

Desenvolvimento de Máquina para Ensaios de Impacto a Alta Velocidade de Deformação e Elevada Temperatura

Miguel Eduardo Lages Saragoça

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Eng. Afonso José de Vilhena Leitão Gregório

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Carla Maria Moreira Machado

Eng. Alcino Pereira dos Reis

Janeiro 2021

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos a todos os que contribuíram para a realização da presente dissertação de mestrado de engenharia mecânica.

Ao meu orientador, professor Pedro Rosa, pelo incansável apoio e motivação durante todo o decorrer da tese, essencial para superar todos os desafios que esta impôs, e pela valiosa contribuição para a minha formação profissional e pessoal.

Ao meu coorientador, Engenheiro Afonso Gregório, por toda a ajuda e apoio prestado, tanto a nível científico como pessoal.

Um especial agradecimento ao Engenheiro Pedro Santos, pela ajuda, aconselhamento e amizade durante todos estes meses de trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Tecnologia Mecânica e a todos os elementos técnicos do Núcleo de Oficinas (NOF), pelo auxílio prestado e tempo despendido no fabrico de todos os componentes necessários.

Aos meus colegas de laboratório, em destaque ao Fábio Baptista e Gonçalo Domingos, por todo o companheirismo, entreajuda e amizade, mostrando-se sempre disponíveis para ajudar nas diversas etapas deste trabalho.

A toda a minha família, com especial atenção aos meus pais, irmão e avós. Desde sempre me acompanharam em todas as etapas da minha vida e que sem todo o seu apoio, amor carinho jamais seria a pessoa que sou hoje.

Institutional Acknowledgements

This work was supported by FCT, through IDMEC, under LAETA, project UIDB/50022/2020.

The project MAMTool entitled “Machinability of Additive Manufactured Parts for Tooling Industry” funded by the Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, and Programa Operacional Regional de Lisboa funded by FEDER and National Funds (FCT) is acknowledged (Reference PTDC/EME-EME/31895/2017).

Laboratory of Machining and Micro Manufacturing, Instituto Superior Técnico, for proposing the theme of this dissertation and for performing the laboratorial experiments analysed in this work.

Co-financed by:



Laboratory of Machining
& Micro-Manufacturing

Resumo

O desenvolvimento de novos materiais marca inevitavelmente um salto tecnológico, pois a sua utilização promove o desempenho mecânico de componentes e aparecimento de novos equipamentos e tecnologias. Esta evolução acarreta novos desafios para os laboratórios de ensaios mecânicos na caracterização do comportamento mecânicos de materiais de elevada resistência e a avaliação do desempenho de componentes em condições representativas de aplicações industriais, civis ou militares.

O presente trabalho procura o desenvolvimento de uma máquina de ensaios que possibilita compressão uniaxial de amostras de materiais em condições de elevada velocidade de deformação e temperatura. A validação do equipamento foi realizada com base na reprodução de casos de estudo disponíveis na literatura, e posteriormente o mesmo foi utilizado para a caracterização mecânica de ligas metálicas recentes utilizadas no fabrico aditivo, focando no aço Maraging produzido por fusão seletiva a laser (SLM).

Palavras-chave

Caracterização mecânica, compressão uniaxial, impacto, fabrico aditivo, aço maraging.

Abstract

The development of new materials always marks a technological leap, as their use promotes the development of new equipment and an improvement in the performance of existing technologies. This evolution poses new challenges for mechanical testing laboratories in the characterization of the mechanical behaviour of high-strength materials and the evaluation of the performance of components under conditions representative of industrial, civil or military applications.

The present work seeks the development of a testing machine that allows uniaxial compression of materials under conditions of high strain-rate and high temperature. The validation of the equipment was based on the reproduction of case studies available in the literature, and later the equipment was used for the mechanical characterization of metal alloys recently used for additive manufacturing, focusing on maraging steel, grade 300, produced by Selective Laser Melting (SLM).

Keywords

Mechanical characterization, uniaxial compression, impact, additive manufacturing, maraging steel.

Índice

Agradecimentos	i
Institutional Acknowledgements	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice.....	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras.....	viii
Abreviaturas	xi
Nomenclatura.....	xii
1 Introdução	1
2 Fundamentos Teóricos	3
2.1. Comportamento Mecânico dos Materiais	3
2.1.1. Modelos Constitutivos	5
2.2. Ensaio Mecânico.....	7
2.2.1. Barra de Hopkinson.....	9
2.3. Fabrico Aditivo de Componentes Metálicos	12
2.3.1. Ligas de Aço Maraging.....	13
3 Desenvolvimento do Aparato Experimental	15
3.1. Máquina de Ensaio	15
3.1.1. Estrutura	15
3.1.2. Barra Incidente e Transmissora	17
3.1.3. Dissipador de Energia	19
3.1.4. Canhão Pneumático	20
3.1.5. Atuador Hidráulico	22
3.1.6. Forno Elétrico	23
3.1.7. Câmara Criogénica.....	26
3.2. Aquisição de Dados.....	26
3.2.1. Sensores de Deslocamento	26
3.2.2. Célula de Carga.....	29
3.2.3. Câmara de Alta Velocidade.....	31
3.2.4. Sistema de Aquisição de Dados.....	31
3.3. Tratamento de Dados	32
3.4. Materiais e Plano de Ensaio	35

4	Resultados Experimentais	37
4.1.	Validação do Aparato Experimental	37
4.2.	AA 5083-H111	39
4.3.	AISI 1045	41
4.4.	Maraging 300.....	43
4.5.	Calibração da Lei do Material.....	48
5	Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro	51
6	Referências	53
7	Anexos	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Modelos constitutivos abordados no presente estudo.....	5
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço Maraging 300 forjado e obtido por SLM, antes e após envelhecimento de 5 horas a 480°C.	14
Tabela 3 – Composição nominal dos elementos de liga do aço maraging 300.....	14
Tabela 4 - Especificações técnicas do forno elétrico	24
Tabela 5 - Elementos de liga do alumínio AA 5083-H111	35
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA 5083-H111 a 25°C.	35
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1045 a 25°C.....	36
Tabela 8 – Constantes de calibração da adaptação do modelo constitutivo de Silva para a liga AA 5083-H111.....	48
Tabela 9 – Constantes de calibração da adaptação do modelo constitutivo de Silva para o aço AISI 1045.....	49

Lista de Figuras

Figura 1 – (a) Encruamento; (b) Fluência primária (1), secundária (2) e terciária (3).	4
Figura 2 – (a) Taxa de deformação 2 superior a 1; Temperatura $T_3 > T_2 > T_1$	4
Figura 3 - Representação esquemática de ensaio de compressão uniaxial.	8
Figura 4 – Efeito de barril no ensaio de compressão e a sua influência na curva de escoamento do material.	9
Figura 5 – Esquema da estrutura típica de uma Barra de Hopkinson	10
Figura 6 – Atuador eletromagnético de 3 bobines de disparo sequencial	11
Figura 7 – (a) Vista em corte do esquema do atuador eletromagnético de 5 bobines de disparo sequencial; (b) Barra de Hopkinson (SHPB) à direita e atuador eletromagnético.	11
Figura 8 - Esquema do aparato experimental para ensaios de compressão a elevada taxa de deformação.....	12
Figura 9 - Esquema resumido dos diferentes processos de fabrico aditivo metálicos e os seus nomes comerciais.....	13
Figura 10 – (a) Estrutura base inicial; (b) Estrutura base após reforços	16
Figura 11 - Estrutura de suporte acoplada à estrutura base.....	17
Figura 12 – (a) Extremidade da barra incidente com haste compressora de 10 mm; (b) Extremidade da barra incidente com haste compressora de 80 mm	19
Figura 13 – (a) Modelo CAD dos elementos de dissipação instalados no equipamento; (b) Instalação final dos elementos de dissipação.	20
Figura 14 – Máquina de ensaios na configuração de alta velocidade (canhão pneumático instalado) e elevada temperatura (forno elétrico instalado).....	20
Figura 15 - Gráfico da velocidade de projétil em função da pressão no tanque utilizando projéteis de diferentes massas	21
Figura 16 - Energia cinética dos projéteis com diferentes massas em função da pressão do ar no tanque.....	22
Figura 17 - Instalação do atuador hidráulico no equipamento.	22
Figura 18 – (a) Forno elétrico utilizado, de notar o furo passante na lateral; (b) Forno instalado na zona de ensaio (aberto).....	23
Figura 19 – (a) Sonda termopar; (b) Canetas indicadoras; (c) Pistola pirométrica.....	25
Figura 20 – Gráfico de temperatura registada no interior do forno e na superfície das hastes de compressão ao longo do tempo.	25
Figura 21 – (a) Câmara criogénica em poliestireno expandido instalada na zona de ensaio; (b) Colocação do Azoto liquido na câmara.....	26
Figura 22 – (a) Bobines dos sensores indutivos; (b) Modelo CAD da instalação dos sensores nas barras incidente e emissora.	27
Figura 23 – (a) Circuito elétrico da ponte retificadora; (b) Nova ponte retificadora desenvolvida.	28

Figura 24 – (a) Potenciômetro linear utilizado. (b) Exemplo da montagem do potenciômetro nas buchas lineares, note-se que a patilha está fixa na caixa aberta na barra de titânio não sendo visível nesta perspetiva.	28
Figura 25 - Curva de calibração dos potenciômetros utilizando amostras calibradas.....	29
Figura 26 – (a) Célula de carga extensométrica do tipo de ponte completa de Wheatstone; (b) Amplificador de sinal VISHAY 2310B.....	30
Figura 27 - Montagem da célula de carga comercial durante a calibração da célula de carga desenvolvida.....	30
Figura 28 - Montagem da câmara de alta velocidade.....	31
Figura 29 - Caixa de conexões National Instruments BNC-2120.	32
Figura 30 – Interface gráfica do software de aquisição de dados Labview.	32
Figura 31 - Esquema da localização nas barras dos potenciômetros D1, D2 e D3.	33
Figura 32 – Gráficos exemplificativos (a) da força registada no tempo e (b) dos deslocamentos dos potenciômetros D1, D2 e D3 no tempo e o deslocamento relativo dos pratos compressores, DR.....	34
Figura 33 - Provetes cilíndricos tipo de cada material ensaiado, da esquerda para a direita: (i) AA 1050-O, (ii) AA 5083-H111, (iii) AISI 1045, (iv) Maraging 300 convencional, (v) Maraging 300 vertical e (vi) Maraging 300 horizontal.	36
Figura 34 - Esquema da orientação de camadas de metal deposto por fabrico aditivo nos provetes (a) maraging 300 vertical e (b) maraging 300 horizontal.....	36
Figura 35 - Gráfico de comparação das curvas de escoamento da liga AA1050-O obtidas no presente trabalho com as de Alcino Reis (2016).	38
Figura 36 – Gráfico comparativo das curvas de escoamento da liga AA1050-O a uma taxa de deformação de 1500 s^{-1} do presente trabalho com as obtidas por Tiago dos Santos (2017).	39
Figura 37 - Curvas tensão-extensão em regime de deformação quase-estático da liga AA5083-H111 a temperatura variável (-70°C , -50°C , 25°C , 50°C e 100°C)	40
Figura 38 - Curva de escoamento dos ensaios de compressão da liga AA5083-H111 a uma taxa de deformação de 3000 s^{-1} e temperatura variável (25°C , 50°C , 100°C).....	41
Figura 39 - Curvas tensão-extensão de compressão em regime quase-estático do aço AISI 1045 (Ck45) a temperatura variável (25°C , 200°C e 400°C).	42
Figura 40 - Curvas tensão-extensão de compressão do aço AISI 1045 (Ck45) a taxa de deformação elevada (2000 s^{-1}) e temperatura variável (25°C , 200°C e 400°C).	43
Figura 41 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 convencional em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1}).....	44
Figura 42 – Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 horizontal (fabrico aditivo) em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1}).....	45
Figura 43 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 vertical (fabrico aditivo) em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1}).....	45
Figura 44 – Curvas de escoamento do maraging 300 convencional em regime quase-estático e temperatura variável (25°C , 200°C e 370°C).	46

Figura 45 - Curvas de escoamento do maraging 300 horizontal em regime quase-estático e temperatura variável (25°C, 200°C, 370°C e 600°C).....	46
Figura 46 – Fotografias dos provetes de maraging 300 horizontal após compressão em regime quase estático a uma temperatura de: (a) 200°C e (b) 600°C.....	47
Figura 47 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 convencional a taxas de deformação elevadas (300 s ⁻¹ , 2000 s ⁻¹ e 6000 s ⁻¹) e temperatura variável (25°C, 200°C e 300°C).	47
Figura 48 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 horizontal a taxas de deformação elevadas (300-s ⁻¹ , 2000 s ⁻¹ e 6000 s ⁻¹) e temperatura variável (25°C, 200°C e 300°C).	48
Figura 49 - Ajuste do modelo de Silva adaptado à curva de escoamento do material AA 5083-H111.	49
Figura 50 - Ajuste do modelo de Silva adaptado à curva de escoamento do material AISI 1045.	50
Figura 51 – Modelo CAD do aparato para ensaios de tração.	52

Abreviaturas

COF – Coeficiente de Atrito

DC – Corrente Direta

DED – Direct Energy Deposition

EBM – Electron Beam Melting

HiPIMS – High-power impulse magnetron sputtering

IST – Instituto Superior Técnico

LabM3 – Laboratório de Maquinagem e Microfabrico

NOF – Núcleo de Oficinas

PBF – Powder Bed Fusion

SHPB – Split-Hopkinson Pressure Bar

SLM – Selective Laser Melting

Variac – Autotransformador Variável

3D – Três dimensões

Nomenclatura

σ - Tensão

ε - Extensão

E - Módulo de Young

ρ - Densidade

E_c - Energia cinética

v - Velocidade

m - Massa

$\dot{\varepsilon}$ - Taxa de deformação

$\dot{\varepsilon}_0$ - Taxa de deformação de referência

T - Temperatura

T_r - Temperatura de referência

T_f - Temperatura de fusão

e - Número de Neper

\ln - Logaritmo natural

F - Força aplicada

A_i - Área instantânea

h_0 - Altura inicial

h_i - Altura instantânea do provete

ϕ_0 - Diâmetro inicial do provete

A_0 - Área inicial da secção transversal

Vol - Volume do provete

d - Deslocamento

mm - Milímetro

V - Volt

nF - Nanofarad

pF - Picofarad

Ω - Ohm

$^{\circ}C$ - Grau Celsius

N - Newton

MPa - Megapascal

kg - Quilograma

V - Volt

Capítulo 1

Introdução

A compreensão do comportamento mecânico dos materiais é de elevada importância no projeto e fabrico de ferramentas, componentes e bens de consumo. Do ponto de vista da aplicação, a escolha de um material sobre outro está condicionada a características quer intrínsecas, como o módulo de elasticidade, quer extrínsecas, como a carga ao qual está sujeito, que afetam o seu comportamento. Por outro lado, do ponto de vista do fabrico, a escolha de parâmetros operativos adequados depende também do conhecimento prévio da resposta dos materiais.

A caracterização do comportamento mecânico dos materiais pode ser feita através de modelos constitutivos que descrevem qual a influência das condições de operação, seja, por exemplo, a temperatura ou a velocidade de deformação, na resposta do material. O desenvolvimento de modelos constitutivos empíricos, que descrevam uma curva tensão-extensão obtida experimentalmente, é o primeiro requisito para se poderem realizar cálculos teóricos acerca das propriedades dos materiais, algo de especial importância aquando da introdução de novos materiais, para os quais à partida não se conhece a resposta face a esforços externos.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma máquina de ensaios de compressão uniaxial em condições de elevada velocidade de deformação e alta ou baixa temperatura, possibilitando a obtenção das curvas tensão-extensão características dos materiais e a parametrização dos modelos constitutivos que os descrevem.

O documento encontra-se estruturado em 5 capítulos, iniciando pela presente introdução. No capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos importantes para o estudo realizado, começando por abordar o comportamento mecânico dos materiais e os modelos constitutivos que o descrevem. De seguida abordam-se os ensaios mecânicos com importância para este trabalho que permitem a obtenção dos parâmetros de calibração dos modelos constitutivos. Finalmente, são também abordados os processos de fabrico aditivo que originaram um dos materiais ensaiados, o aço maraging 300.

O capítulo 3 descreve a conceção do equipamento para a realização dos ensaios de compressão uniaxial a diferentes temperaturas, em condições quase-estáticas e de alta velocidade. Inicialmente é apresentada a estrutura e os componentes da cadeia cinemática da máquina de ensaios. Segue-se o desenvolvimento dos sensores e equipamentos que permitem a aquisição e registo de dados. Por fim, descreve-se o processo de tratamento de dados que permite a obtenção das curvas tensão-extensão dos materiais ensaiados. Neste capítulo inclui-se também o plano de ensaios delineado para o equipamento, assim como os materiais para provetes escolhidos e as suas características.

O capítulo 4 serve o propósito de apresentar e analisar os resultados obtidos. Iniciando pelos ensaios de validação da máquina de impacto, seguido dos ensaios de que permitem a obtenção da curva tensão-extensão da liga AA 5083-H111, do aço AISI 1045 e do aço maraging 300. Finaliza-se com a calibração dos parâmetros dos modelos constitutivos da liga AA 5083-H111 e do aço AISI 1045.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e as perspectivas de trabalhos futuros dentro desta temática.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo, através de uma revisão bibliográfica, apresentam-se os fundamentos teóricos que permitem a realização deste trabalho. Iniciando pela caracterização dos materiais, o seu comportamento quando sujeito a solicitações externas e os modelos constitutivos que o descrevem, passando pelos ensaios mecânicos relevantes para este trabalho que permitem realizar esta caracterização, com destaque para a Barra de Hopkinson. Finalmente, são também abordados os processos de fabrico aditivo que originaram os materiais ensaiados, destacando-se o aço Maraging produzido por fusão seletiva a laser (SLM).

2.1. Comportamento Mecânico dos Materiais

O estudo das características e do comportamento mecânico dos materiais quando sujeitos a solicitações externas é de fundamental importância para o projeto e desenvolvimento de componentes, estruturas e processos tecnológicos de transformação dos materiais. Por um lado, do ponto de vista da aplicação, por exemplo ao nível estrutural, a escolha de um material sobre outro está condicionada a características quer intrínsecas, como o módulo de elasticidade, quer extrínsecas, como a carga, que afetam o seu comportamento. Por outro lado, do ponto de vista fundamental, a caracterização do comportamento dos materiais, através de ensaios mecânicos e do desenho e validação de modelos constitutivos com base nestes, permite um conhecimento profundo da resposta dos materiais, algo de especial importância aquando da introdução de novas técnicas de fabrico ou de novos materiais, para os quais à partida não se conhece a resposta face a esforços externos.

O comportamento dos materiais é diverso, e pode ser racionalizado através da caracterização da curva tensão-extensão. De uma forma geral, os materiais, em resposta a esforços externos, apresentam um comportamento tanto elástico como plástico. A simplicidade do comportamento elástico, na forma de uma relação linear entre a tensão e a extensão

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

não é válida no caso geral de materiais que apresentam deformação plástica. Nestes, a não linearidade da própria relação tensão-extensão impõe um esforço significativo no desenvolvimento do modelo constitutivos. Nos metais, esta não linearidade surge como efeito da complexidade e pela característica estocástica dos mecanismos que estão por detrás de processos de deformação plástica, tais como a mobilidade dos deslocamentos ou a migração de fronteiras de grão (Negahban, 2012), ou, por exemplo, de processos de encruamento (figura 1(a)), relacionados com a densidade dos deslocamentos.

Para mais, esta não linearidade é acentuada porque os materiais também exibem um comportamento viscoso, que depende do tempo. Sob tensão constante, os materiais, especialmente a temperaturas

mais elevadas, têm a tendência a deformar-se permanentemente, sendo este fenómeno característico denominado de fluência (figura 1(b)). Além disso, os efeitos viscosos levam a que a resposta mecânica dos materiais dependa da velocidade a que a deformação é aplicada (figura 2(a)) (Perzyna, 1966).

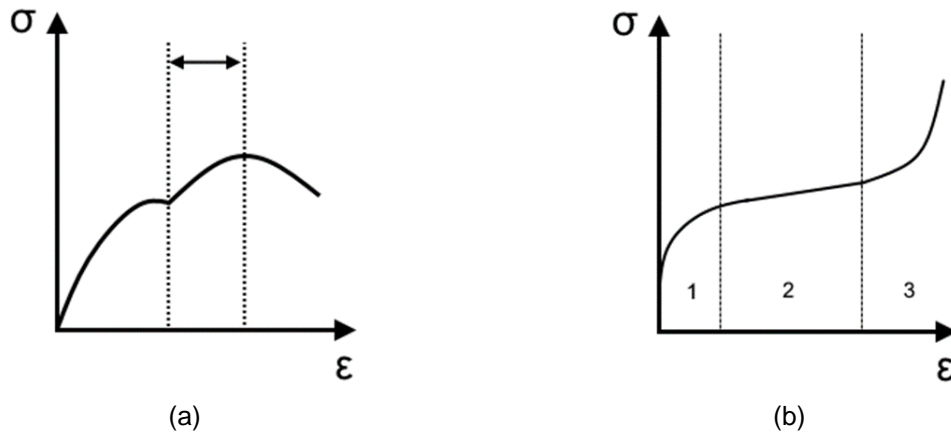


Figura 1 – (a) Encruamento; (b) Fluência primária (1), secundária (2) e terciária (3); Adaptados de (Jones, 2009).

Embora a descrição do comportamento dos materiais tendo em conta os efeitos dependentes do tempo seja uma descrição mais completa do que a visão clássica de plasticidade, parte do trabalho feito pelas tensões no processo de deformação plástica é também dissipado e convertido em calor. Em particular, em processos industriais exigentes do ponto de vista de velocidades de deformação e tensões aplicadas, o aumento de temperatura pode ser substancial, o que de uma forma geral afeta o comportamento mecânico dos materiais, tanto no regime elástico como no regime plástico. Materiais que são dúcteis à temperatura ambiente tipicamente tornam-se mais dúcteis a temperaturas mais elevadas (figura 2(b)), e a temperaturas mais baixas podem tornar-se mais frágeis. Dessa forma, ao se considerar a temperatura na caracterização do comportamento dos materiais sob solicitações externas, as curvas tensão-extensão tornam-se ainda menos lineares (Jones, 2009). A temperatura tem também um efeito sobre as características reológicas dos materiais, tais como a sua resistência à fluência, a qual pode diminuir com um aumento da temperatura.

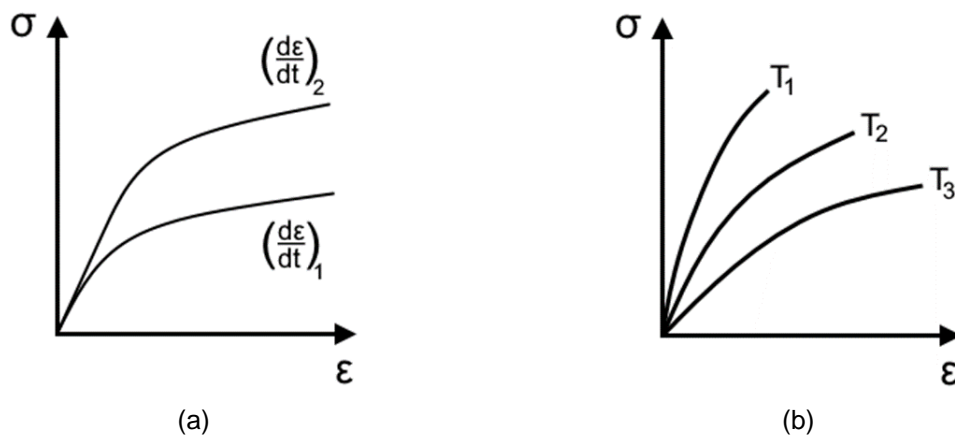


Figura 2 – (a) Taxa de deformação 2 superior a 1; Temperatura $T_3 > T_2 > T_1$; Adaptados de (Jones, 2009).

Desta forma, para obter uma descrição mais completa e precisa do comportamento dos materiais, o estudo e a caracterização dos materiais deve contemplar uma larga gama de tensões, de velocidades

de deformação e de temperatura. A influência da velocidade de deformação e da temperatura na tensão de escoamento do material pode ser determinada a partir da caracterização do comportamento mecânico do mesmo em condições quase-estáticas e dinâmicas com temperatura variável, sendo por isso estes tipos de ensaios úteis na construção de modelos constitutivos sólidos e preditivos do comportamento dos materiais.

2.1.1. Modelos Constitutivos

A caracterização do comportamento mecânico dos materiais pode ser feita através de modelos constitutivos que descrevem qual a influência das condições de operação, seja a temperatura ou a velocidade de deformação por exemplo, na resposta do material. Do ponto de vista fundamental, o desenvolvimento de modelos constitutivos empíricos, que descrevam uma curva tensão-extensão obtida experimentalmente, é o primeiro requisito para se poderem realizar cálculos teóricos acerca das propriedades dos materiais. Estes modelos empíricos podem tomar formas mais ou menos complexas, dependendo do comportamento e das propriedades demonstradas experimentalmente, como por exemplo a componente elástica da deformação ou o encruamento (Martins e Rodrigues, 2005). Os modelos designados por rígidos não contemplam a parte elástica da deformação, considerando-se um módulo de elasticidade infinito. Os modelos que não contemplam o encruamento designam-se de perfeitamente plásticos. Ao analisar a parcela elástica a par da parcela plástica da deformação, um modelo empírico passa a ser denominado de elasto-plástico, sendo que, quando a componente plástica da deformação é de uma ordem de grandeza muito superior à componente elástica, um modelo que aproxime tal comportamento diz-se rígido-plástico. Os modelos visco-plásticos contabilizam também os efeitos da temperatura e velocidade de deformação, sendo estes parâmetros o foco do presente trabalho. Os modelos constitutivos empíricos híbridos permitem, através de uma única equação constitutiva, reproduzir vários modelos tradicionais. Na tabela 1 discriminam-se os modelos abordados neste estudo.

Tabela 1 - Modelos constitutivos abordados no presente estudo.

Modelo	Natureza do Modelo
Ludwik	Rígido-plástico
Voce	Rígido-plástico
Johnson-Cook	Visco-plástico
Silva	Híbrido

Modelo de Ludwik

O modelo de Ludwik (Ludwik, 1909) pode ser aplicado no caso em que o material apresenta um comportamento rígido-plástico. Este modelo rege-se pela equação:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2)$$

Sendo K uma constante dependente do material e n o expoente que depende do encruamento do mesmo, cujo valor está compreendido entre 0 e 1, sendo que quanto maior for este expoente maior é o encruamento do material. Admite-se um valor de tensão inicial igual a zero e um declive inicial da curva infinito, ou seja, a deformação do material ocorre sempre em domínio plástico. Exceto na particularidade em que $n = 0$, caso em que o material é rígido-perfeitamente-plástico, prevê-se sempre que a tensão deverá crescer com a extensão.

Modelo de Voce

O modelo de Voce (Voce, 1948) é também um modelo de natureza rígido-plástica, regendo-se pela seguinte equação:

$$\sigma = K(1 - m e^{-n\varepsilon}) \quad (3)$$

Onde K é o valor assintótico para o qual as curvas tensão-extensão tendem ao fazer-se variar os coeficientes m e n . A velocidade com que as curvas tendem para este valor assintótico é representada por n , ao passo que m corresponde ao estado inicial de encruamento, sendo que um material completamente encruado apresenta $m = 0$.

Este modelo difere dos anteriormente apresentados por permitir modelar o comportamento mecânico de um material que, a partir de certo valor de extensão, não está mais sujeito a encruar, tendendo a tensão de escoamento assintoticamente para um valor de saturação.

Modelo de Johnson-Cook

O modelo de Johnson-Cook (Johnson e Cook, 1985) é um dos modelos visco-plásticos mais utilizados. Este contempla em simultâneo os efeitos da temperatura e da velocidade de deformação e é adequado para a modelar o comportamento do material para uma larga gama de velocidades de deformação. Este modelo rege-se pela equação:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_f - T_r} \right)^p \right) \quad (4)$$

Esta equação pode ser separada em três parcelas, a primeira diretamente relacionada com efeitos de encruamento, a segunda relacionada com a velocidade de deformação e, a terceira relacionada com efeitos de cariz térmico. A e B são constantes do material, sendo que n é uma constante referente ao encruamento. m é uma constante relacionada com a velocidade de deformação, sendo que $\dot{\epsilon}_0$ é uma constante que tem a função de normalização da velocidade de deformação, $\dot{\epsilon}$. A constante p está relacionada com o amaciamento térmico, T é a temperatura ambiente, T_r é uma temperatura de referência e T_f é a temperatura de fusão do material.

Modelo de Silva

O modelo de Silva (Silva, 2013) é um modelo empírico visco-plástico proposto para o comportamento mecânico de materiais a frio, dado pela expressão:

$$\sigma = [A + e^{m\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}^n][B + C \ln(D + \dot{\epsilon})] \quad (5)$$

Onde A, B, C, D, m e n são constantes que dependem do material e que podem ser determinados experimentalmente. Este modelo incorpora os modelos tradicionais de Ludwik-Hollomon (Hollomon, 1945), Voce e Johnson-Cook apresentados para casos particulares. O modelo mostrou-se ser apropriado para condições de deformação plástica a frio, com vantagem em relação aos anteriores, uma vez que permite reproduzir situações em que a tensão de escoamento do material decresce com a extensão para níveis de extensão e velocidade de deformação elevados.

2.2. Ensaio Mecânicos

A caracterização dos materiais e obtenção dos parâmetros de calibração dos modelos constitutivos pode ser realizada com recurso a ensaios mecânicos. Estes consistem na simulação experimental de condições específicas, permitindo a obtenção dos parâmetros necessários à sua caracterização. A escolha do tipo de ensaio a utilizar, entre os diversos tipos que existem, depende da característica a ser avaliada, do tipo de solicitação e, das condições às quais determinado material ou componente irá estar sujeito. A curva de tensão-extensão é, por exemplo, uma das características que pode ser determinada com recurso a ensaios mecânicos, sendo aplicados diferentes tipos de solicitação, compressão ou tração, e sujeitos a diferentes condições, temperatura e velocidade de deformação.

O presente trabalho baseia-se no ensaio de compressão uniaxial por forma a determinar a curva de tensão-extensão característica dos materiais em diferentes condições de temperatura e velocidade de deformação, sendo este o tipo de ensaio abordado de seguida.

Ensaio de Compressão Uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial entre pratos direitos, esquematizado na figura 3, é um dos ensaios mecânicos mais utilizados para obter a evolução tensão-extensão de um determinado material. Consiste em submeter um provete cilíndrico a uma força compressiva, registrando a força medida para cada incremento de deslocamento, e podendo ser realizado de forma incremental ou monotônica. A medição da força e deslocamento durante o ensaio é realizada com instrumentação especialmente concebida para o efeito.

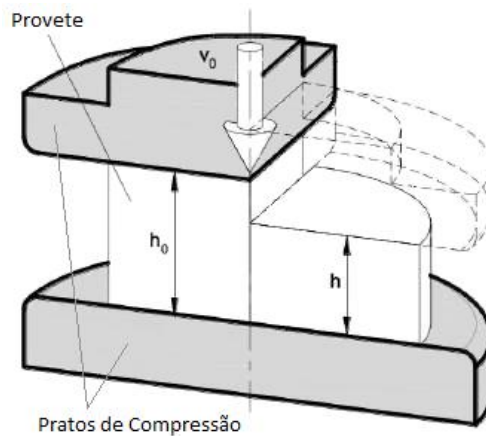


Figura 3 - Representação esquemática de ensaio de compressão uniaxial. Adaptado de (Silva,2013)

A conversão dos valores de força (F) em tensão verdadeira (σ) é realizada através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (6)$$

Onde F é a força exercida no provete e A_i é a área instantânea do provete. Através da condição de incompressibilidade, a área instantânea do provete é calculada a partir da seguinte expressão:

$$A_i = \frac{V}{h_i} = \frac{A_0 h_0}{h_i} = \frac{\pi \left(\frac{\phi_0}{2}\right)^2 h_0}{h_0 - d} \quad (7)$$

Onde V é o volume do provete, h_i é a altura do provete num determinado instante, h_0 é a altura inicial do provete, ϕ_0 é o diâmetro inicial do provete e d é o deslocamento. O deslocamento é calculado através da seguinte expressão:

$$d = h_0 - h_i \quad (8)$$

A extensão, ε , é calculada através da seguinte expressão:

$$\varepsilon = - \int_{h_0}^{h_i} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (9)$$

O fenómeno denominado de efeito de barril é um dos principais problemas do ensaio de compressão uniaxial. A superfície lateral do provete, inicialmente cilíndrica como esquematizado na figura 4(a), sofre uma deformação durante a compressão, passando a apresentar uma curvatura tal como se mostra na figura 4(b). O atrito entre as superfícies circulares do provete e os pratos de compressão provoca um constrangimento ao deslizamento do material, fazendo com que a deformação plástica não ocorra de forma homogénea. À medida que o provete é comprimido, a área de contacto entre o provete e os pratos de compressão aumenta de forma quadrática em função do raio. Existe então um aumento acentuado da força necessária para comprimir os provetes, o que se traduz numa alteração da curva tensão-extensão verdadeira do material, visível no gráfico da figura 4(c).

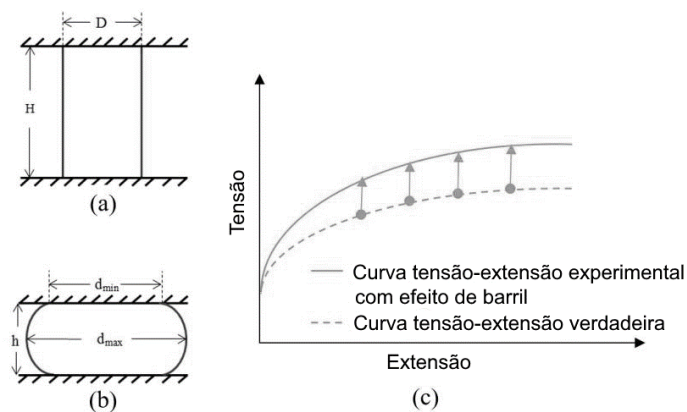


Figura 4 – Efeito de barril no ensaio de compressão e a sua influência na curva de escoamento do material. Esquema adaptado de (Wang et al., 2017)

2.2.1. Barra de Hopkinson

Um dos equipamentos utilizados frequentemente para realizar ensaios de compressão a altas taxas de deformação, na ordem dos 5000 s^{-1} , é a Barra de Hopkinson, denominada *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) em inglês (Pires, 2016). A figura 5 apresenta o esquema típico deste tipo de equipamento, de onde se realçam os dois componentes principais: a barra incidente e barra transmissora. Estas barras, fabricadas no mesmo material e com diâmetros idênticos, são excitadas em regime elástico acima da sua frequência de ressonância (Field et al., 2004).

Um projétil, acelerado com recurso a um sistema propulsor, colide com a barra incidente, criando uma onda de pressão elástica que percorre a mesma. Uma parte desta onda transmite-se para o provete e conseqüentemente para a barra transmissora, sendo que a outra parte é refletida de volta para a barra incidente. A instalação de extensómetros nas barras permite a monitorização destas ondas de pressão e, através de relações matemáticas, é possível determinar a curva de escoamento do material e a curva de velocidade de deformação-extensão (Ramesh, 2008).

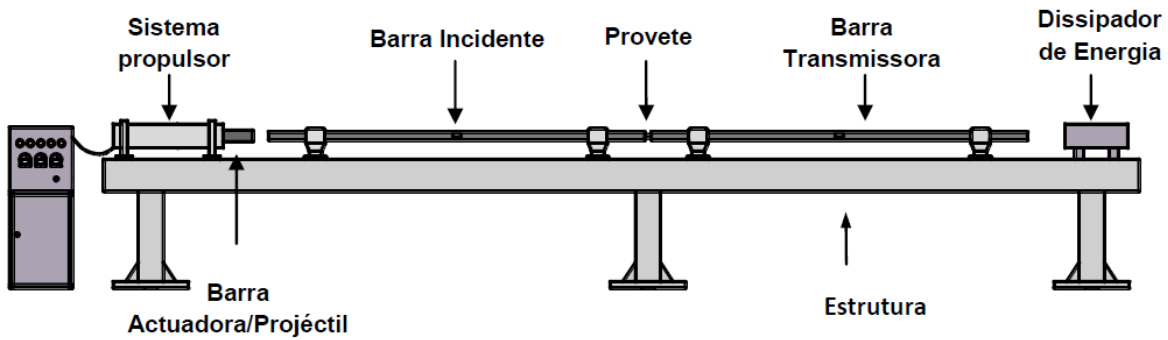


Figura 5 – Esquema da estrutura típica de uma Barra de Hopkinson (Pinto, 2009)

A partir do estado de equilíbrio a velocidade de deformação, $\dot{\varepsilon}(t)$, é dada por:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_b}{h_0} \varepsilon_r(t) \quad (10)$$

onde ε_r corresponde ao valor de extensão originado pela onda refletida, e c_b à velocidade da onda elástica dada por:

$$c_b = \sqrt{E_b/\rho_b} \quad (11)$$

sendo E_b e ρ_b o módulo de Young e a densidade das barras. Sabendo a velocidade de deformação é possível determinar a extensão:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau \quad (12)$$

A tensão obtém-se a partir da extensão originada pela onda transmitida, ε_t , aplicando a seguinte fórmula:

$$\sigma(t) = -\frac{E_b A_b}{A_0} \varepsilon_t(t) \quad (13)$$

Com A_b e A_0 sendo, respetivamente, a área transversal das barras e a área transversal inicial do provete cilíndrico. As equações (10), (12) e (13) são conhecidas como as equações de Hopkinson em ordem ao tempo (Young, 2015).

Evolução da Barra de Hopkinson (SHPB) no Instituto Superior Técnico

Ao longo dos anos têm vindo a ser desenvolvidos no Instituto Superior Técnico (IST) vários equipamentos baseados no método da barra de Hopkinson (SHPB) com o intuito de caracterizar materiais a taxas de deformação elevadas. Pedro Barbosa (2005) foi o primeiro a montar um protótipo deste equipamento no IST, sendo que o sistema de propulsão do projétil consistia num atuador eletromagnético de bobine simples. No ano seguinte, João Palma (2006) melhorou o conceito do atuador passando a ser utilizadas 5 bobines de disparo sequencial.

Pedro Monteiro (2007) refez a montagem do aparato de João Palma (2006), utilizando apenas 3 bobinas, figura 6, e utilizando o mesmo na avaliação de várias proteções balísticas. Neste caso, o equipamento consistia numa simplificação da barra de Hopkinson; a barra incidente era em simultâneo o projétil. Ainda que o aparelho revelasse uma grande versatilidade no tipo de amostras que podiam ser utilizadas foi observado um desempenho reduzido.

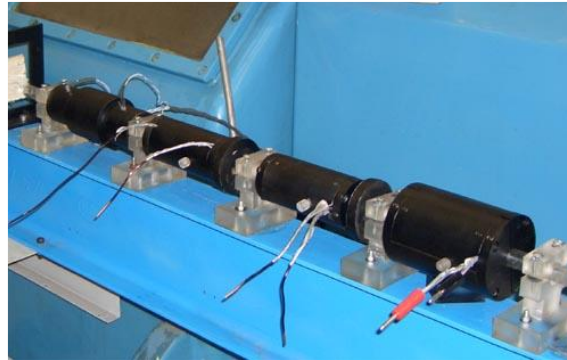
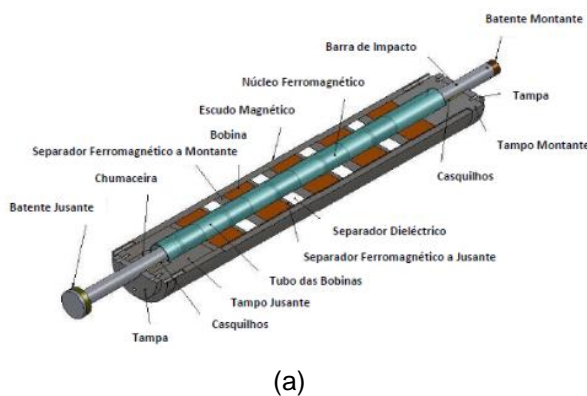


Figura 6 – Atuador eletromagnético de 3 bobinas de disparo sequencial (Monteiro, 2007)

Num estudo semelhante, José Pinto (2009) voltou a refazer o equipamento existente com o intuito de avaliar a energia transmitida após o impacto em proteções balísticas. O atuador eletromagnético foi melhorado, voltando a ser utilizadas 5 bobinas de disparo sequencial, figura 7(a), e construída uma estrutura independente para o mesmo visível na figura 7(b). Neste estudo já foi utilizada uma barra de Hopkinson (SHPB) completa, com barra incidente e transmissora, montadas numa estrutura constituída por uma viga em I, suportada por 3 pilares; esta estrutura, visível também à esquerda na figura 7(b), servirá de estrutura base para a montagem do equipamento desenvolvido no presente estudo.



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Vista em corte do esquema do atuador eletromagnético de 5 bobinas de disparo sequencial (Pinto, 2009); (b) Barra de Hopkinson (SHPB) à direita e atuador eletromagnético desenvolvida por José Pinto (2009).

Mais recentemente, Afonso Gregório (2017) realizou ensaios de compressão a elevada taxa de deformação no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3); para este efeito desenvolveu um canhão pneumático que acelera projéteis a alta velocidade, colidindo com a ferramenta de compressão desenvolvida pelo mesmo, tal como esquematizado na figura 8. Neste caso o equipamento tem somente algumas semelhanças ao modelo da barra de Hopkinson (SHPB), adotando o mesmo o conceito da colisão do projétil com a barra incidente e, por sua vez, a barra incidente fazer a compressão do provete.

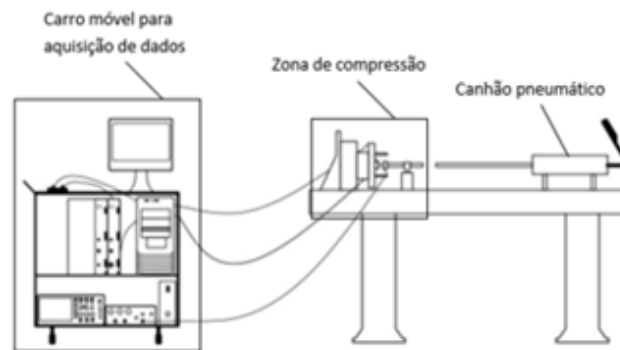


Figura 8 - Esquema do aparato experimental para ensaios de compressão a elevada taxa de deformação (Gregório, 2017)

2.3. Fabrico Aditivo de Componentes Metálicos

O fabrico aditivo, também denominado impressão 3D, permite a produção de componentes com geometrias complexas que não podem ser obtidas através dos processos convencionais de fabrico subtrativo (Peng *et al.*, 2018). Mais recentemente, o fabrico aditivo de peças em metal tem vindo a aumentar a sua expressividade em indústrias de ponta, como por exemplo na indústria aeroespacial. Os processos de fabrico aditivo de componentes metálicos mais comuns, entre os apresentados no esquema da figura 9, são: Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) e processos de Direct Energy Deposition (DED) (Fredriksson, 2019).

O SLM e EBM pertencem a uma categoria de processos denominada Powder Bed Fusion (PBF), sendo que o conceito destes processos consiste na fusão seletiva de pontos numa camada de metal pulverizado utilizando uma fonte de energia focada, por exemplo utilizando um laser ou um feixe de eletrões. Já na categoria de processos de Direct Energy Deposition (DED) o conceito é diferente; neste caso o metal é fundido e depositado camada a camada.

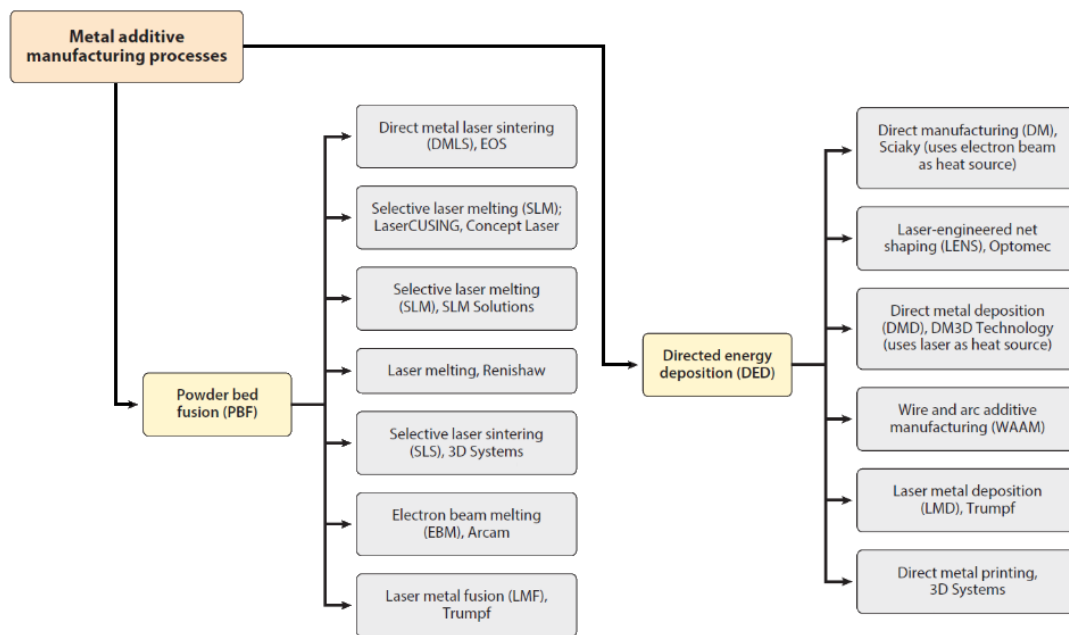


Figura 9 - Esquema resumido dos diferentes processos de fabrico aditivo metálicos e os seus nomes comerciais (Lewandowski, 2016)

As propriedades mecânicas dos componentes fabricados por este tipo de processos de fabrico aditivo aproximam-se das propriedades obtidas com materiais processados de forma convencional, por exemplo por fundição, forjamento ou extrusão, chegando a excedê-las dependendo do processo de fabrico aditivo utilizado. O problema atual centra-se no facto de existirem poucos dados publicados sobre estas propriedades e, por outro lado, a não existência de estudos sobre tenacidade à fratura, impacto, fluência ou efeitos ambientais (Lewandowski, 2016). Por outro lado, a variedade de processos de fabrico aditivo, e a própria variabilidade de parâmetros dentro de cada processo, vai também dificultar o seu estudo e posterior aplicação na indústria.

2.3.1. Ligas de Aço Maraging

O aço maraging é um material conhecido por combinar boas propriedades, tais como: elevada resistência, tenacidade, facilidade em soldar e estabilidade dimensional durante tratamentos térmicos, cujas propriedades mecânicas estão descritas na tabela 2. Este aço é utilizado tipicamente na indústria aeronáutica e aeroespacial, devido às suas propriedades mecânicas superiores. Devido à sua boa maquinabilidade, também é utilizado na produção de ferramentas (Allen e Boardman, 2005).

O aço maraging pertence a uma classe especial de aços de alta resistência que diferem dos aços convencionais pelo processo metalúrgico de endurecimento sem envolver carbono (Allen e Boardman, 2005), resultando num aço com uma percentagem de carbono muito reduzida, como pode ser visto na tabela 3 onde se apresentam os elementos de liga do aço maraging 300. A martensite formada ao arrefecer é endurecida devido à precipitação de compostos intermetálicos durante o envelhecimento a 480°C.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço Maraging 300 forjado e obtido por SLM, antes e após envelhecimento de 5 horas a 480°C (Kempen *et al.*, 2011).

	Forjado	Forjado e Envelhecido	SLM	SLM e Envelhecido
Tensão de Cedência (0,2%) [MPa]	760 - 895	1910 - 2020	1115 - 1313	1966 - 2030
Tensão de Ruptura [MPa]	1000 - 1170	1951 - 2041	1176 - 1404	2144 - 2290
Módulo de Elasticidade [GPa]	180	190	163	189
Alongamento na Ruptura %	6 - 15	11	12,4 - 15,2	1,34 – 1,86

Tabela 3 – Composição nominal dos elementos de liga do aço maraging 300.

Elemento	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn, Si	P, S	Fe
% massa	17-19	8.5-9.5	4.5-5.2	0.6-0.8	0.05-0.15	<0.5	<0.03	<0.1	<0.01	Bal.

Recentemente este aço tem vindo a ser utilizado em processos de fabrico aditivo, tipicamente em processos de Selective Laser Melting (SLM), cujas propriedades mecânicas podem ser observáveis na tabela 2, conferindo aos componentes fabricados uma elevada resistência mecânica e (aparentemente) boa maquinabilidade (Casati *et al.*, 2016).

Capítulo 3

Desenvolvimento do Aparato Experimental

O presente capítulo apresenta a conceção do equipamento para a realização dos ensaios de compressão uniaxial a diferentes temperaturas, em condições quase-estáticas e de alta velocidade.

Inicialmente é apresentada a estrutura e os componentes da cadeia cinemática da máquina de ensaios. Segue-se o desenvolvimento dos sensores e equipamentos que permitem a aquisição e registo de dados. Descreve-se o processo de tratamento de dados que permite a obtenção dos resultados experimentais pretendidos. Por fim, apresenta-se o plano de ensaios delineado para o equipamento desenvolvido.

3.1. Máquina de Ensaio

Tal como foi referido nas secções anteriores, o aparato experimental desenvolvido neste trabalho baseia-se no modelo de Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) mas, contrariamente a este modelo, apenas a barra transmissora vai estar instrumentada com extensómetros e a altura do provete para cada instante da compressão vai ser registada, assemelhando-se assim a um equipamento de ensaios de compressão uniaxial convencional.

3.1.1. Estrutura

A estrutura pré-existente no laboratório, desenvolvida no âmbito dos trabalhos de mestrado de Pedro Monteiro (2007) e José Pinto (2009), era composta por três pilares de suporte e uma viga em I, tal como se apresenta na figura 10(a). Esta estrutura, no entanto, apresentava uma rigidez estrutural baixa, algo verificado no início deste trabalho durante a realização de ensaios quase-estáticos em materiais com elevada resistência mecânica. A aplicação da força necessária para a compressão dos provetes causava uma flexão da estrutura de tal ordem que o pilar intermédio levantava do chão, algo claramente visível a olho nu.

De forma a corrigir o problema da baixa rigidez estrutural, optou-se, por um lado, pela fixação dos três pilares ao chão do laboratório, de forma a criar um anel estrutural fechado, e, por outro, fixar com recurso a soldadura, duas vigas em U entre os pilares, tal como esquematizado na figura 10(b), de forma a reforçar esse anel. Estas modificações permitiram reduzir a deformação elástica do equipamento, algo verificado ao realizar a compressão em vazio utilizando o atuador hidráulico.

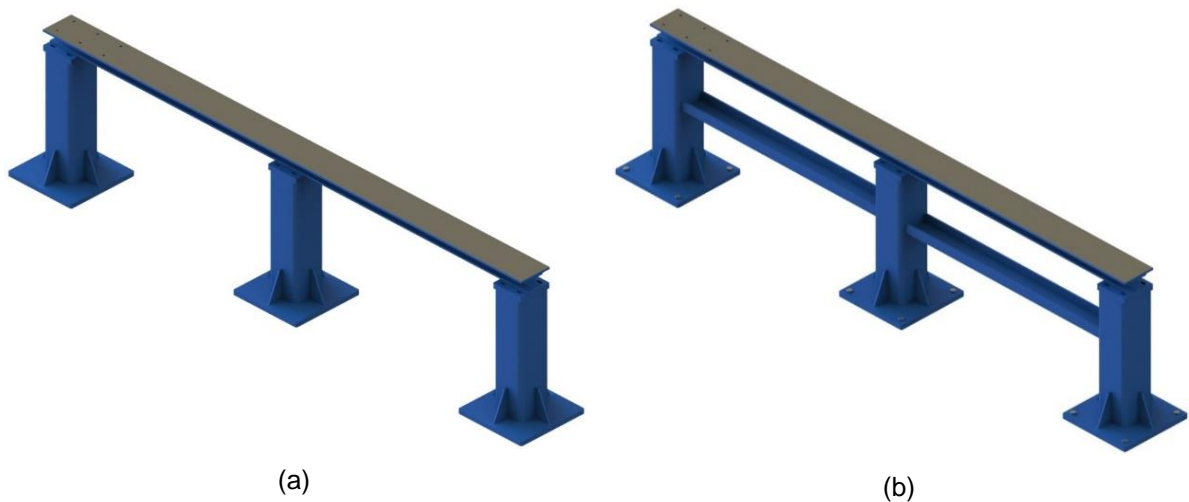


Figura 10 – (a) Estrutura base inicial; (b) Estrutura base após reforços

A esta estrutura base reforçada é também agora possível acoplar todos os equipamentos necessários para a realização dos ensaios de compressão. Foi então desenvolvida uma estrutura de suporte para as barras incidente e transmissora, sendo que esta estrutura é caracterizada por uma elevada rigidez e uma ausência de folgas, características que permitem realizar ensaios de compressão em condições exigentes sem comprometer a qualidade dos resultados.

A referida estrutura de suporte foi projetada e fabricada em placas de aço AISI 1045 com 20 mm de espessura que foram fixas à viga em I da estrutura base. Como pode ser observado na figura 11, a estrutura divide-se em duas zonas: a zona de ensaio e a zona de dissipação.

Na zona de ensaio, de forma a colmatar a flexão característica das estruturas em C, foram instalados 3 varões roscados que atuam como tirantes. Estes tirantes são amovíveis, permitindo a instalação do forno de alta temperatura.

Na zona de dissipação, os ensaios preliminares de teste do equipamento evidenciaram que a estrutura em placas de aço não seria suficiente para impedir a deformação do equipamento. Optou-se pela instalação dos esquadros e pela fixação de uma viga em I que faz a ligação da zona de dissipação à zona de ensaio.

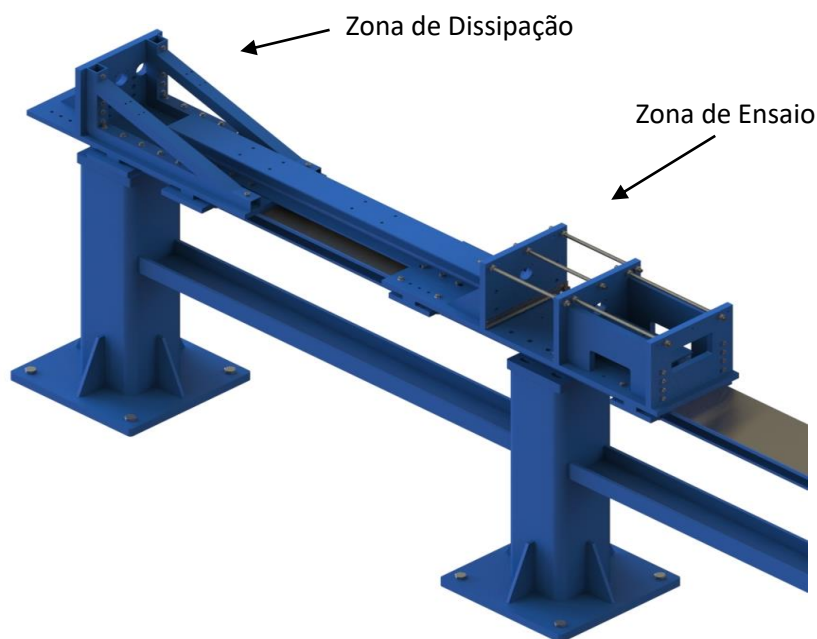


Figura 11 - Estrutura de suporte acoplada à estrutura base

3.1.2. Barra Incidente e Transmissora

Com o objetivo de criar um equipamento capaz de realizar ensaios de impacto em condições severas, optou-se por utilizar uma liga de titânio (Ti6Al4V) como material de construção das barras incidente e transmissora. Desta forma foi possível ter barras com uma maior resistência mecânica, a tensão de cedência à compressão de 970 MPa desta liga garante a permanência no regime elástico durante os ensaios com maiores cargas, até um máximo de força aplicada de 87,3 kN.

As duas barras de titânio, com comprimento de 500 mm para a barra incidente, 1500 mm para a transmissora e diâmetro idêntico de 30 mm, para a correta realização dos ensaios, devem estar alinhadas concentricamente e mover-se longitudinalmente com o menor atrito possível. De forma a garantir estes dois requisitos, instalaram-se rolamentos de bucha de esferas lineares, que suportam as barras, e possibilitam o ajuste do seu alinhamento, bem como permitem um movimento longitudinal com baixo atrito (COF = 0.001), providenciada por uma lubrificação correta utilizando lubrificante à base de silicone.

As condições severas verificadas na zona de compressão do provete, tais como altas velocidades de impacto e temperaturas elevadas, levaram à instalação de hastes de compressão, cujas extremidades funcionam como pratos de compressão, produzidas num material mais resistente que o titânio. Utilizaram-se hastes de carboneto de tungstênio em matriz de cobalto (WC-Co10%) com 18 mm de diâmetro, fabricadas recorrendo a eletroerosão por fio e retificação plana, de forma a garantir a planicidade entre as suas superfícies. Estas hastes de compressão foram fixadas a uma das extremidades de cada barra de titânio por interferência mecânica: o furo das barras de titânio cujo diâmetro era, à temperatura ambiente, ligeiramente inferior ao diâmetro das hastes, foi expandido por aquecimento. A expansão permitiu a introdução das hastes e, após arrefecimento, garantiu um aperto e fixação sólidos destas na extremidade das barras.

Um dos problemas verificados em ensaios preliminares foi a quebra precoce destas hastes, especialmente quando se realizavam ensaios de impacto em provetes de liga de titânio. Verificou-se que o provete tinha tendência em aderir à superfície das hastes, provocando a sua rotura. Numa primeira análise deste problema, o mecanismo de rotura poderia estar relacionado com o atrito entre as superfícies do provete e as hastes de carboneto. O polimento das superfícies de compressão das hastes e a utilização de lubrificante à base de grafite permitiu melhores resultados, exceto em provetes de liga de titânio.

No caso do titânio, a adesão das superfícies é explicada pela afinidade entre o titânio do provete e o cobalto da matriz da haste de carboneto de tungstênio. Esta situação, que acontece tipicamente quando se realiza corte por arranque de aparas no titânio com ferramentas deste tipo, deve-se ao facto de acontecer difusão de titânio na matriz de cobalto, promovida pelas elevadas temperaturas (Chandrashekar e Prasad, 2018).

A solução encontrada para este problema passou pela aplicação de revestimentos duros e autolubrificantes nas hastes. O fabricante Palbit realizou um revestimento PVD nano composto com tecnologia HiPIMS de TiAlSiN com 3 μm de espessura. Este revestimento reduz o coeficiente de atrito entre as superfícies (He *et al.*, 2016) e impede a difusão entre o titânio e o cobalto que forma a matriz das hastes (Bilger *et al.*, 2006). Após a aplicação deste revestimento a quebra das hastes de compressão não se voltou a verificar.

A realização de ensaios a altas temperaturas requer a utilização de um forno elétrico que envolve a zona de compressão. Este constrangimento levou à produção de dois conjuntos distintos de barras incidentes e transmissoras.

O primeiro conjunto, sendo a extremidade da barra incidente observável na figura 12(a), tem as extremidades das barras de titânio roscadas, permitindo a instalação de sensores indutivos de posição, e apresentam hastes de compressão com um comprimento saliente de 10 mm; este é o conjunto preferencial para a realização de ensaios à temperatura ambiente, pois o reduzido comprimento saliente das hastes de compressão também diminui o risco de fratura das mesmas.

O segundo conjunto de hastes de compressão tem um comprimento saliente de 80 mm, como mostra a figura 12(b), de forma a estarem acomodadas no interior do forno elétrico durante os ensaios; este conjunto é apenas utilizado ao realizar ensaios de temperatura elevada, pois existe um maior risco de fratura das hastes de carboneto devido à sua esbelteza. Neste caso, os sensores indutivos de posição não podem ser instalados, tendo sido desenvolvido um sistema alternativo de medição do deslocamento com recurso a potenciômetros que será detalhado na secção 3.2.1 deste documento.



Figura 12 – (a) Extremidade da barra incidente com haste compressora de 10 mm; (b) Extremidade da barra incidente com haste compressora de 80 mm

3.1.3. Dissipador de Energia

Uma vez que este equipamento foi projetado com o objetivo de realizar ensaios de compressão em condições severas, foi necessário encontrar soluções para dissipar a energia quando se realizavam ensaios de impacto com elevada velocidade de deformação. Para tal, como se pode visualizar na figura 13, foram instalados na zona de dissipação do equipamento dois componentes: bloco dissipador de energia e um sistema de amortecimento. Ambos os componentes foram adicionados com o objetivo de transferir a quantidade de movimento originada pelo ensaio, reduzindo a intensidade da onda de pressão que é refletida no final da barra transmissora.

O bloco dissipador, fabricado em aço com uma massa de 25 kg, está em contacto com a extremidade da barra transmissora, absorvendo parte da energia do ensaio de impacto. A introdução do sistema de amortecimento, constituído por dois amortecedores com uma carga de 80 N fixos à barra transmissora e ao rolamento de bucha linear, permite, por um lado, reduzir a intensidade do ressalto da mesma quando se dá a transferência de energia para o bloco dissipador, e por outro lado, assegurar o encosto da barra ao bloco dissipador por via da carga estática aplicada pelos amortecedores. Instalaram-se também anéis de retenção na barra transmissora para, no caso da falha dos amortecedores, impedirem um ressalto excessivo que danifique os componentes.

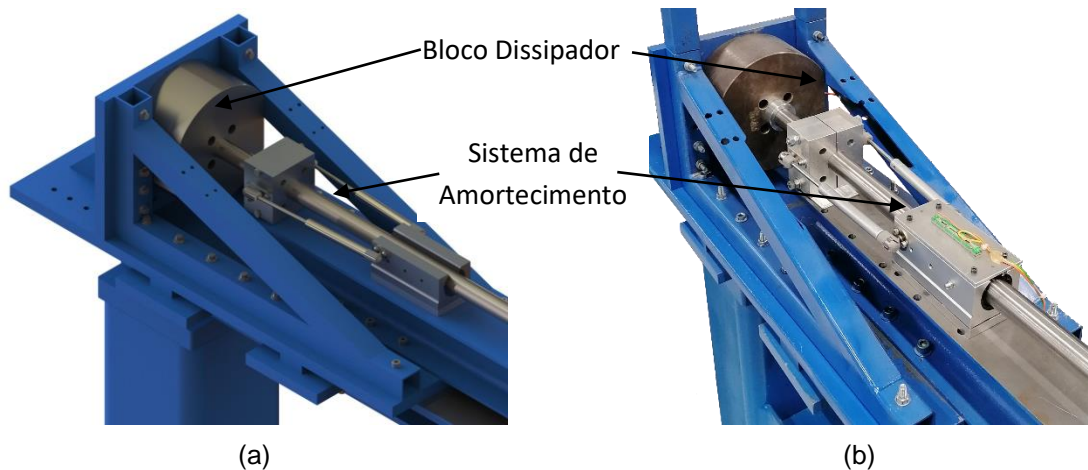


Figura 13 – (a) Modelo CAD dos elementos de dissipação instalados no equipamento; (b) Instalação final dos elementos de dissipação.

3.1.4. Canhão Pneumático

Para a realização de ensaios de compressão a altas velocidades de deformação optou-se por instalar no equipamento um canhão pneumático. Na figura 14 pode ser observada a máquina de impacto a alta velocidade com o canhão pneumático instalado.

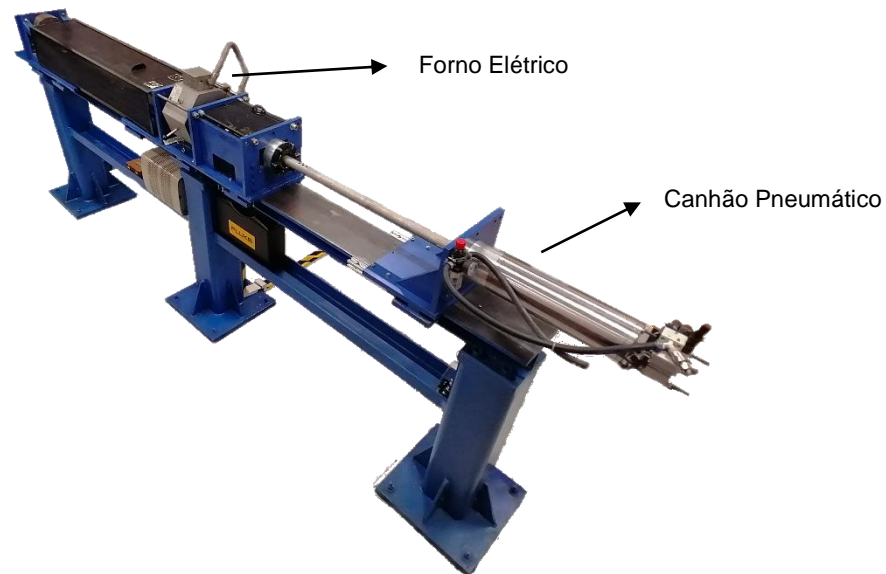


Figura 14 – Máquina de ensaios na configuração de alta velocidade (canhão pneumático instalado) e elevada temperatura (forno elétrico instalado).

Este dispositivo, desenvolvido por Afonso Gregório (2017) no seu trabalho de dissertação de mestrado no LabM3, é composto por uma câmara de pressão e um cano que guia o projétil. O ar pressurizado na câmara de pressão escoia para o cano com o acionamento de uma válvula de escape rápido, impulsionando o projétil até velocidades balísticas. Relativamente à energia disponível para o ensaio

de compressão, a mesma está relacionada com a energia cinética, E_c , sendo esta em função da velocidade e da massa do projétil (eq, 14):

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (14)$$

Uma vez que o tanque tem um volume constante, a energia armazenada é exclusivamente função da pressão, que pode ser modificada através de uma válvula reguladora de pressão instalada no dispositivo, sendo esta energia transferida para o projétil. O projétil irá adquirir mais velocidade quanto menor a massa. Posto isto, existe um conjunto de projéteis com diferentes massas e tamanhos, variando entre 250 g e 3000 g, permitindo assim a utilização de um leque variado de velocidades.

De acordo com David Campos (2020), os ensaios experimentais realizados na sua dissertação de mestrado com recurso ao sensor de velocidade desenvolvido pelo mesmo, permitiram obter um modelo, que relaciona a pressão da câmara com a velocidade de saída dos diferentes projéteis, presente no gráfico da figura 15, assim como o da figura 16, que relaciona a pressão com a energia cinética do projétil.

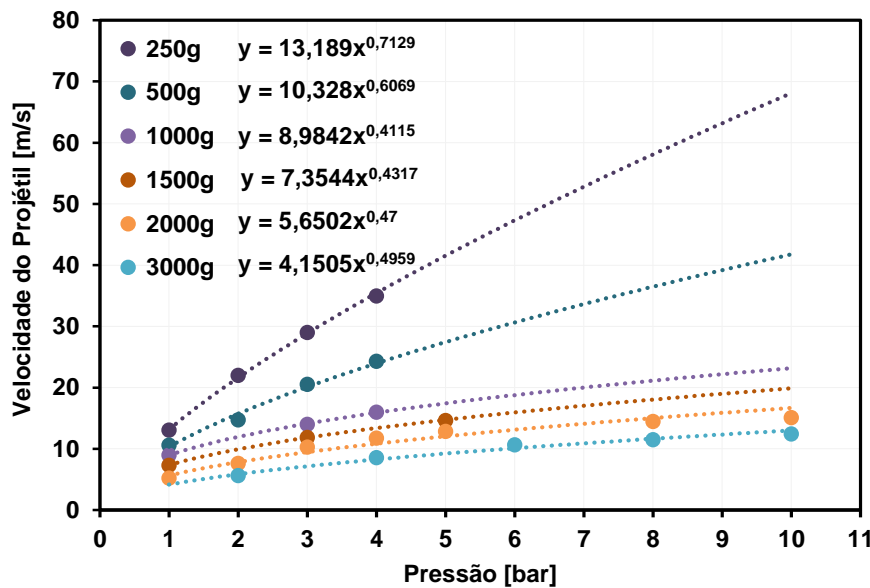


Figura 15 - Gráfico da velocidade de projétil em função da pressão no tanque utilizando projéteis de diferentes massas (Campos, 2020)

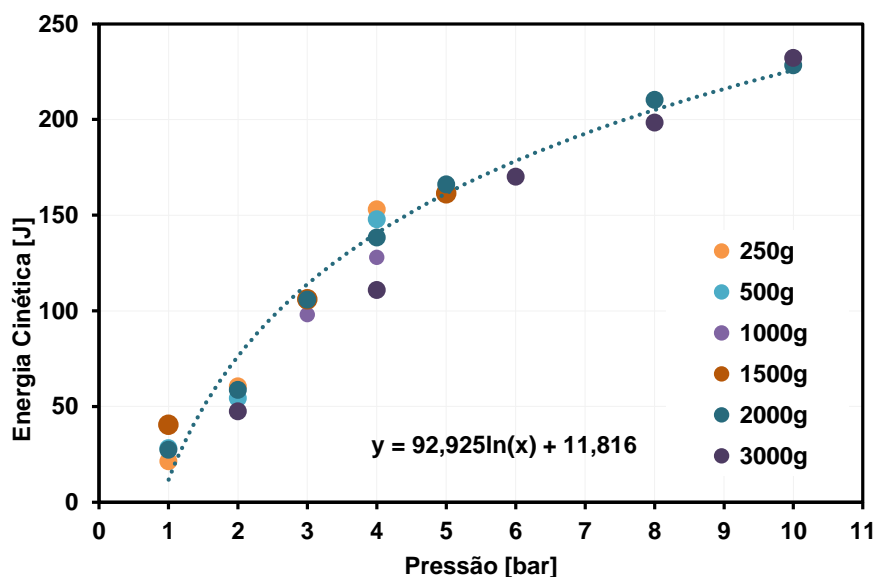


Figura 16 - Energia cinética dos projéteis com diferentes massas em função da pressão do ar no tanque (Campos, 2020)

3.1.5. Atuador Hidráulico

Os ensaios de compressão quase-estáticos foram feitos com recurso a um atuador hidráulico. Este atuador foi instalado na estrutura da zona de ensaio, representado na figura 17, e quando acionado empurra a barra incidente, realizando assim a compressão do provete. Dependendo das particularidades do ensaio a realizar, para acionar o atuador hidráulico utilizaram-se dois tipos de bombas hidráulicas: bomba hidráulica manual e bomba hidropneumática de pedal.

Utiliza-se a bomba hidráulica manual quando o controlo da carga aplicada é um fator crítico no ensaio, por exemplo em materiais com resistência mecânica muito baixa, ou existe a necessidade de realizar compressões sucessivas do mesmo provete, pois o seu funcionamento mais lento permite um melhor controlo tanto da carga aplicada como da altura instantânea do provete. Por outro lado, o funcionamento mais rápido da bomba hidropneumática de pedal não confere a precisão e controlo da bomba manual, mas, por motivos práticos, este equipamento é utilizado em provetes de materiais com elevada resistência mecânica, pois permite atingir cargas mais elevadas num espaço de tempo inferior.

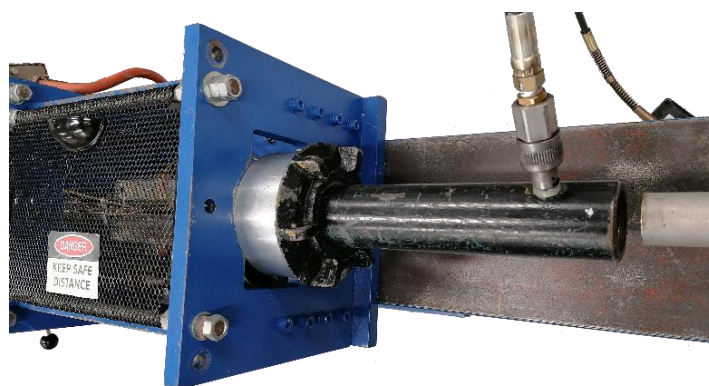


Figura 17 - Instalação do atuador hidráulico no equipamento.

3.1.6. Forno Elétrico

Para realizar os ensaios de compressão uniaxial a altas temperaturas instalou-se um forno elétrico na zona de ensaio, envolvendo as hastes de compressão. Este forno, observável na figura 18(a), consiste numa câmara revestida com material refratário onde se encontram as resistências elétricas de aquecimento, com a particularidade de ter um furo passante nas laterais. Este equipamento foi munido de um conjunto de guias, semelhantes a uma gaveta, facilitando a sua montagem na zona de ensaio da máquina. Na figura 18(b) pode ser observado o forno aberto, durante um ensaio de compressão quase-estático a alta temperatura. É de notar a utilização de folhas de material isolante e refletor entre as barras de titânio e os furos do forno para evitar a perda de calor por estas aberturas e proteger os rolamentos de bucha.

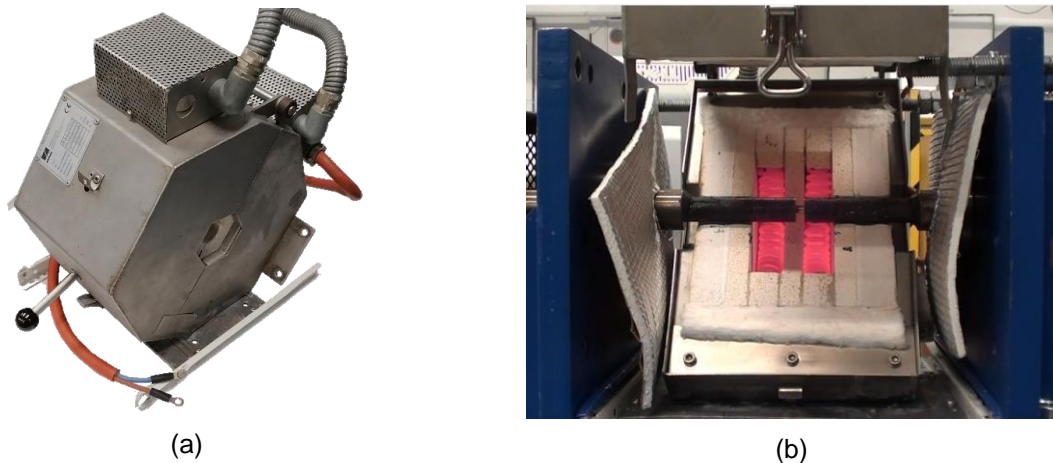


Figura 18 – (a) Forno elétrico utilizado, de notar o furo passante na lateral; (b) Forno instalado na zona de ensaio (aberto).

As especificações técnicas do forno, presentes na tabela 4, levaram ao projeto de um circuito elétrico necessário para o seu funcionamento. A rede elétrica do LabM3 fornece uma tensão de 230 V, logo existe a necessidade de reduzir esta tensão para os 25 V requeridos pelo forno. Optou-se pela instalação de um autotransformador variável (Variac) que, para além de reduzir a tensão, permite variar a mesma manualmente. Para operar corretamente o Variac, este foi conectado a um transformador de forma a garantir um isolamento galvânico e impedir que o disjuntor diferencial da rede elétrica do LabM3 dispare.

Tabela 4 - Especificações técnicas do forno elétrico

Forno Könn GmbH, tipo STE12SO	
Temperatura Nominal (°C)	1000
Tensão Elétrica Nominal (V/Hz)	25
Potência Nominal (W)	750
Corrente Nominal (A)	30
Resistência Nominal (Ω)	1

O transformador instalado converte tensão de 230 V para 50 V, logo o Variac vai permitir variar entre 0 V a 50 V a tensão que chega ao forno. Como referido anteriormente, a tensão nominal do forno é de 25 V, então, para evitar que, por acidente, a tensão à saída do Variac ultrapasse os 25 V e danifique a resistência do forno, foi instalado um disjuntor de 16 A. De acordo com a lei de Ohm:

$$U = R \times I \quad (15)$$

em que R e I correspondem, respetivamente, ao valor de resistência (Ohms) e ao valor da corrente (Ampere). Aplicando o valor da corrente máxima, 16 A, e a resistência do forno, 1 Ω , obtém-se o valor de tensão máxima que se pode seleccionar no Variac sem que dispare o disjuntor instalado, 16 V.

A medição da temperatura foi realizada de três formas distintas: com sonda termopar, canetas indicadoras de temperatura e pistola pirométrica, observáveis respetivamente na figura 19(a), (b) e (c). A sonda termopar, colocada num orifício presente no topo da estrutura do forno, permitia a medição da temperatura do ar no seu interior; esta temperatura é apenas uma aproximação da temperatura real do provete, e servia apenas como um indicador, pois este vai aquecer mais rápido por condução devido ao contacto direto com as hastes compressoras. Posto isto, e devido à reduzida massa do provete, concluiu-se que a temperatura do mesmo seria aproximadamente a mesma que a das hastes compressoras. Para facilitar a leitura da temperatura nas hastes foram cobertas com uma fina camada de silicone negro resistente a alta temperatura, à exceção dos pratos compressores, evitando assim a reflexão do laser da pistola pirométrica e, devido à rugosidade desta camada, permitir às canetas indicadoras de temperatura pintar mais facilmente a superfície.

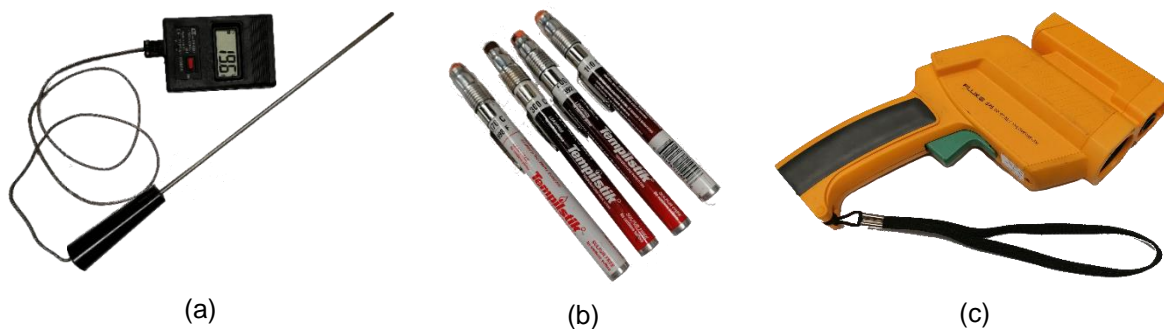


Figura 19 – (a) Sonda termopar; (b) Canetas indicadoras; (c) Pistola pirométrica.

Com estes instrumentos de medida foi possível registar a temperatura em dois pontos de interesse, o interior do forno e a superfície das hastes de compressão, durante intervalos de tempo regulares. A partir do gráfico da figura 20, que apresenta os valores registados em função do tempo, é possível determinar que a temperatura máxima que o interior do forno pode atingir, utilizando uma corrente de 16 A, tende para aproximadamente 750°C. Já nas hastes de compressão, a temperatura sobe mais lentamente, atingindo os 600°C após 120 minutos de funcionamento.

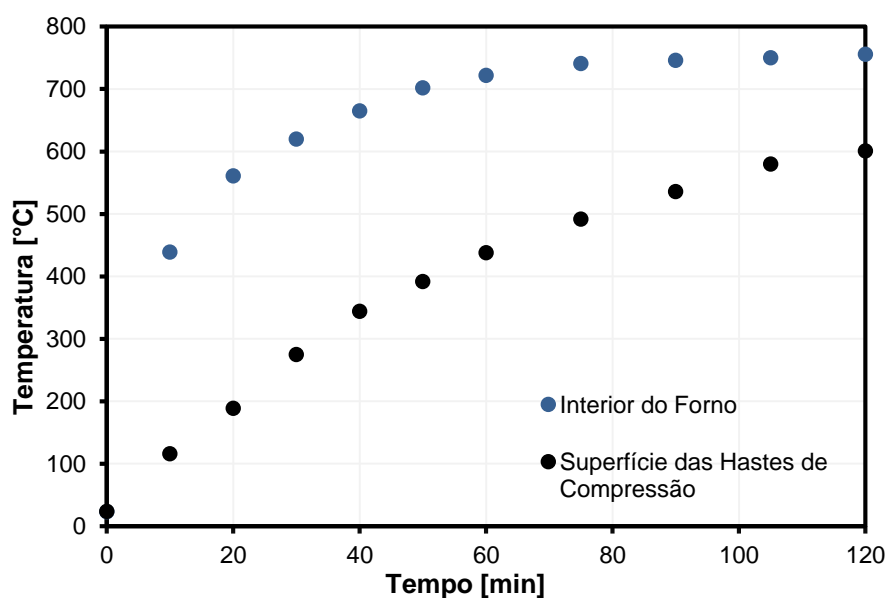


Figura 20 – Gráfico de temperatura registada no interior do forno e na superfície das hastes de compressão ao longo do tempo.

3.1.7. Câmara Criogénica

Instalou-se uma câmara criogénica, fabricada em poliestireno expandido, na zona de ensaios, aproveitando o conceito do forno elétrico, permitindo também a realização de ensaios a temperaturas abaixo da temperatura ambiente. Tal foi conseguido com a deposição de um líquido, ou sólido, a baixas temperaturas na câmara criogénica, por exemplo azoto líquido ou dióxido de carbono sólido. Na figura 21 observa-se a câmara criogénica instalada na zona de ensaio, é possível verificar a existência de dois furos passantes nas laterais que permitem a introdução das hastes de compressão. O nível de líquido ou sólido presente na câmara criogénica resulta em diferentes temperaturas de ensaio, controladas com recurso à pistola pirométrica, podendo mesmo envolver as hastes de compressão e o provete.

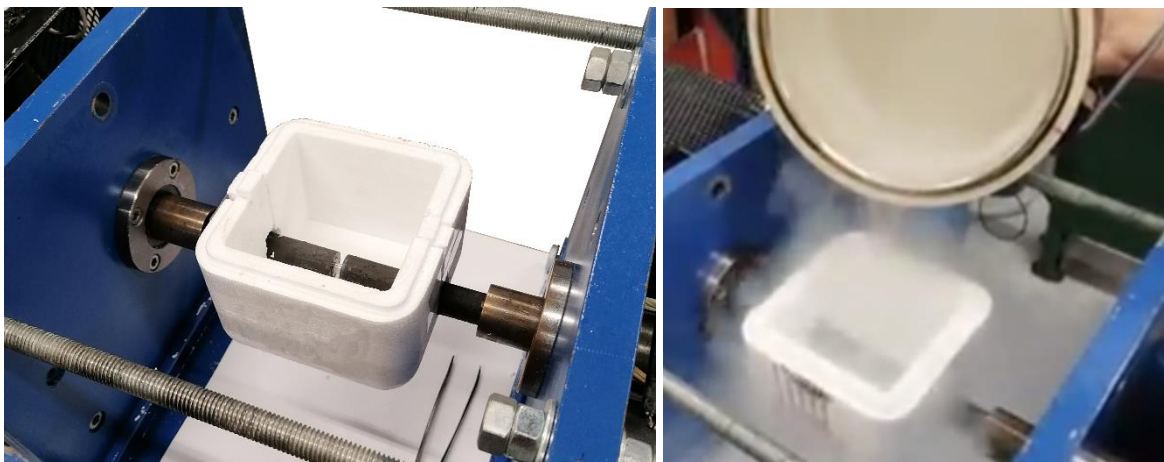


Figura 21 – (a) Câmara criogénica em poliestireno expandido instalada na zona de ensaio; (b) Colocação do Azoto líquido na câmara..

3.2. Aquisição de Dados

À estrutura e componentes mecânicos do equipamento é necessário implementar um conjunto de sensores e equipamento eletrónico que permitam a monitorização e registo dos dados físicos necessários para a caracterização dos materiais ensaiados. As grandezas físicas necessárias à obtenção das curvas tensão-extensão características do material, para além da altura e diâmetro inicial do provete, são: a altura instantânea do provete e a força aplicada correspondente. Para estas medições desenvolveram-se sensores de deslocamento e células de carga. Além destes elementos, instalou-se mais um dispositivo de aquisição de dados, uma câmara de alta velocidade, importantes para a compreensão, não só do comportamento dos materiais ensaiados, como também do próprio equipamento.

3.2.1. Sensores de Deslocamento

O método de medição da altura instantânea do provete durante o ensaio, ou seja, a distância entre pratos de compressão, varia consoante o conjunto de barras incidente e transmissora utilizado. Nos

ensaios à temperatura ambiente utilizou-se um sensor indutivo, já nos ensaios a temperaturas elevadas, dados os constrangimentos impostos pelo forno elétrico, foi utilizado um sistema de potenciômetros lineares.

Sensores Indutivos

Os sensores indutivos desenvolvidos por Pedro Santos (2019), figura 22(a), baseiam-se no princípio de indução eletromagnética entre bobines. A corrente imposta numa bobine, neste caso a bobine emissora, gera um campo eletromagnético que irá induzir uma corrente elétrica na bobine oposta, recetora. A distância entre espiras faz variar a corrente elétrica induzida. Com base neste conceito e mantendo uma tensão constante na bobine emissora, é possível determinar a distância entre bobines através da tensão medida na bobine recetora.

Para instalar estes sensores indutivos nas extremidades previamente roscadas das barras incidente e transmissora, foram fabricados adaptadores roscados onde foram colados os sensores com recurso a resina epoxídica. Na figura 22(b) pode ser observado o modelo CAD da montagem final dos sensores.

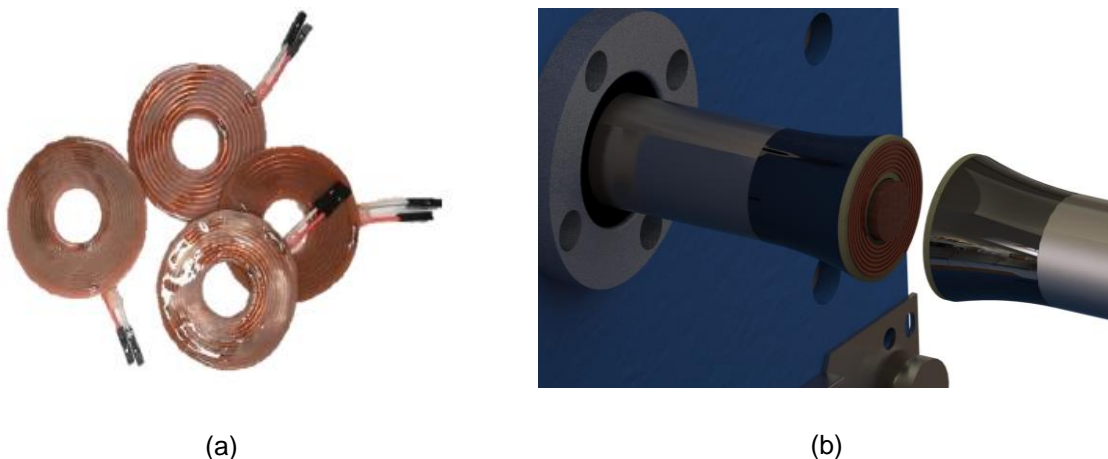


Figura 22 – (a) Bobines dos sensores indutivos desenvolvidos por Pedro Santos (2019); (b) Modelo CAD da instalação dos sensores nas barras incidente e emissora.

A bobine emissora foi ligada a um gerador de funções AIM&TTi (TG315). Uma vez que o sinal enviado pelo gerador de funções é um sinal de corrente alternada (AC) e a placa de aquisição de dados recebe sinais de corrente contínua (DC), é necessário a utilização de um retificador para traduzir o sinal. Inicialmente foi utilizado o retificador de sinal desenvolvido por Pedro Santos (2019), que, tal como pode ser visto no esquema da figura 23(a), era constituído por uma ponte retificadora de 4 díodos semicondutores em silício, que faz a transformação do sinal, e um condensador de 1 nF à saída que faz a suavização do sinal. A utilização deste retificador foi interrompida devido à lentidão da resposta do sinal, provocada pelo condensador utilizado, incompatível com a realização de ensaios a alta velocidade. Desenvolveu-se um novo retificador com um condensador que tivesse um compromisso entre a estabilidade final do sinal e o atraso da resposta no tempo; optou-se por uma ponte retificadora comercial MB6M, equipada com um condensador de 13 pF (figura 23(b)). A resposta no tempo melhorou, sendo apenas necessário fazer um pequeno ajuste temporal no tratamento de dados.

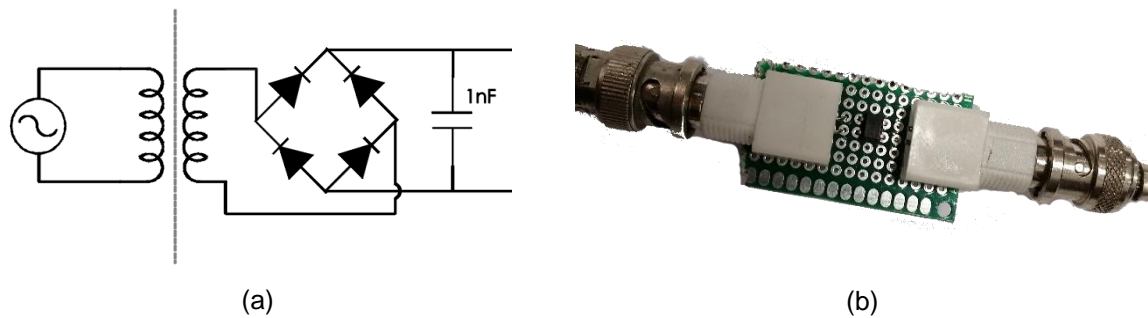


Figura 23 – (a) Circuito elétrico da ponte retificadora (Santos, 2019); (b) Nova ponte retificadora desenvolvida.

Potenciômetros

O forno elétrico instalado na zona de ensaio impede a utilização dos sensores indutivos descritos anteriormente. Foi desenvolvida uma solução alternativa recorrendo a potenciômetros lineares, do tipo apresentado na figura 24(a). A montagem destes dispositivos foi feita aproveitando a estrutura das buchas de rolamentos lineares que suportam as barras transmissora e incidente. Tal como pode ser visto na figura 24(b), foi aparafusada à bucha uma placa de alumínio que permite a fixação do potenciômetro, fazendo com que a patilha encaixe numa caixa previamente aberta na barra. Foi adicionada resina epoxídica a esta ligação entre a patilha e a barra para impedir que se liberte com a violência dos impactos. Instalaram-se um total de 3 potenciômetros: 1 na barra incidente e 2 na barra transmissora; no subcapítulo 3.3 descreve-se em detalhe a utilidade dos mesmos.

Os potenciômetros são alimentados com uma tensão de 5 V através de uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC). O movimento da patilha do potenciômetro faz variar a sua resistência, alterando o valor da tensão registada à saída do mesmo. Neste tipo de montagem não é necessária a utilização do retificador uma vez que o potenciômetro funciona com corrente DC, podendo ser ligado diretamente à placa de aquisição de dados (DAQ).

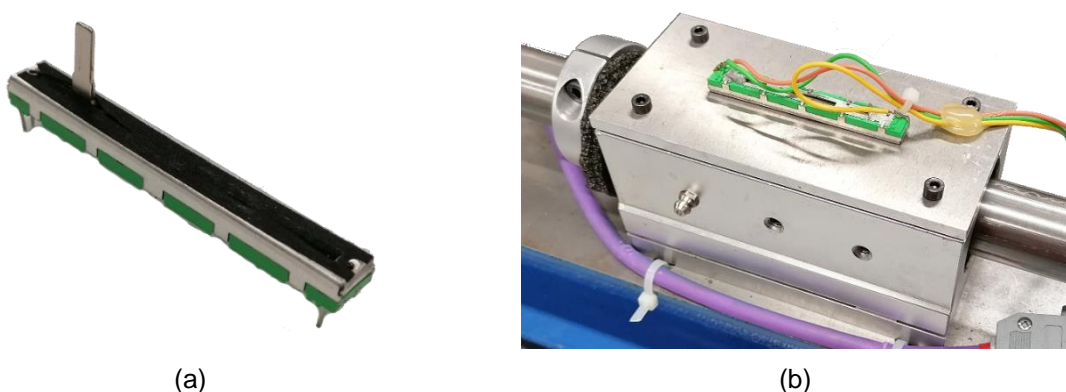


Figura 24 – (a) Potenciômetro linear utilizado. (b) Exemplo da montagem do potenciômetro nas buchas lineares, note-se que a patilha está fixa na caixa aberta na barra de titânio não sendo visível nesta perspetiva.

A curva de calibração do potenciômetro é realizada com recurso às mesmas amostras calibradas em alumínio utilizadas no sistema de sensores indutivos. A gama de calibração tem em consideração a altura inicial e final dos provetes utilizados regularmente nos ensaios, antes e após compressão,

eliminando procedimentos de extrapolação das curvas de calibração que possam comprometer a qualidade dos dados experimentais registados.

Visto que este sistema de medição do deslocamento pode ser instalado nos dois conjuntos de barras incidentes e transmissoras e que o nível de confiança na curva de calibração do mesmo é elevada, foi possível utilizá-lo para calibrar os sensores indutivos de uma forma mais precisa.

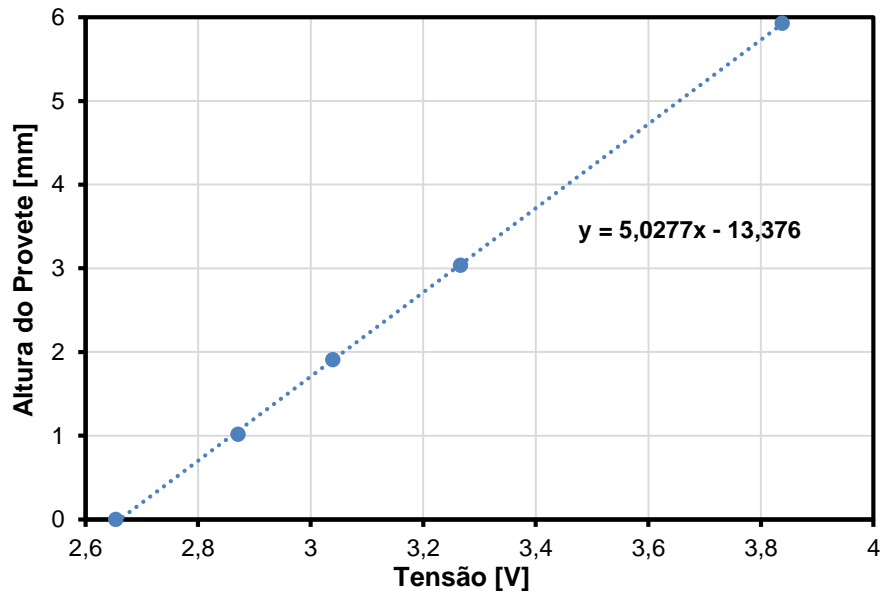
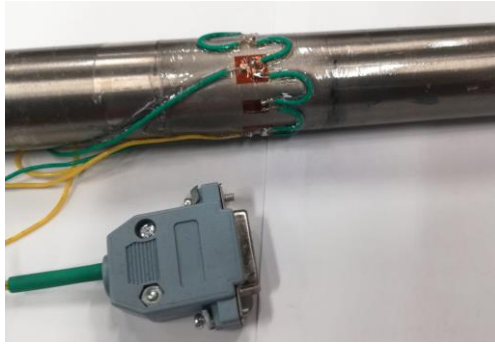


Figura 25 - Curva de calibração dos potenciômetros utilizando amostras calibradas.

3.2.2. Célula de Carga

A força é monitorizada por uma célula de carga extensométrica, do tipo de ponte completa de Wheatstone, instalada na barra transmissora (figura 26(a)). Quando a célula de carga está sujeita a uma determinada carga, a resistência dos extensómetros muda, o que, por sua vez, permite o cálculo da força exercida. Dado que são utilizadas barras diferentes nas duas configurações do equipamento foi necessário desenvolver duas células de carga (uma em cada barra).

Tendo em conta que a instalação dos extensómetros nas barras transmissoras deve ser cuidada, a superfície da barra foi previamente lixada e limpa com acetona. Procedeu-se então à colagem dos extensómetros com recurso a cola de cianoacrilato. Após a fixação dos cabos elétricos aos terminais dos extensómetros estes foram revestidos com resina epoxídica de forma a proteger a montagem.



(a)



(b)

Figura 26 – (a) Célula de carga extensométrica do tipo de ponte completa de Wheatstone; (b) Amplificador de sinal VISHAY 2310B.

Uma vez que o valor de tensão enviada pela célula de carga é muito baixo, esta foi conectada a um sistema de amplificação e condicionamento de sinal (figura 26(b)). A amplificação do sinal foi feita através de um amplificador VISHAY, modelo 2310B. O amplificador foi configurado com um ganho de 500, tendo sido utilizado o máximo valor de excitação de 10 V. É importante referir que existe a necessidade de confirmar periodicamente o valor da excitação do amplificador uma vez que valores elevados do ganho tornam o sistema de aquisição de dados muito sensível a perturbações externas.

A curva de calibração da célula de carga foi confirmada através de uma célula de carga comercial. Como é possível observar na figura 27, para se efetuar a calibração da célula de carga do equipamento colocam-se dois discos, fabricados em alumínio, entre pratos, aplicando-se, depois, a força. Uma vez que a calibração da célula de carga comercial é fornecida pelo fabricante, foi apenas necessário fazer a relação entre as duas células de carga através dos dados adquiridos durante a aplicação de força em ambas as células de carga.

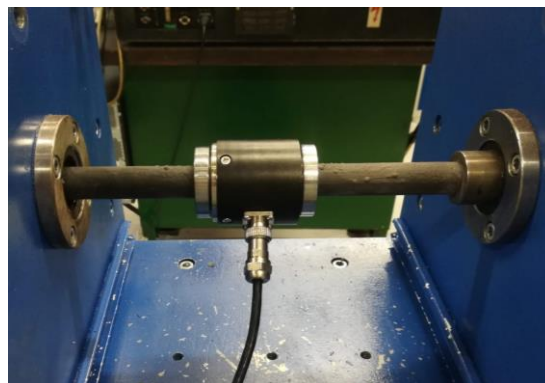


Figura 27 - Montagem da célula de carga comercial durante a calibração da célula de carga desenvolvida.

3.2.3. Câmara de Alta Velocidade

A velocidade de compressão dos provetes durante os ensaios dinâmicos é incompatível com uma análise do seu comportamento à vista desarmada. Foi então instalada uma câmara de gravação a alta velocidade, com capacidade de captura de até 6000 imagens por segundo com uma resolução de 100 por 50 pixéis.

Numa primeira fase esta câmara estava instalada num suporte fixo à máquina na zona de ensaio. Esta solução mostrou-se ineficaz, tanto para a facilidade de uso do equipamento como para a qualidade das imagens capturadas, pois ao estar fixa à máquina as vibrações produzidas pelo impacto a alta velocidade afetavam a gravação.

Para resolver o problema descrito foi desenvolvido um suporte para a câmara independente da máquina de ensaios. Como pode ser visto na figura 28, foi maquinado um suporte de alumínio para a câmara que possibilita a sua fixação a um tripé e instalação um aro de luz que ilumina a zona de ensaio. O aquecimento excessivo da câmara de alta velocidade foi combatido com a instalação de um dissipador com alhetas de alumínio dotado de uma ventoinha de arrefecimento.



Figura 28 - Montagem da câmara de alta velocidade

3.2.4. Sistema de Aquisição de Dados

Um sistema de aquisição de dados é constituído por um conversor (ADC) que converte sinais de grandezas físicas em sinais elétricos (tensões ou correntes). Neste equipamento foi instalada uma placa de aquisição de dados do fabricante National Instruments, modelo PCI 6115, que permite a aquisição simultânea de 4 canais até 10 MHz, 16MS, 12bits até 42V. Esta placa foi conectada por cabo, bidireccionalmente, a uma caixa de ligações do fabricante National Instruments, modelo BNC-2120, que permite a utilização dos cabos coaxiais vindos dos sensores de deslocamento e do sensor de força (figura 29).



Figura 29 - Caixa de conexões National Instruments BNC-2120.

A placa de aquisição de dados por si só não tem a capacidade para processar os sinais, apenas recebe os sinais elétricos e entrega um sinal digital à saída. Por isso, foi desenvolvido um programa em Labview que permite o controlo da placa e o registo dos dados. Neste programa foi criada uma interface gráfica que permitiu ao utilizador a visualização das variáveis do processo em tempo real (figura 30). Além disso, este programa regista simultaneamente o tempo, o deslocamento e a força num ficheiro ASCII.

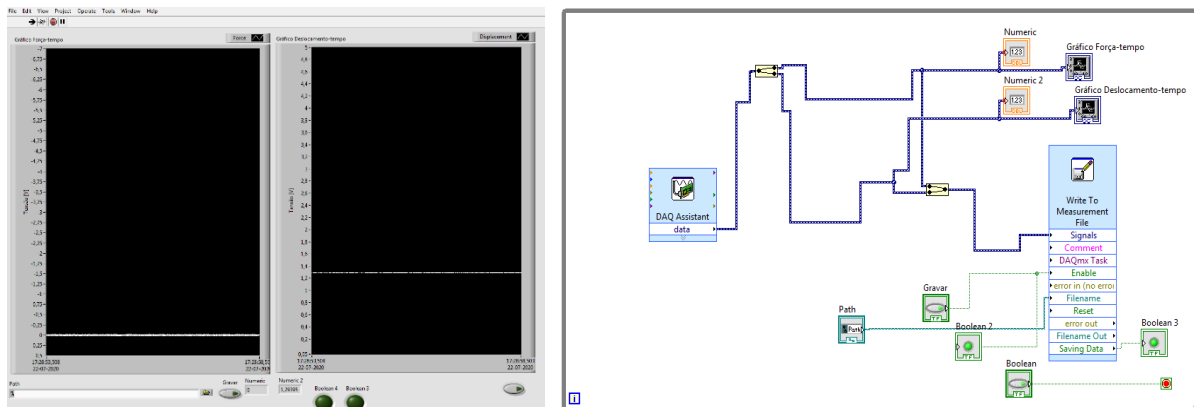


Figura 30 – Interface gráfica do software de aquisição de dados Labview.

3.3. Tratamento de Dados

A construção do equipamento e a realização de ensaios são somente os primeiros passos para a obtenção de resultados válidos. A transformação dos sinais elétricos, registados a partir da instrumentação, nos valores físicos pretendidos nem sempre é direta; torna-se por isso necessário um tratamento cuidadoso dos dados obtidos considerando as características do equipamento e dos sensores. Para tornar este tratamento o mais célere e padronizado possível, foi criada uma folha de cálculo no software Excel que permite a análise e tratamento dos dados registados, desde os sinais elétricos até às curvas finais de tensão-extensão do material ensaiado. Essencialmente, os dados necessários para obtenção dos valores de tensão e extensão em cada instante da compressão do provete cilíndrico são: a altura instantânea do mesmo, dada pela distância entre pratos de compressão; a força aplicada, dada pelo sinal da célula de carga e a altura e diâmetro iniciais do provete.

As diferentes configurações do equipamento implicam diferentes processos de tratamento de dados. No caso dos ensaios de compressão quase-estáticos à temperatura ambiente, utilizando as barras equipadas com os sensores indutivos, o tratamento de dados passa somente pela aplicação de um filtro de Butterworth de quarta ordem de forma a remover o ruído provocado pela interferência dos equipamentos elétricos presentes no laboratório.

No desenvolvimento dos sensores indutivos presente na secção 3.2.1, é referido o atraso temporal provocado pelo condensador presente na montagem do retificador de sinal; este atraso, ainda que reduzido com o desenvolvimento do novo retificador, continua presente. Na folha de cálculo desenvolvida foi criado um sistema de correção que permite sincronizar o sinal dos sensores indutivos com o sinal proveniente da célula de carga. Esta correção só é necessária nos ensaios de impacto, e não nos quase-estáticos, pois a velocidade de deformação é tão elevada que a mínima falha na sincronização da aquisição de dados vai afetar os resultados finais obtidos.

Como descrito nos subcapítulos anteriores, a utilização do forno elétrico, e os constrangimentos que este traz, implica a utilização de um sistema de medição do deslocamento alternativo. Ao contrário dos sensores indutivos, cujo sinal elétrico pode ser traduzido diretamente numa distância entre pratos de compressão (dada a sua localização preferencial, diretamente na zona dos ensaios) a utilização dos potenciômetros lineares implica o conhecimento da resposta do equipamento às solicitações para ser determinada esta mesma distância.

A análise do comportamento do equipamento nos ensaios de compressão quase-estáticos a elevada temperatura revelou que a deformação elástica da barra transmissora, visível à vista desarmada, fazia com que o deslocamento obtido a partir do potenciómetro instalado na barra incidente não correspondesse à distância entre pratos real. O esquema da figura 31 identifica a localização do potenciómetro (D1) instalado na barra incidente. A estratégia para a análise deste tipo de ensaio passa pela realização de um ensaio de compressão em vazio, no qual se obtém a relação entre a força aplicada e o deslocamento do potenciómetro D1; esta relação permite obter um fator que corrige o deslocamento D1 consoante a força que se aplica, eliminando a contribuição da elasticidade das barras e do equipamento.

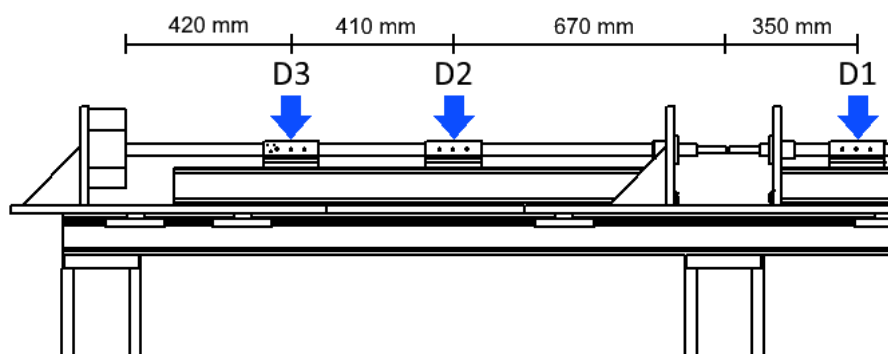


Figura 31 - Esquema da localização nas barras dos potenciómetros D1, D2 e D3.

Os dados obtidos nos ensaios de impacto, a alta velocidade e temperatura, não puderam ser tratados utilizando a estratégia descrita anteriormente, pois o comportamento dinâmico do equipamento a alta velocidade revelou ser difícil de analisar. Em primeiro lugar, o sinal proveniente da célula de carga apresenta uma assinatura característica a partir de um determinado instante, esquematizado no gráfico da figura 32(a), algo que não se esperava. Determinou-se que esta assinatura provinha da reflexão da onda de pressão na barra transmissora, que ao chegar ao final do comprimento da barra, reflete e volta a passar na célula de carga, deixando esta barra num estado de vibração; foi possível chegar a esta conclusão pois, sabendo que a velocidade do som no titânio é aproximadamente 6000 m/s, o instante em que se inicia esta assinatura corresponde ao tempo que a onda de pressão demora a percorrer a distância entre a célula de carga e o fim da barra de titânio e voltar, cerca de 0,3 ms. A correção deste sinal passou pela aplicação de um filtro de Fourier; a assinatura tem uma frequência característica, pelo que é possível atenuá-la e diminuir a sua influência no sinal.

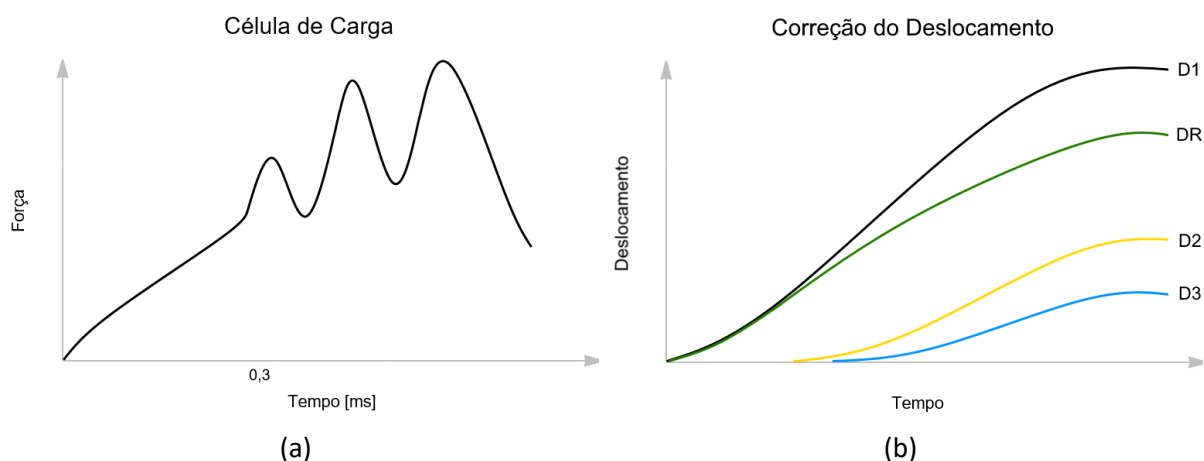


Figura 32 – Gráficos exemplificativos (a) da força registada no tempo e (b) dos deslocamentos dos potenciômetros D1, D2 e D3 no tempo e o deslocamento relativo dos pratos compressores, DR.

A correção do deslocamento com recurso à força registada durante os ensaios de impacto a alta velocidade e elevada temperatura, tal como aplicada nos ensaios quase-estáticos nas mesmas condições de temperatura, originou resultados que não correspondiam à realidade. Os sinais de deslocamento exemplificados na figura 32(b), originados pelos potenciômetros D2 e D3 instalados na barra transmissora (figura 31), e a visualização das imagens da câmara de alta velocidade incluídas no anexo A2, permitiu determinar que o comportamento elástico do equipamento não ocorre de forma previsível como nos ensaios quase-estáticos.

Neste caso, a correção foi realizada tendo em conta o deslocamento dos potenciômetros D2 e D3, pois, sabendo a sua posição na barra transmissora, pode-se extrapolar o deslocamento do prato de compressão da mesma e subtrai-lo ao deslocamento de D1, obtendo-se assim o deslocamento relativo entre os pratos de compressão, DR, e conseqüentemente a altura instantânea do provete durante o ensaio.

3.4. Materiais e Plano de Ensaios

O plano de ensaios da presente investigação consistiu na realização de ensaios de compressão uniaxial utilizando o equipamento desenvolvido, sendo este dividido em três fases. A primeira fase consiste na realização de ensaios de validação do equipamento. Para tal utilizaram-se provetes cilíndricos em liga de alumínio AA1050-O (99,5% wt), recozido a 450°C e arrefecido ao ar, com 6 mm de altura e 6 mm de diâmetro, ilustrados na figura 33, procurando reproduzir os resultados experimentais obtidos no estudo de Alcino Reis (2016), no que diz respeito aos ensaios quase-estáticos, e os resultados dos ensaios dinâmicos do artigo publicado por Tiago dos Santos et al. (2017). Numa segunda fase, de forma a testar progressivamente as capacidades do equipamento, optou-se por realizar ensaios num material que não tivesse uma elevada resistência mecânica. Para tal foram utilizados provetes cilíndricos em liga de alumínio AA 5083-H111, com 6 mm de altura e 6 mm de diâmetro, ilustrados na figura 32, provenientes de uma placa com 8 mm de espessura, obtidos com recurso a eletroerosão por fio e facejamento no torno. A composição química desta liga de alumínio está presente na tabela 5.

Tabela 5 - Elementos de liga do alumínio AA 5083-H111

Elemento	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn	Cr	Ti	Al
% massa	0.4 - 1.0	0.4	0.1	4.0 - 4.9	0 - 0.4	0 - 0.1	0.05 - 0.25	0.05 - 0.25	Bal.

Este alumínio, muito utilizado em aplicações navais e no fabrico de componentes em contacto com químicos devido às suas boas propriedades mecânicas (tabela 6), facilidade em realizar soldadura e resistência à corrosão, foi escolhido tendo em conta as propriedades mecânicas e a disponibilidade no laboratório. Ao ser um material com uma resistência mecânica relativamente baixa, em comparação ao aço, permite realizar a sua compressão com cargas inferiores e, nos ensaios dinâmicos, não serão necessárias utilizar altas pressões no canhão pneumático, que conseqüentemente levariam a altas velocidades do projétil.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA 5083-H111 a 25°C.

Tensão de Cedência (0,2%)	115 MPa
Tensão de Rotura	270 – 345 MPa
Módulo de Elasticidade	72 GPa
Alongamento na Rotura	Min. 12%

Ainda na segunda fase de ensaios, optou-se pela introdução do aço AISI 1045 (DIN Ck45) tendo em conta a sua vasta utilização em engenharia. Este material, tendo uma resistência mecânica superior à liga AA 5083-H111, estando as suas propriedades mecânicas descritas na tabela 7, serve como prova final para o equipamento antes de realizar ensaios em materiais de elevada resistência, como é o caso do aço maraging 300. Os provetes cilíndricos de AISI 1045 têm 4 mm de altura e 4 mm de diâmetro e foram obtidos por torneamento de um varão de material comercial.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1045 a 25°C.

Tensão de Cedência (0,2%)	450 MPa
Tensão de Ruptura	570 – 700 MPa
Módulo de Elasticidade	206 GPa
Alongamento na Ruptura	Min. 12%

Na terceira e última fase de ensaios foram testados provetes em aço maraging 300, sendo este o desafio proposto para o equipamento de ensaios desenvolvido. Os provetes obtidos têm duas origens distintas: um varão comercial convencional de maraging 300 e um componente produzido em maraging 300 por Selective Laser Melting (SLM). Todos os provetes têm 4 mm de altura e 4 mm de diâmetro, também ilustrados na figura 33, e, da mesma forma que os provetes de AA 5083-H111, foram obtidos com recurso a eletroerosão por fio e facejamento no torno.



Figura 33 - Provetes cilíndricos tipo de cada material ensaiado, da esquerda para a direita: (i) AA 1050-O, (ii) AA 5083-H111, (iii) AISI 1045, (iv) Maraging 300 convencional, (v) Maraging 300 vertical e (vi) Maraging 300 horizontal.

Devido às características do processo de fabrico aditivo por SLM, os provetes de maraging 300 obtidos a partir do componente produzido por este método foram divididos em dois tipos diferentes, vertical e horizontal, dependendo da orientação das camadas de material fundido, tal como esquematizado na figura 34.

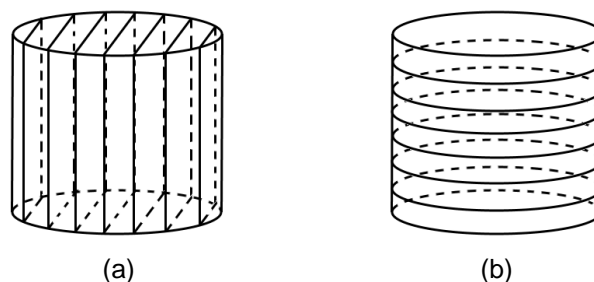


Figura 34 - Esquema da orientação de camadas de metal depositado por fabrico aditivo nos provetes (a) maraging 300 vertical e (b) maraging 300 horizontal.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Este capítulo serve o propósito de apresentar os resultados dos ensaios de compressão realizados e a sua análise. Começando pelos ensaios da liga AA1050-O para validação da máquina de impacto, seguindo pelos ensaios de que permitem a obtenção da curva tensão-extensão da liga AA5083-H111 e do aço maraging 300 proveniente de fabrico aditivo e finalizando com a calibração dos parâmetros da lei do material.

4.1. Validação do Aparato Experimental

Após desenvolvimento da máquina de ensaios, integração e calibração de toda a instrumentação necessária, foram realizados ensaios mecânicos numa liga AA1050-O de forma a tentar reproduzir o trabalho de Alcino Reis (2016). Estes ensaios foram realizados em dois instantes: (i) em primeiro lugar, em condições quase-estáticas e, (ii) numa segunda fase, para solitação do material num regime dinâmico. Para a primeira instância foram montadas barras de titânio que permitem acoplar o transdutor de posição indutivo, sendo esta a montagem de referência e que permite percorrer toda a gama de velocidades de ensaio uma vez que o princípio de funcionamento deste transdutor garante capacidade de responder às solicitações de elevada frequência típicas de ensaios dinâmicos. Esta configuração é aquela que permite maior rigor nos resultados obtidos uma vez que os sensores estão montados diretamente nos pratos de compressão e não são sensíveis a qualquer interferência externa ao ensaio, como por exemplo a deformação elástica da máquina de ensaios ou efeitos de inércia que ocorrem aquando de solicitações dinâmicas. Os provetes de alumínio foram recolhidos a partir do mesmo lingote e posteriormente maquinados para as mesmas dimensões anteriormente referidas. Na figura 35 apresenta-se a curva correspondente à média de 3 ensaios realizados, que se compara com a curva obtida por Alcino Reis (2016). Observa-se que os resultados se sobrepõem, mostrando boa concordância entre as curvas de escoamento, permitindo validar o equipamento de ensaios na sua configuração principal.

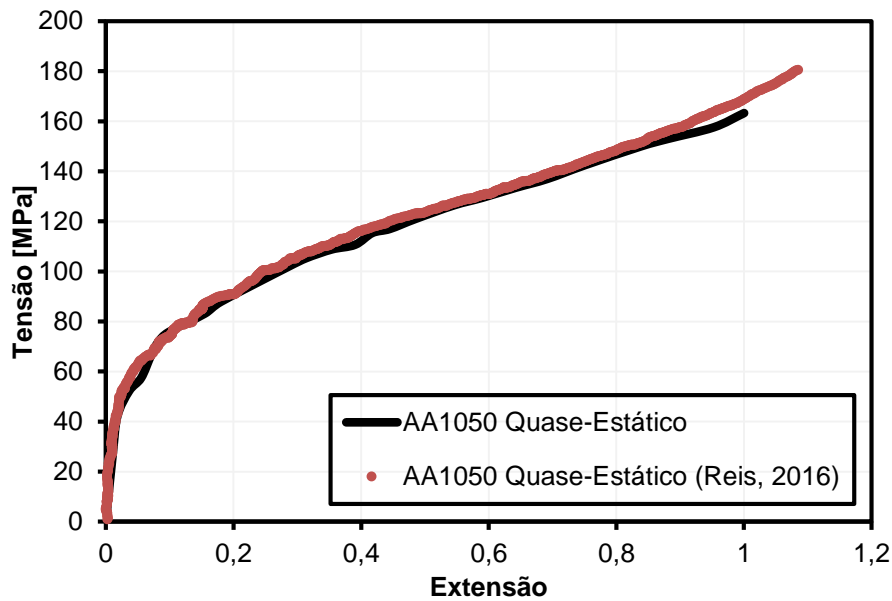


Figura 35 - Gráfico de comparação das curvas de escoamento da liga AA1050-O obtidas no presente trabalho com as de Alcino Reis (2016).

A introdução do forno elétrico para a realização de ensaios em temperatura levou ao desenvolvimento de um segundo par de barras de titânio, nos quais, por limitações impostas pelo próprio forno elétrico, não foi possível acondicionar o transdutor indutivo. A integração dos transdutores baseados em potenciômetros resistivos levou à necessidade de se desenvolver um procedimento de tratamento de dados no qual se calcula a variação da altura do provete de forma indireta, relacionando-se esta com o deslocamento entre os potenciômetros montados em posições estratégicas dos varões de titânio. De forma a aferir se esta configuração permite responder a solicitações dinâmicas e ainda verificar o procedimento experimental adotado, procurou-se reproduzir o trabalho de dos Santos *et al.* (2017) através da realização de ensaios numa liga de AA1050 para a mesma velocidade de deformação. Os provetes foram obtidos a partir do mesmo pedaço de matéria prima e processados para as mesmas dimensões do trabalho em causa. Com base na informação das curvas de calibração obtidas por David Campos (2020) e através da seleção de um projétil de massa adequada foi possível realizar 3 ensaios a uma velocidade de deformação com perfil médio de 1500 s^{-1} , apresentando-se na figura 36 a média dos 3 ensaios, bem como a curva obtida por dos Santos *et al.* (2017). Pode-se observar uma relação de correspondência entre ambas as curvas de escoamento, graficamente representada pela sobreposição das mesmas. Este resultado permite assim validar a configuração necessária aquando da utilização do forno para ensaios em temperatura bem como o procedimento seguido para o tratamento de dados, garantindo ainda uma resposta dos transdutores rápida o suficiente para condições dinâmicas. Pode-se então combinar, num plano de ensaios uma vasta gama de velocidades de deformação e temperaturas em simultâneo, o que motiva a realização de estudos acerca do comportamento termo-visco-plástico dos materiais.

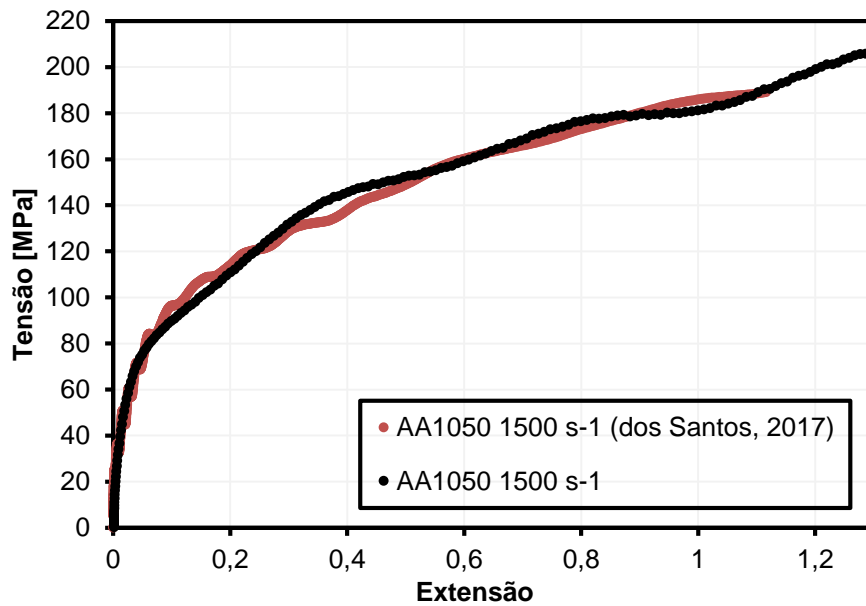


Figura 36 – Gráfico comparativo das curvas de escoamento da liga AA1050-O a uma taxa de deformação de 1500 s^{-1} do presente trabalho com as obtidas por Tiago dos Santos (2017).

4.2. AA 5083-H111

As curvas tensão-extensão obtidas a partir dos ensaios de compressão quase-estáticos, realizados a temperatura variável, observáveis na figura 37, revelam um amaciamento progressivo do material com o aumento da temperatura. Pode quantificar-se uma redução da tensão de escoamento na ordem de 5% e 15%, a uma temperatura de 50°C e 100°C respetivamente, em relação à curva de escoamento a 25°C . A redução da temperatura tem, como seria de esperar, um efeito de endurecimento do material, observando-se um aumento da tensão de escoamento para temperaturas de -50°C e -70°C de, respetivamente, 10% e 14% em relação à temperatura ambiente (25°C). O aumento da tensão de escoamento com a deformação também se verifica, indicando o encruamento do material que acontece independentemente da temperatura.

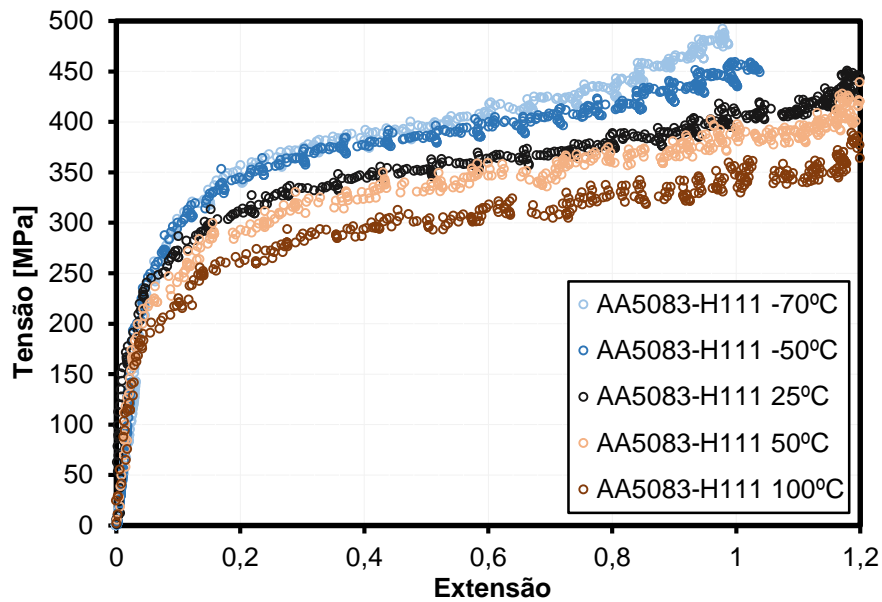


Figura 37 - Curvas tensão-extensão em regime de deformação quase-estático da liga AA5083-H111 a temperatura variável (-70°C, -50°C, 25°C, 50°C e 100°C)

Esta liga de alumínio AA 5083-H111, como referido anteriormente, tem boas propriedades mecânicas comparativamente a outros alumínios tipicamente utilizados, à exceção de alumínios para aplicações aeroespaciais, mas é desaconselhada a sua utilização em condições operacionais acima dos 65°C. Uma das razões para esta indicação do fabricante pode dever-se ao facto da resistência mecânica reduzir drasticamente acima dessa temperatura, o que é particularmente visível nas curvas tensão-extensão na figura 38 da compressão a velocidade de deformação elevada, neste caso na ordem de 3000 s^{-1} . A redução da tensão de escoamento comparativamente ao ensaio a 25°C está na ordem de 10% e 30%, para temperaturas de 50°C e 100°C respetivamente. Já a temperaturas abaixo dos 0°C, verifica-se um aumento da tensão de escoamento de aproximadamente 11,8% e 20% para temperaturas de -50°C e -70°C respetivamente, sendo este aumento mais pronunciado comparativamente aos ensaios quase-estáticos.

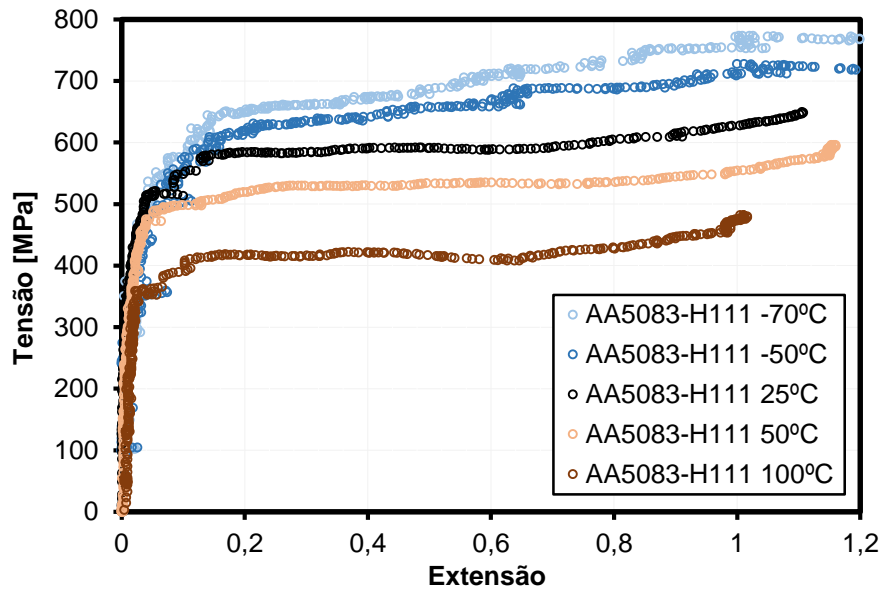


Figura 38 - Curva de escoamento dos ensaios de compressão da liga AA5083-H111 a uma taxa de deformação de 3000 s^{-1} e temperatura variável (25°C , 50°C , 100°C)

As curvas de escoamento a uma taxa de deformação de 3000 s^{-1} têm uma morfologia que se assemelha ao de um material com comportamento elasto-perfeitamente plástico. Comparativamente ao ensaio quase-estático, a influência da velocidade de deformação na tensão de escoamento varia conforme a temperatura, quantitativamente, para extensões de 0,4, a 25°C a tensão aumenta cerca de 71%, a 50°C aumenta 63% e já a 100°C apenas aumenta 40%. Estes dados apontam para uma redução da influência da taxa de deformação com o aumento da temperatura.

4.3. AISI 1045

Os ensaios de compressão quase-estáticos do aço AISI 1045, também denominado DIN Ck45, observáveis na figura 39, mostram um comportamento semelhante ao obtido nos ensaios anteriores para a liga AA 5083-H111; o aumento da temperatura leva a curva a, tendencialmente, aproximar-se de um comportamento elasto-perfeitamente plástico, pois com este aumento de temperatura o aumento da tensão de escoamento, característico do encruamento do material, é menos perceptível. A natureza deste fenómeno prende-se com o aumento da mobilidade dos deslocamentos com o aumento da temperatura que contrabalança os efeitos de aumento da densidade dos mesmos pelo processo de encruamento. Quantitativamente, para extensões de 0,6, observa-se uma redução de 14,4% e 27,8% da tensão de escoamento para as temperaturas de 200°C e 400°C respetivamente, em relação à temperatura ambiente (25°C). Já para extensões de 1,2, esta redução é mais pronunciada, 18,6% e 33,6% para 200°C e 400°C em relação aos 25°C .

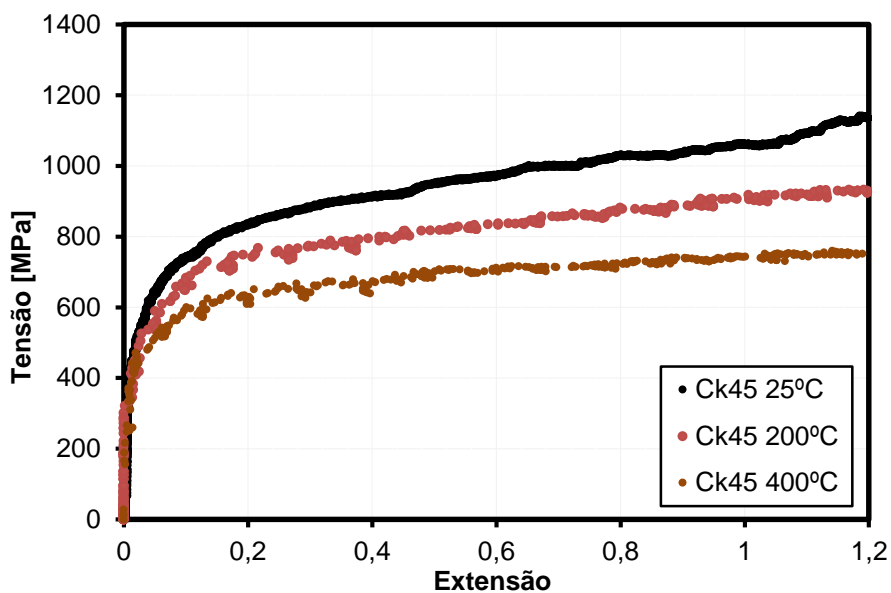


Figura 39 - Curvas tensão-extensão de compressão em regime quase-estático do aço AISI 1045 (Ck45) a temperatura variável (25°C, 200°C e 400°C).

Na figura 40 apresentam-se as curvas de escoamento do material com uma taxa de deformação de 2000 s^{-1} a diferentes temperaturas. A introdução de uma velocidade de deformação elevada levou ao aumento generalizado da tensão de escoamento, quando comparado aos ensaios quase-estáticos do mesmo material. Para extensões de 0,6 observa-se um aumento médio da tensão de escoamento de 11%. Este aumento é atribuído à característica dos dois efeitos aqui evidentes, viscosos e de temperatura. A característica própria dos efeitos viscosos, nomeadamente o efeito de inércia ao escoamento, torna-se mais evidente e introduz uma modificação ao comportamento observado nos ensaios quase-estáticos, onde se verifica o efeito homólogo associado à temperatura, um aumento da plasticidade do material. Por outras palavras, quando comparando os dois tipos de ensaios, o efeito inercial impede um escoamento do material mais fácil com o aumento da temperatura.

Por outro lado, nos ensaios a taxa de deformação elevada, a redução na tensão de escoamento entre curvas a diferentes temperaturas é de 20,5% e 31,3%, para ensaios a 200°C e 400°C respetivamente, quando comparadas a ensaios a temperatura ambiente e a uma extensão de 0,6.

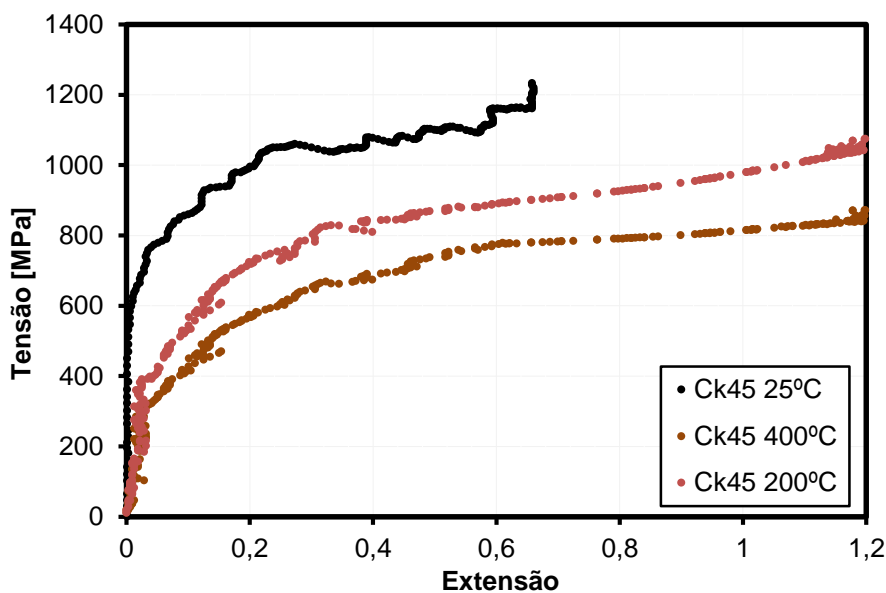


Figura 40 - Curvas tensão-extensão de compressão do aço AISI 1045 (Ck45) a taxa de deformação elevada (2000 s^{-1}) e temperatura variável (25°C , 200°C e 400°C).

4.4. Maraging 300

Segue a análise e discussão dos resultados de maior relevo obtidos para a liga de aço maraging 300. Numa primeira análise, realizaram-se ensaios de compressão, sempre a temperatura ambiente, variando apenas a taxa de deformação, desde o regime quase-estático até taxas de extensão na ordem dos 6000 s^{-1} . As curvas de escoamento do material permitem comparar a influência da taxa de deformação em cada material e também comparar o comportamento do material convencional com o produzido por fabrico aditivo e, adicionalmente, se a orientação das camadas de deposição do metal por fabrico aditivo, têm influência no comportamento do mesmo quando sujeito a cargas compressivas.

No gráfico da figura 41 pode observar-se a evolução da curva de escoamento para os provetes de maraging 300 convencional. Na curva do ensaio em regime quase-estático, após ser ultrapassada uma tensão de cedência na ordem dos 1150 MPa, pode-se observar uma ligeira evolução negativa da tensão de escoamento. Somente a partir de uma extensão à volta de 0,3 a tensão de escoamento apresenta uma evolução positiva característica do fenómeno de encruamento. Esta evolução negativa da curva de escoamento do material é ainda mais pronunciada nos ensaios dinâmicos, verificando-se que o aumento da velocidade de deformação provoca, numa fase inicial, um aumento da tensão de escoamento, observando-se uma tensão de cedência na ordem de 1200 MPa, 1300 MPa e 1350 MPa para taxas de deformação de 300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1} respetivamente, mas rapidamente se transforma num amaciamento pronunciado até extensões na ordem de 1. Este comportamento de saturação da tensão de escoamento deve ser característico do maraging, pois mesmo as amostras deste metal obtido por fabrico aditivo apresentam o comportamento descrito.

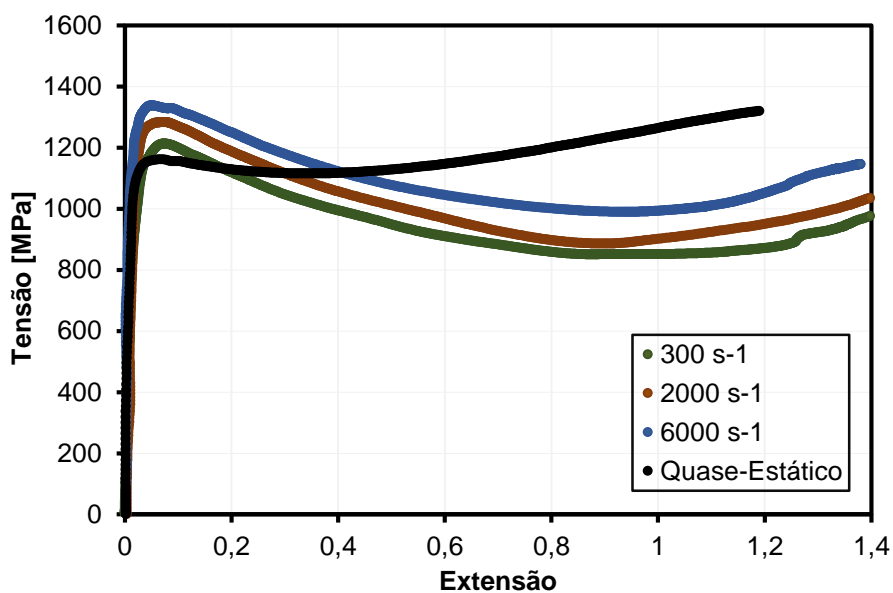


Figura 41 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 convencional em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1}).

Entre ensaios dinâmicos, a morfologia da curva de escoamento mantém-se, existindo um aumento da tensão de escoamento com a velocidade de deformação, cerca de 7% de 300 s^{-1} para 2000 s^{-1} e 5% de 2000 s^{-1} para 6000 s^{-1} .

Os provetes de maraging 300 obtidos por fabrico aditivo com camadas orientadas na horizontal e vertical, com as respetivas curvas de escoamento representadas nos gráficos das figuras 42 e 43, têm um comportamento semelhante ao descrito anteriormente, mas apresentando um amaciamento comparativamente menos pronunciado. No caso do maraging 300 horizontal o encruamento aparenta começar a partir de extensões próximas de 0,6, já no vertical o mesmo acontece a partir de 0,8. A explicação para este aumento de tensão de escoamento, aproximadamente 10% no caso horizontal e 7% no caso vertical, comparativamente ao maraging 300 convencional, pode passar pelo envelhecimento do metal durante o processo de fabrico. A fusão das camadas sucessivas durante a sua deposição faz com que o metal mantenha uma temperatura propícia ao seu envelhecimento, aumentando ligeiramente a resistência mecânica.

Entre provetes com camadas de material na vertical e na horizontal a diferença de tensão de escoamento não é muito significativa, os provetes de maraging 300 horizontais demonstram uma tensão de escoamento superior na ordem dos 3% o que pode ser desprezável. A altura das camadas, ainda que não tenha sido possível realizar a sua medição, rondaria os $30\text{ }\mu\text{m}$ a $50\text{ }\mu\text{m}$ característicos do processo de fabrico aditivo por Selective Laser Melting (SLM), e poderá estar na origem deste comportamento aparentemente isotrópico da tensão de escoamento em ensaios de compressão.

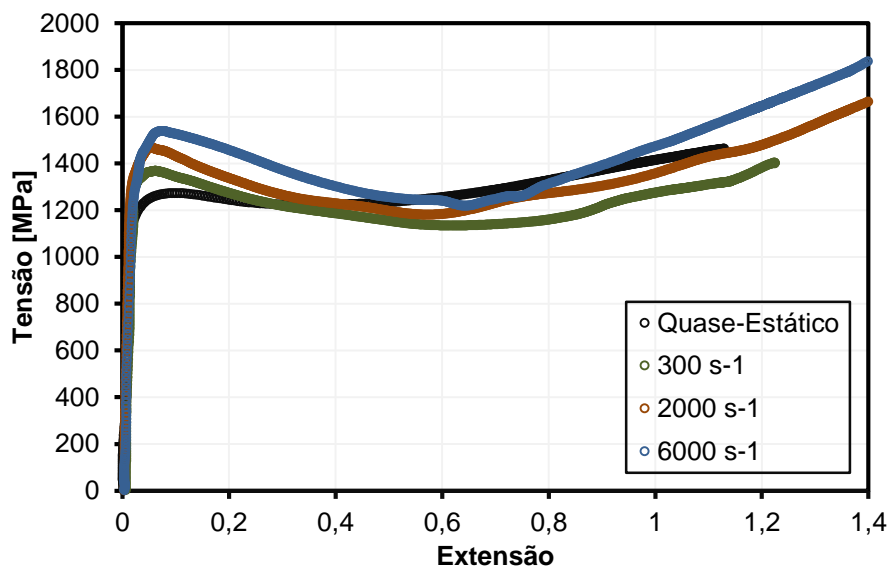


Figura 42 – Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 horizontal (fabrico aditivo) em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s⁻¹, 2000 s⁻¹ e 6000 s⁻¹).

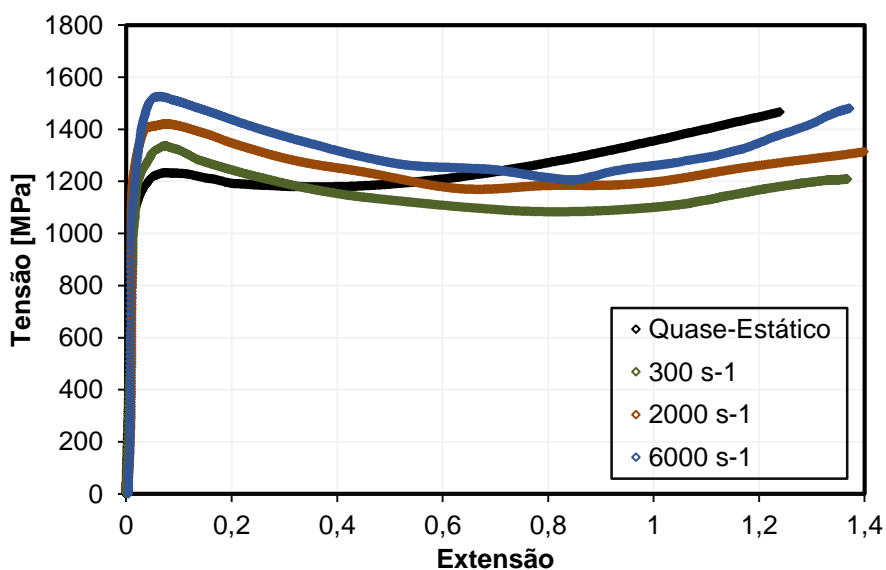


Figura 43 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 vertical (fabrico aditivo) em regime quase estático e taxas de deformação elevadas (300 s⁻¹, 2000 s⁻¹ e 6000 s⁻¹).

Devido a constrangimentos alheios ao presente trabalho, só foi possível a obtenção de provetes de maraging 300 convencional e na direção horizontal para os subsequentes ensaios. A influência da temperatura começou por ser estudada em regime quase-estático. O gráfico da figura 44 apresenta as curvas de escoamento dos ensaios quase-estáticos realizados a temperatura variável no maraging 300 convencional onde é possível verificar uma redução da tensão de escoamento com a temperatura, o que seria previsível tendo em conta o comportamento típico dos metais com o aumento de temperatura. O mesmo acontece no maraging 300 horizontal, explícito no gráfico da figura 45.

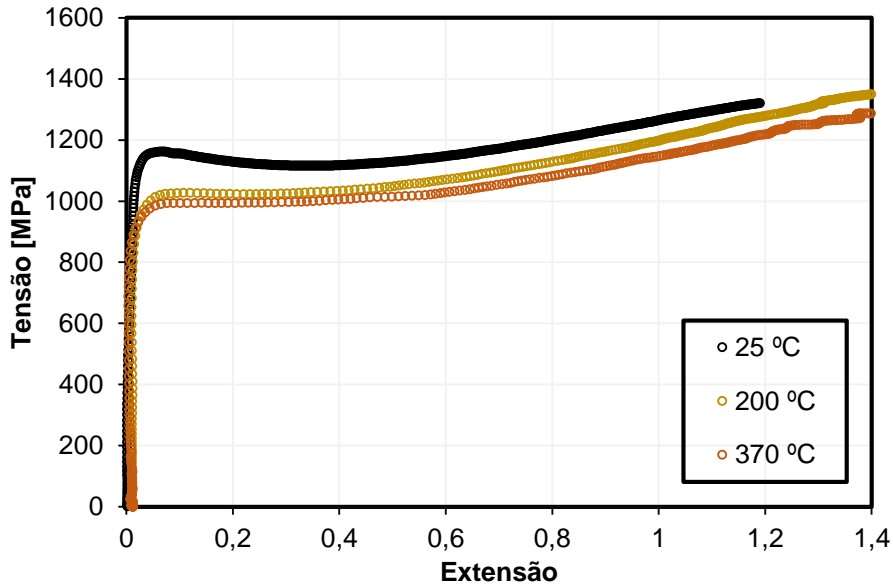


Figura 44 – Curvas de escoamento do maraging 300 convencional em regime quase-estático e temperatura variável (25°C, 200°C e 370°C).

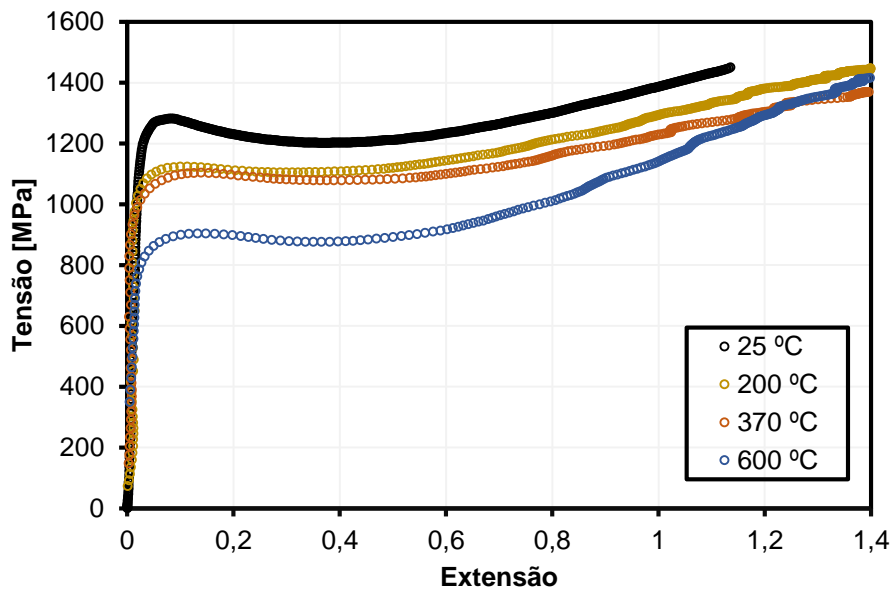


Figura 45 - Curvas de escoamento do maraging 300 horizontal em regime quase-estático e temperatura variável (25°C, 200°C, 370°C e 600°C).

O maraging 300 apresenta uma redução de cerca de 15% da tensão de escoamento à temperatura de 200°C, comparativamente a 25°C, mas apresenta uma diferença desprezável em relação a 370°C, tanto no maraging 300 convencional como no horizontal. Já a 600°C, o maraging 300 horizontal sofre uma redução de tensão de escoamento de 30%, mas, a partir de uma extensão de 0,5, esta tensão tem uma evolução superior à da registada a temperaturas inferiores. A análise ao microscópio dos provetes após compressão, figuras 46(a) e 46(b), permite concluir pelo seu aspeto que a 200°C o provete tem uma deformação homogênea, apresentando um comportamento dúctil, mas a 600°C este tem um aspeto muito diferente, apesar de durante a compressão não ter ocorrido a sua fratura abrupta.

Neste caso a deformação parece ter ocorrido a partir do escorregamento de planos de clivagem, provavelmente devido à formação de precipitados nas fronteiras de grão, pois a permanência no forno a estas temperaturas, tal como se descreve no procedimento experimental no Anexo I, pode catalisar este processo.

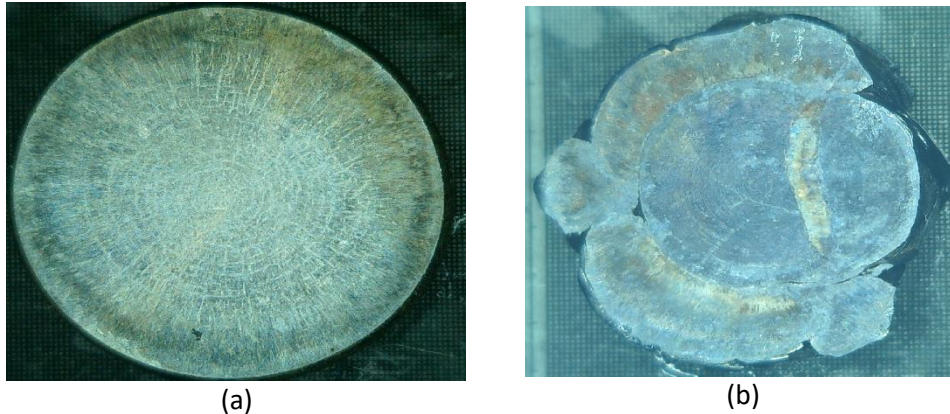


Figura 46 – Fotografias dos provetes de maraging 300 horizontal após compressão em regime quase estático a uma temperatura de: (a) 200°C e (b) 600°C

Tal como indicam os gráficos das figuras 47 e 48, a introdução de taxas de deformação elevadas aos ensaios de compressão a temperatura elevada trouxe resultados inesperados do ponto de vista do comportamento do material. Nestes gráficos inclui-se o ensaio de impacto com taxa de deformação de 2000 s^{-1} à temperatura ambiente (25°C) analisado anteriormente, de forma a ser possível analisar a alteração da evolução da tensão de escoamento do material. Tanto no maraging 300 convencional como no maraging 300 horizontal, o aumento de temperatura provoca a eliminação do amaciamento inicial da curva de escoamento, fazendo com que até extensões de aproximadamente 0,5 se verifique uma evolução positiva da tensão de escoamento, seguida de um amaciamento.

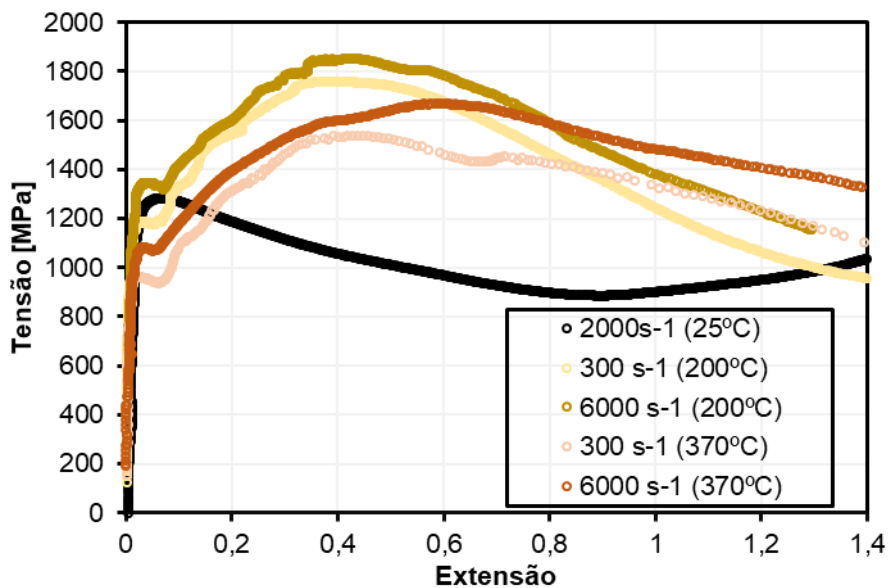


Figura 47 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 convencional a taxas de deformação elevadas (300 s^{-1} , 2000 s^{-1} e 6000 s^{-1}) e temperatura variável (25°C , 200°C e 300°C).

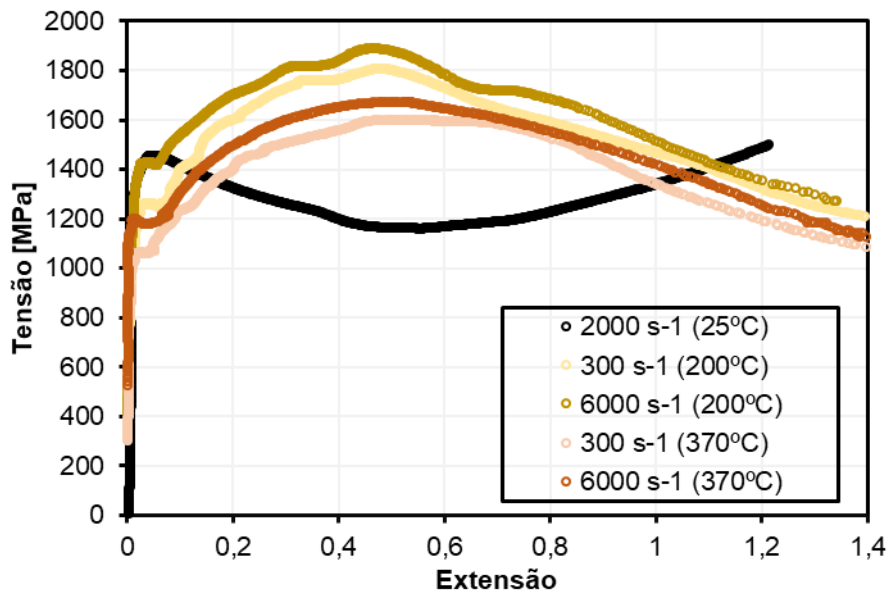


Figura 48 - Curva de escoamento dos provetes de maraging 300 horizontal a taxas de deformação elevadas (300 s⁻¹, 2000 s⁻¹ e 6000 s⁻¹) e temperatura variável (25°C, 200°C e 300°C).

4.5. Calibração da Lei do Material

Os dados obtidos experimentalmente a partir dos provetes de liga AA5083-H111 foram utilizados para obter os parâmetros de calibração de uma adaptação do modelo de Silva. Visto que o modelo de Silva não contabiliza o fator temperatura, e o modelo de Johnson-Cook não modela o comportamento do material observado experimentalmente, adicionou-se uma parcela, baseado na parcela que modela os efeitos de cariz térmico no modelo de Johnson-Cook (eq. 4), à equação do modelo empírico de Silva (eq. 5) de forma a modelar o seu efeito na curva de escoamento do material, resultando a seguinte equação:

$$\sigma = [A + e^{m\varepsilon} \varepsilon^n][B + C \ln(D + \dot{\varepsilon})][E - F \cdot (T/G)^p] \quad (16)$$

Onde A , B , C , D , E , F , m , n e p são constantes que dependem do material e foram determinadas experimentalmente, estando quantificadas na tabela 8. A tensão, σ , é dada em MPa, a extensão, ε , é adimensional, a velocidade de deformação, $\dot{\varepsilon}$, em s⁻¹ e a temperatura, T , em Kelvin.

Tabela 8 – Constantes de calibração da adaptação do modelo constitutivo de Silva para a liga AA 5083-H111.

A	B	C	D	E	F	G	m	n	p
3,35	0,438	0,095	28,562	142,140	0,023	13,561	0,261	0,005	2,358

Como se pode verificar no gráfico da figura 49, o modelo tem uma boa correspondência à curva de escoamento em regime quase-estático. Em regime dinâmico, devido ao comportamento característico do material não foi possível ajustar o modelo de forma a reproduzir os dados experimentais.

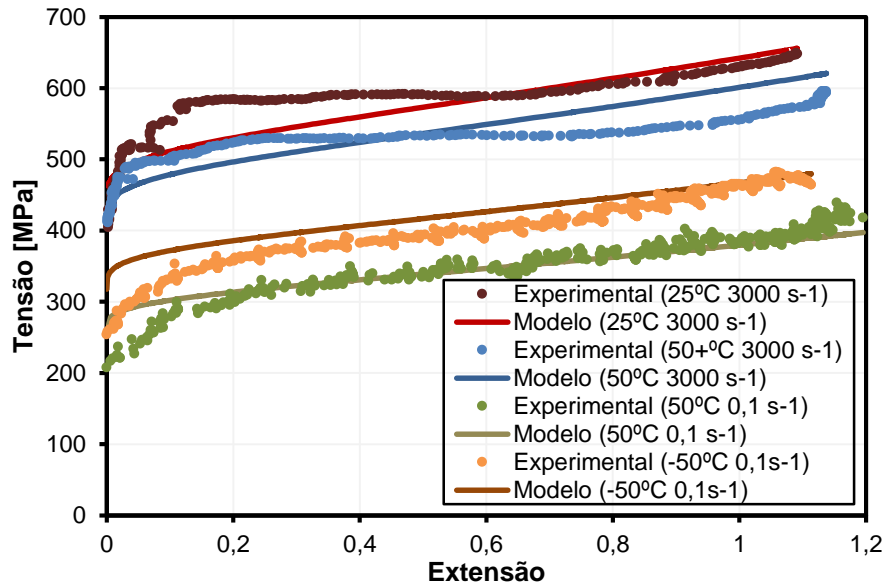


Figura 49 - Ajuste do modelo de Silva adaptado à curva de escoamento do material AA 5083-H111.

Foi também possível modelar a curva de tensão-extensão para o aço AISI 1045, obtida experimentalmente a diferentes temperaturas e taxas de deformação. O modelo constitutivo utilizado foi de novo o modelo de Silva, sendo que a parcela acrescentada que modela os efeitos térmicos no comportamento do material foi obtida através de um processo iterativo, resultado na seguinte equação:

$$\sigma = [A + e^{m\varepsilon} \varepsilon^n][B + C \ln(D + \varepsilon)][1 - E(\frac{\ln(T)}{F})G^T] \quad (17)$$

Onde A , B , C , D , E , F , m , n e p são novamente constantes experimentais que dependem do material, estando quantificadas na tabela 9. A tensão, σ , é dada em MPa, a extensão, ε , é adimensional, a velocidade de deformação, $\dot{\varepsilon}$, em s^{-1} e a temperatura, T , em Kelvin.

Tabela 9 – Constantes de calibração da adaptação do modelo constitutivo de Silva para o aço AISI 1045.

A	B	C	D	E	F	G	m	n
0,4255	-161,9672	-28,9337	393,6127	0,8356	0,9688	0,9989	-0,2124	0,4046

O gráfico da figura 50 apresenta três curvas experimentais tensão-extensão exemplificativas do material em diferentes condições de temperatura e taxa de deformação e as respectivas curvas obtidas a partir do modelo constitutivo aplicado. Observa-se que este modelo ajusta bem a resposta mecânica do material na condição de referência, em regime quase-estático à temperatura ambiente. Do mesmo modo, a lei material proposta mostrou boa concordância com as curvas experimentais obtidas para altas velocidades de deformação, onde o encruamento visco-plástico promove uma crescente tensão de escoamento com a extensão do material, mesmo nos casos em que se fez variar a temperatura do ensaio. Por outro lado, quando se consideram apenas os efeitos de amaciamento térmico promovidos pelo aumento da temperatura de ensaio, o modelo tem dificuldade em descrever um comportamento que tende para o rígido perfeitamente plástico, modelando apenas uma tendência de saturação da tensão de escoamento para valores altos de extensão, em torno de 1.

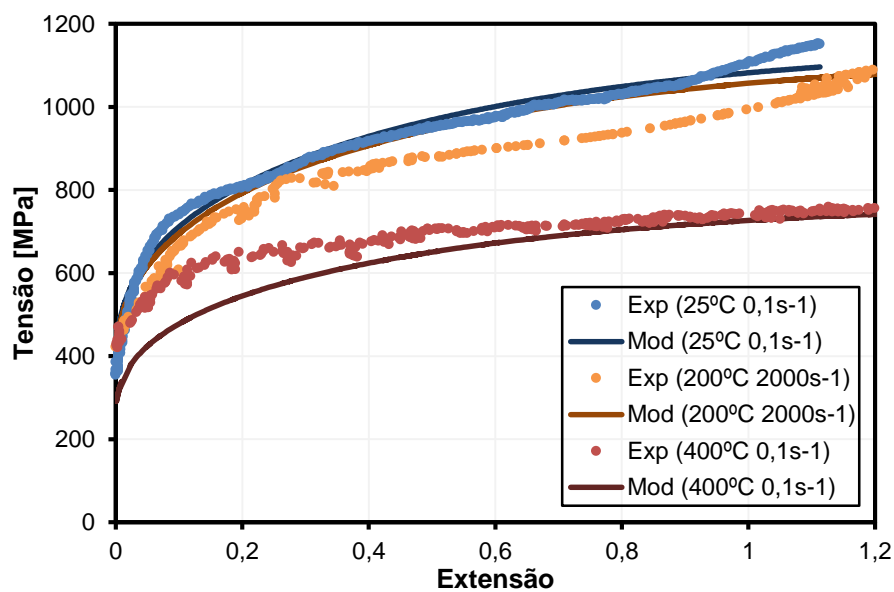


Figura 50 - Ajuste do modelo de Silva adaptado à curva de escoamento do material AISI 1045.

Capítulo 5

Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões retiradas da realização deste trabalho e abordam-se as perspetivas de trabalhos futuros no seguimento do tema desta dissertação.

O desenvolvimento do equipamento experimental e a realização de ensaios nas condições propostas com sucesso permitem concluir que os principais objetivos deste trabalho foram cumpridos. Foram realizados ensaios de compressão desde o regime quase-estático até velocidades de deformação na ordem dos 6000 s^{-1} em condições temperatura elevada, o que representou um avanço nas capacidades de testagem atualmente presentes no Instituto Superior Técnico.

A aplicação dos modelos constitutivos aos materiais ensaiados não teve o sucesso pretendido. A estrutura fechada do modelo fenomenológico apenas permite a obtenção de parâmetros de calibração para as condições nas quais estes foram desenvolvidos, ficando aquém do esperado nas situações em que se testa, por exemplo, novos materiais em condições pouco usuais. No caso do aço maraging 300, os modelos aplicados não têm a capacidade de modelar o comportamento inusual que este apresenta.

Os ensaios de impacto a elevadas velocidades têm como característica a produção de vibrações que interferem com o sinal registado pelos sensores. Neste caso concreto, a onda de pressão refletida no final da barra transmissora provocava uma assinatura típica no sinal adquirido pela célula de carga extensométrica, sendo que houve a necessidade de desenvolver estratégias matemáticas para resolver esta situação. No futuro, a utilização de uma barra transmissora com um comprimento suficientemente grande, ao ponto da onda refletida não ter influência no sinal, seria uma melhoria que traria uma maior facilidade no tratamento dos dados originados pelos ensaios de impacto.

A versatilidade do equipamento desenvolvido é um dos seus pontos fortes; a facilidade de instalação e adaptação de componentes que permitem a realização de ensaios em diferentes condições, como foi o caso do forno elétrico, criam novos desafios e abrem portas a novos estudos. Durante este trabalho conceptualizou-se o fabrico e instalação no equipamento de um aparato que permitiria a realização de ensaios mecânicos de tração em condições quase-estáticas e a alta velocidade. Os constrangimentos temporais não permitiram a construção do aparato, mas, como pode ser visto na figura 51, foi criado um modelo CAD do mesmo e a construção e adaptação seria uma perspetiva de trabalho futuro.

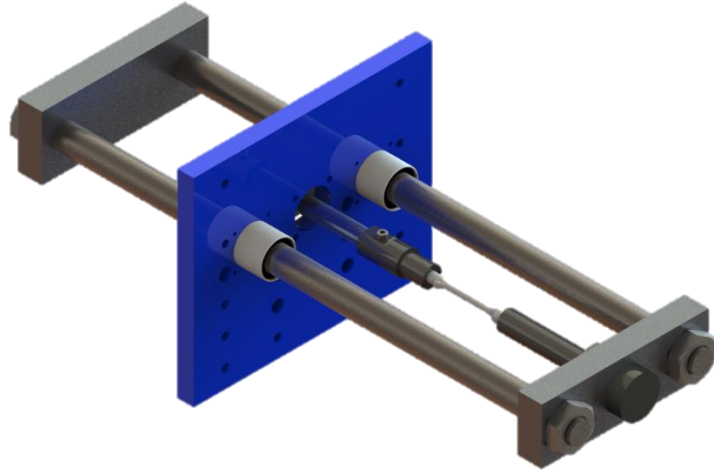


Figura 51 – Modelo CAD do aparato para ensaios de tração.

Referências

- Allen, C. M. e Boardman, B. (2005) «ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection : Irons , Steels , and High Performance Alloys», *Fonderie*.
- Bilger, G. *et al.* (2006) «High-temperature diffusion barriers from Si-rich silicon-nitride», *Surf. Interface Anal.*, (38), pp. 1687–1691.
- Campos, D. L. T. da C. (2020) *Compressive Properties of Aramid Fabrics*. Instituto Superior Técnico.
- Casati, R. *et al.* (2016) «Aging behaviour and mechanical performance of 18-Ni 300 steel processed by selective laser melting», *Metals*, 6(9). doi: 10.3390/met6090218.
- Chandrashekar, M. e Prasad, S. K. V. (2018) «The Effect of Cobalt on Wear behavior of Cemented Carbide cutting tools for machining of Titanium alloy», *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 7678–7684. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.443.
- Field, J. E. *et al.* (2004) *Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies*, *International Journal of Impact Engineering*. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.005.
- Fredriksson, C. (2019) «Sustainability of metal powder additive manufacturing», *Procedia Manufacturing*, 33, pp. 139–144. doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.018.
- Gregório, A. J. de V. L. (2017) *Ensaio de Impacto e Elevadas Velocidades de Deformação*. Instituto Superior Técnico.
- He, N. *et al.* (2016) «High temperature tribological properties of TiAlSiN coatings produced by hybrid PVD technology», *Tribology International*, 98, pp. 133–143. doi: 10.1016/j.triboint.2016.02.034.
- Hollomon, H. (1945) «Metals Technology, 1945, Vol. XII - June 1945 - Tensile Deformation», *American insititute of mining and metallurgical engineers insititute of mining and metallurgical engineers*, 879(I), pp. 1–22.
- Johnson, G. R. e Cook, W. H. (1985) «Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures», *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), pp. 31–48.
- Jones, R. M. (2009) *Deformation Theory of Plasticity*. Blacksburg, Virginia: Bull Ridge Publishing.
- Kempen, K. *et al.* (2011) «Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel», *Physics Procedia*, 12(PART 1), pp. 255–263. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.033.
- Lewandowski, J. J. (2016) «Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties», *Annual Review of Materials Research*, 46, pp. 151–186. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024.
- Ludwik, P. (1909) *Elemente der Technologischen Mechanik, Elemente der Technologischen*

Mechanik. doi: 10.1007/978-3-662-40293-1.

Martins, P. e Rodrigues, J. (2005) *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica. Vol. I*. Escolar Editora.

Negahban, M. (2012) *The Mechanical and Thermodynamical Theory of Plasticity, The Mechanical and Thermodynamical Theory of Plasticity*. doi: 10.1201/b12050.

Peng, C. *et al.* (2018) «Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining», *Procedia CIRP*, 71, pp. 386–389. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.046.

Perzyna, P. (1966) «Fundamental Problems in Viscoplasticity», *Advances in Applied Mechanics*, 9(C), pp. 243–377. doi: 10.1016/S0065-2156(08)70009-7.

Pires, T. L. M. C. A. (2016) *Barra de Pressão de Hopkinson*. Escola Superior Náutica Infante D. Henrique.

Ramesh, K. T. (2008) «High Strain Rate», em *Handbook of Experimental Solid Mechanics*, p. 874.

Santos, P. M. G. (2019) *Ensaio de Compressão Uniaxial: Desenvolvimento de Máquina e Aplicação a Metais e Ligas Metálicas*. Instituto Superior Técnico.

Silva, C. (2013) *Caracterização Mecânica e à fratura de materiais aplicada a processos de deformação plástica e corte*. PhD in Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Voce, E. (1948) «The relationship between stress and strain for homogeneous deformation», *J. Instit. Metal*, (74), pp. 537–62.

Wang, X. *et al.* (2017) «Inverse finite element modeling of the barreling effect on experimental stress-strain curve for high temperature steel compression test», *Journal of Materials Processing Technology*, 243, pp. 465–473. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.012.

Young, K. (2015) *Development of a Tensile Split Hopkinson Pressure Bar Testing Facility*. University of Windsor. Disponível em: <https://scholar.uwindsor.ca/etd>.

Anexos

A1. Procedimentos Experimentais

PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO

Calibração da Célula de Carga

1. Verificar se o forno não está instalado e se o batente de alumínio foi removido;
2. Desapertar a fixação dos potenciômetros de formas a estes ficarem livres;
3. Desapertar os anéis instalados na barra incidente de forma a permitir a instalação da célula de carga comercial e os pratos entre as hastes de compressão;
4. Correr o programa de calibração da célula de carga e “zerar” os dois sinais no amplificador;
5. Acionar a bomba hidráulica até a célula de carga comercial e os pratos os pratos estarem seguros, garantindo que não se regista força aplicada;
6. Colocar o programa a gravar e acionar a bomba hidráulica;
7. Parar a gravação e guardar o ficheiro criado;
8. Retirar a célula de carga, voltar a fixar os anéis, colocar o batente de alumínio e apertar a fixação dos potenciômetros;

Calibração do Deslocamento (Sensores Indutivos)

Sem potenciómetro instalado na barra incidente:

1. Utilizar amostras calibradas entre os pratos compressores, registar valores e fazer a curva de calibração;

Com potenciómetro instalado na barra incidente:

2. Se a montagem do potenciómetro tiver feita, utilizar o potenciómetro para calibrar o sensor indutivo;
3. Juntar os pratos de compressão e obter o zero, tanto do potenciómetro como dos sensores indutivos;
4. Colocar as amostras calibradas entre os pratos de forma a obter o valor do potenciómetro e das bobines para tal deslocamento;
5. Deslocar a barra intermédia de forma a relacionar os valores dados pelo potenciómetro com os das bobines, obtendo-se assim a curva de calibração;

Calibração do Deslocamento (Potenciómetros)

1. Abrir o programa de calibração do deslocamento para altas temperaturas;
2. Verificar se a gama de movimento dos potenciómetros se encontra na zona linear;
3. Utilizar os calibres de forma a verificar a repetibilidade de resultados.

PROCEDIMENTOS GERAIS

Ensaio Quase-Estático

1. Instalar o atuador hidráulico
2. Ligar o atuador à bomba hidráulica manual ou à bomba hidropneumática de pedal, consoante a carga e precisão pretendida;
3. Lubrificar pratos compressores com massa grafitada;
4. Centrar sempre o provete nos pratos compressores.

Ensaio de Impacto

1. Escolher a massa do projétil a utilizar;
2. Montar o canhão pneumático;
3. Verificar se foi colocado o batente de nylon na barra incidente;
4. Lubrificar pratos compressores com massa grafitada;
5. Centrar sempre o provete nos pratos compressores.

PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS A ALTA TEMPERATURA

Preparação e Ensaio

1. Remover os tirantes roscados e instalar o forno;
2. Voltar a instalar o tirante roscado que fica atrás do forno;
3. Verificar se o disjuntor está desligado e se o voltímetro do Variac se encontra a zero Volts.
4. Ligar forno à corrente e o termopar ao display de temperatura;
5. Ligar o disjuntor e rodar o potenciómetro do Variac **lentamente** até a um **máximo de 16 V no Voltímetro**;
6. Colocar o provete entre as hastes de compressão, aplicando massa grafitada, e, se necessário, pintar a lateral das hastes com as canetas indicadoras de temperatura;
7. Fechar o forno e monitorizar a temperatura com recurso ao display, devendo verificar-se a temperatura das hastes de compressão de 5 em 5 minutos utilizando a pistola pirométrica, o provete deve permanecer no forno pelo menos 5 minutos;
8. Instalar o varão roscado à frente do forno somente quando as hastes atingirem a temperatura pretendida, medida com recurso ao termómetro a laser;
9. Realizar o Ensaio.

A2. Análise da filmagem da compressão a alta velocidade

Frames da Compressão	Análise	Dados obtidos pelo software de vídeo								
	Instante 0 s *1 H = 14 4,0096 px mm	Tempo por frame	0,000333 s							
	Instante 0,000333 s *2 H = 14 4,0096 d1= 1 0,2864 d2= 1 0,2864 px mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Altura do Provete</th> <th>Altura em Píxeis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,01 mm</td> <td>14 px</td> </tr> </tbody> </table>	Altura do Provete	Altura em Píxeis	4,01 mm	14 px	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Altura de 1 píxel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,2864 mm</td> </tr> </tbody> </table>		Altura de 1 píxel	0,2864 mm
	Altura do Provete	Altura em Píxeis								
	4,01 mm	14 px								
	Altura de 1 píxel									
0,2864 mm										
Instante 0,000667 s H = 7 2,0048 d1= 2 0,5728 d2= 8 2,2912 px mm	Legenda da Análise H Altura do provete no instante. d1 Deslocamento do prato esquerdo desde o início do ensaio. d2 Deslocamento do prato direito desde o início do ensaio.									
Instante 0,001 s *3 H = 4 1,1456 d1= 5 1,432 d2= 15 4,296 px mm	Notas:									
Instante 0,001333 s *4 H = 4 1,1456 d1= 4 1,1456 d2= 14 4,0096 px mm										