210,4	268,1	11,4	16,6
Tipo 2	209,8	270,0	12,1	17,2

Comparando agora os resultados dos ensaios miniaturizados da liga AZ31B entre si e com o ensaio à escala macro, Figura 4.37 e Tabela 4.13, várias observações podem ser feitas:

- Os dois tipos de geometria apresentam um comportamento muito idêntico entre si, e os seus parâmetros característicos de resistência e ductilidade são muito semelhantes. Embora os parâmetros de ductilidade A_t sejam próximos, não devem ser alvo de comparação uma vez que tal como já se referiu, a repetibilidade em cada tipo de geometria é fraca;
- As curvas dos provetes miniaturizados coincidem satisfatoriamente com a curva de referência macro;
- A tensão de cedência, $R_{p0.2}$ para os provetes miniaturizados é ligeiramente inferior à tensão de cedência à escala macro, enquanto que a tensão R_m é praticamente igual;

- Relativamente aos parâmetros de ductilidade, novamente só deve ser feita a comparação da extensão relativa ao ponto de rotura, A_{gt} , que apresenta valores ligeiramente mais baixos nos provetes miniaturizados, contudo aceitáveis.

4.3.6 Conclusões

A realização dos ensaios miniaturizados nas ligas de alumínio e de magnésio permitiu avaliar o comportamento dos dois materiais de uma forma adequada uma vez que os resultados obtidos através deles são perfeitamente comparáveis com os ensaios à escala macro.

As tensões de cedência e de rotura podem ser determinadas de uma forma precisa enquanto que as propriedades de ductilidade necessitam de ser analisadas com cuidado. Dentro destes a extensão máxima, A_t , é o parâmetro mais sensível à miniaturização. Estas observações conferem com os resultados apresentados na literatura, tal como se apresentou na secção 2.1.

Relativamente ao módulo de elasticidade de cada material, não se tira qualquer conclusão uma vez que o protótipo utilizado não tem robustez suficiente para o avaliar corretamente, isto porque a deformação elástica do protótipo influencia os resultados obtidos. Neste sentido, aquando do projeto do novo protótipo este aspeto deve ser tido em consideração.

Outro ponto a ter em atenção, como melhoria a implementar no novo protótipo é a necessidade de um alinhamento mais preciso entre os componentes, especialmente entre amarras. Na realização dos ensaios neste protótipo, houve uma grande dificuldade em manter o provete alinhado durante todo o teste.

Com estes ensaios preliminares percebeu-se a complexidade que os ensaios em provetes miniaturizados podem ter. Na verdade, durante todo o processo, existiram dificuldades que tiveram de ser ultrapassadas, desde o fabrico dos provetes até à medição das propriedades do material. Assim, embora os resultados obtidos sejam satisfatórios é necessário aperfeiçoar algumas variáveis em todo o processo de modo a obter resultados ainda mais precisos.

Capítulo 5

Desenvolvimento do protótipo - *Mini Sample Tester Device*

Tendo como base o protótipo apresentado anteriormente, neste capítulo é apresentado um novo equipamento, denominado *Mini Sample Tester Device* (MSTD), especialmente desenvolvido para a realização de ensaios uniaxiais em provetes miniaturizados. Este, além de ter uma capacidade de carga superior ao anterior, permite realizar ensaios de compressão.

Inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica, onde se analisam diversas soluções existentes, avaliando as suas principais vantagens e desvantagens. Posteriormente são definidos os principais requisitos que o novo protótipo tem de verificar e são apresentadas algumas versões preliminares do mesmo. Em seguida, é descrito o protótipo final, especificando-se as suas principais características. Por fim é efetuada uma análise a alguns resultados experimentais realizados no protótipo e retiradas as respetivas conclusões.

5.1 Revisão bibliográfica

Antes de projetar o MSTD, foi realizada uma pesquisa bibliográfica relativamente aos equipamentos utilizados, por outros autores e instituições de investigação, para a realização de ensaios em escalas reduzidas. O caso mais simples e comum é a adaptação de uma máquina de tração. Através do fabrico de interfaces específicas para a fixação das amostras e uso de técnicas adequadas de medição consegue-se reproduzir, com mais ou menos sucesso, este tipo de ensaios. Contudo, como normalmente estas máquinas são de elevado porte e têm uma capacidade muito acima do necessário para este tipo de ensaios, a existência de um equipamento especializado, mais compacto e adequado à escala que se pretende estudar, é uma mais valia para o sucesso dos mesmos. Todos os equipamentos de seguida apresentados são compostos por três grandes grupos, cada um com a sua função bem definida. O primeiro é o grupo motor, que produz movimento linear, direta ou indiretamente; o segundo é o grupo condutor, responsável pelo guiamento dos diversos componentes; por último temos o grupo de instrumentação, constituído por um elemento de medição de força e outro de deslocamento.

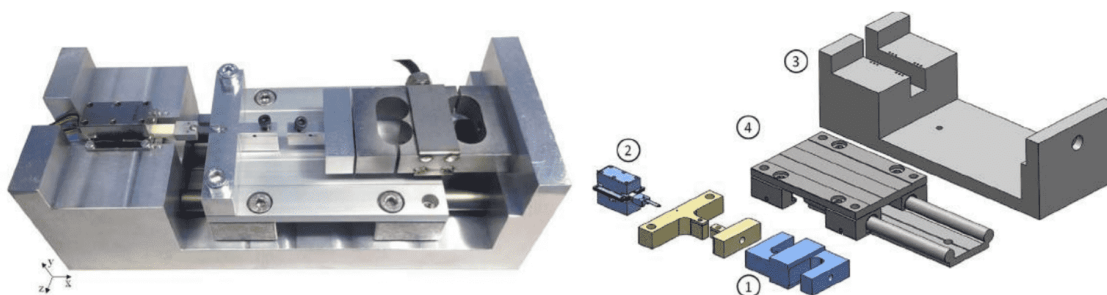


Figura 5.1: Equipamento, desenvolvido por Gorji e Mohr [45], constituído por: (1) célula de carga; (2) motor linear; (3) base de alumínio; (4) mesa linear de deslizamento.

Gorji e Mohr [45] desenvolveram um equipamento, representado na Figura 5.1, especializado na realização de ensaios de tração em provetes micro. Estes autores utilizaram no seu estudo, amostras com uma largura e espessura de referências de 0,5 mm e 0,2 mm, respetivamente. O grupo motor é neste caso, um motor linear com "pernas" piezoelétricas, com uma capacidade de carga axial máxima de 40 N. Este componente tem um funcionamento muito interessante e permite movimentos com uma precisão nanométrica. Embora o movimento linear seja muito rigoroso, a sua capacidade de carga é bastante baixa, o que impossibilita a sua utilização no MSTD. O grupo condutor é constituído por uma mesa linear de deslizamento. A força é medida por uma célula de carga do "tipo S" e a deformação da amostra por correlação digital de imagem.

Na Figura 5.2 está representado um outro protótipo, desenvolvido por Rego [46], para ensaios de fadiga em micro provetes. Tal como no exemplo anterior, o grupo motor é um componente piezoelétrico, mas neste caso trata-se de um atuador linear. O guiamento utilizado consiste num rolamento de ar ligado diretamente a uma das amarras, onde é possível atingir uma movimentação com um nível de atrito próximo de zero, o que é extremamente útil e necessário, para escalas tão reduzidas. O grupo de instrumentação é igual ao exemplo anterior.

Lim e Kim [47] desenvolveram também um protótipo, representado na Figura 5.3, para a realização de ensaios uniaxiais, neste caso para amostras de uma mesoescala. Estas têm uma largura e espessura de referência de 8 mm e 1 mm, respetivamente. Como é expectável a capacidade

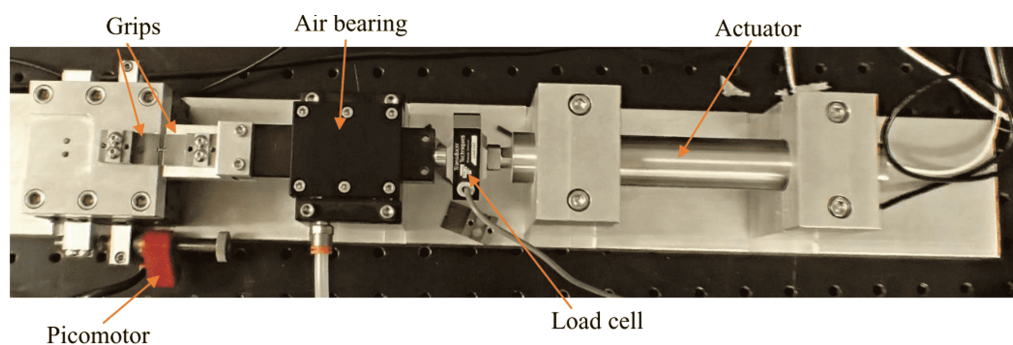


Figura 5.2: Equipamento desenvolvido por Rego [46] para ensaios mecânicos cíclicos em micro provetes.

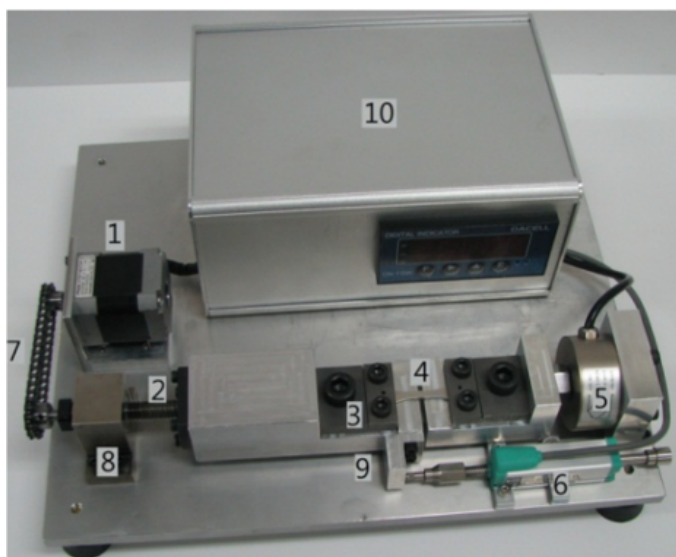


Figura 5.3: Equipamento utilizado por Lim e Kim [47] constituído por: (1) motor passo a passo; (2) fuso de esferas; (3) amarras; (4) provete miniaturizado; (5) célula de carga; (6) transdutor de deslocamento; (7) correia de transmissão; (8) rolamento de esferas; (9) guia de movimento linear; e (10) controlador.

deste equipamento é superior aos anteriores sendo igual a 2 kN. Utilizou-se neste caso, um grupo motor, constituído por um motor passo a passo ligado a um fuso de esferas. Este é responsável por converter o movimento de rotação em movimento linear. Ao contrário dos anteriores, neste equipamento não se utilizou a correlação digital de imagem para avaliação da extensão do provete mas sim um transdutor de deslocamento.

Um equipamento semelhante ao anterior é o apresentado na Figura 5.4, desenvolvido na universidade de Dallas [48], para testar amostras também numa mesoescala. Neste caso utilizam-se dois fusos de avanço duplo ligados a um motor através de um engrenamento por parafuso sem-fim. Com este mecanismo consegue-se atingir uma capacidade axial máxima de 2,5 kN. Note-se que não existe propriamente um componente de guiamento neste protótipo, mas a utilização de dois veios funciona como tal. Outro aspeto interessante a considerar é a diversidade de ensaios que é possível realizar com uma simples substituição das amarras. De todos os exemplos enumerados, este último equipamento e o anterior são os que têm mais relevância para o que se pretende com o MSTD, uma vez que ambos foram pensados para testar amostras numa mesoescala.

5.2 Requisitos do MSTD (*Mini Sample Tester Device*)

A pesquisa bibliográfica e os ensaios realizados no protótipo inicial foram extremamente importantes para perceber diversos pontos críticos nos ensaios miniaturizados assim como dar relevo para várias questões e melhorias a implementar no MSTD. A primeira delas é a necessidade de um guiamento preciso entre os diversos componentes, de modo a impedir o desalinhamento do provete do provete durante o ensaio. Este guiamento é essencial para que o ensaio prossiga sem

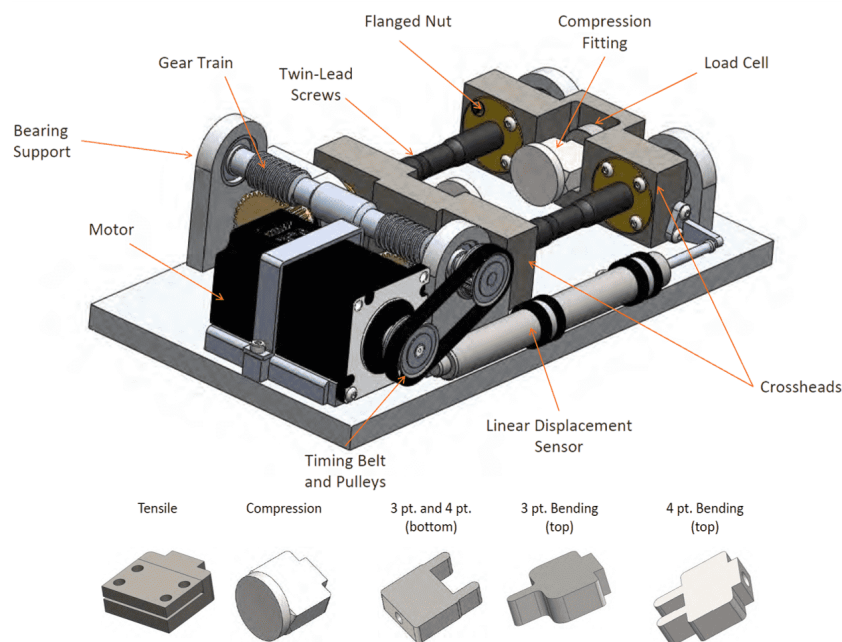


Figura 5.4: Equipamento desenvolvido pela universidade de *Dallas* [48]; Destaca-se a versatilidade de testes mecânicos possíveis com alteração das amarras.

problemas à tração mas sobretudo para evitar ou reduzir as questões de *buckling* durante o ensaio de compressão. Além disso, o atrito induzido pelo guiamento tem de ser analisado de uma forma cuidada uma vez que, para velocidades reduzidas, o fenómeno *stick-slip* pode ser crítico. Caraterizado por um movimento irregular caraterístico da transição entre o regime estático e cinemático, este fenómeno pode influenciar não só a continuidade do movimento como também da força medida.

Como já foi referido, o novo protótipo tem de ser capaz de realizar não só ensaios de tração como também de compressão. A junção destes dois movimentos, em especial a inversão de sentido, é também importante uma vez que permite estudar fenómenos como o efeito de *Bauschinger* ou o *stress differential*, neste caso caraterísticos por exemplo das liga de magnésio. Nesse sentido o equipamento tem de ter a capacidade de inverter o sentido de um modo contínuo e sem *backlash*, de forma a não induzir folgas e erros na medição.

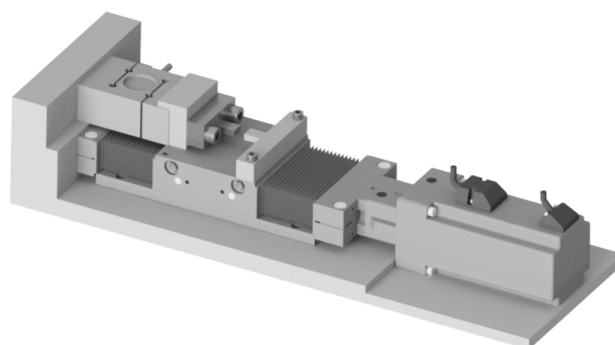
Relativamente à carga máxima necessária, estabeleceu-se que o MSTD tem de ter a capacidade de suportar axialmente uma força total de 2,5 kN. Assim, será possível estudar uma maior variedade de materiais e geometrias. Relativamente à velocidade de ensaio média prevista, definiu-se que esta tem um valor de aproximadamente 10 rpm, tendo como base os ensaios anteriores.

Relativamente à portabilidade do equipamento, este tem de ser facilmente transportável e como tal o seu atravancamento e peso devem ser minimizados. Tal como se referiu a máquina é especialmente desenhada para ensaios de tração e compressão porém a realização de outros ensaios, tais como dobragem de três e quatro pontos, não deve ser descartada. Por fim, o MSTD deve estar preparado para a inserção de componentes externos sejam eles câmaras de medição, ou fontes de

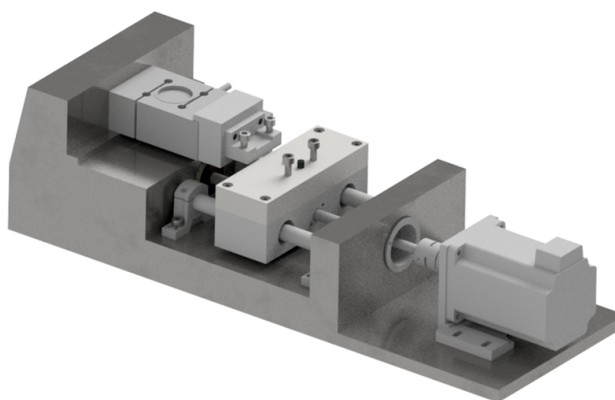
calor.

5.3 Versões

Como em qualquer processo de desenvolvimento de produto o conceito final é precedido de geração de ideias e estudo de diferentes soluções. Assim, só após várias iterações no projeto é que se atinge o produto final. Na Figura 5.5 estão representadas duas soluções, inspiradas tanto no protótipo inicial como nos equipamentos atrás mencionados. Da análise crítica às suas características e aos respectivos pontos fortes e fracos compreendeu-se que nenhuma destas soluções respeitava o alinhamento de forças que evitasse momentos de flexão nos componentes de guiamento do sistema. As duas soluções consideram falta de colinearidade entre o eixo de rotação do motor (lado de fixação de uma das amarras) e o eixo da célula de carga (lado de fixação da amarra oposta). Com esta ‘excentricidade’ não se garante um alinhamento preciso durante o ensaio, promove-se o aparecimento de momentos fletores indesejáveis e por isso se considerou uma nova solução.



(a)



(b)

Figura 5.5: Diferentes versões do MSTD projetadas antes do protótipo final.

5.4 Mini Sample Tester Device - protótipo final

O conceito final do MSTD está representado na Figura 5.8. É composto essencialmente por 4 blocos maquinados, ligados entre si por dois veios. Estes ao serem pré-tensionados nos blocos (1) e (4), conferem ao equipamento a rigidez necessária para o seu correto funcionamento. O bloco (2), designado por mesa linear, é o responsável pela movimentação da amarra móvel (5) enquanto que o bloco (3) pela conexão entre a célula de carga (14) e a amarra fixa (6). Tal como nos protótipos atrás mencionados o MSTD é composto por três grandes grupos de componentes. Neste caso, o grupo motor é composto por um motor passo a passo (8) e por um fuso de esferas (9) ligados entre si por um acoplamento rígido (10). Já o grupo condutor é composto por quatro rolamentos lineares (12) que deslizam nos veios (13). Por fim o grupo de instrumentação é formado por uma célula de carga do "tipo S"(14) e por um sistema de correlação digital, que não está representado na figura. Note-se desde já que com esta solução existe um guiamento mais completo entre os distintos componentes, facilitando assim o seu alinhamento.

A nível de atravancamento o MSTD possui as dimensões apresentadas na Figura 5.6, que validam o requisito de portabilidade exigido anteriormente. O curso máximo disponível nesta solução é de 42,7 mm sendo por isso, esta solução, capaz de testar provetes de diferentes comprimentos. Na Figura 5.7 estão representadas as duas posições extremas de trabalho.

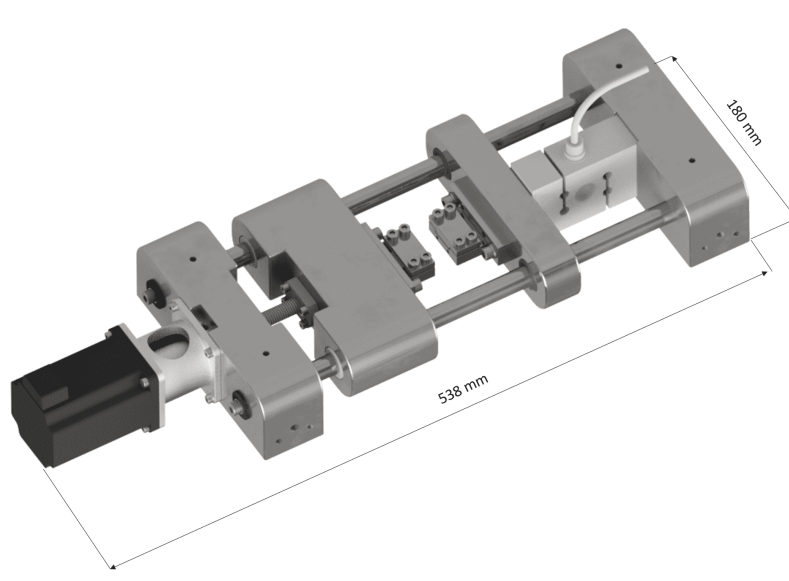


Figura 5.6: Medidas gerais de atravancamento do MSTD.

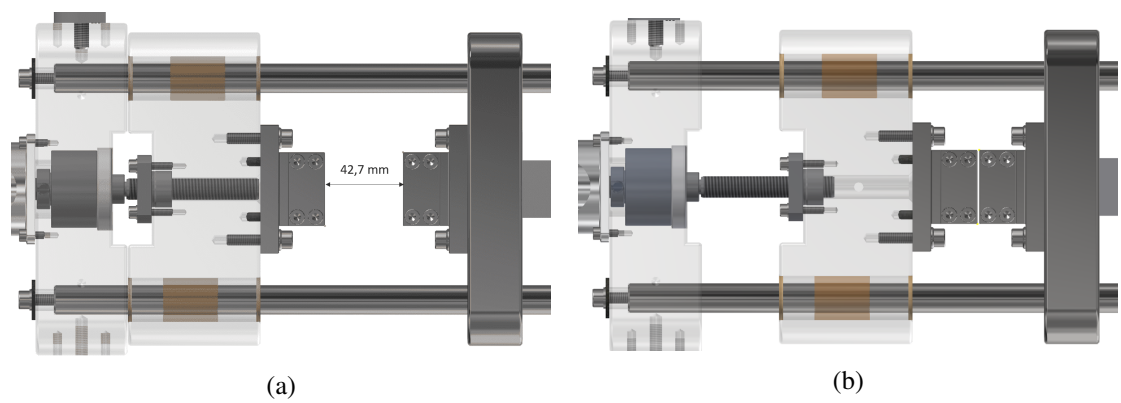
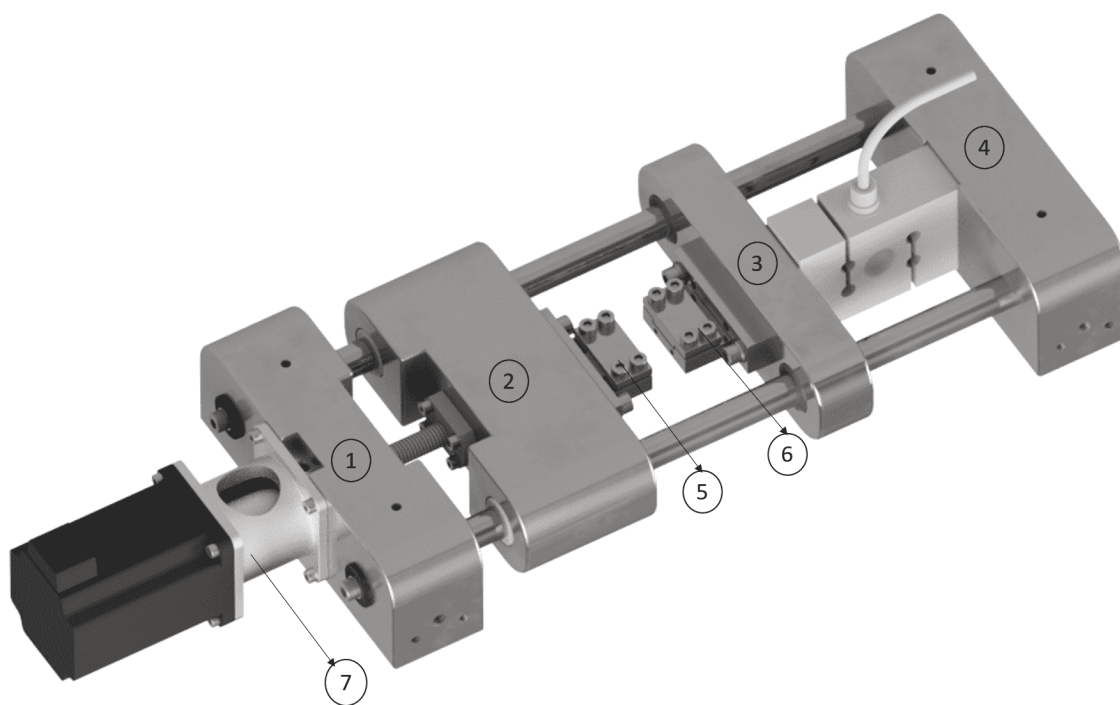
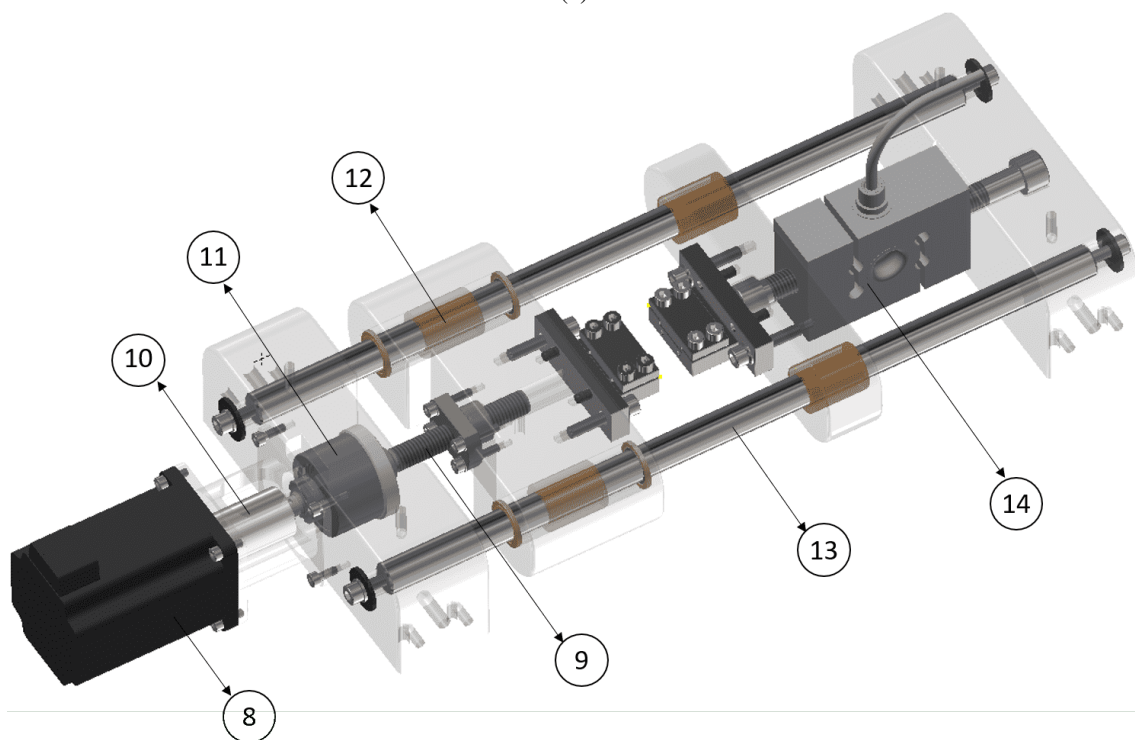


Figura 5.7: Representação das posições extremas de trabalho do MSTD.



(a)



(b)

Figura 5.8: Representação do conceito final do MSTD e a sua constituição geral: (1) suporte esquerda; (2) mesa linear; (3) suporte da amarra fixa; (4) suporte direita; (5) amarra móvel; (6) amarra fixa; (7) flange do motor; (8) motor passo a passo; (9) fuso de esferas; (10) acoplamento rígido; (11) rolamento de esferas; (12) rolamento linear; (13) veios de guiamento; (14) célula de carga.

5.4.1 Considerações sobre o novo protótipo

Como já foi referido, durante um ensaio uniaxial principalmente, em escalas miniaturizadas, é importante que não haja qualquer movimento do protótipo relativamente à câmara de medição da extensão. Neste sentido, no projeto do MSTD houve a preocupação em pensar em várias alternativas de fixação do equipamento, de modo a torna-lo o mais versátil possível. Para isso, foram realizados vários furos roscados, nos suportes da direita e da esquerda tal como está ilustrado na Figura 5.9. Com a utilização de componentes de ligação, tal como está representado na Figura 5.9a, o protótipo é facilmente fixado numa base rígida, como por exemplo uma mesa ótica. De modo a facilitar a portabilidade e mobilidade do MSTD a furação existente pode também ser utilizada para inserção de um puxador tal como representado na Figura 5.9b.

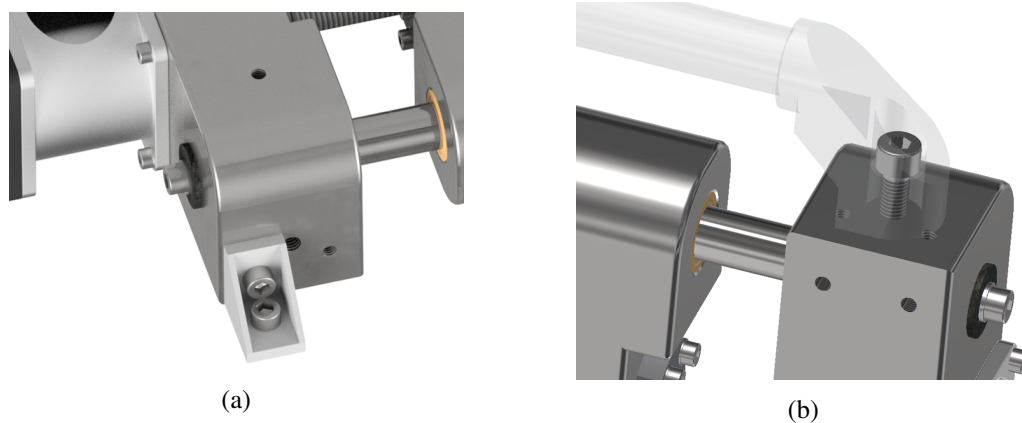


Figura 5.9: Representação da furação complementar realizada no MSTD.

De todos os componentes maquinados o suporte da esquerda (1), ou seja, o bloco onde está alojado o apoio fixo do fuso, é o componente crítico em termos de esforços aplicados e como tal merece uma análise cuidada. Para tal recorreu-se ao software *Inventor* [42] para a realização de uma análise estrutural, onde se avaliou a distribuição de tensões e deformações na peça.

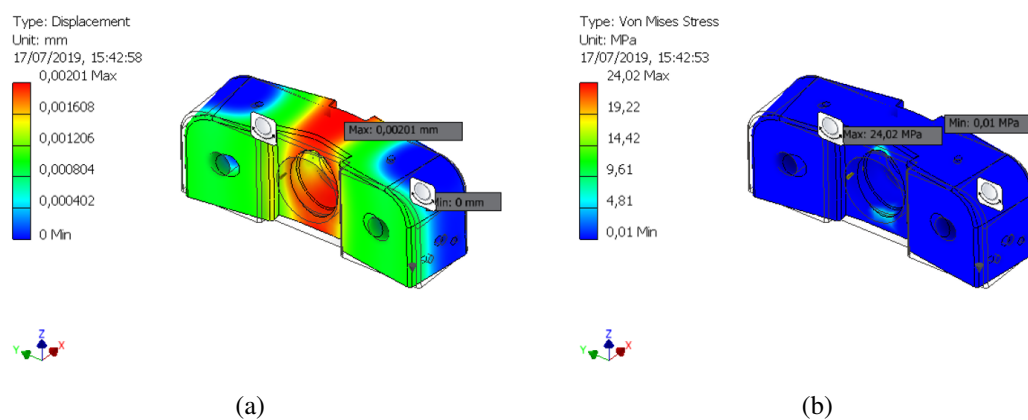


Figura 5.10: Análise estrutural do suporte da esquerda (1): a tensão máxima instalada é de 24,02 MPa e o alongamento de 0,002 mm.

Os resultados obtidos estão representados na Figura 5.10. Observa-se que mesmo aplicando uma carga duas vezes superior à carga máxima, o alongamento máximo é perfeitamente adequado ($2\ \mu\text{m}$) e a tensão máxima instalada está bastante abaixo da tensão de cedência do material (210 MPa).

Além da posição de trabalho natural, representada na Figura 5.11a é possível ainda utilizar o protótipo na posição representada na Figura 5.11b. Esta é especialmente vantajosa quando se pretende realizar, por exemplo, ensaios com a presença de temperatura. Neste caso, é possível fazer circular um fluxo de calor entre as duas amarras e estudar a sua influência no comportamento do material. O MSTD está também preparado para a utilização de outro tipo de amarras tal como se definiu nos requisitos.

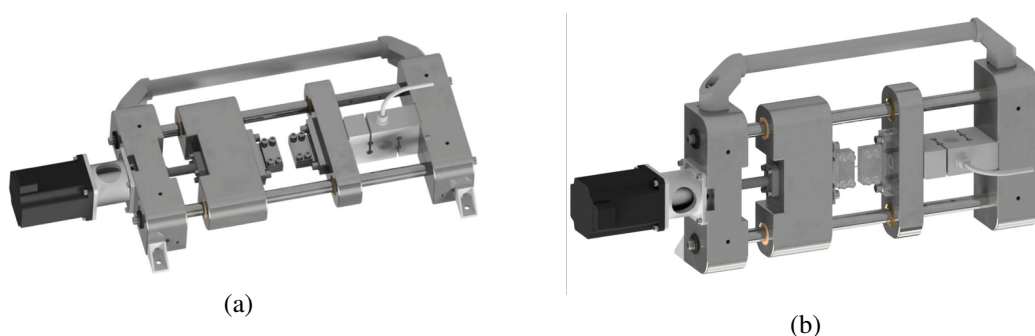


Figura 5.11: Representação da versatilidade de posições de utilização do MSTD.

Na Figura 5.12 está representado o resultado final do MSTD após a aquisição, maquinagem e montagem de todos os componentes.

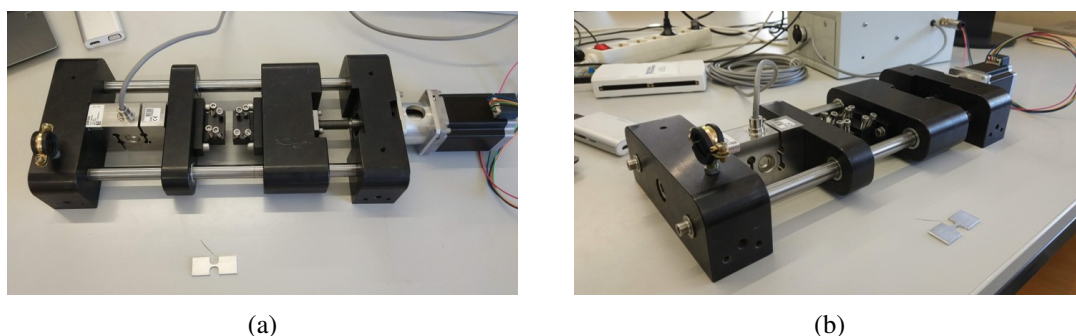


Figura 5.12: Resultado final do MSTD após maquinagem e montagem dos componentes.

5.5 Ensaios experimentais

Com o MSTD concluído e operacional, foram realizados alguns ensaios experimentais. Como este novo protótipo já está preparado para ensaios de compressão, optou-se por realizar ensaios cíclicos de tração-compressão. Na secção seguinte é feita uma pequena contextualização deste tipo de ensaios, apresentando-se algumas curvas típicas de diversos materiais para este tipo de solicitação.

5.5.1 Contextualização

Os ensaios experimentais cíclicos com inversão de sentido, como por exemplo, ensaios de tração seguido de compressão ou vice versa, são testes fundamentais para a identificação do comportamento mecânico de materiais metálicos. Alguns materiais quando solicitados ciclicamente, apresentam um comportamento dissemelhante em comparação com o seu comportamento só à tração ou só à compressão.

Um dos fenômenos mais relevantes em materiais metálicos é o efeito de *Bauschinger*. Este é normalmente associado a solicitações onde a tensão de cedência sofre uma diminuição, quando se aplicam solicitações sucessivas em sentido reverso. Na Figura 5.13, está representado um exemplo deste fenômeno numa curva tensão-extensão real, de um material metálico dúctil. Para a generalidade dos materiais dúcteis, a curva é muito semelhante, em tração e compressão. Segundo a figura, a tensão de cedência do material quando solicitado à tração é σ_A , e à compressão, a tensão de cedência respetiva é aproximadamente igual em módulo, representada por σ_B sobre a curva a tracejado.

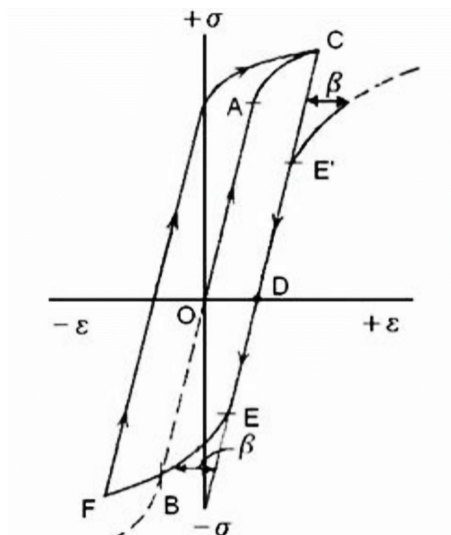


Figura 5.13: Representação do efeito de Bauschinger numa curva tensão-extensão de um material dúctil [49].

Considere-se agora o ensaio de tração, segundo o percurso O-A-C. Quando atingido o ponto C o provete é descarregado até ao ponto D. Neste, desprezando efeitos de histerese, o provete ficará com uma deformação plástica permanente. Voltando a carregar o provete em tração, segundo a trajetória D-C, a plasticidade iniciar-se-á no ponto C, com uma tensão de cedência σ_C , superior à inicial, σ_A ($\sigma_C > \sigma_A$). Se pelo contrário, o provete, após o percurso O-A-C-D, for carregado em compressão, observa-se que a deformação plástica iniciar-se-á no ponto E, com uma tensão, σ_E , apreciavelmente inferior à tensão de cedência à compressão σ_B ($|\sigma_E| < |\sigma_B|$). Assim, enquanto a tensão de cedência à tração aumentou (ponto C), à compressão esta tensão diminuiu (ponto E). Este fenómeno é reversível, isto é, se em primeiro lugar tivesse sido aplicada a compressão e posteriormente a tração, o efeito de *Bauschinger* verificar-se-ia do mesmo modo. Se a compressão

for continuada até ao ponto F, e em seguida carregada em tração, obter-se-á um ciclo de histerese mecânica.

Um modo de quantificar o efeito de *Bauschinger* é através dos parâmetros β ou BE (*Bauschinger effect*) e BEF (*Bauschinger effect factor*). Os parâmetros BE_{t-c} e BEF_{t-c} no sentido tração-compressão podem ser expressos matematicamente pelas Equações 5.1 e 5.2, respetivamente. Ambos dependem da tensão instalada no momento de inversão de sentido, σ_{inv} , e da tensão de cedência atingida posteriormente, σ_{ced} . Note-se que o parâmetro σ_{inv} não é mais do que a tensão de cedência obtida quando o provete é carregado à tração (σ_C , na Figura 5.13), após ter sido previamente descarregado. Quanto mais próximo da unidade for o parâmetro BEF menor será o efeito de *Bauschinger* do material.

$$BE_{t-c} = \frac{|\sigma_{inv}| - |\sigma_{ced}|}{|\sigma_{inv}|} = \frac{|\sigma_C| - |\sigma_E|}{|\sigma_C|} \quad (5.1)$$

$$BEF_{t-c} = \frac{|\sigma_{ced}|}{|\sigma_{inv}|} = \frac{|\sigma_E|}{|\sigma_C|} \quad (5.2)$$

O efeito de *Bauschinger* pode ser explicado com base em dois mecanismos distintos. O primeiro propõe que a presença de tensões residuais localizadas, como as que encontram agrupadas nos limites de grão após carregamento do material, facilitam a entrada em regime plástico quando o material é solicitado em sentido contrário ao inicial. O segundo mecanismo é baseado na teoria das deslocações. Durante a deformação plástica as deslocações nas bandas de escorregamento ativas vão deslizando até serem imobilizadas em obstáculos, formando empilhamentos de elevada densidade. Quando a solicitação do provete é retirada, para além de um pequeno recuo de algumas deslocações, tal estado pode persistir indefinidamente a baixas temperaturas, uma vez que a estrutura é bastante estável mecanicamente. Contudo, quando a direção do carregamento é invertido, algumas das deslocações nas bandas de deslizamento deslocam-se apreciavelmente, com baixas tensões de corte, pois nesta direção as barreiras não são tão fortes como eram na direção oposta.

A análise do efeito de *Bauschinger* é essencial para a modelação do comportamento de um material a cargas cíclicas, como acontece por exemplo em processos de conformação plástica, onde solicitações em sentidos contrários podem ocorrer. É o caso, por exemplo, das operações de desempenho de chapas ou barras em feiras, onde o material ao sofrer dobragens e desdobragens sucessivas nos rolos, pode sofrer uma redução da tensão de cedência com um aumento de alongamento, em consequência do trabalho a frio. Outro exemplo é o da estampagem inversa, na qual a chapa é deformada na segunda fase de modo inverso ao que foi na primeira fase, sendo necessária menor força para a operação e comportando-se o material de um modo mais dúctil. O efeito de *Bauschinger* pode ser anulado, através de tratamentos térmicos de recozimento efetuados a baixas temperaturas [1, 49].

Genericamente, os ensaios cíclicos podem ser realizados segundo duas vertentes, e o que difere em cada uma delas é a variável que se está a controlar. Na Figura 5.14a está representado um ensaio cíclico de um aço HSLA-50 onde se controla a força máxima atingida durante o ensaio, tanto à tração como à compressão. Tal como se pode observar existe, ao longo dos ciclos, uma

acumulação da extensão plástica, causada essencialmente por um diferencial não nulo de força à tração e compressão. Este fenómeno é conhecido como *ratcheting* [24]. Por outro lado, na Figura 5.14b a variável controlada durante o ensaio é a extensão atingida à tração e à compressão. Ambas as curvas são extremamente úteis para avaliar o modo como evolui o encruamento do material ao longo dos ciclos.

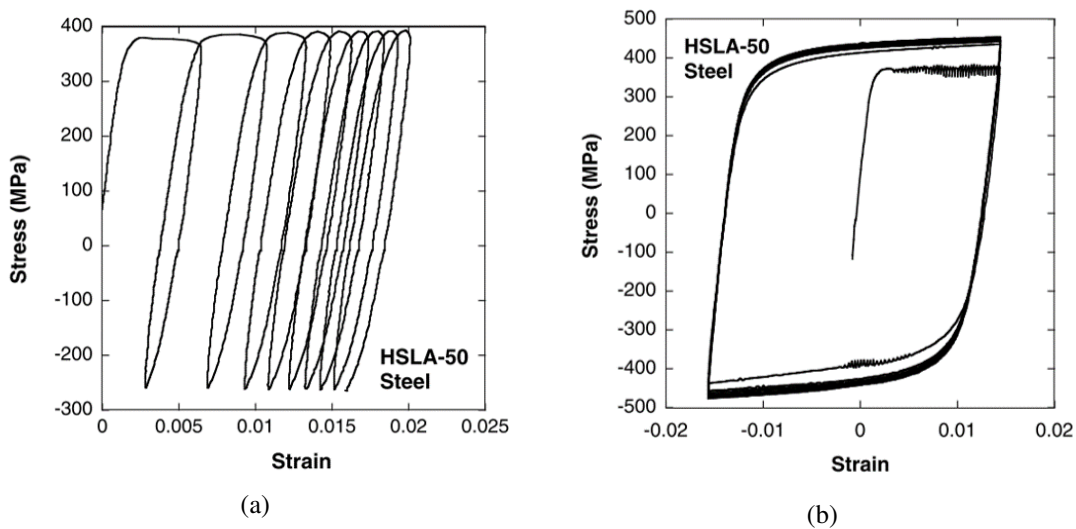


Figura 5.14: Curvas de encruamento cíclico para um aço HSLA-50 com a utilização de um controlo de (a) força e de (b) extensão [24].

A Figura 5.15 apresenta as curvas características de ensaios cíclicos para dois materiais distintos, DP1000 e DC01. Observa-se que o DP1000 apresenta um amaciamento cíclico significativo, traduzindo-se numa diminuição da resistência mecânica em cada ciclo. Por outro lado o aço DC01 apresenta encruamento, levando a que a sua resistência mecânica aumente em cada ciclo. O encruamento tende normalmente a estabilizar ao longo dos ciclos realizados e esta saturação pode ser feita de um modo progressivo, Figura 5.16a, ou mais rápido, Figura 5.16b.

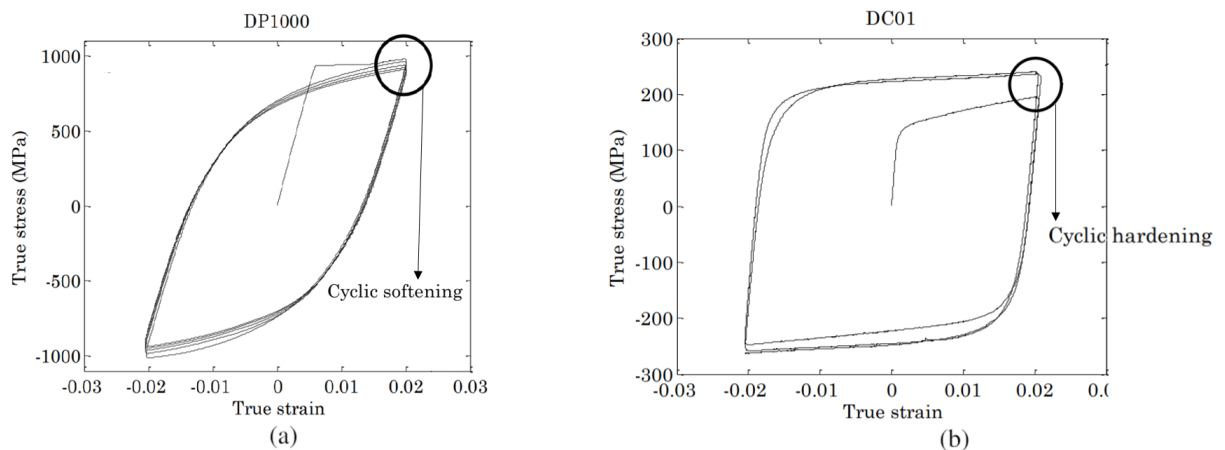


Figura 5.15: Curva experimental de um ensaio cíclico dos aços (a) DP1000 e (b) DC01 [50].

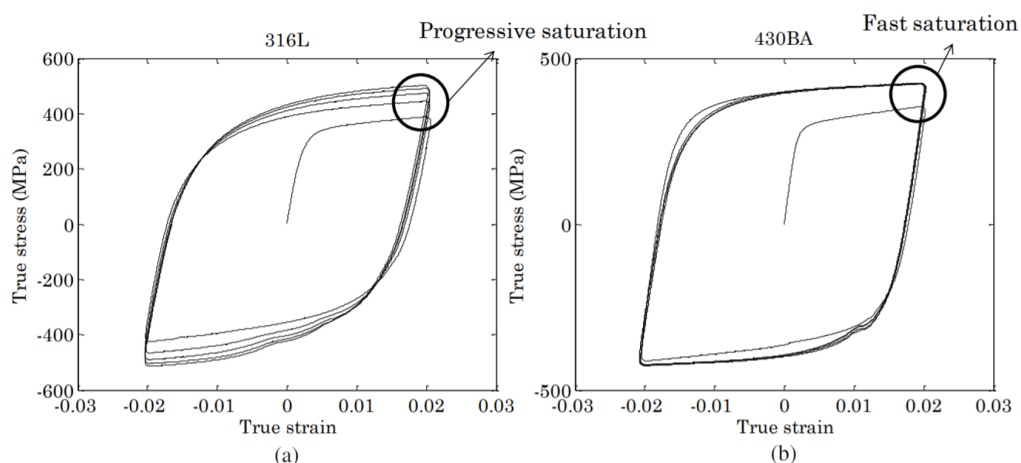


Figura 5.16: Curva experimental de um ensaio cíclico do aço inoxidável (a) 316L e (b) 430BA [50].

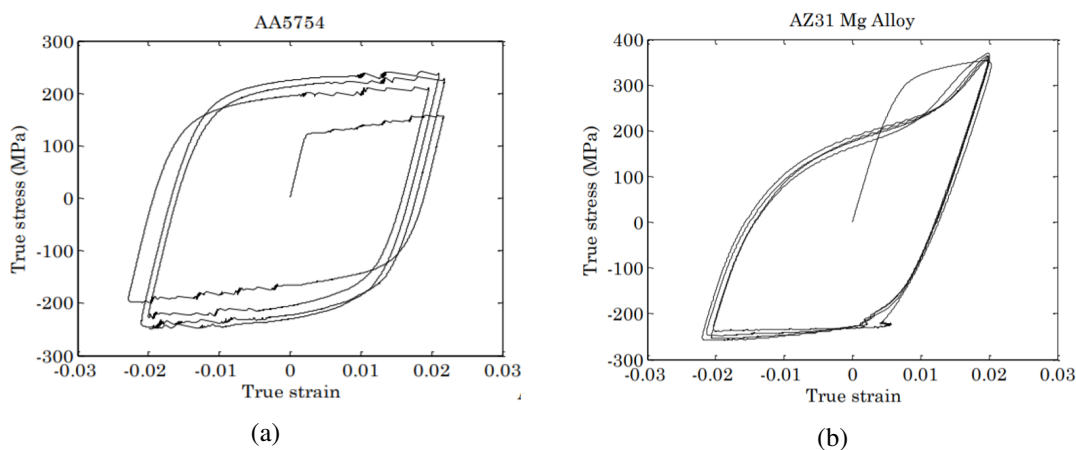


Figura 5.17: Curva experimental de um ensaio cíclico da (a) liga de alumínio AA5754 e (b) da liga de magnésio AZ31 [50].

Por fim, na Figura 5.17 está representado o comportamento dos materiais utilizados nos capítulos 3 e 4, ou seja, a liga de alumínio AA5754 e a liga de magnésio AZ31 quando submetidos a ensaios cíclicos com controlo da extensão. A liga AA5754 apresenta um encruamento cíclico pronunciado com uma saturação progressiva. Por outro lado, a liga AZ31 apresenta um comportamento assimétrico à tração e compressão. Este fenómeno está relacionado com a orientação dos grãos e com o modo de deformação plástica por maclagem [50].

5.5.2 Metodologia

Nesta secção é apresentada a metodologia adotada nos ensaios experimentais cíclicos. O material testado foi o aço HC220 em chapa com uma espessura, a_0 , de 1,1 mm, e os provetes utilizados apresentam uma geometria semelhante aos provetes do Tipo 2 apresentados no Capítulo 4. Os provetes foram maquinados segundo a direção de laminagem. Os parâmetros do ensaio e a geometria do provete utilizada estão representados na Figura 5.18.

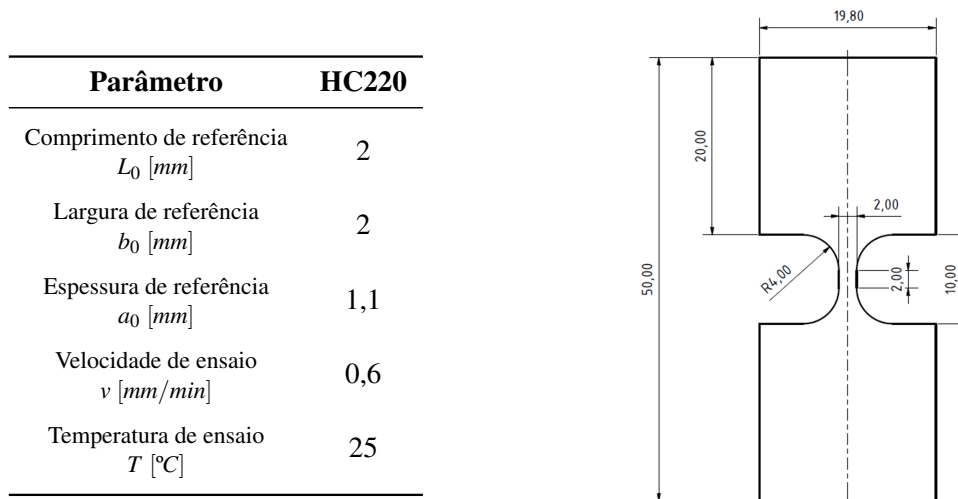


Figura 5.18: Parâmetros de ensaio e geometria do provete utilizada nos ensaios experimentais.

Antes da realização dos ensaios, realizou-se um estudo de modo a prever os valores de força para os quais, o aço HC220 à compressão, apresenta fenómenos de encurvadura. A primeira aproximação realizada foi através da Equação 5.3 que define a carga crítica de *Euler*:

$$P_{Euler} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (5.3)$$

Para tal, considerou-se que a zona do provete que não está apoiada nas amarras, é equivalente a uma viga de secção reta retangular com largura e espessura iguais aos valores de referência do provete. O comprimento da viga equivale ao comprimento da zona não apoiada do provete, ou seja 10 mm. Considerou-se também no cálculo da carga crítica de *Euler*, que a encurvadura ocorre segundo o momento de inércia menor, ou seja segundo a espessura. Nesta sequência, o valor do momento de inércia, I , é igual a:

$$I = \frac{b_0 \cdot a_0^3}{12} = 0,17 \text{ mm}^4 \quad (5.4)$$

O parâmetro relativo ao comprimento na Equação 5.3, L_e , denominado comprimento efetivo, não equivale ao comprimento não apoiado do provete. Estes dois parâmetros estão relacionados através de uma constante representativa das condições de fronteira presentes. Idealmente as amarras do MSTD são representadas como dois encastramentos, não permitindo qualquer tipo de

deslocamento e rotação ao provete. Contudo, na prática estas condições não acontecem, uma vez que existe sempre, por mínima que seja, rotação de uma ou das duas amarras. Na Tabela 5.2 estão representadas três condições de fronteira, o comprimento efetivo L_e para cada uma delas e a respetiva carga crítica de Euler, P_{Euler} . Como é expectável a condição de fronteira (c) é a mais desfavorável, uma vez que a carga possível de atingir sem que ocorra encurvadura é a menor das três.

Tabela 5.2: Representação da carga crítica de Euler para diferentes condições de fronteira.

	(a)	(b)	(c)
Condição de Fronteira			
Comprimento efetivo L_e [mm]	5	7	10
Carga crítica Euler P_{Euler} [N]	13 818	7050	3455

De forma a aproximar estes valores da realidade foram realizadas algumas simulações numéricas, utilizando o software Abaqus [40]. Para tal, foi concretizada uma análise de encurvadura linear de valores próprios ("*Eigenvalue linear buckling analysis*"). Numa análise deste tipo procura-se o valor da carga para o qual a matriz de rigidez do modelo se torna singular, ou seja quando o problema seguinte, apresenta soluções não triviais:

$$K^{MN} v^M = 0 \quad (5.5)$$

K^{MN} representa a matriz de rigidez tangente quando a carga é aplicada e v^M as soluções de deslocamento não triviais. As cargas aplicadas podem ser pressões, forças concentradas, deslocamentos prescritos diferentes de zero ou fluxos de calor [51].

Nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 está representada o valor da força crítica possível de aplicar no provete obtida pela simulação, para os três tipos de condições de fronteira. Já na Tabela 5.3 estão sintetizados esses valores e a sua comparação com a a carga crítica de Euler. Observa-se que os valores obtidos por simulação são ligeiramente superiores aos teóricos. Esta diferença é expectável uma vez que na simulação numérica considerou-se a geometria real do provete, e não a aproximação desta a uma viga de secção uniforme.

A análise por valores próprios é puramente linear e como tal não tem em consideração o comportamento elasto-plástico do material. Não tem também em conta qualquer tipo de imperfeição que possa existir na realidade, como por exemplo imperfeições geométricas ou excentricidades. Neste sentido devem ser utilizados coeficientes de segurança elevados, entre 2,5 e 5, no valor da carga crítica obtida para precaver este tipo de anomalias [52].

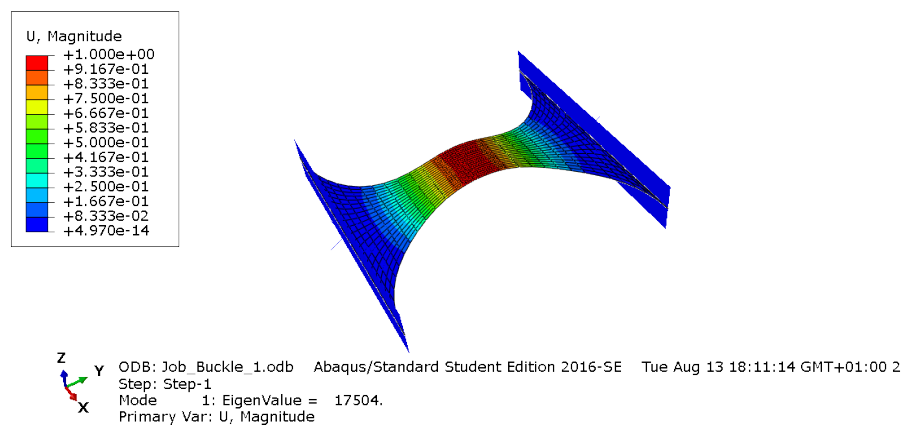


Figura 5.19: Carga crítica, $P_{sim} = 17\,504\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (a).

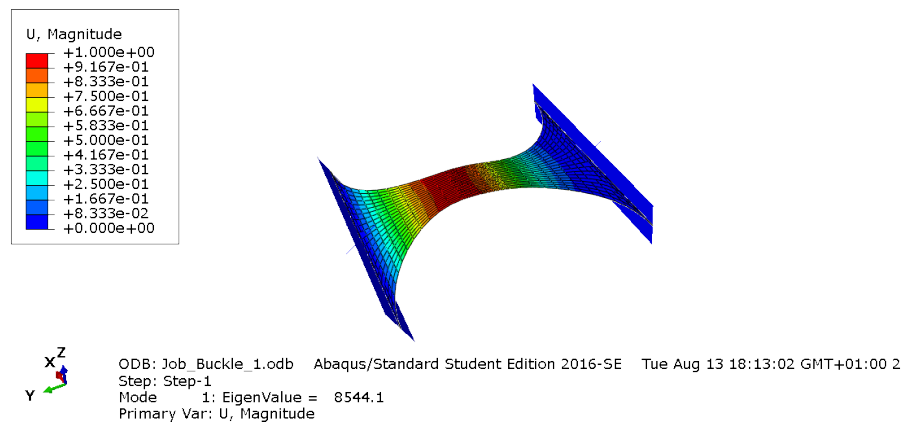


Figura 5.20: Carga crítica, $P_{sim} = 8544\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (b).

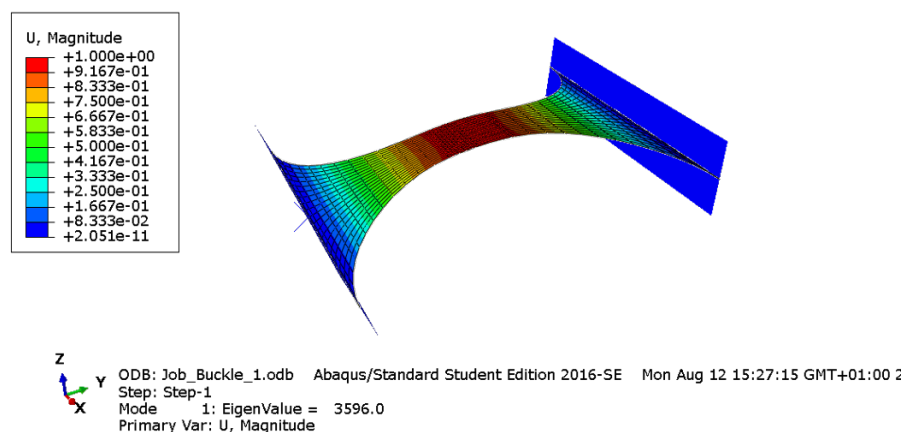
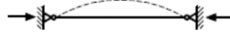


Figura 5.21: Carga crítica, $P_{sim} = 3596\,N$ obtida por simulação numérica com condições de fronteira do tipo (c).

Tabela 5.3: Representação da carga crítica obtida por simulação numérica para diferentes condições de fronteira.

	(a)	(b)	(c)
Condição de Fronteira			
Carga crítica Euler P_{Euler} [N]	13 818	7050	3455
Simulação Numérica P_{sim} [N]	17 504	8544	3596
Carga crítica $P = P_{sim} \cdot 0.4$ [N]	7002	3418	1436

Para uma melhor percepção do comportamento do provete antes, durante e após o ensaio foi instalada uma câmara adicional no protótipo tal como está representado na Figura 5.22. Assim, com esta configuração foi possível observar que para o aço HC220, o fenómeno de encurvadura no provete começa a ser notório visualmente, para um valor de força de aproximadamente $P_{cr} = 1300$ N. Note-se que este valor é semelhante ao estimado anteriormente para as condições de fronteira do tipo (c) já com a aplicação do coeficiente de segurança, o que valida o modelo numérico utilizado.

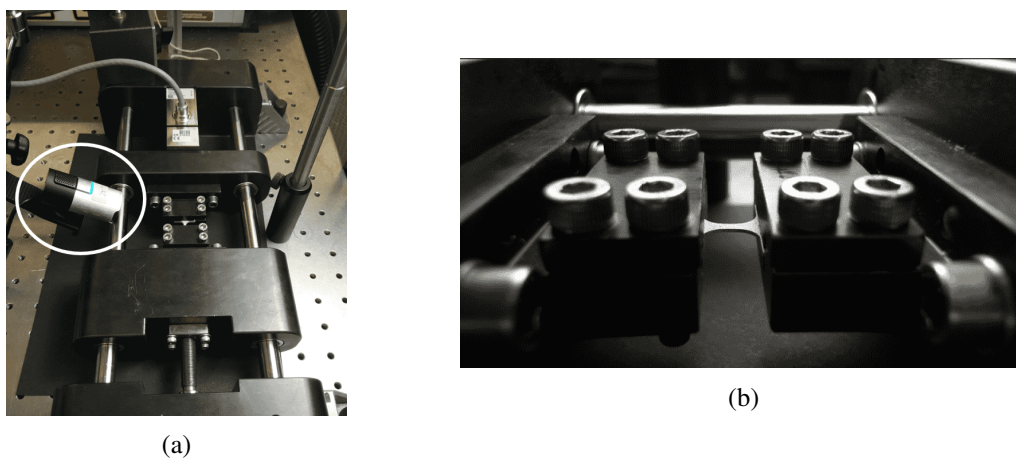


Figura 5.22: Representação da câmara específica utilizada para o controlo visual do provete.

Para este valor de P_{cr} , a flecha y é dada matematicamente pela Equação 5.6 e a sua variação em função da carga P aplicada ao provete está representada na Figura 5.23. O parâmetro e na equação, representa a excentricidade de aplicação da carga e reflete o desalinhamento entre amarras. Foi considerado, para o MSTD um valor igual a $e = 0,01$ mm.

$$y = e \left[\sec \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) - 1 \right] \quad (5.6)$$

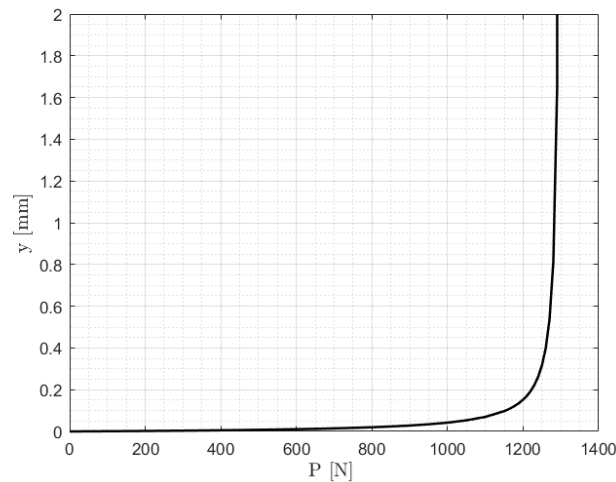


Figura 5.23: Representação do valor da flecha y em função da carga P .

Após esta análise, o valor crítico $P_{cr} = 1300 \text{ N}$ foi estabelecido como o valor limite de força permitido tanto à compressão como à tração para os ensaios cíclicos realizados ao aço HC220. Deste modo, utilizando a força máxima atingida como variável de controlo definiram-se dois ciclos de solicitação, CF-CT2 e CF-TC2T1. O ciclo de solicitação CF-CT2 é um ensaio com controlo de força (CF) que consiste em dois ciclos consecutivos de compressão-tração (CT2). Já o ciclo de solicitação CF-TC2T1 é novamente um ensaio com controlo de força (CF) mas agora com dois ciclos consecutivos de tração-compressão (TC2) seguidos de uma etapa de tração (T1). Com esta nomenclatura é facilmente identificável qualquer tipo de ciclo de solicitação quer este se faça com um controlo de força (CF) ou com controlo de extensão/deslocamento (CD). As etapas de cada ciclo de solicitação estão detalhadas na Tabela 5.4. Por fim, na Figura 5.24 está representado o *setup* experimental utilizado para a realização dos ensaios.

Tabela 5.4: Etapas das sequências de ensaio realizadas para o aço HC220.

Etapas	CF-CT2 ¹	CF-TC2T1 ²
1	Compressão até $-P_{cr}$	Tração até P_{cr}
2	Tração até P_{cr}	Compressão até $-P_{cr}$
3	Compressão até $-P_{cr}$	Tração até P_{cr}
4	Tração até rotura	Compressão até $-P_{cr}$
5	-	Tração até rotura

¹CF-CT2: Ciclo com Força controlada, Compressão seguida de Tração, 2 ciclos

²CF-TC2T1: Ciclo com Força controlada, Tração seguida de Compressão, 2 ciclos; seguida de Tração, 1 ciclo.

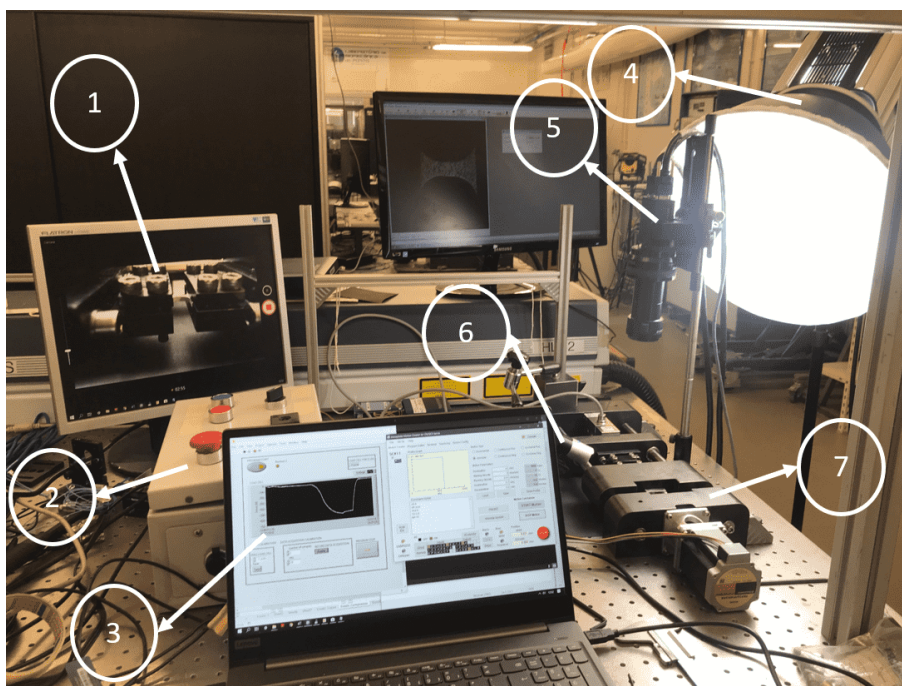


Figura 5.24: *Setup* experimental utilizado nos ensaios, constituído por: (1) monitor para análise específica do comportamento do provete; (2) controlador do MSTD; (3) computador; (4) iluminação; (5) câmara CCD; (6) câmara de análise lateral do provete; (7) MSTD.

5.5.3 Resultados experimentais

As curvas de tensão-extensão convencionais, resultantes dos ensaios cíclicos, CF-CT2 e CF-TC2T1 estão apresentadas nas Figuras 5.25 e 5.26, respetivamente. De modo a facilitar a compreensão dos resultados estão indicadas, em ambas as curvas, as distintas etapas de cada sequência. Na medição da extensão por correlação digital foi utilizado um extensómetro virtual com um comprimento igual ao comprimento de referência do provete, ou seja 2 mm. Por uma análise geral confirma-se, que em ambas as sequências de ensaio, a variável em controlo é a força máxima atingida; outra observação é que a histerese característica deste tipo de controlo é visível, existindo uma acumulação de deformação plástica em cada ciclo.

Na primeira sequência, CF-CT2, atingiram-se à compressão extensões negativas, ao contrário da segunda sequência, CF-TC2T1, onde as extensões alcançadas foram positivas, tanto à tração como à compressão. Esta diferença está relacionada com a primeira etapa de cada sequência. Assim, quando a sequência começa com compressão, a extensão do provete é naturalmente negativa, uma vez que este inicia o ensaio com extensão nula. Pelo contrário, quando se comprime o material após tração, segunda etapa de CF-TC2T1, este tem inicialmente de alcançar um valor de extensão nula e só depois é que está em condições de ser comprimido até extensões negativas. Como o controlo utilizado foi um controlo de força, a curva não chega, neste caso, a passar para o quadrante negativo de extensão, uma vez que a força máxima de 1300 N é atingida antes desse ponto.

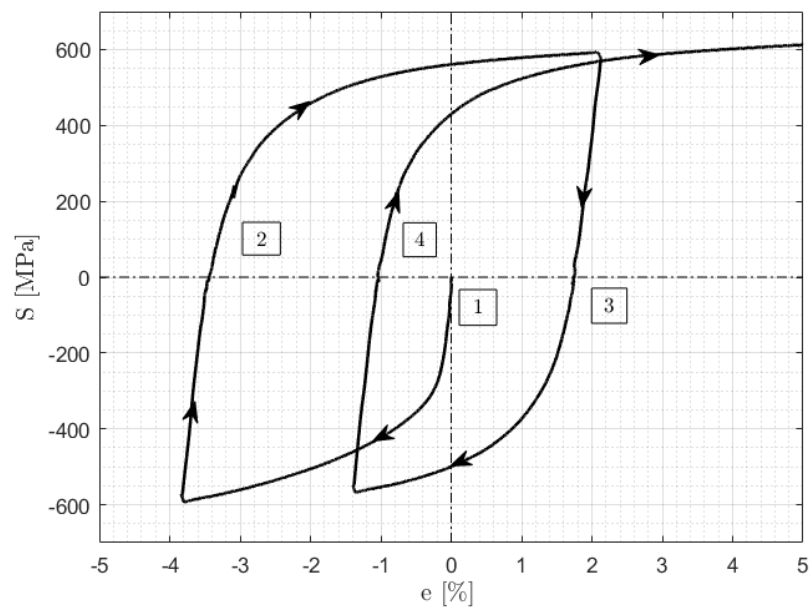


Figura 5.25: Curva resultante do ensaio cíclico CF-CT2 (ver Tabela 5.4) para o aço HC220.

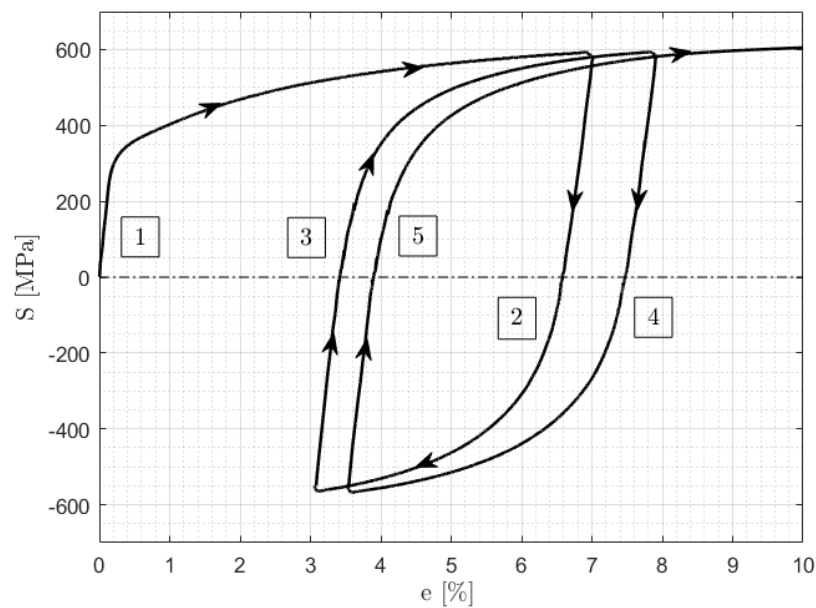


Figura 5.26: Curva resultante do ensaio cíclico CF-TC2T1 (ver Tabela 5.4) para o aço HC220.

A comparação da primeira etapa das duas seqüências está representada na Figura 5.27. De modo a facilitar a análise utilizaram-se os valores absolutos da tensão e extensão reais para que as duas curvas se localizassem no mesmo quadrante. A extensão real, ϵ , foi obtida aplicando a Equação 3.10 à extensão convencional, enquanto que a tensão real, σ , utilizando a Equação 3.9.

A área considerada foi, tanto à tração como à compressão o produto da largura e espessura de referência.

O gráfico demonstra que o material apresenta uma evolução de encruamento muito idêntica em tração e em compressão. Observa-se também que em compressão a extensão real atingida foi menor do que em tração. Relativamente à tensão de cedência, Tabela 5.5, em tração esta foi ligeiramente superior do que em compressão, cerca de 38%. Estes resultados fornecem uma indicação que o fenómeno de encurvadura não foi notório no ensaio de compressão CF-CT2, pois não houve nenhum decréscimo evidente da força e as curvas têm o mesmo andamento.

Tabela 5.5: Tensão de cedência, σ_{ced} , relativas à primeira etapa de cada sequência.

	CF-CT2	CF-TC2T1
Etapas	σ_{ced} [MPa]	σ_{ced} [MPa]
1	184,0	255,0

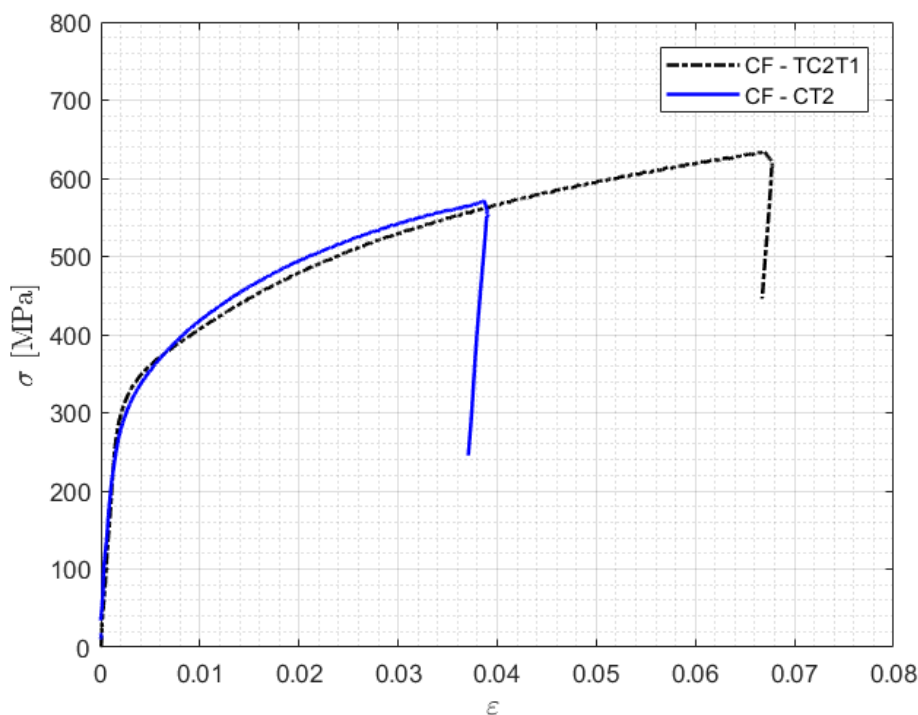


Figura 5.27: Comparação dos valores absolutos de tensão e extensão reais, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-CT2 (compressão); CF-TC2T1 (tração).

Na Figura 5.28 está representada a distribuição da extensão longitudinal, ε_L , ao longo da secção uniforme do provete para uma solicitação à compressão e à tração. O ciclo de solicitação

utilizado para esta análise foi o CF-CT2, sendo que as etapas de compressão e tração foram respetivamente as etapas 1 e 2. A Figura 5.28a, relativa à compressão foi retirada exatamente no ponto onde se atingiu a força máxima de $P_{cr} = -1300$ N. Observa-se que à tração, Figura 5.28b, a extensão tem um comportamento aproximadamente uniforme ao longo de toda a área de interesse. Pelo contrário, à compressão esta uniformidade não acontece, levando a que haja um diferencial de extensões notório entre a zona situada mais à esquerda e a da direita, tal como é visível na Figura 5.28a.

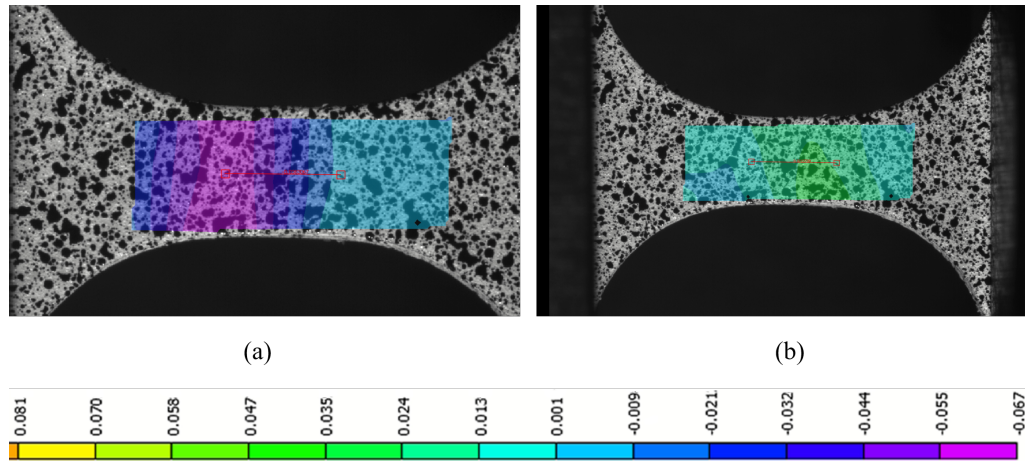


Figura 5.28: Distribuição da extensão ao longo da área de interesse do provete quando solicitado (a) à compressão e (b) à tração para o ciclo de solitação CF-CT2.

Para quantificar este diferencial foi feita uma análise mais detalhada da extensão ao longo do comprimento do provete. Assim, foram definidos, no software de correlação digital de imagem, três extensómetros virtuais, tal como está representado na Figura 5.29. O extensómetro E_L -L avalia a extensão longitudinal da zona da esquerda; o extensómetro E_L -R a extensão longitudinal da zona da direita; por fim o extensómetro E_L -Tot a extensão total do comprimento de referência. A variação temporal da extensão real longitudinal, ε_L , para cada extensómetro está representada na Figura 5.30.

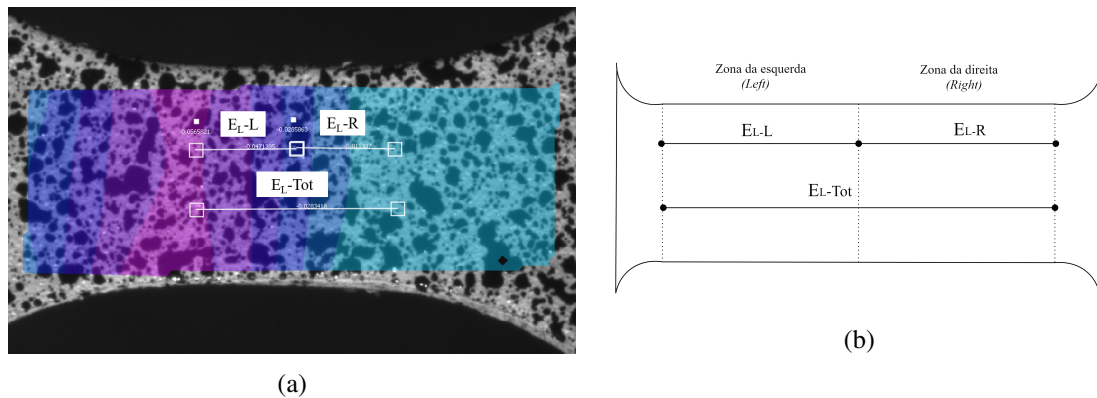


Figura 5.29: Localização dos extensómetros virtuais E_L -L, E_L -R e E_L -Tot para avaliação da extensão ao longo do comprimento de referência do provete.

Pela análise dos resultados, confirma-se as observações feitas anteriormente. Tal como se pode observar, a extensão real obtida no final da solicitação à tração (nas etapas 2 e 4) é semelhante para os três extensómetros. Pelo contrário, na compressão (etapas 1 e 3), esta apresenta valores notoriamente distintos entre os extensómetros, sendo esta diferença visível tanto na etapa 1 como na etapa 3. De realçar que o patamar existente entre etapas deve-se à inversão de sentido do movimento. Genericamente observa-se que o valor de extensão real medida pelo extensómetro E_L -Tot é um valor intermédio da extensão obtida pelos extensómetros E_L -L e E_L -R. Na etapa 1, os três apresentam extensões negativas o que indica que diminuíram de comprimento. Já para a etapa 3, embora a extensão tenha diminuído para os três só o E_L -L e E_L -Tot é que obtiveram extensões reais negativas.

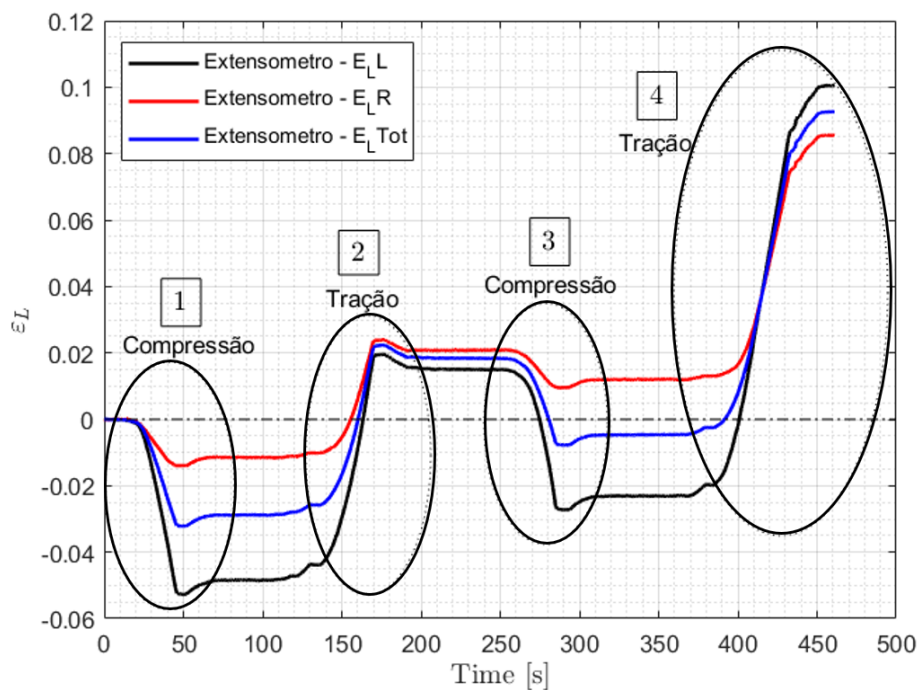


Figura 5.30: Variação temporal da extensão real longitudinal para os três extensómetros em análise.

Uma explicação possível para os diferentes valores de extensão para cada extensómetro durante a compressão, pode ser feita com base na Figura 5.31. Nesta, está representado o comportamento do provete, obtido pela câmara de análise lateral, no instante antes e depois de se atingir a força máxima à compressão. Assim a Figura 5.31b representa o mesmo instante da Figura 5.28a. Nota-se que neste momento, o fenómeno de encurvadura tende a aparecer, existindo um pequeno desalinhamento do provete devido à rotação da amarra da direita. Neste sentido, embora o fenómeno de encurvadura só comece a ser notório para uma força próxima de 1300 N o comportamento à compressão não é totalmente uniforme ao longo do comprimento durante o ensaio. A zona da esquerda tende a ser mais comprimida do que a zona da direita levando a que o valor da extensão total obtida no extensómetro E_L -Tot seja influenciado pela extensão de cada uma das zonas.

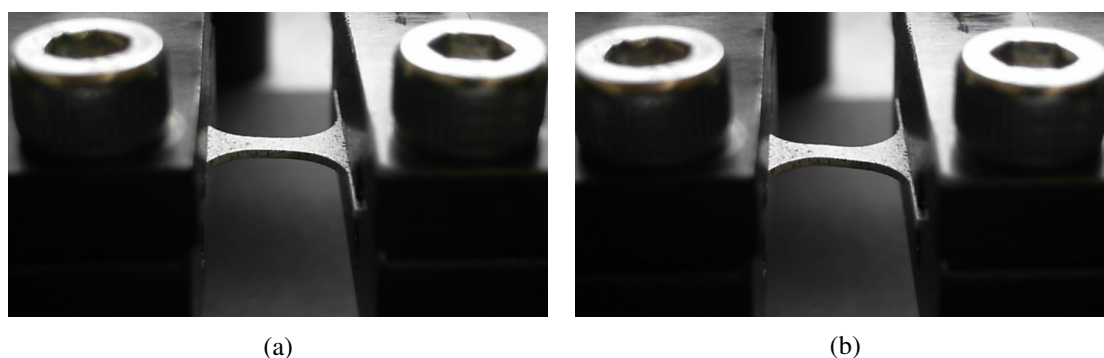


Figura 5.31: Representação do provete à compressão (a) antes e (b) e depois de se atingir a força máxima.

Na Figura 5.27 estão representadas as curvas força-extensão real, em valor absoluto, para cada um dos extensómetros para a etapa 1 (compressão). Está ainda representada a curva relativa à primeira etapa (tração) do ciclo de solicitação CF-TC2T1. Observa-se que tal como esperado, para um mesmo valor de força a extensão real atingida é menor na zona da direita do que nas restantes, sobretudo para forças superiores a 700 N.

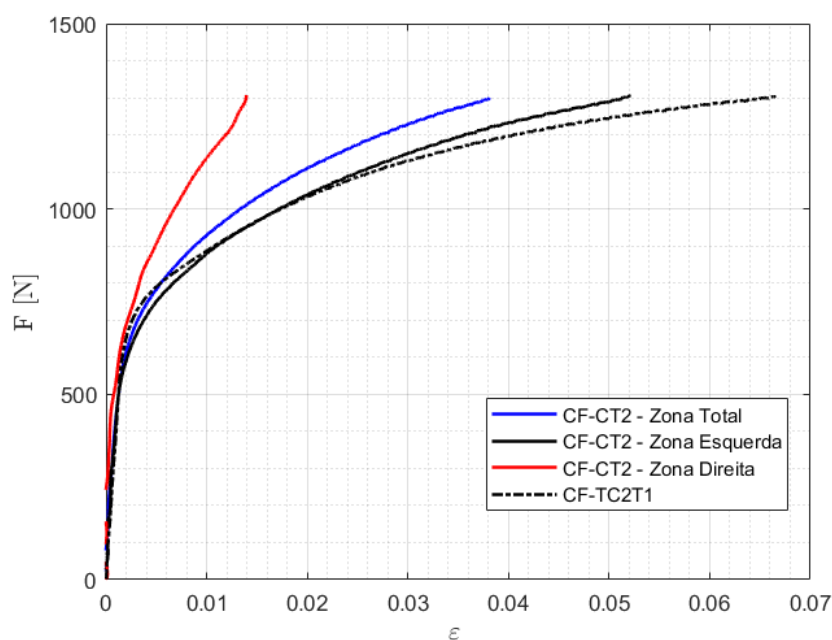


Figura 5.32: Comparação dos valores absolutos de força e extensão, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-TC2T1 (tração), CF-CT2 (compressão);

Foram ainda analisadas as extensões reais transversais, ϵ_w , ao longo da largura do provete. Para tal, foram definidos dois extensómetros virtuais no centro de cada zona, tal como está representado na Figura 5.33. Assim com os extensómetros E_w -L e E_L -L é possível avaliar o comportamento da zona da esquerda do provete, enquanto com os extensómetros E_w -R e E_L -R da zona da direita.

A evolução temporal da extensão real transversal para os dois extensómetros está representada na Figura 5.34.

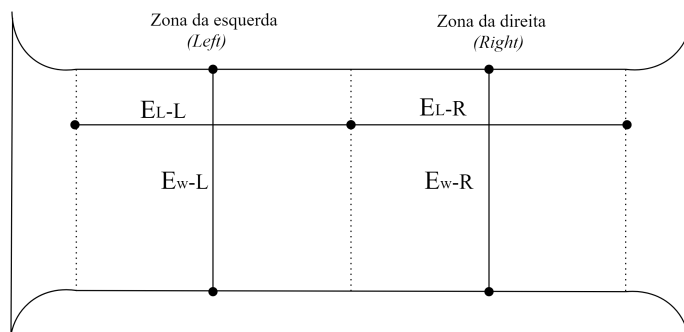


Figura 5.33: Localização dos extensómetros virtuais E_w-L e E_w-R para avaliação da extensão nas zonas da esquerda e direita do provete.

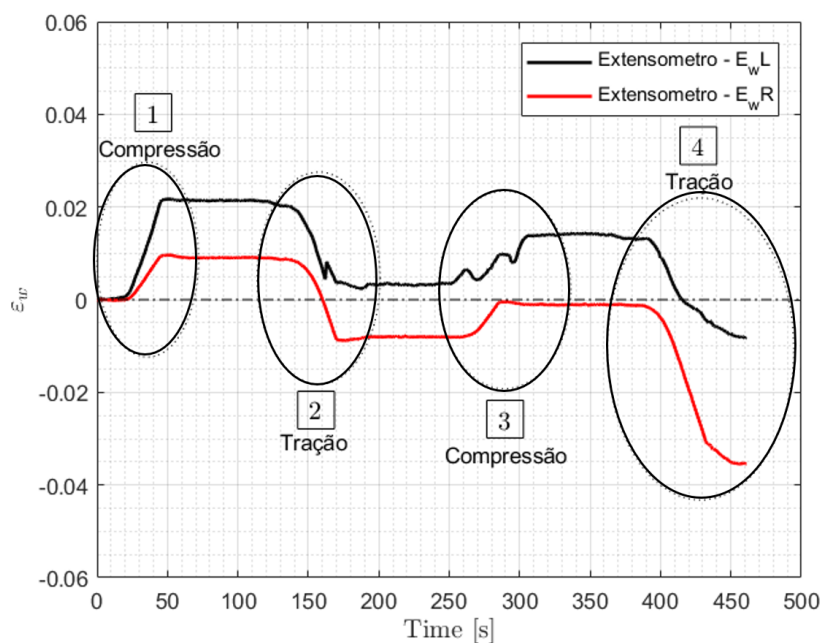


Figura 5.34: Variação temporal da extensão real transversal, ϵ_w , para os dois extensómetros em análise.

Observa-se que, ao contrário do que ocorria com a extensão longitudinal, a extensão transversal é sempre distinta para os dois extensómetros, tanto à tração como à compressão. Na primeira etapa (compressão) ambas as extensões transversais são positivas, o que significa que houve um aumento da largura do provete. Na segunda etapa (tração) as extensões diminuíram, porém na zona da esquerda a largura manteve-se maior do que a largura de referência, ao contrário da zona da direita onde a largura se tornou menor do que a referência. Na terceira etapa (compressão) houve novamente um aumento da extensão transversal nas duas zonas, levando a que na zona da

esquerda a largura aumenta-se relativamente ao comprimento anterior e na zona da direita fica-se próximo da largura de referência. Por fim, na quarta etapa (tração) houve uma diminuição da extensão, tornando a largura em ambas as zonas menor que a largura de referência.

A trajetória de deformação representativa dos dois ciclos de solicitação está representada na Figura 5.35. Nesta está representada a extensão real longitudinal, ε_L em função da extensão real transversal, ε_w para a primeira etapa de cada ciclo de solicitação CF - TC2T1 (tração) e CF - CT2 (compressão). Para que a comparação fosse feita corretamente foi utilizada como zona de análise a zona da esquerda para ambos os ciclos de solicitação. Observa-se que a trajetória de deformação coincide com o comportamento esperado sendo a razão $\varepsilon_L/\varepsilon_w$ próximo de dois, tanto em tração como em compressão, valores que coincidem com os normalmente obtidos num ensaio convencional à escala macro.

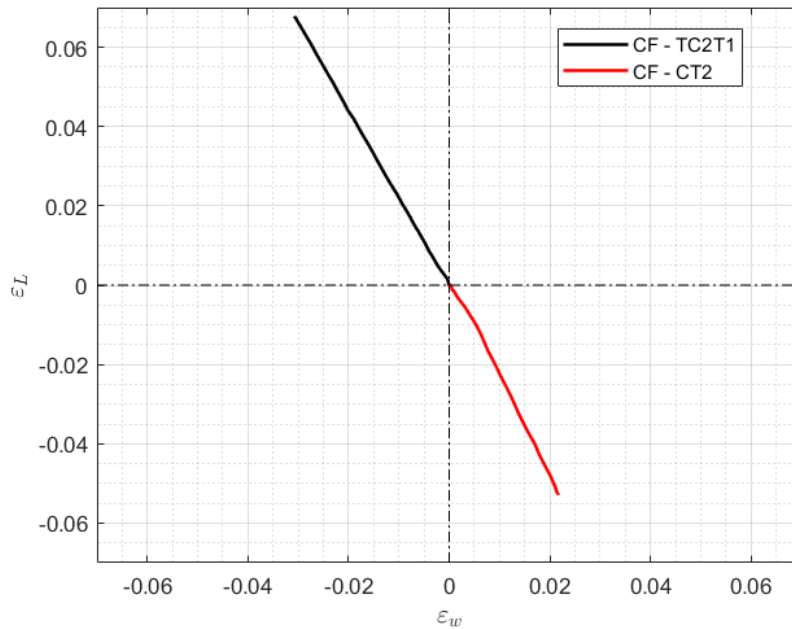


Figura 5.35: Representação da trajetória de deformação para a primeira etapa de cada ciclo de solicitação: CF-TC2T1 (tração) e CF-CT2 (compressão).

A variação da extensão real ao longo da espessura, ε_t , não foi obtida experimentalmente mas pode ser calculada pelo princípio da conservação do volume ou seja:

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_w + \varepsilon_L) \quad (5.7)$$

em que ε_L , ε_w e ε_t são as extensões reais segundo o comprimento, largura e espessura, respetivamente. Assim, a variação temporal da extensão real segundo a espessura para as duas zonas está apresentada na Figura 5.36. Observa-se que na primeira etapa (compressão) a espessura aumentou na zona da esquerda e manteve-se praticamente constante na zona da direita. Na segunda etapa

(tração) a espessura diminui em ambas as zonas. Na terceira etapa (compressão) a espessura aumentou, porém só na zona da direita é que ficou superior ao valor de referência. Por fim na quarta e última etapa (tração) ambas as espessuras diminuíram para valores mais baixos que a espessura de referência.

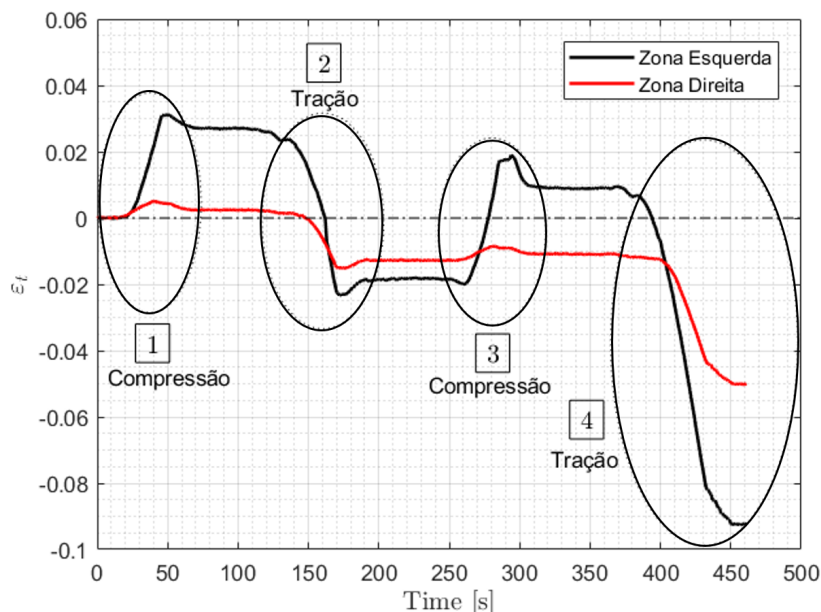


Figura 5.36: Variação temporal da extensão real segundo a espessura, ε_t , para a zona da esquerda e da direita.

Com os valores da extensão segundo a largura e espessura definidos é possível obter agora as variações temporais de área nas duas zonas. Para tal utilizam-se as Equações 5.8 e 5.9 para calcular os valores de largura (b) e espessura (a) ao longo do ensaio.

$$b = e^{\varepsilon_w} \cdot b_0 \quad (5.8)$$

$$a = e^{\varepsilon_t} \cdot a_0 \quad (5.9)$$

Multiplicando estes valores para cada um das zonas, obtém-se a variação de área respetiva ao longo do tempo, tal como está representado na Figura 5.37. Nesta figura está também representada a variação da área obtida com base no extensómetro longitudinal E_L -Tot que representa a variação média da área da secção do provete. Analisando os resultados observa-se que à compressão a área aumenta nas três zonas, porém cada uma delas apresenta um valor diferente. O maior aumento de área ocorre na zona da esquerda e o menor na zona da direita. Pelo contrário, à tração a área diminui de uma forma aproximadamente constante nas três zonas, relativamente ao seu valor inicial. Como se pode observar a área respetiva à zona total apresenta sempre valores intermédios relativamente à zona da esquerda e da direita.

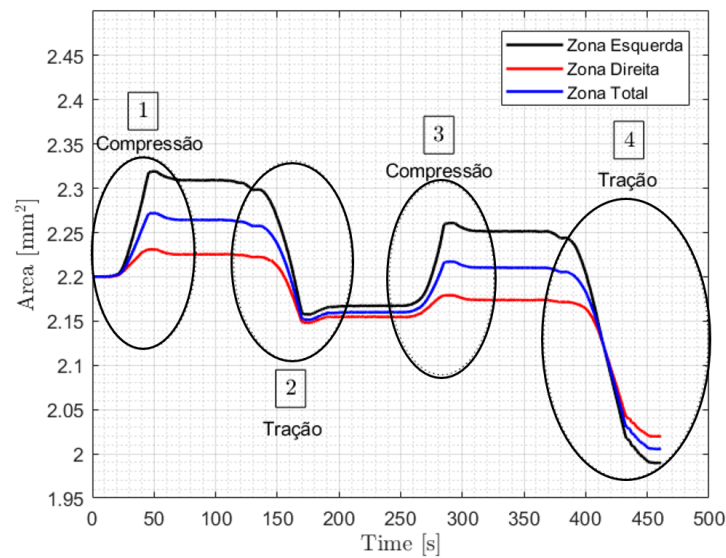


Figura 5.37: Variação temporal da área da zona da esquerda e direita e respectiva comparação com a área da zona total.

A partir da Figura 5.32, dividindo a força pela área de cada zona de análise obtém-se o gráfico da Figura 5.38. Observa-se que o comportamento do encruamento da zona da direita e da zona total à compressão coincidem com o comportamento do encruamento à tração. Contudo, o encruamento da zona da direita à compressão está distante dos restantes.

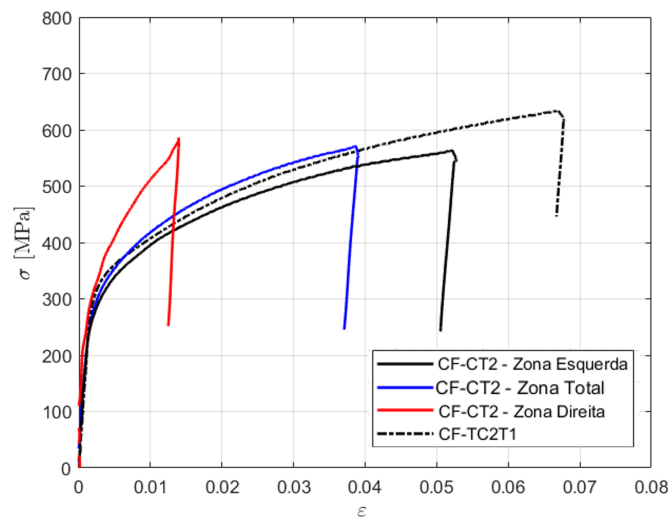


Figura 5.38: Comparação dos valores absolutos de tensão e extensão real, relativos à primeira etapa de cada sequência: CF-TC2T1 (tração), CF-CT2 (compressão); para esta última etapa está também representada a curva da zona da esquerda e da direita.

Embora a distribuição da extensão não seja perfeitamente uniforme à compressão segundo as várias direções do provete, os resultados obtidos utilizando o extensómetro E_L -Tot fornecem uma

aproximação razoável do comportamento do material, uma vez que os resultados à compressão assemelham-se aos resultados à tração. Contudo a diferença de tensões obtidas entre a zona da esquerda e direita deixam em aberto, algumas sugestões de trabalhos futuros de forma a tentar perceber, com mais pormenor, de que forma é que a diferença de áreas entre as zonas afeta o resultado final.

De seguida vai ser analisado o efeito de *Bauschinger* deste material. Para tal, utilizando as curvas tensão-extensão reais obtiveram-se as curvas apresentadas na Figura 5.39 onde foi removida a parte elástica de cada etapa para os dois ciclos de solicitação. De modo a tornar mais fácil a interpretação destes valores, realizaram-se os gráficos da Figura 5.40, onde para cada sequência se consideraram os valores absolutos de tensão e se modificou a extensão real de modo a torná-la sempre incremental. Constata-se pela análise gráfica que o aço HC220 apresenta um forte efeito de *Bauschinger* uma vez que sempre que é feito um ciclo de descarga a tensão de cedência atingida sofre uma redução em relação ao valor da solicitação em sentido contrário.

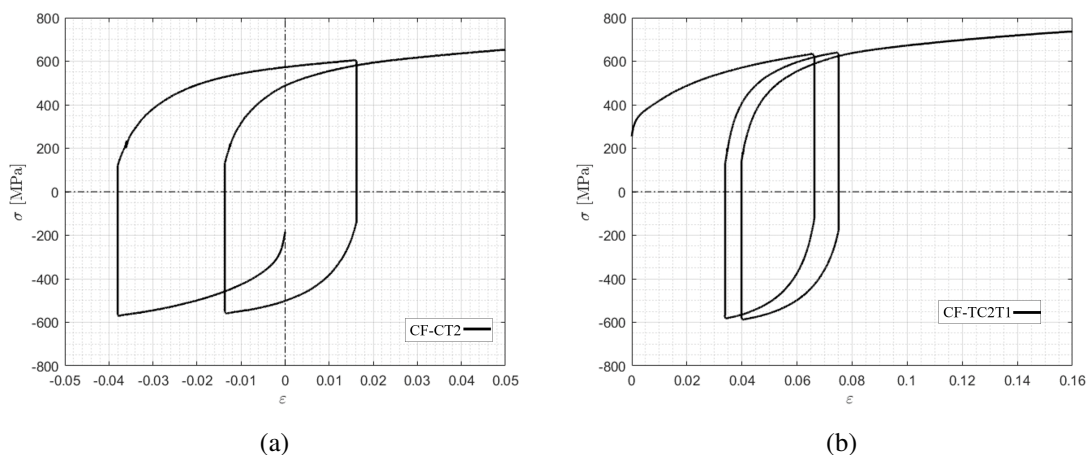


Figura 5.39: Curva tensão-extensão real plástica para a sequência (a) CF-CT2 e (b) CF-TC2T1.

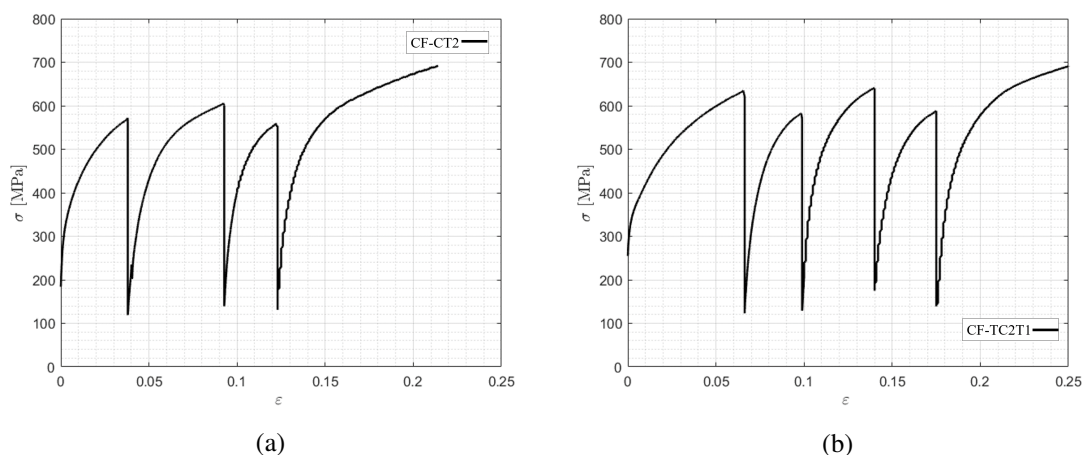


Figura 5.40: Evolução do encruamento para a sequência (a) CF-CT2 e (b) CF-TC2T1.

Tabela 5.6: Tensão de cedência, σ_{ced} , e σ_{inv} para as diferentes etapas de cada ciclo de solicitação.

Etapas	CF-CT2		CF-TC2T1	
	σ_{ced} [MPa]	σ_{inv} [MPa]	σ_{ced} [MPa]	σ_{inv} [MPa]
1	184,0	567,0	255,0	625,0
2	119,0	603,0	125,0	568,0
3	142,0	548,0	129,0	634,0
4	13,02	-	177,0	582,0
5	-	-	139,0	-

Através dos dados da Tabela 5.6, correspondentes à tensão de cedência e de inversão para cada ciclo, é possível quantificar este efeito, através dos parâmetros, BE e BEF para os sentidos tração-compressão, Equações 5.10 e 5.11, e compressão-tração, Equações 5.12 e 5.13.

$$BE_{t-c} = \frac{625,0 - 125,0}{625,0} = 0,80 \quad (5.10)$$

$$BEF_{t-c} = \frac{125,0}{625,0} = 0,20 \quad (5.11)$$

$$BE_{c-t} = \frac{567,0 - 119,0}{567,0} = 0,79 \quad (5.12)$$

$$BEF_{c-t} = \frac{119,0}{567,0} = 0,21 \quad (5.13)$$

Pela análise destes parâmetros pode-se concluir que o efeito de *Bauschinger* é semelhante nos sentido tração-compressão e compressão-tração, uma vez que os parâmetros quantificadores são aproximadamente iguais; tal como se tinha observado pela análise gráfica, o efeito de *Bauschinger* é significativo para este material, uma vez que a tensão de cedência após a inversão de sentido diminui 80%.

Capítulo 6

Considerações finais

6.1 Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação consistiu no desenvolvimento de um equipamento especializado na realização de ensaios uniaxiais, de tração-compressão, em provetes metálicos miniaturizados. Surge assim o MSTD - *Mini Sample Tester Device*, concebido para ensaiar provetes a uma escala meso.

Numa primeira fase deste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica geral relativa à técnica dos ensaios uniaxiais miniaturizados. Com esta, ficou-se a conhecer o porquê da utilização da técnica de miniaturização, as suas principais vantagens face à escala macro assim como os seus principais campos de aplicação. Definiu-se em pormenor os ensaios miniaturizados de tração e compressão analisando as dificuldades principais inerentes à utilização de uma escala de estudo mais pequena.

De seguida apresentou-se em pormenor o ensaio de tração à escala macro, onde foram analisadas as suas curvas características assim como os parâmetros de resistência e ductilidade obtidos a partir destas. Avaliaram-se os resultados experimentais de tração à escala macro de dois materiais distintos: a liga de alumínio AA5754 e a liga de magnésio AZ31B. Para a liga de alumínio foi nitidamente visível o efeito PLC, característico deste material. Os parâmetros de resistência e ductilidade para esta liga, obtidos a partir dos dados experimentais, conferem com as propriedades documentadas na literatura sendo que o módulo de elasticidade obtido experimentalmente foi ligeiramente inferior. Relativamente à liga de magnésio verificou-se novamente que o módulo de elasticidade foi inferior ao documentado, e que as tensões $R_{p0.2}$ e σ_m apresentaram valores superiores. Procedeu-se também à modelação numérica do ensaio de tração utilizando o software comercial *AbaqusTM*. Para isso foi necessário definir os parâmetros elásticos e plásticos do material. Para total definição do comportamento plástico do material foram escolhidas leis de encruamento para cada um dos materiais. Conclui-se que a lei mais adequada para a liga de alumínio AA5754 é lei de *Voce* e para a liga de magnésio AZ31B a lei de *Johnson-Cook*. Os resultados numéricos através da simulação obtidos aproximaram-se dos resultados experimentais o que permite concluir que o modelo numérico definido foi adequado e representativo do ensaio.

Posteriormente foram realizados ensaios de tração em provetes miniaturizados utilizando os mesmos materiais. Para tal foi adaptado um protótipo de modo a ser possível testar provetes numa mesoescala. De modo a avaliar a variação dos resultados com o comprimento de referência foram testadas duas geometrias de provetes. Os resultados obtidos permitiram concluir que este tipo de ensaios permitem avaliar o comportamento dos materiais de uma forma adequada, uma vez que os resultados obtidos através deles são comparáveis com os resultados obtidos nos ensaios de tração à escala macro. As tensões de cedência e de rotura podem ser calculadas de forma precisa, enquanto que as propriedades de ductilidade necessitam de ser objeto de uma análise mais cuidada. A extensão máxima, é o parâmetro mais sensível à miniaturização sendo que se aproximou mais do resultado de referência para geometrias com um comprimento de referência maior. Ainda com estes ensaios foi possível definir aspetos a considerar como melhoria para o MSTD, nomeadamente no que toca ao alinhamento dos componentes.

Tendo como base o protótipo existente e outros equipamentos do mesmo tipo presentes na literatura foi desenvolvido e construído o MSTD. Este tem uma capacidade de carga de 2,5 kN e permite testar provetes miniaturizados de uma mesoescala. Além de ensaios de tração o equipamento permite realizar ensaios de compressão em chapa metálica e ainda possui a capacidade de ser adaptado para realização de ensaios de dobragem. Para avaliar o desempenho do novo protótipo foram realizados ensaios cíclicos de tração compressão ao aço HC220. Os resultados foram satisfatórios pois conseguiu-se obter um comportamento idêntico do material tanto à compressão como à tração. Isto demonstra que o fenómeno de encurvadura à compressão foi minimizado, pois caso contrário não existiria tal similaridade nos resultados obtidos. A distribuição da extensão longitudinal mostrou-se não ser perfeitamente uniforme ao longo do comprimento do provete quando solicitado à compressão, porém este fenómeno não teve grande influência nos resultados. O efeito de *Bauschinger* foi também avaliado para este material e conclui-se que no aço HC220 este efeito é muito significativo uma vez que a tensão de cedência na inversão de sentido é cerca de 80 % menor relativamente ao valor esperado. Estes ensaios, embora muito preliminares, permitiram definir várias linhas de rumo a seguir para possíveis trabalhos futuros.

Em suma, conseguiu-se com a presente dissertação cumprir de um modo muito positivo todos os objetivos estabelecidos previamente, deixando para a comunidade científica um equipamento operacional e adequado para a evolução do conhecimento relativo à temática dos ensaios uniaxiais de tração compressão em provetes metálicos miniaturizados.

6.2 Perspetivas de trabalhos futuros

Entre as perspetivas de trabalhos podem-se incluir as seguintes propostas:

- Realização de ensaios cíclicos no MSTD com controlo de deslocamento. Com este tipo de controlo pretende-se obter as curvas semelhantes às apresentadas na secção 5.5. Assim, será possível estudar o comportamento do material para condições de deslocamento fixo, avaliando mais facilmente a evolução do encruamento ao longo dos ciclos;

- Realização de ensaios com inversão de sentido, no sentido tração-compressão com a inversão a ocorrer a níveis diferentes de extensão. Na Figura 6.1 está representado um gráfico ilustrativo desta metodologia em ensaios de corte. Assim é possível avaliar por exemplo o comportamento do efeito de *Bauschinger* para diferentes extensões;

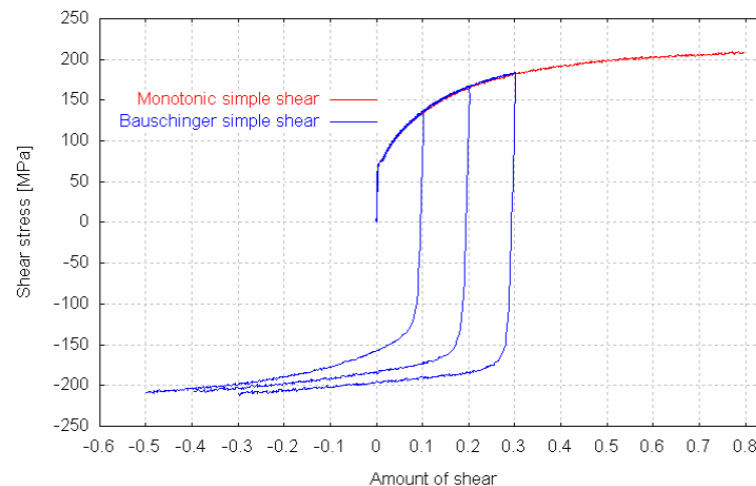


Figura 6.1: Representação de ensaios cíclicos de corte com a inversão do sentido a ocorrer para níveis diferentes de extensão.

- Realização de ensaios cíclicos com mais materiais, sobretudo materiais cujo o seu comportamento seja conhecido à escala macro, tanto à tração como à compressão. Assim os resultados obtidos podem ser facilmente comparáveis com a referência macro;
- Utilizando a correlação digital de imagem avaliar as diferenças existentes no campo de deformações em ambos os lados do provete;
- Avaliar o comportamento de materiais, como por exemplo a liga de magnésio, em ensaios miniaturizados com a presença de temperatura;
- Confirmar a teoria estabelecida no capítulo 4 relativa à influência da taxa de deformação nos resultados do ensaio de tração na tensão de cedência obtida para a liga de alumínio AA5754 (Figura 4.29). Visto que não é possível realizar ensaios com um motor passo a uma velocidade mais baixa do que a utilizada propõe-se realizar um ensaio de tração com os provetes do Tipo 1 a uma velocidade de modo a igualar a taxa de deformação utilizada para o Tipo 1. Assim, se os resultados deram semelhantes confirma-se a teoria da taxa de deformação influenciar a tensão de cedência para a liga AA5754;
- Implementação no MSTD de um sensor para medição da flecha do provete durante o ensaio. Assim é possível avaliar o comportamento do provete à encurvadura e compara-lo com as previsões teóricas. Um exemplo possível implementar é o sensor apresentado na Figura 6.2;

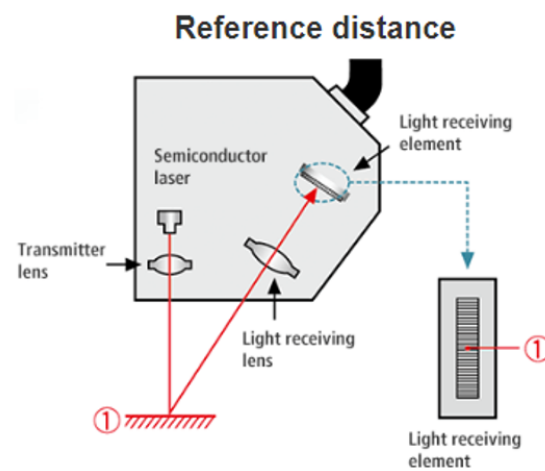


Figura 6.2: Sensor de medição de deslocamento da OMRON- Ref: Z4M-N30V [53].

- De modo a aproveitar a versatilidade do MSTD, projetar e executar amarras para a execução de outros ensaios mecânicos tais como ensaios de dobragem de 3 e 4 pontos;
- Realização destes ensaios com materiais distintos e respetiva comparação com resultados existentes na literatura.

Referências

- [1] Jorge Rodrigues and Paulo Martins. ‘Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. I’. *Escolar Editora*, 1995.
- [2] André Filipe Gomes Pereira. ‘On the constitutive parameters identification of metal sheets - Bulge, Shear and Tensile Tests’. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 2018.
- [3] ISO. ‘6892-1 - metallic materials - tensile testing - part 1: Method of test at room temperature’. Norma, *International Organization for Standardization*, Geneva, CH, june 2016.
- [4] Clayton Teague and John Evans. ‘meso/micro/nano scale technologies’, 1999. *National Institute of Standards and Technology - Maryland, USA*.
- [5] Salahudin M Nimer. ‘Microscale mechanical experiments at elevated temperatures: System development and material characterization’. Tese de doutoramento, University of Maryland, Baltimore County, 2016.
- [6] André Diogo Roberto de Sousa. ‘Orientation and location dependency of the mechanical properties of an AlSi10Mg part produced using direct metal laser sintering (DMLS) - a microsample approach’. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [7] Jonas Bally, Wim De Waele, Patricia Verleysen, Nenad Gubeljak, and Stijn Hertelé. ‘Characterisation of weld heterogeneity through hardness mapping and miniature tensile testing’. *International Journal Sustainable Construction and Design*, Vol.6, 2015.
- [8] Bin Yang, Fu-Zhen Xuan, and Jing-Kai Chen. ‘Evaluation of the microstructure related strength of crmov weldment by using the in-situ tensile test of miniature specimen’. *Materials Science and Engineering:A*, Vol.736:193–201, 2018.
- [9] Y. M. Wang, K. Wang, D. Pan, K. Lu, K. J. Hemker, and E. Ma. ‘Microsample tensile testing of nanocrystalline copper’. *Scripta Materialia*, Vol.48(12):1581–1586, 2003.
- [10] M. Zupan, M. J. Hayden, C. J. Boehlert, and K. J. Hemker. ‘Development of high-temperature microsample testing’. *Experimental Mechanics*, Vol.41(3):242–247, 2001.
- [11] Kundan Kumar, Arun Pooleery, K. Madhusoodanan, R.N. Singh, J.K. Chakravartty, B.K. Dutta, and R.K. Sinha. ‘Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties’. *Procedia Engineering*, Vol.86:899 – 909, 2014.
- [12] N.F. Panayotou, R.J. Puigh, and E.K. Opperman. ‘Miniature specimen tensile data for high energy neutron source experiments’. *Journal of Nuclear Materials*, Vol.104:1523 – 1526, 1981.

- [13] A.V. Sergueeva, J. Zhou, B.E. Meacham, and D.J. Branagan. ‘Gage length and sample size effect on measured properties during tensile testing’. *Materials Science and Engineering:A*, Vol.526(1):79 – 83, 2009.
- [14] T. Fülöp, W.A.M. Brekelmans, and M.G.D. Geers. ‘Size effects from grain statistics in ultra-thin metal sheets’. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.174(1):233 – 238, 2006.
- [15] Haiting Liu, Yao Shen, Shuang Yang, Pengfei Zheng, and Lei Zhang. ‘A comprehensive solution to miniaturized tensile testing: Specimen geometry optimization and extraction of constitutive behaviors using inverse fem procedure’. *Fusion Engineering and Design*, Vol.121:188–197, 2017.
- [16] Martin Rund, Radek Procházka, Pavel Konopík, Jan Džugan, and Hugo Folgar. ‘Investigation of sample-size influence on tensile test results at different strain rates’. *Procedia Engineering*, Vol.114:410–415, 2015.
- [17] Pavel Konopik, Jan Džugan, and Radek Prochazka. ‘Evaluation of local mechanical properties of steel weld by miniature testing technique’. *Small specimens testing methods*, Vol.4:2404–2411, 2014.
- [18] Jan Džugan, Radek Prochazka, and Pavle Konopík. ‘Micro-tensile test technique development and application to mechanical property determination’. *ASTM Special Technical Publication*, 2015.
- [19] Michael Sutton, Jean-José Orteu, and Hubert W. Schreier. ‘Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications’. *Springer*, 2009.
- [20] Rahmat Kazemi Firouzjaei. ‘Digital Image Correlation (DIC) and Experimental Testing of Masonry Samples’. Tese de mestrado, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) and Universidade do Minho (UM), 2016.
- [21] ‘VIC-2DTM’. *Correlated Solutions*, 2008.
- [22] Hyoungwook Lee, Cheolhee Kim, and Jung Han Song. ‘An evaluation of global and local tensile properties of friction-stir welded dp980 dual-phase steel joints using a digital image correlation method’. *aterials*, Vol.8:8424–8436, 2015.
- [23] ASTM. ‘e9-89a - standard test methods for compression testing of metallic’. Norma, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, May 2000.
- [24] R. K. Boger, R. H. Wagoner, M. G. d Lee F.an Barlat, and K. Chung. ‘Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material’. *International Journal of Plasticity*, Vol.21:2319–2343, 2005.
- [25] A Abel and R.K Ham. ‘The cyclic strain behaviour of crystals of aluminum-4 wt.% copper-i. the bauschinger effect’. *Acta Metallurgica*, Vol.14:1489 – 1494, 1966.
- [26] P.S. Bate and D.V. Wilson. ‘Analysis of the bauschinger effect’. *Acta Metallurgica*, Vol.34:1097 – 1105, 1986.
- [27] Fusahito Yoshida, Takeshi Uemori, and Kenji Fujiwara. ‘Elastic–plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension–compression at large strain’. *International Journal of Plasticity*, Vol.18(5):633 – 659, 2002.

- [28] Toshihiko Kuwabara. ‘Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations’. *International Journal of Plasticity*, Vol.23(3):385 – 419, 2007.
- [29] Jian Cao, Wonoh Lee, Hang Shawn Cheng, Mark Seniw, Hui-Ping Wang, and Kwansoo Chung. ‘Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals’. *International Journal of Plasticity*, Vol.25(5):942 – 972, 2009.
- [30] C.S. Aitchison and L.B. Tuckerman. ‘The pack method for compressive tests of thin specimens of materials used in thin-wall structures’. *National Advisory Committee on Aeronautics*, 1939.
- [31] Engineering Archives. Engarc - 1 - tensile test. **site:** http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html, 2015. (Accessed on 24/06/2019).
- [32] A. Barata da Rocha J.Ferreira Duarte. ‘Tecnologia da Embutidura’. *Associação Portuguesa das tecnologias de conformação plástica*, Porto, 1992.
- [33] DIN. ‘50145 - testing of metallic materials. tensile test’. Norma, *Deutsches Institut für Normung E.V.*, Geneva, CH, May 1975.
- [34] David Roylance. Stress-strain curves, 2001.
- [35] Rui Ricardo Loureiro Amaral. ‘Modelação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Chapas, Caracterização Mecânica e Previsão de Retorno Elástico’. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [36] ‘CES EduPack’. *Granta Design*, 2018.
- [37] Pedro Teixeira, Nannan Song, Shenghua Wu, Francisco Pires, Abel D. Santos, and J. Cesar de Sá. ‘Development and implementation of computational strategies for numerical modeling of warm forming of Hexagonal Closed Packed (HCP) materials’. Relatório atividade, IDMEC - Institute of Mechanical Engineering University of Porto, January 2012.
- [38] Patrick Marques da Cunha. ‘Simulação numérica do processo de estampagem a quente’. Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2016.
- [39] Ahmet Yilmaz. ‘The portevin-le chatelier effect: a review of experimental findings.
- [40] ‘Abaqus CAE Student Edition’. *Simulia*, 2016.
- [41] João Marcos Teixeira Fernandes. ‘Projeto de uma Máquina de Ensaio de Células Solares’. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [42] ‘Autodesk Inventor’. *Autodesk*, 2018.
- [43] ‘NI Labview’. *Instruments, National*, 2018.
- [44] R. Smerd, S. Winkler, C. Salisbury, M. Worswick, D. Lloyd, and M. Finn. ‘High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet’. *International Journal of Impact Engineering*, Vol.32(1):541 – 560, 2005.

- [45] Maysam B. Gorji and F Dirk Mohr. ‘Micro-tension and micro-shear experiments to characterize stress-state dependent ductile fracture’. *Acta Materialia*, Vol.131:65 – 76, 2017.
- [46] Ricardo Jorge Silva Rego. ‘Fatigue Testing Machine Development for Microsample Evaluation of Additively Manufactured Metals’. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.
- [47] W Lim and H.-K Kim. ‘Design and development of a miniaturised tensile testing machine’. *Global Journal of Engineering Education*, Vol.15:48–53, 2013.
- [48] UtDesign. *UTDesign | UTDesign Capstone - The University of Texas at Dallas*. **site:** <https://utdesign.utdallas.edu/>, 2015. (Accessed on 09/07/2019).
- [49] Sandro Guilherme Solosando. ‘Efeito Bauschinger em aços inoxidáveis’. Relatório final, Departamento de Engenharia Mecânica - FEI, 2007.
- [50] Elena Silvestre Soriano. *Sheet metal roll levelling optimization by means of advanced numerical models and development of new concepts for last generation materials*. Tese de doutoramento, Mondragon Unibersitatea, 2015.
- [51] Michael Smith. ‘*ABAQUS/Standard User’s Manual, Version 6.9*’. Simulia, 2009.
- [52] Stipica Novoselac, Todor Ergic, and Pavo Balicevic. ‘Linear and nonlinear buckling and post buckling analysis of a bar with the influence of imperfection. *Tehnicki Vjesnik*, Vol.19:695–701, 2012.
- [53] 1d laser displacement sensors | measurement library | keyence america. https://www.keyence.com/ss/products/measure/measurement_library/type/laser_1d/. (Accessed on 09/03/2019).