

Ensaio de Impacto e Elevadas Velocidades de Deformação

Afonso José de Vilhena Leitão Gregório

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Prof. Rodrigo Rossi

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista
Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Vogais: Prof. Alberto Eduardo Morão Cabral Ferro
Prof. Gabriela Belinato

Novembro 2017

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus profundos e sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização da presente dissertação.

Ao meu orientador, professor Pedro Rosa, por todo o apoio inesgotável prestado durante o decorrer da tese, pelas excelentes condições de trabalho que me foram proporcionadas, pela amizade e, pela sua contribuição para a minha formação profissional e pessoal.

Ao Engenheiro Alcino Reis, pelo seu apoio de carácter científico, e a todo o corpo técnico do NOF, pelo apoio prestado à investigação e desenvolvimento, cuja contribuição para o presente trabalho foi de acentuado relevo.

Aos técnicos de laboratório, Sr. Farinha e Diogo Silva, pela disponibilidade e auxílio prestado durante o decorrer da dissertação.

Aos meus amigos que acompanharam de perto o meu trabalho e com os quais partilhei as alegrias e dificuldades do dia a dia, por toda a sua amizade, apoio e companheirismo, proporcionando um excelente e rico ambiente de trabalho. Nomeadamente António Carvalhosa, Miguel Nabais e Paulo Farinha.

Finalmente, e com especial atenção, a toda a minha família, avó, pais e irmãos. Desde sempre me acompanharam em todas as etapas da minha vida, esta não foi exceção. Sem todo o seu apoio, amor e carinho jamais seria a pessoa que sou hoje. É a eles, em grande parte, que devo um percurso até agora com tantas oportunidades e recheado de momentos inigualáveis e que perdurarão para sempre na minha memória.

Resumo

Este documento apresenta uma investigação compreensiva do escoamento plástico de metais a alta taxa de deformação. O desenvolvimento experimental passou pelo projeto e fabrico de máquinas de ensaios, assim como pela integração de transdutores desenvolvidos para aplicações de alta velocidade. O plano de ensaios envolveu um grupo de metais puros e comercialmente puros (Alumínio, Cobre, Zinco, Estanho, AA1085 e AA1050) e um outro representativo de aplicações industriais (AlSi9Cu3, AS7G03, AISI1045 e Ti6Al4V), tendo estes sido ensaiados para grandes deformações, a taxas de deformação até $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Os resultados apresentam e discutem os parâmetros que influenciam a resistência mecânica dos materiais para diferentes condições de deformação, procurando contribuir para uma melhor compreensão da visco-plasticidade dos materiais metálicos, assim como propor novas metodologias de ensaio mecânico a alta velocidade de deformação.

Palavras chave

Velocidade de deformação, tensão de escoamento, metais, caracterização mecânica, impacto.

Abstract

This document presents a comprehensive investigation on plastic flow of metals at high strain rates. The experimental development consisted of projecting and manufacturing testing machines, but also of integrating transducers developed for high-speed applications. The test plan comprised a group of pure and commercially pure metals (Aluminium, Copper, Zinc, Tin, AA1085 and AA1050) and a group of alloys that is representative of industrial applications (AlSi9Cu3, AS7G03, AISI1045 and Ti6Al4V), which were tested to high strains, at high strain rates of up to $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. The results present and discuss the parameters that have influence on the mechanical resistance of materials for different strain rate conditions, seeking to contribute for a better understanding of viscoplasticity in metallic materials but also to suggest new techniques and methodologies for high strain rate mechanical testing.

Keywords

Strain rate, flow stress, metals, mechanical characterization, impact.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract	III
Índice	IV
Lista de Tabelas	V
Lista de Figuras	VI
Abreviaturas	IX
Nomenclatura	X
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Caracterização mecânica de materiais	3
2.1.1 Modelos constitutivos	3
2.1.2 Ensaios Mecânicos	7
2.2 Ensaios Dinâmicos e Velocidade de Deformação	9
2.2.1 Velocidade de deformação	9
2.2.2 Equipamentos e técnicas de ensaio	11
3 Desenvolvimento Experimental	17
3.1 Materiais de ensaio	17
3.2 Desenvolvimento da Ferramenta de Compressão	21
3.3 Instrumentação e Aquisição de Dados	23
3.4 Máquinas de Ensaios	28
3.4.1 Prensa Hidráulica	28
3.4.2 Martelo de queda	29
3.4.3 Canhão pneumático	31
3.5 Ensaios de compressão	34
4 Análise e Discussão de Resultados	35
4.1 Validação da Ferramenta	35
4.2 Relação entre a Dureza e a Tensão de Escoamento	36
4.2.1 Influência da Percentagem de Elementos nas Ligas de Alumínio	39
4.3 Tensão de Escoamento dos Metais e Ligas Metálicas	40
4.3.1 Influência da Quantidade Percentual de Elementos na Tensão de Escoamento de Ligas de Alumínio	42
4.4 Influência da Velocidade de Deformação na Tensão de Escoamento Plástica	44
4.5 Calibração do Modelo de Silva	50
5 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros	51
Referências	53

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Modelos constitutivos abordados.</i>	4
<i>Tabela 3.1 - Composição química dos materiais ensaiados. Os metais puros são designados pelo nome do elemento metálico e os vestígios de outros elementos são apresentados em partes por milhão [ppm]; As ligas metálicas são apresentadas pelo nome normalizado e os elementos de ligas são quantificados em peso percentual [%wt].</i>	20
<i>Tabela 3.2 - Propriedades físicas dos materiais ensaiados. A gama de valores está associada à condição metalúrgica com mínimos na condição recozida e máximos na tratada.</i>	20
<i>Tabela 3.3 – Tabela com valores de referencia para o martelo de queda implementado.</i>	30
<i>Tabela 4.1 - Constantes de calibração do modelo constitutivo de Silva, otimizadas para os materiais ensaiados.</i> ..	50

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática: (a) Ensaio de compressão uniaxial[4]; (b) Ensaio de dureza Vickers.....	7
Figura 2.2 - Representação gráfica da influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do material.	10
Figura 2.3 - Condições de similaridade entre processos tecnológicos e ensaios mecânicos[4].....	11
Figura 2.4 - Assinaturas velocidade deformação típicas para[4]: (a) Processos de corte e de deformação plástica; (b) Equipamentos de ensaio frequentemente utilizados para ensaios mecânicos a médias e altas velocidades de deformação.....	12
Figura 2.5 - Representação esquemática: (a) Martelo de queda[17] (b) Prensa Hidráulica para ensaios mecânicos.	13
Figura 2.6 - Representação esquemática[19]: (a) Barra de Hopkinson; (b) Ondas de pressão incidente, refletida e transmitida.	14
Figura 2.7 - Representação esquemática[21]: (a) Equipamento de compressão guiado por came, com atuador eletromagnético; (b) Perfil da came que transforma o movimento horizontal em deslocamento vertical – direção segundo a qual se processa a compressão.	16
Figura 3.1 - Provetes de compressão uniaxial com diâmetro inicial $\Phi_0 = 6$ mm e altura inicial $h_0 = 6,4$ mm constantes e com esbeltez aproximadamente unitária. Na imagem são apresentados da esquerda para a direita, os provetes de (i) Alumínio puro, (ii) Cobre puro, (iii) Zinco puro, (iv) Estanho puro, (v) AA1085, (vi) AA1050, (vii) AS7G03+05U, (viii) AISI1045 e (ix) Ti6Al4V.....	19
Figura 3.2 – Amostragem realizada para provetes das ligas: (a) AISI1045; (b) Ti6Al4V.....	19
Figura 3.3 – Ferramenta de compressão, modelada em Solidworks. 1 - Encabadouro; 2 - Porta pratos superior; 3 - Porta pratos inferior; 4 - Prato de compressão; 5 - Casquilho; 6 - Coluna; 7 - Sensor de deslocamento; 8 – Célula de carga; 9 - Base da ferramenta.....	22
Figura 3.4 – Pratos com inserto de carboneto de tungstênio: (a) Fabrico de um prato com insertos de carboneto de tungstênio; (b) Prato acabado; (c) Prato lascado; (d) Pormenor de superfície dos pratos fracturada vista ao microscópio, onde é possível ver a direccionalidade dos riscos deixados pela retificação.	23
Figura 3.5 – (a) Célula de carga para medição de força; (b) Representação de bobines de indução eletromagnética utilizadas como sensores de deslocamento para medir a distância entre pratos compressores; (c) Sensor de deslocamento fabricado e implementado num prato de compressão.	24
Figura 3.6 – Circuitos retificadores utilizados para os sensores de deslocamento. (a) Circuito desenvolvido para ensaios em condições quasi-estáticas; (b) Circuito desenvolvido para dinâmicos. As linhas verticais em tom cinza demarcam as partes emissora (à esquerda desta) e receptora do sistema (à direita desta).	25
Figura 3.7 – Evolução dos valores da tensão do sensor de deslocamento em função da distância entre os pratos de compressão; Os gráficos apresentam diferentes verificações da calibração do sensor (a) na configuração original de projeto e (b) após a introdução de melhorias relacionadas com as ligações dos cabos elétricos, para as mesmas condições de excitação.	26
Figura 3.8 – Carro móvel com os equipamentos necessários à excitação de sensores e aquisição de dados. 1 – Placa de aquisição de dados; 2 – PC; 3 – Amplificador; 4 – Osciloscópio; 5 – Gerador de sinais.	28
Figura 3.9 – Aparato experimental para a realização de ensaios de compressão quasi-estáticos.	29

Figura 3.10 – Aparato experimental utilizado para os ensaios a média velocidade. É possível ver a representação esquemática do aparato, bem como o martelo de queda implementado e a ferramenta de compressão preparada para realizar ensaios.....	31
Figura 3.11 – Aparato experimental utilizado para ensaios a alta velocidade. É possível ver a representação esquemática do aparato, bem como o dispositivo utilizado para medir a velocidade de impacto, a ferramenta de compressão e, o canhão pneumático.	33
Figura 3.12 – Calibração pressão-velocidade para os ensaios no canhão pneumático, para pressões entre os 2,5 e 5 bar.	33
Figura 4.1 – Comparação das curvas de escoamento obtidas na presente tese com as obtidas por Alcino Reis (2016) para o AA1050-O em condições quasi-estáticas; Os provetes foram obtidos do mesmo lingote.	35
Figura 4.2 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza medida entre ensaios de compressão incrementais para os metais puros (Cu, Zn, Al e Sn) em condições de deformação quasi-estáticas e de alta velocidade.	36
Figura 4.3 – Dureza inicial dos provetes da liga Ti6Al4V em função da posição radial de amostragem no varão fornecido.....	37
Figura 4.4 – Evolução da curva de escoamento plástico para Ti6Al4V em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais, para amostras recolhidas em diferentes posições radiais do varão fornecido. As amostras N58, N8 e N49 ficam a 35 mm do centro, enquanto a amostra N32 fica a 8 mm do centro.	38
Figura 4.5 – Evolução da curva de escoamento plástico para Ti6Al4V em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais, mas para amostras recolhidas em posições radiais similares do varão fornecido (a 35 mm do centro do varão). N8 e N49 foram testados em condições incrementais, enquanto N58, N17 e N4 foram testados em condições monotônicas.	38
Figura 4.6 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza dos materiais após deformação plástica para o Alumínio puro (99,999%) e ligas de alumínio (AS7G03+05U, AlSi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas incrementais.	39
Figura 4.7 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza dos materiais após deformação plástica para as ligas de engenharia ensaiadas na presente investigação (Ti6Al4V, AISI1045, AS7G03+05U, AlSi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas. Para referência foi adicionada a curva de escoamento do Alumínio puro em condições de deformação similares.....	40
Figura 4.8 – Evolução da curva de escoamento plástico para os metais puros ensaiadas na presente investigação (Cu, Zn, Al e Sn) em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais.	41
Figura 4.9 – Evolução da curva de escoamento plástico para as ligas de engenharia ensaiadas na presente investigação (Ti6Al4V, AISI1045, AS7G03+05U, AlSi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas.	42
Figura 4.10 – Evolução da curva de escoamento plástico para o Alumínio puro e para as ligas comercialmente puras AA1085 e AA1050 em condições de deformação quasi-estáticas obtidas através de ensaios de compressão uniaxial monotônicos e incrementais.	43
Figura 4.11 – Evolução da curva de escoamento plástico para o Alumínio puro e para a liga comercialmente pura AA1050 em diferentes taxas de deformação.	44
Figura 4.12 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Cobre puro a diferentes taxas de deformação.	45
Figura 4.13 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Zinco puro a diferentes taxas de deformação.	46

<i>Figura 4.14 - Evolução da curva de escoamento plástico para as ligas de alumínio AlSi9Cu3 e AS7G03+05U em diferentes taxas de deformação. Para referência foi adicionada a curva de escoamento do Alumínio puro em condições de deformação quasi-estáticas.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.15 - Evolução da curva de escoamento plástico para o AISI1045 em diferentes taxas de deformação (provetes recolhidos na periferia do varão).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.16 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Ti6Al4V em diferentes taxas de deformação (provetes recolhidos a aproximadamente 7 mm do centro do varão).</i>	<i>49</i>

Abreviaturas

AC – Corrente alternada

ACS – Archival Cytometry Standard

ADC – Conversor analógico-digital

IST – Instituto Superior Técnico

APF – Associação Portuguesa de Fundição

ASTM – American Society for Testing and Materials

BSI – British Standards Institution

CAD – Computer Aided Design

CIRP STC-C – The International Academy for Production Engineering - Cutting

CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

DC – Corrente contínua

DIN – Deutsches Institut für Normung

FCC – Cúbica de Faces Centradas

FEM – Finite Element Method

HCP – Hexagonal Compacta

HV – Dureza Vickers

LabM3 – Laboratório de Maquinagem e Microfabrico

NI – National Instruments

ppm – Partes por milhão

TTi – Thurbly Thandar Instruments

SHPB – Split Hopkinson Pressure Bar

Nomenclatura

A_0 – Área inicial do provete

A_b – Área da secção transversal das barras de Hopkinson

c_b – Velocidade da onda elástica

d_m – Comprimento médio da diagonal num ensaio de dureza Vickers

E – Módulo de Young

E_b – Módulo de Young das barras de Hopkinson

E_c – Energia cinética

E_p – Energia potencial gravítica

g – Aceleração da gravidade

H – Altura de queda

h_0 – Altura inicial do provete

M – Massa

P – Carga aplicada

T – Temperatura

T_f – Temperatura de fusão

T_r – Temperatura de referencia

t – Tempo

v – Velocidade

ε – Extensão verdadeira

ε_r – Extensão provocada pela onda refletida

ε_t – Extensão provocada pela onda transmitida

$\dot{\varepsilon}$ – Velocidade de deformação

$\dot{\varepsilon}_0$ – Fator de normalização para a velocidade de deformação

ρ_b – Densidade das barras de Hopkinson

σ – Tensão de escoamento

σ_y – Tensão limite de elasticidade

\emptyset_0 – Diâmetro inicial do provete

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

1 Introdução

Os materiais metálicos são utilizados na indústria para produção de componentes, equipamentos e bens de consumo. Inerente à transformação de metais estão os processos tecnológicos de corte e de deformação plástica. Estes, pela sua natureza cinemática e cadência da produção, desenrolam-se sob os mais variados regimes de deformação - desde baixa velocidade de deformação como por exemplo a extrusão, até regimes de muito alta velocidade de deformação como se verifica, por exemplo, na enformação explosiva (explosive forming). Sucede que a influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico dos materiais, nomeadamente na sua tensão de escoamento, é um dos fatores mais importantes para modelar, de forma realista, os processos de fabrico. A falta de informação acerca da relação velocidade de deformação – tensão de escoamento é, aliás, um dos principais fatores para o erro da modelação destes processos^[1]. Esta falta de informação deve-se, essencialmente, às dificuldades técnicas associadas aos ensaios mecânicos para elevadas velocidades de deformação, pelo que será, inevitavelmente necessário, o desenvolvimento de novas metodologias e técnicas de ensaio que permitam extensões elevadas para muito altas velocidades de deformação.

Neste trabalho procura-se analisar o comportamento mecânico de metais e ligas metálicas quando submetidos a uma larga gama de velocidades de deformação, estando esta compreendida entre o regime quasi-estático e $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Para condições quasi-estáticas existe um grande número de máquinas universais que permitem realizar ensaios de caracterização mecânica. Contudo, o mesmo não sucede para condições de elevadas velocidade de deformação. Desta feita, foram projetados e desenvolvidos pelo autor diversos equipamentos, máquinas e ferramentas com o propósito de possibilitarem ensaios mecânicos para esta vasta gama de taxas de deformação.

Os materiais selecionados para a presente dissertação podem-se dividir em dois grupos. O primeiro grupo compreende os metais puros e comercialmente puros: Alumínio, Cobre, Zinco, Estanho, AA1085 e AA1050. Ao passo que o outro compreende ligas metálicas representativas de aplicações de engenharia, designadamente: AlSi9Cu3, AS7G03+05U, AISI1045 e Ti6Al4V.

O comportamento mecânico dos materiais foi avaliado através de ensaios de compressão uniaxial e através de ensaios de dureza. Pelo que, findos os ensaios, se compara a evolução da tensão de escoamento e dureza em função da velocidade de deformação. Compara-se a resposta mecânica dos materiais entre si, consoante se tratem de metais puros ou ligas metálicas e, avalia-se qual a influência dos elementos de liga nas ligas de Alumínio estudadas.

O documento encontra-se estruturado em cinco capítulos, iniciando-se pela presente introdução. O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica onde se começa por abordar a caracterização mecânica e modelação do comportamento de materiais, nomeadamente modelos empíricos constitutivos e ensaios mecânicos que permitem obter os parâmetros de calibração destes modelos. De seguida introduz-se o parâmetro velocidade de deformação e quais os equipamentos e metodologias que permitem estudar a influência desta no comportamento mecânico dos materiais.

O capítulo 3 descreve as principais etapas do processo de desenvolvimento experimental. Começa-se por apresentar os materiais que foram selecionados para este trabalho e como foi feita a obtenção de provetes a partir destes. Segue-se o projeto e desenvolvimento de ferramentas, equipamentos e técnicas que foram especificamente desenvolvidos para possibilitar a realização de ensaios mecânicos para a gama de velocidades de formação pretendida.

O capítulo 4 avalia os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de dureza e de compressão uniaxial incrementais e monotônicos, conduzidos para diferentes taxas de deformação. Inicia-se com a relação entre dureza e tensão de escoamento para os metais puros e ligas de engenharia, seguindo-se da comparação das curvas de tensão de escoamento-extensão para os diferentes materiais estudados, consoante se tratem de metais puros ou ligas de engenharia. Avalia-se ainda qual a influência da percentagem de elementos de liga no Alumínio para ensaios realizados às mesmas velocidades de deformação. Finaliza-se ao calibrar, através do método dos mínimos quadrados não lineares, um modelo constitutivo para o comportamento dos materiais testados.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo inicia com uma revisão sobre caracterização de materiais. Apresentam-se com brevidade alguns modelos empíricos que, através de equações constitutivas, permitem modelar o comportamento mecânico dos materiais. De seguida abordam-se os ensaios mecânicos utilizados para a obtenção dos parâmetros de calibração para estes modelos, nomeadamente ensaios de compressão uniaxial e ensaios de dureza. Por fim, dá-se destaque ao parâmetro velocidade de deformação, explicitando a sua importância e quais os tipos de equipamentos e técnicas que permitem estudar a influência desta no comportamento mecânico dos materiais.

2.1 Caracterização mecânica de materiais

Diversos ensaios são amplamente utilizados em atividades de investigação e desenvolvimento com o fim de se obter a caracterização mecânica de um dado material. Isto visa conhecer as propriedades mecânicas dos mais diversos materiais, estando posteriormente relacionado com a seleção de determinados materiais em detrimento de outros para as mais diversas aplicações da indústria^[2]. Os procedimentos experimentais empregues na caracterização de materiais são frequentemente regulamentados, seguindo-se normas bem definidas de forma a obter resultados comparáveis entre laboratórios independentes. Diversas são as organizações que desenvolveram metodologias regulamentadas para a caracterização de materiais, como por exemplo a ASTM, a BSI, ou a DIN. Pelo que, mesmo organizações, empresas ou laboratórios cuja experiência em caracterização de materiais seja pouca ou nenhuma, podem fazer uso de procedimentos regulamentados para acreditar as propriedades mecânicas que pretendem conhecer para determinado material. Cabe pois definir como se pode proceder à caracterização destes, bem como os tipos de ensaios requeridos para tal.

2.1.1 Modelos constitutivos

O comportamento mecânico de materiais pode ser modelado através de equações constitutivas. Estas diferem entre si por contabilizarem ou não algumas propriedades fundamentais, como por exemplo a componente elástica da deformação ou o encruamento^[3]. Um modelo que não contemple a parte elástica da deformação diz-se rígido, que corresponde à aproximação de um módulo de elasticidade infinito. Ao passo que um modelo que não contemple o encruamento diz-se perfeitamente plástico. Quando se analisa 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. Existem também modelos visco-plásticos que contabilizam ainda os efeitos da temperatura e velocidade de deformação, sendo o segundo parâmetro o foco do presente trabalho. E existem ainda modelos híbridos, que permitem, através de uma única equação constitutiva, reproduzir vários modelos tradicionais.

Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns modelos constitutivos que serão abordados neste capítulo.

Tabela 2.1 - Modelos constitutivos abordados.

Modelo	Natureza do modelo
Ludwik-Hollomon	Rígido-plástico
Swift	Rígido-plástico
Voce	Rígido-plástico
Ludwik-generalizado	Elasto-plástico
Ramberg-Osgood	Elasto-plástico
Johnson-Cook	Visco-plástico
Silva	Híbrido

Modelo de Ludwik-Hollomon

O modelo de Ludwik-Hollomon (Ludwik, 1909; Hollomon, 1945) aplica-se a casos em que os materiais apresentem um comportamento rígido-plástico. A equação que rege este modelo é dada por:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

Onde K representa uma constante dependente do material e n é um expoente que depende do encruamento do material e cujo valor está compreendido entre 0 e 1, sendo que quanto maior for este expoente maior é o encruamento do material. Neste modelo admite-se um valor de tensão inicial igual a zero e um declive inicial da curva infinito, ou seja, toda a extensão do material é no domínio plástico. Prevê-se ainda que a tensão deverá sempre crescer com a extensão, exceto para a particularidade de $n = 0$, caso em que o material é rígido-perfeitamente-plástico.

Modelo de Swift

O modelo de Swift (Swift, 1952) é uma lei de potência, generalizada a partir do modelo de Ludwik. A expressão que o descreve é dada por:

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

Onde K é mais uma vez uma constante que depende do material e n um expoente que depende do encruamento. m é também um valor empírico que pode ser encarado como um valor que reflete a quantidade de pré-extensão num material, sendo que para um material recozido m é igual a 0. Graficamente este modelo representa então uma curva tensão-extensão conforme obtida no modelo de Ludwik após sofrer uma translação de valor m segundo o eixo positivo da extensão.

Modelo de Voce

O modelo de Voce (Voce, 1948) rege-se segundo a equação:

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

Onde K é um valor assintótico, para o qual as curvas tensão-extensão tendem, ao fazer-se variar os coeficientes m e n . A celeridade 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 Ludwik-generalizado

O modelo de Ludwik-generalizado está definido na região plástica por uma potência e assume-se existir um ponto de cedência abaixo do qual o material está em regime elástico. A equação para este modelo é dada por:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & , \varepsilon \leq \frac{\sigma_y}{E} \\ \sigma_y \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_y} \right)^n & , \varepsilon \geq \frac{\sigma_y}{E} \end{cases} \quad (4)$$

Onde σ_y representa a tensão limite de elasticidade, ε representa a extensão e, E representa o módulo de Young. Neste modelo existe uma descontinuidade no declive da curva tensão-extensão para o ponto de cedência, sendo que a curva obtida compreende então um trecho inicial de declive E , seguida da parte plástica pós cedência

Modelo de Ramberg-Osgood

O modelo de Ramberg-Osgood (Ramberg e Orsgood, 1943) é utilizado para situações cuja extensão em regime elástico e plástico são da mesma ordem de grandeza, ou seja, próximo da cedência. Desta forma, segundo este modelo, a extensão total é dada pela soma das parcelas elástica e plástica, segundo a equação:

$$\sigma = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{m-1} \right] \quad (5)$$

Onde σ_y é a tensão de cedência e α é uma constante adimensional. Neste modelo, para o ponto de cedência ($\sigma = \sigma_y$), a extensão plástica é α vezes superior à extensão elástica. Para um largo número de materiais metálicos é razoável assumir $\alpha = 3/7$ e para o caso de materiais elasto-perfeitamente-plásticos, $m = \infty$.

Modelo de Johnson-Cook

O modelo de Johnson-Cook (Johnson e Cook, 1983) 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 modelar o comportamento do material para uma larga gama de velocidades de deformação. Este modelo rege-se pela equação:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_f - T_r} \right)^p \right) \quad (6)$$

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 sensibilidade à velocidade de deformação, sendo que $\dot{\varepsilon}_0$ é uma constante que tem a função de normalização da velocidade de deformação, $\dot{\varepsilon}$. A constante p está relacionada com o amaciamento térmico, T_r é uma temperatura de referencia 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:

$$\sigma = [A + e^{m\varepsilon}\varepsilon^n][B + C \ln(D + \varepsilon)] \quad (7)$$

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, Voce e Johnson-Cook apresentados para casos particulares. O modelo mostrou 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^[4].

2.1.2 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos desempenham um papel fulcral na caracterização de materiais. É também através destes que se obtêm os parâmetros de calibração de modelos constitutivos como os anteriormente descritos^[5]. Ensaios mecânicos consistem em simulações experimentais aplicadas para fins de caracterização mecânica em condições de operação específicas. Existe um vasto leque de ensaios mecânicos cujo procedimento segue padrões bem definidos, sendo que a escolha de um determinado procedimento é função da característica a ser avaliada, do tipo de sollicitação e, das condições às quais determinado material ou componente irá estar sujeito. As características a serem avaliadas podem ser por exemplo tensão – extensão, dureza, ou ductilidade. Quando se refere o termo sollicitação fala-se por exemplo de compressão, tração, torção ou flexão. Já as condições às quais um material estará sujeito fazem referência ao nível de extensão, temperatura ou velocidade de deformação.

No presente trabalho foram utilizados ensaios de compressão uniaxial e de dureza Vickers para avaliar o comportamento mecânico de diversos materiais, pelo que estes dois tipos de ensaios mecânicos serão abordados de seguida.

Ensaio de Compressão Uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial entre pratos direitos é um dos ensaios mecânicos mais utilizados para obter a evolução tensão – extensão de um determinado material. Este consiste em submeter um provete cilíndrico a uma força compressiva, efetuando-se o registo da força medida para cada incremento de deslocamento (Figura 2.1 (a)), podendo os ensaios ser realizados de forma incremental ou monotónica. De forma a medir os parâmetros força e deslocamento do ensaio, é utilizada instrumentação especialmente concebida para o efeito, pelo que em série com os pratos se utiliza um sensor de força e um sensor de deslocamento.

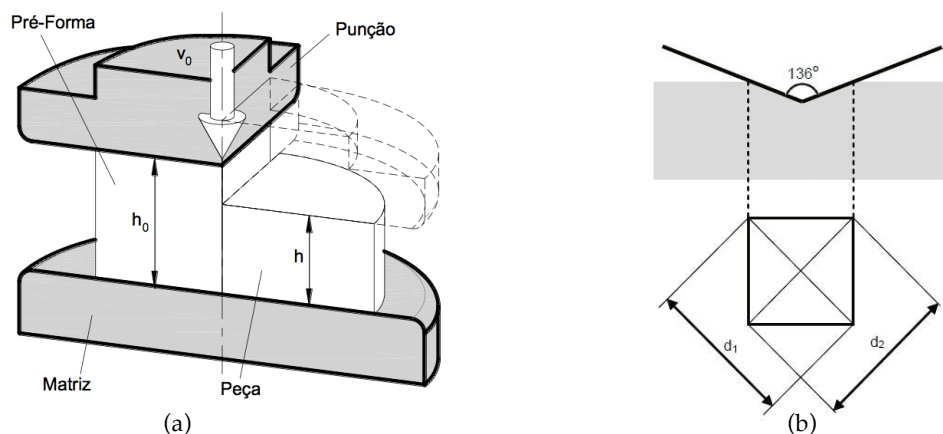


Figura 2.1 - Representação esquemática: (a) Ensaio de compressão uniaxial^[4]; (b) Ensaio de dureza Vickers.

O maior inconveniente que tende a ocorrer nos ensaios de compressão é o denominado efeito barril, que se manifesta visualmente na geometria lateral dos provetes – estes tendem a formar uma curvatura na sua superfície lateral. O efeito de barril ocorre devido ao estrangimento do escoamento do material na direção radial, uma vez que à medida que o provete é comprimido, a área de contacto entre provete e pratos de compressão aumenta de forma quadrática em função do raio. Isto promove efeitos de atrito, ainda para mais porque a área de expansão da superfície de contacto não é acompanhada pela quantidade de lubrificante presente nessa interface, o que se traduz no aumento do coeficiente de atrito. A contribuição do atrito torna-se relevante para extensões superiores a sensivelmente 0,8 (dependendo do par material prato/provete), pelo que a partir desse valor se verifica um aumento da força necessária para comprimir o provete, não acompanhado por uma variação proporcional do deslocamento. Desta feita, a tensão de escoamento obtida por ensaios de compressão monotónicos sofre também um aumento, visível graficamente.

As dimensões dos provetes são também um fator importante para a contribuição do atrito nos valores de força medidos, sendo que para razões entre altura e diâmetro de valor inferior a 1, o atrito entre a interface de contacto provete / prato de compressão apresenta uma influência maior^[6].

Tendo em conta estes aspetos, pode-se reter que a lubrificação é de extrema importância nos ensaios de compressão, para que estes decorram de forma a promover uma deformação quasi-homogénea ao longo de todo o provete.

Ensaio de Dureza

A dureza é uma característica mecânica que corresponde a uma medida da resistência mecânica do material a uma deformação plástica localizada. Este tipo de ensaios é extremamente útil como medida de controlo de qualidade uma vez que é considerado um ensaio pouco intrusivo, pois as indentações deixadas no material são da escala micrométrica. Pode ser utilizado, por exemplo, para determinar a homogeneidade de um material, ou para verificar se um determinado processo de tratamento surtiu o efeito desejado no material. De notar ainda que a dureza tem uma relação íntima com a tensão de escoamento do material, pelo que ensaios de dureza e compressão, realizados em simultâneo, permitem determinar esta relação que é função do material. Desta forma, poder-se-á posteriormente aferir o nível de deformação à qual um determinado material já foi submetido.

De forma a caracterizar melhor esta propriedade, foram-se desenvolvendo técnicas e metodologias, dando origem aos conhecidos: ensaio de dureza Vickers; ensaio de dureza Brinell; ensaio de dureza Rockwell; ensaio de dureza Shore; e até, ensaios de microdureza – utilizados para medir a dureza em amostras de geometria reduzida. Todas estas técnicas fazem uso de um indentador que visa penetrar a superfície de um material, para condições de carga controladas. E, para todas elas, quanto maior o índice de dureza, mais duro é o material e conseqüentemente, menor será a marca deixada pelo indentador.

Para o ensaio de dureza utilizado no presente trabalho, dureza Vickers, utiliza-se um indentador de diamante, com a geometria de pirâmide quadrangular cujas faces opostas fazem um ângulo de 136° (Figura 2.1 (b)). O valor de dureza é dado por um quociente que relaciona a carga aplicada, P em Kg-força, com a área de contacto indentação. A fórmula é dada por:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d_m^2} \quad (8)$$

Onde d_m , em unidades de mm , corresponde ao comprimento médio das diagonais deixadas pela indentação.

O ensaio Vickers apresenta ainda a vantagem de existir semelhança geométrica entre identações provocadas por diferentes cargas, pelo que o número de dureza Vickers é independente da carga aplicada^[7].

2.2 Ensaios Dinâmicos e Velocidade de Deformação

A caracterização dinâmica de materiais visa estudar e compreender o comportamento visco-plástico de um determinado material, ao submeter o mesmo a diferentes condições de velocidade de deformação e/ou temperatura. A necessidade de se estudar este comportamento surgiu fruto de se encontrarem bem estabelecidas as propriedades mecânicas dos materiais em condições quasi-estáticas, não havendo porém bases de dados que contemplassem estas propriedades para elevadas velocidades de deformação. Sendo que estas eram fundamentais, uma vez que se verificava que as propriedades mecânicas obtidas para condições estáticas não são representativas do comportamento dos materiais em situações de solitação dinâmicas, como observado em pesquisas pioneiras por J. Hopkinson^{[8],[9],[10]}.

2.2.1 Velocidade de deformação

A velocidade de deformação, ou taxa de deformação, é a taxa à qual se processa a deformação, exprime-se em unidades s^{-1} e é dada pela seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (9)$$

Aquando de uma solitação dinâmica, de forma semelhante ao que sucede em condições quasi-estáticas, o material deforma plasticamente quando é ultrapassado o seu limite elástico. Numa curva tensão-extensão, este comportamento traduz-se num troço inicial linear seguido de uma região de deformação plástica após cedência. A velocidade de deformação surge intimamente ligada a estas duas zonas de deformação, uma vez que para velocidades de deformação mais altas os materiais são submetidos a ondas elasto-plásticas, ou até mesmo ondas de choque, que provocam efeitos metalúrgicos nos metais^[11]. Estes efeitos ocorrem na sua estrutura cristalina, nos planos de escorregamento, onde as deslocações se processam a uma taxa mais elevada e existe maior resistência ao movimento, conforme descrito por Hartley e Duffy (1985)^[12]. Desta forma, para taxas de deformação mais elevadas, os materiais tendem a exibir um valor de tensão limite elástica mais elevado, seguindo-se tensões de escoamento mais elevadas também. Este tipo de comportamento encontra-se representado de forma genérica e meramente ilustrativa, na Figura 2.2.

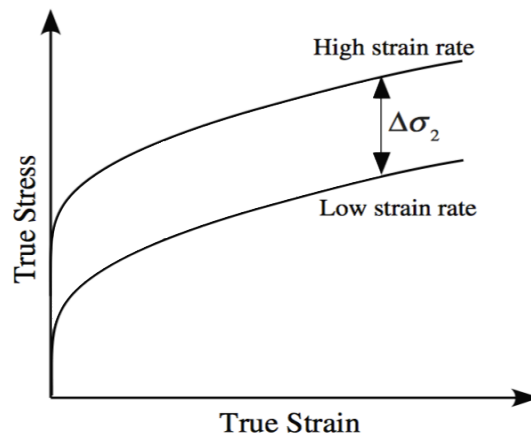


Figura 2.2 - Representação gráfica da influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do material.

O parâmetro velocidade de deformação é de particular interesse para as situações mais díspares, como por exemplo quando se procura estudar como é que um satélite se comporta se for atingido por algum fragmento espacial na Exosfera, quando se pretende aferir acerca de como um material se comporta aquando de uma explosão, ou até mesmo para projetar equipamentos sujeitos a impactos de balística. Porém, de particular interesse para a área de estudo da Tecnologia Mecânica, são os processos de fabrico. Na maioria dos processos de fabrico, os materiais são deformados em condições bastante diferentes daquelas encontradas em testes convencionais (Figura 2.3), pelo que o seu comportamento se desvia também daquele obtido através destes testes. Por análise à Figura 2.3 verifica-se que entre extremos, no que toca a processos tecnológicos, a velocidade de deformação pode variar sensivelmente 10 ordens de grandeza. É, portanto, necessário determinar as propriedades mecânicas dos materiais para diferentes taxas de deformação, de forma a perceber qual o comportamento que estes irão exibir e assim se poder modelar (com rigor) determinado processo, otimizar processos já existentes, ou até mesmo desenvolver novos processos tecnológicos.

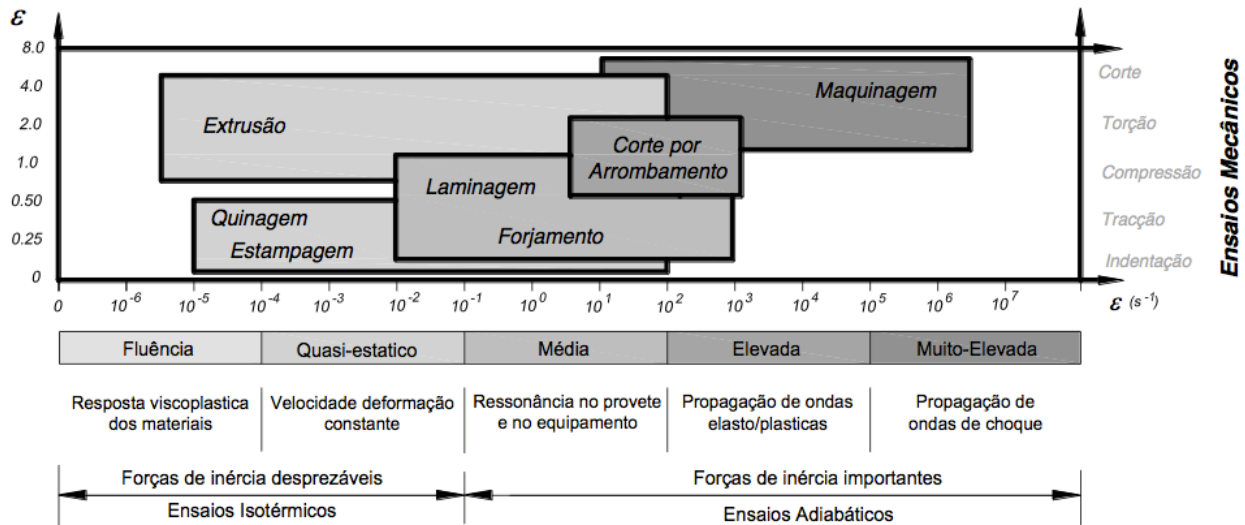


Figura 2.3 - Condições de similaridade entre processos tecnológicos e ensaios mecânicos^[4].

Cabe pois estabelecer quais os equipamentos e técnicas que permitem medir qual a influência da velocidade de deformação no comportamento do material.

2.2.2 Equipamentos e técnicas de ensaio

A caracterização mecânica de materiais para processos de deformação realizados em condições de carregamento quasi-estático é geralmente feita com recurso a máquinas de ensaios universais à tração, compressão e torção. Isto para velocidades de deformação entre $1 \times 10^{-3} - 1 \text{ s}^{-1}$. Para taxas de deformação médias, entre $1 - 10^2 \text{ s}^{-1}$, o tipo de equipamentos disponíveis é já mais restrito, recorrendo-se habitualmente a máquinas baseadas em sistemas de queda de graves, sistemas hidráulicos, ou sistemas mecânicos^{[13],[14],[15]}. E, para o caso de velocidades de deformação elevada, superiores a 10^2 s^{-1} , os ensaios realizam-se geralmente com recurso a equipamentos do tipo barra de Hopkinson, ou dispositivos de impacto de Taylor^[16].

Embora existam equipamentos que permitem realizar ensaios para uma vasta gama de velocidades de deformação, uma técnica frequentemente ignorada é a similaridade entre as condições de ensaio e as reais condições dos processos que se pretendem compreender e modelar. Neste contexto, apresentam-se abaixo as assinaturas velocidade de deformação-extensão típicas de processos de corte e deformação plástica (Figura 2.4 (a)) e dos principais equipamentos utilizados para caracterizar materiais em diferentes regimes de velocidade de deformação (Figura 2.4 (b)).

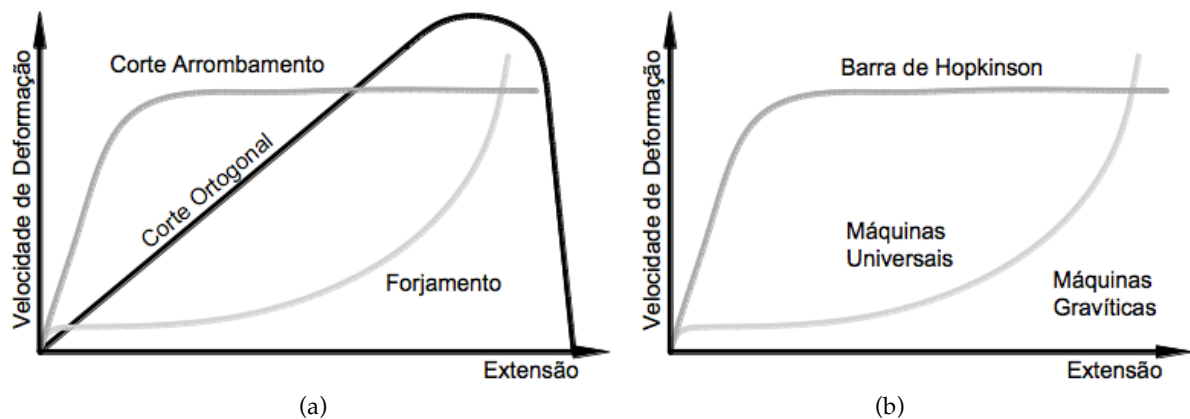


Figura 2.4 - Assinaturas velocidade de deformação típicas para^[4]: (a) Processos de corte e de deformação plástica; (b) Equipamentos de ensaio frequentemente utilizados para ensaios mecânicos a médias e altas velocidades de deformação..

Por análise a esta figura pode-se verificar que diferentes equipamentos apresentam diferentes assinaturas, não só entre si, mas também para com os processos tecnológicos de corte e deformação plástica evidenciados. Esta é a razão pela qual nem todos os equipamentos mostram adequabilidade para realizar ensaios simulando as reais características dos processos. Isto explicita a importância de adequar as assinaturas características das máquinas de ensaios às características cinemáticas dos processos, uma vez que curvas de escoamento obtidas sob diferentes condições de ensaio podem não coincidir. Negligenciar a similaridade (ou falta dela) entre as assinaturas do equipamento e do processo pode, portanto, introduzir erros de tal ordem que tornem desadequadas as caracterizações mecânicas obtidas, invalidando a modelação destes processos.

Por motivos de proximidade com o trabalho desenvolvido nesta dissertação e/ou relevância do ponto de vista da caracterização de materiais, apresentam-se de seguida alguns equipamentos que permitem realizar ensaios para velocidades de deformação compreendidas entre 10^{-3} e 10^4 s^{-1} .

Prensa Hidráulica

A prensa hidráulica, cuja representação esquemática pode ser vista na Figura 2.5 (b), é um equipamento que se baseia no princípio de que a pressão é mantida constante ao longo de um sistema fechado. Faz uso de uma bomba que desloca um fluido incompressível de forma a atuar um êmbolo. Devido à natureza do seu funcionamento, as prensas hidráulicas são equipamentos que geralmente produzem forças elevadas, na ordem das várias toneladas, pelo que são frequentemente utilizadas para processos de forjamento, extrusão, estampagem, quinagem, corte por arrombamento, entre outros. Apesar de serem capazes de exercer grandes forças, são equipamentos que estão bastante limitados no que toca à velocidade com que o êmbolo se desloca. No que a ensaios de caracterização mecânica diz respeito, este tipo de equipamento é um dos mais utilizados para ensaios de compressão e tração uniaxial a baixas velocidades de deformação.

Martelo de Queda

O martelo de queda é um equipamento cujo funcionamento se baseia no princípio da queda de graves. A estrutura deste equipamento encontra-se esquematizada na Figura 2.5 (a) e compreende um carro móvel / carro de massas, uma base maciça e, um provete colocado na zona de compressão. A velocidade do ensaio v é definida pela altura do carro de massas e a energia disponível, E_p , é função da massa e altura do grave, segundo as equações 10 e 11, respetivamente:

$$v = \sqrt{2gH} \quad (10)$$

$$E_p = MgH \quad (11)$$

De forma a medir os parâmetros força e deslocamento envolvidos no processo de deformação, geralmente o carro de massas e/ou ferramenta são instrumentados. Este é um equipamento que permite realizar ensaios de compressão uniaxial para se aferir acerca do comportamento mecânico de um dado material para médias velocidades de deformação. Permite ainda estudar fenómenos relacionados com a absorção e dissipação de energia. O martelo de queda apresenta tipicamente uma assinatura velocidade de deformação-extensão que cresce exponencialmente (Figura 2.4 (b)), que se deve ao facto da velocidade de atuação na zona de compressão permanecer aproximadamente constante durante o ensaio.

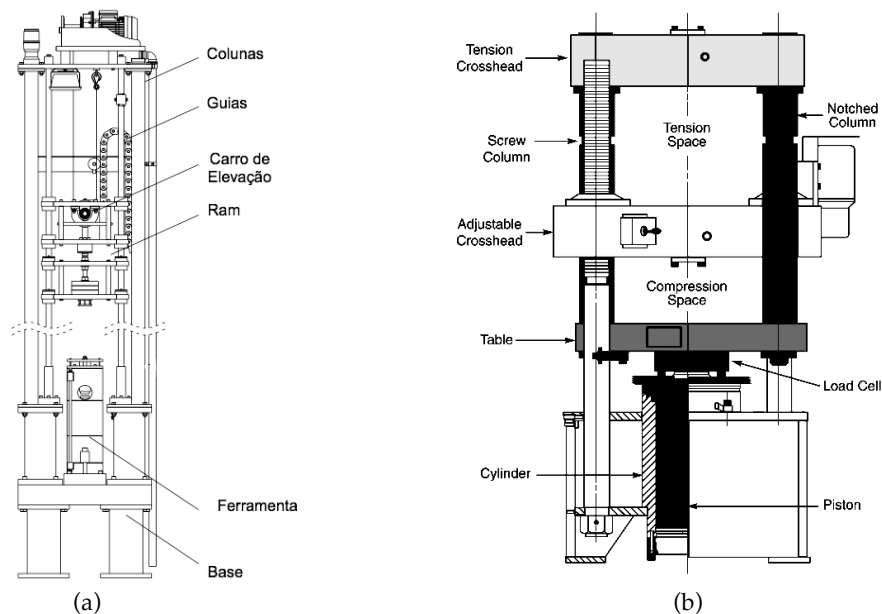


Figura 2.5 - Representação esquemática: (a) Martelo de queda^[17] (b) Prensa Hidráulica para ensaios mecânicos.

Barra de Hopkinson

A barra de Hopkinson (SHPB), cuja representação esquemática pode ser vista na Figura 2.6 (a), é um dos equipamentos mais utilizados para caracterizar materiais a taxas de deformação elevadas, entre 10^3 e 10^4 s^{-1} . A técnica de ensaio inerente a este equipamento faz uso de duas barras do mesmo material, excitadas em regime elástico acima da sua frequência de ressonância^[18]. O ensaio desenrola-se ao disparar uma barra projétil contra uma barra incidente, resultando daí uma onda de pressão elástica que se propaga ao longo da barra incidente até à interface da zona de compressão. Segue-se que uma parte dessa onda é transmitida para a barra transmissora e a outra parte da onda é refletida para a barra incidente (Figura 2.6 (b)). A monitorização destas ondas de pressão ao longo das duas barras é feita com recurso a extensómetros, permitindo assim determinar através de relações matemáticas, a curva de escoamento do material bem como a curva velocidade de deformação-extensão^[19].

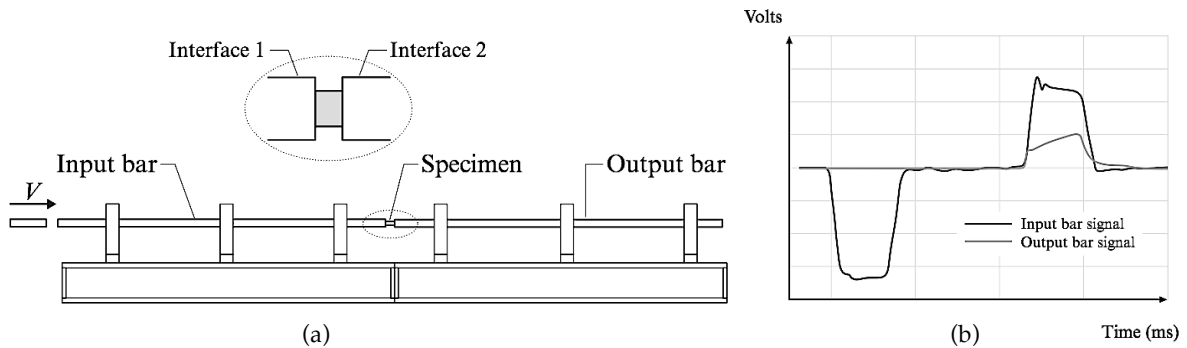


Figura 2.6 - Representação esquemática^[19]: (a) Barra de Hopkinson; (b) Ondas de pressão incidente, refletida e transmitida.

A partir do estado de equilíbrio (isto é, quando já não se verificam efeitos de inércia), a velocidade de deformação, extensão e tensão podem ser estimadas, respetivamente, por^[19]:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_b}{h_0} \varepsilon_r(t) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau \quad (13)$$

e

$$\sigma(t) = -\frac{E_b A_b}{A_0} \varepsilon_t(t) \quad (14)$$

Onde ε_r e ε_t correspondem aos valores de extensão fruto das ondas refletida e transmitida, respetivamente. c_b é a velocidade da onda elástica, definida por $c_b = \sqrt{E_b/\rho_b}$, sendo E_b e ρ_b o módulo de Young e a densidade das barras. Já A_b é a área da secção transversal da barra transmissora.

Apesar da barra de Hopkinson ser um dos equipamentos cuja utilização para caracterização de materiais a elevadas velocidades de deformação está mais difundida, há diversos fatores que têm que ser tomados em conta aquando do planeamento de ensaios e posterior análise dos resultados obtidos com recurso a este equipamento, de entre estes: (i) oscilação, com picos e vales, dos valores de tensão de escoamento, provocada por ondas elásticas, principalmente para valores mais baixos de extensão, (ii) os dados que se obtêm para caracterização do material na zona elástica não são geralmente disponibilizados por este equipamento, (iii) existem efeitos de inércia devido à alta velocidade para a qual ocorre o impacto, (iv) para estimar a tensão de escoamento para grandes extensões e velocidades de deformação elevadas é necessário extrapolar a partir de resultados obtidos para condições inferiores àquelas que se pretende conhecer. Todos estes fatores introduzem erro, sendo porém difícil quantificar a dimensão deste erro. Como tal, é necessário particular cuidado aquando da interpretação de dados e resultados obtidos de ensaios realizados numa SHPB^[20].

De forma contrária ao martelo de queda, a assinatura velocidade de deformação-extensão da barra de Hopkinson é aproximadamente constante (Figura 2.4 (b)).

Came Atuada por canhão Eletromagnético

Uma came é um mecanismo que transmite movimento a um seguidor por contacto direto. A came é denominada de membro excitador, ao passo que o seguidor é o membro conduzido. Existem diversos tipos de came, classificadas quanto ao tipo de entrada/saída, quanto ao tipo de membros excitador e conduzido, quanto ao tipo de movimento e quanto à posição do seguidor. Existem também considerações de projeto que se prendem quanto ao ângulo de pressão e raio de curvatura da came.

Recentemente foi introduzido um equipamento (Figura 2.7 (a)) que faz uso de uma came, integrada numa ferramenta de compressão, capaz de realizar ensaios de compressão uniaxial a velocidades de deformação até $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Este equipamento compreende uma came especificamente projetada consoante a natureza cinemática do processo que se pretende replicar, atuada com recurso a um canhão eletromagnético. Aquando da atuação do canhão eletromagnético, uma massa impacta no sistema guiado por came obrigando o seguidor a percorrer o perfil desta, resultando daí a conversão do movimento horizontal em deslocamento vertical – direção segundo o qual se processa a compressão (Figura 2.7 (b)). Este equipamento apresenta inovação no que a ensaios de caracterização mecânica diz respeito uma vez que, através do perfil da came, pode-se estabelecer à priori qual a assinatura velocidade de deformação – extensão do equipamento e, conseqüentemente, realizar ensaios para as reais condições do processo que se pretende modelar. Outra vantagem que este equipamento apresenta aquando da realização de ensaios na gama de velocidades de deformação para as quais foi projetado operar, é a atenuação das oscilações em dentes de serra causadas pelas forças de inércia e ondas elásticas típicas de ensaios de impacto^[21], uma vez que a compressão se processa na direção perpendicular ao impacto.

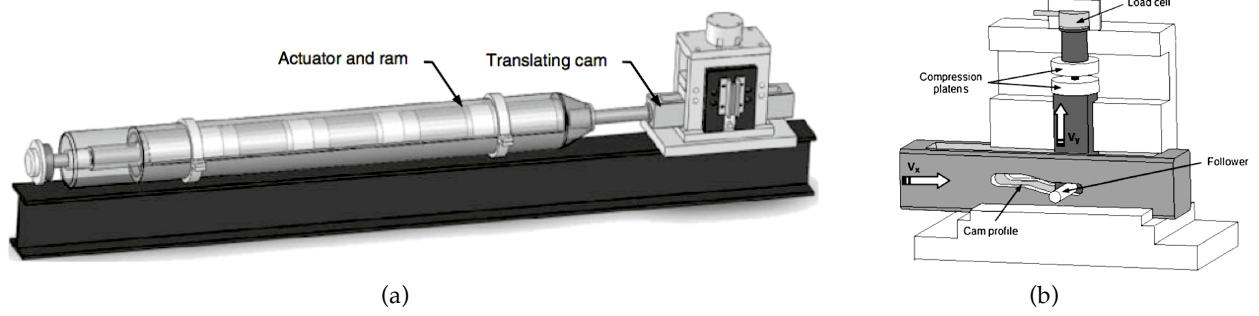


Figura 2.7 - Representação esquemática^[21]: (a) Equipamento de compressão guiado por came, com atuador eletromagnético; (b) Perfil da came que transforma o movimento horizontal em deslocamento vertical – direção segundo a qual se processa a compressão.

3 Desenvolvimento Experimental

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento experimental da investigação, particularmente no que diz respeito ao projeto e ao fabrico de máquinas para ensaios mecânicos em condições de alta velocidade de deformação. Este capítulo serve ainda o propósito de apresentar os materiais ensaiados, assim como descrever os procedimentos seguidos na obtenção dos provetes e na realização dos ensaios mecânicos. Termina-se com a apresentação do plano de ensaios.

3.1 Materiais de ensaio

Os materiais ensaiados dividem-se em dois grupos: (i) metais puros e comercialmente puros, e (ii) ligas metálicas de engenharia, servindo os primeiros como referência para validar as máquinas e os procedimentos desenvolvidos pelo autor, e os segundos para avaliar o desempenho dos equipamentos e dos sensores em condições de utilização real. De entre os vários materiais, faz-se referência ao Alumínio puro por ser um dos materiais mais bem documentados na literatura e que apresenta características físicas, químicas, mecânicas, elétricas e térmicas bem definidas. Igual referência é feita à liga de titânio Ti6Al4V por ser aquela com características mecânicas mais severas para as máquinas de ensaios.

A utilização de metais na sua forma mais pura, cuja estrutura cristalina é composta por átomos de um único elemento metálico, facilita a comparação entre ensaios obtidos em diferentes laboratórios por serem materiais menos suscetíveis a variações metalúrgicas. Para além disso, o elevado grau de pureza destes garante homogeneidade entre fornecedores e lotes de material, facilitando a repetição dos resultados em diferentes períodos e locais. De realçar ainda que os metais puros são, na generalidade, dúcteis e macios, diminuindo assim as solicitações mecânicas sobre as máquinas de ensaio protótipo desenvolvidas pelo autor. Na presente investigação foram utilizados os seguintes materiais de elevada pureza: (i) Alumínio, (ii) Zinco, (iii) Estanho e (iv) Cobre, com composição química certificada pela GoodFellow e apresentada na Tabela 3.1. Selecionaram-se ainda duas ligas de alumínio comercialmente puro: (i) AA1085 e (ii) AA1050, cujas composições químicas são discriminadas na Tabela 3.1.

Muitas são as ligas metálicas desenvolvidas com o fim de se obter características físicas e propriedades superiores aos elementos que as constituem, sendo posteriormente amplamente utilizadas para as mais diversas aplicações de engenharia. Na presente investigação foram selecionadas ligas metálicas representativas de diferentes setores da engenharia, tais como (i) extrusão, fundição e fundição injetada, (ii) forjamento, quinagem e construção soldada, e (iii) maquinagem de componentes para aplicações biomédicas e aeronáuticas. Em representação do primeiro setor, seguindo as orientações da APF (Associação Portuguesa de Fundição), foram escolhidas as ligas (i) AlSi9Cu3 e (ii) AS7G03+05U. Para o segundo setor, seguindo as orientações da CMM (Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista) foi escolhido o aço de baixa liga AISI1045 amplamente utilizado no setor pela elevada relação entre o custo e o benefício, enformabilidade e boa soldabilidade. Por último, mas não menos importante, e seguindo as orientações do grupo de estudo “Cooperative Work on Material Constitutive Models and Data for Modelling of Metal Cutting” do CIRP STC-C (The International

Academy for Production Engineering - Cutting), foi escolhida a liga de titânio Ti6Al4V por ser um dos materiais de engenharia mais difíceis de maquinar através de processos mecânicos e térmicos. A Tabela 3.1 apresenta as composições químicas certificadas pela ASCOMETAL.

As ligas AlSi9Cu3 e AS7G03+05U são ligas de alumínio, utilizadas essencialmente na indústria de fundição no fabrico de componentes para o sector automóvel, como por exemplo blocos de motor ou chassis de veículos. A liga AISI1045 é um aço amplamente utilizado na indústria metalomecânica e sector automóvel, servindo de matéria prima para o fabrico de parafusos, fusos, veios, engrenagens, cambotas, ferramentas, barras estruturais, entre outros. Por sua vez, a liga Ti6Al4V é uma liga de titânio, com aplicações, sobretudo, no campo da biomédica e das indústrias aeronáutica e aeroespacial. Pode ser encontrada em implantes, próteses, turbinas a gás e peças de aviões. Na indústria aeronáutica, o titânio Ti6Al4V representa 80 a 90 % da aplicação das ligas de titânio^[22]. A Tabela 3.2 apresenta algumas das principais propriedades dos materiais utilizados para o presente trabalho.

Os metais puros (Al, Zn, Sn, Cu) foram fornecidos num formato de varão cilíndrico extrudido com diâmetro adequado ao fabrico dos provetes de compressão. A recolha das amostras passou pela realização de operações de torneamento fino e retificação dos topos planos. As ligas metálicas comercialmente puras (AA1085 e AA1050) foram fornecidas pela empresa Lanema num formato de chapa, tendo sido posteriormente seccionadas em guilhotina, fundidas em atmosfera controlada, vazadas e de seguida extrudidas para um formato de varão cilíndrico com 8 mm de diâmetro. A recolha das amostras passou pela realização de operações de torneamento fino e retificação dos topos planos. Uma vez produzidos os provetes de materiais puros e comercialmente puros, estes foram processados termicamente através do tratamento de recozimento. Este é um tratamento térmico que origina a recristalização do grão metalúrgico, levando-o a coalescer até um estado em que o metal se apresenta na sua forma mais macia. O recozimento elimina o histórico de deformações, garantindo-se assim uma comparação rigorosa e fidedigna entre a caracterização mecânica obtida experimentalmente e os resultados descritos na literatura. A temperatura de recozimento é aquela que permite a recristalização total de um determinado metal e o seu valor encontra-se geralmente a $\sim 0,3T_f$ ^[23]. Desta feita, todos os provetes, com exceção dos provetes de estanho, foram levados ao forno, sendo mantidos à sua temperatura de recozimento durante o período de 1,5 horas e, de seguida deixados a arrefecer lentamente até atingirem a temperatura ambiente. Os provetes de estanho não foram levados ao forno uma vez que o estanho recristaliza à temperatura ambiente^[24].

As ligas metálicas de engenharia AISI1045 e Ti6Al4V foram fornecidas pela ASCOMETAL em formato de varão com 80 mm de diâmetro, enquanto as ligas leves AlSi9Cu3 e AS7G03+05U foram fornecidas sob a forma de lingote vazado. A preparação dos materiais passou pela recolha de uma fatia de material com 7 mm e posterior recorte de formatos cilíndricos com 7 mm através do processo de electroerosão por fio. Posteriormente, foram realizadas operações de torneamento fino, retificação cilíndrica e plana com vista a garantir o rigor geométrico (planicidade e paralelismo entre as faces de topo) e dimensional dos provetes finais. Este procedimento permitiu também melhorar o acabamento

superficial dos provetes e remover zonas termicamente afetadas. Importa ainda referir que as ligas metálicas de engenharia foram fornecidas numa condição metalúrgica desconhecida sem indicação da homogeneidade do material. Considerando o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas destas ligas na condição fornecida, a aplicação de técnicas de normalização ou recozimento da massa metálica ficou limitada, não tendo sido aplicado qualquer tratamento térmico. Para garantir a qualidade da presente investigação, foi considerada a posição radial da amostragem em relação ao centro geométrico dos varões de AISI1045 e Ti6Al4V.

Após recolha das amostras, os provetes foram identificados e foi realizado o controlo da sua qualidade geométrica e dimensional, e ainda verificada a dureza inicial de cada um dos provetes de compressão. A medição da dureza do material foi realizada com recurso ao microdurómetro Hardruler HVS-1000. Para melhorar o rigor da medida de dureza foram aplicados procedimentos de polimento das superfícies de topo dos provetes.

Os provetes de compressão uniaxial utilizados na investigação tinham um diâmetro inicial $\phi_0 = 6 \text{ mm}$ e altura inicial $h_0 = 6,4 \text{ mm}$ constantes, e esbelteza aproximadamente unitária. Para cada condição de deformação foram realizados 5 ensaios de compressão. A Figura 3.2 apresenta a matriz de amostragem para as ligas metálicas de engenharia AISI1045 e Ti6Al4V.

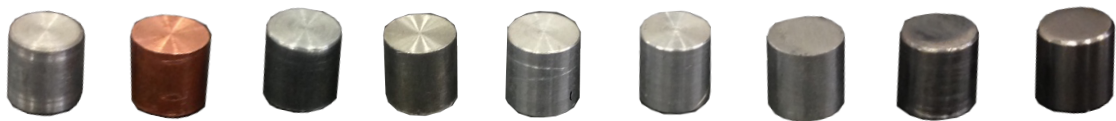


Figura 3.1 - Provetes de compressão uniaxial com diâmetro inicial $\phi_0 = 6 \text{ mm}$ e altura inicial $h_0 = 6,4 \text{ mm}$ constantes e com esbelteza aproximadamente unitária. Na imagem são apresentados da esquerda para a direita, os provetes de (i) Alumínio puro, (ii) Cobre puro, (iii) Zinco puro, (iv) Estanho puro, (v) AA1085, (vi) AA1050, (vii) AS7G03+05U, (viii) AISI1045 e (ix) Ti6Al4V.

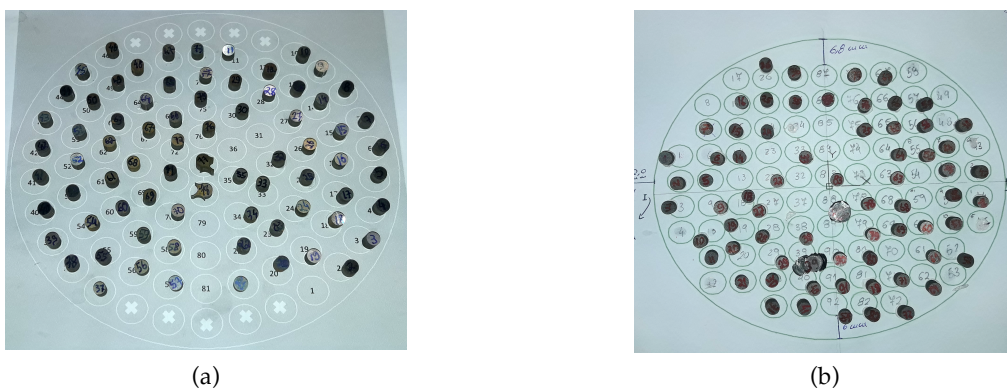


Figura 3.2 – Amostragem realizada para provetes das ligas: (a) AISI1045; (b) Ti6Al4V.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais ensaiados. Os metais puros são designados pelo nome do elemento metálico e os vestígios de outros elementos são apresentados em partes por milhão [ppm]; As ligas metálicas são apresentadas pelo nome normalizado e os elementos de ligas são quantificados em peso percentual [%wt].

	Al	Ag	Au	C	Cd	Ce	Co	Cu	Cr	Ga	Ge	Fe	In	La	Li	Mg	Mn	H	Hg	N	Na	Ni	O	Pb	Pd	P	Pt	S	Sb	Se	Si	Sn	Ta	Ti	V	Zn	
Cobre [ppm]	0.011	-	-	-	-	-	-	Matriz	-	-	-	0.008	-	-	0.001 (<)	-	-	-	-	0.001 (<)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002	-	-	
Estanho (β) [ppm]	-	0.18 (<)	0.1 (<)	-	0.1	-	0.1	-	-	-	-	0.5	1	-	-	-	-	-	0.1 (<)	-	-	-	-	4.4	-	-	-	-	1.5	0.2 (<)	-	Matriz	0.5 (<)	-	-	-	
Zinco [ppm]	-	0.92	-	-	2.2	-	0.03	1.7	0.085	-	-	17	-	-	-	-	1.3	-	-	-	-	0.14	-	24	-	-	-	-	0.053	-	0.12	0.04	-	-	-	Matriz	
Alumínio [ppm]	Matriz	-	-	-	-	0.74	-	0.702	-	-	0.1 (<)	0.48	-	0.489	-	1.21	-	-	0.3 (<)	-	-	-	-	-	0.1 (<)	0.71	0.1 (<)	-	-	-	1.2	-	-	-	-		
AA1085 [%wt]	99.85	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005	-	0.079	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	0.005	0.013	0.003
AA1050 [%wt]	99.50	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	0.40	-	-	-	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	-	-	0.03	-	0.05
AlSi9Cu3 [%wt]	80.1 - 86	-	-	-	-	-	-	2 - 4	0.15	-	-	0.6 - 1.1	-	-	-	0.15 - 0.55	0.55	-	-	-	-	0.55	-	0.35	-	-	-	-	-	-	0.8 - 11	0.25	-	0.2	-	1.2	
AS7G03 +05U [%wt]	91.75 - 92.5	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	0.14	-	-	-	0.3 - 0.4	0.09	-	-	-	0.0025	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.7 - 7.3	-	-	0.1 - 0.15	-	0.09
AISI1045 [%wt]	-	-	-	0.42 - 0.5	-	-	-	-	-	-	-	98.51 - 98.98	-	-	-	-	0.6 - 0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04 (≤)	0.05 (≤)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ti6Al4V [%wt]	6	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89.71	4	-	

Tabela 3.2 - Propriedades físicas dos materiais ensaiados. A gama de valores está associada à condição metalúrgica com mínimos na condição recozida e máximos na tratada.

	Estrutura Cristalina	Densidade [g/cm ³]	HV	HB	Young [GPa]	Cedência (0.2%) [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Rotura [MPa]	Fratura [J/m ²]	Rácio τ/R	Resistividade [nΩ·m]	Magnetismo	Fusão [°C]	Estados de Oxidação
Alumínio	FCC	2,6989	15		70	10					28.2	Paramagnético	660	3 to 1
Zinco	HCP	7,1	30		96-108	60					59.0	Diamagnético	420	+2 to 0
Estanho (β)	TETRAGONAL	7,265	5		44,3-50	11					115	Paramagnético	232	4 to 1, -4
Cobre	FCC	8,93	50		110	33,3						Diamagnético	1083	
AA1085-O	FCC	2,7	20		68	17							660	
AA1050-O	FCC	2,7	22		69	25	250		7	6			660	
AlSi9Cu3	FCC	2,76	81		75	140							600	
AS7G03 +05U	FCC	2,67	110	55 - 100	74	90 - 200		190-280					625	
AISI1045		7,87	180		200	310						Ferromagnético	1460	
Ti6Al4V		4,429	349		120	950							1660	

3.2 Desenvolvimento da Ferramenta de Compressão

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados com recurso a uma ferramenta especialmente desenvolvida para o efeito. Durante o projeto da mesma, foi considerada a dificuldade que existe em comparar resultados obtidos entre diferentes máquinas de ensaios, geralmente por desvios nas curvas de calibração das máquinas e dos sensores. Por esta razão, a linha seguida consistiu no projeto de uma ferramenta compatível com diferentes máquinas de ensaios e que permitisse a monitorização dos parâmetros físicos (tempo, força e deslocamento) sempre através dos mesmos sensores e recorrendo aos mesmos procedimentos de ensaio. Esta é também uma forma de controlar a influência da condição tribológica no resultado final das curvas de escoamento pois o material e o acabamento superficial dos pratos de compressão manter-se-ão constante durante os testes.

A ferramenta de compressão é constituída por dois grupos de componentes: *(i)* os componentes mecânicos que controlam o paralelismo e o movimento dos pratos e, *(ii)* os componentes elétricos e eletrónicos que permitem monitorizar os parâmetros físicos (tempo, força e deslocamento) envolvidos no ensaio. Os componentes mecânicos foram concebidos e dimensionados com recurso aos módulos de CAD/FEM existentes no software Solidworks. A Figura 3.3 apresenta o modelo CAD da ferramenta e dos componentes projetados pelo autor. Nesta figura é possível observar a existência de uma base sólida em aço (9) sobre a qual são montados todos os outros componentes, com especial destaque para as três colunas de guiamento (6) e os seis casquilhos em bronze (5) responsáveis por manter uma orientação correta e um movimento suave e sem prisões entre as duas placas circulares móveis (2 e 3). Esta cadeia cinemática é importante para garantir que a energia fornecida pela máquina de ensaios é aplicada de forma correta na compressão e, que a resposta mecânica dos provetes é transmitida à célula de carga (8) sem dissipação. Sobre as placas circulares móveis são montados os pratos de compressão (4). A interface de montagem com a máquina de ensaios é realizada através de um encabadouro (1) montado na placa circular superior que permite a abertura e fecho da ferramenta. Todos os componentes foram fabricados e instalados com base nas especificações de fabrico previamente determinadas. Do mesmo modo, foi acautelado o arranque em funcionamento da ferramenta de modo a permitir regularizar o valor da folga entre os casquilhos e as colunas para garantir a formação de um filme lubrificante adequado. Foram realizados diversos ciclos de rodagem, simulando-se a cinemática do ensaio de compressão até se verificar que as placas circulares móveis se deslocavam suavemente e sem prisões em fase de montagem.

O projeto da ferramenta teve ainda em consideração aspetos relacionados com a montagem dos *(i)* transdutores de força e dos *(ii)* sensores de deslocamento.

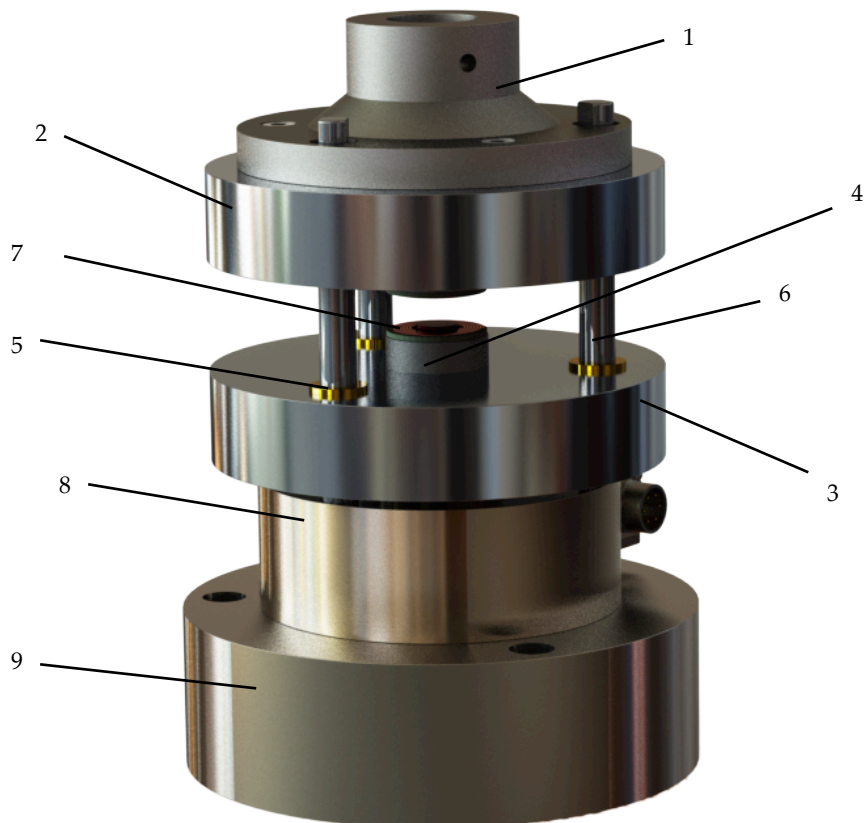


Figura 3.3 – Ferramenta de compressão, modelada em Solidworks. 1 - Encabadouro; 2 - Porta pratos superior; 3 - Porta pratos inferior; 4 - Prato de compressão; 5 - Casquilho; 6 - Coluna; 7 - Sensor de deslocamento; 8 – Célula de carga; 9 - Base da ferramenta.

Os pratos de compressão são os componentes da ferramenta que têm de suportar, sem deformar ou fissurar, todos os esforços envolvidos na compressão dos provetes. Esta consideração levou ao fabrico de diferentes conjuntos de pratos de compressão. Inicialmente foram fabricados pratos de aço forjado em prensa hidráulica para um valor de carga superior ao valor espectável nos ensaios de compressão. Após a operação de forjamento, a planicidade dos pratos foi corrigida em retificação plana e a rugosidade das superfícies ajustada através de polimento com lixas de carbetto de silício (SiC) na sequência P240, P400, P600, P800 e P1200 até à obtenção de uma superfície espelhada. Este procedimento de forjar o conjunto de pratos de compressão permitiu aumentar a dureza superficial destes em mais de 50 % (de $178,3^{\pm 2,5}$ HV para $260,9^{\pm 5,3}$ HV). Contudo, estes valores mostraram-se insuficientes para ensaiar as ligas de engenharia AISI1045 e Ti6Al4V. Após os ensaios de compressão observou-se a formação de uma concavidade nos pratos, limitando as condições de compressão uniaxial. Para ultrapassar esta situação foi necessário fabricar um novo conjunto de pratos de compressão, em metal duro (carboneto de tungsténio). A necessidade desta alteração, combinada com o elevado custo do material e o processamento difícil, obrigou a redesenhar os pratos para a inclusão de pequenos insertos cilíndricos em metal duro nos pratos originais (Figura 3.4 (a)). Para o fabrico destes insertos foi necessário recorrer aos processos de eletroerosão por fio e retificação plana. Estes

insertos cilíndricos foram montados por interferência mecânica através do aquecimento e contração dos pratos de aço (Figura 3.4 (a)). Após montagem, foram retificados para garantir o paralelismo entre as superfícies planas dos pratos e as superfícies de assentamento na ferramenta de guias, seguindo-se a operação de polimento com pasta de diamante com granulometria inferior a $0,5 \mu m$ até atingir a condição espelhada (Figura 3.4 (b)). O polimento é necessário para remover a textura da superfície deixada pela operação de retificação que condiciona a expansão axissimétrica do provete, e em casos extremos pode contribuir para a iniciação de fissuras (concentração de tensões na direção perpendicular ao escoamento do material).

Como o metal duro tem baixa tenacidade à fratura foi possível observar a formação de fissuras e fratura dos pratos em condições de impacto (Figuras 3.4 (c) e (d)). Este revés obrigou a alterar o material dos pratos considerando um compromisso entre a elevada dureza do metal duro e a elevada tenacidade do aço forjado. Foi fabricado um terceiro par de pratos em HSS M2 (Molybdenum High Speed Steels) que mostraram ser capazes de resistir aos ensaios de impacto sem deformar nem fraturar. Os pratos finais foram igualmente sujeitos a um rigoroso polimento até apresentarem uma superfície plana e espelhada, fulcral para a realização de ensaios. Este estudo permitiu definir a geometria e os materiais constituintes dos pratos para a realização dos ensaios de compressão da investigação em condições similares.

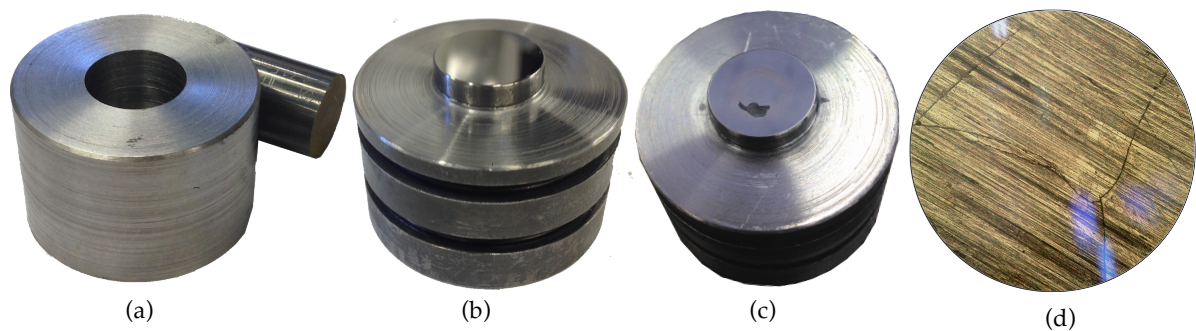


Figura 3.4 – Pratos com inserto de carboneto de tungstênio: (a) Fabrico de um prato com insertos de carboneto de tungstênio; (b) Prato acabado; (c) Prato lascado; (d) Pormenor de superfície dos pratos fracturada vista ao microscópio, onde é possível ver a direccionalidade dos riscos deixados pela retificação.

3.3 Instrumentação e Aquisição de Dados

A instrumentação da ferramenta envolve a integração de (i) uma célula de carga para medir a força de compressão (Figura 3.3) e (ii) um sensor de deslocamento para medição a distância entre os pratos de compressão (Figura 3.3). A força é monitorizada através de uma célula de carga comercial SENSOTEC modelo 43, de 100 toneladas (Figura 3.5 (a)), baseada na tecnologia de transdutores resistivos do tipo ponte extensométrica completa de Wheatstone. A curva de calibração da célula de carga é de $3 mV$ por cada V de excitação, tendo sido utilizado o máximo valor de excitação de $10 V$. Quando solicitada com carga máxima terá uma resposta de $30 mV$. Esta célula de carga foi posteriormente ligada a um sistema de amplificação e condicionamento de sinal.

A distância entre pratos foi medida através de um sensor desenvolvido especificamente para assegurar uma resposta sensível e rápida a alta velocidade, e simultaneamente uma montagem compacta entre os pratos de compressão. O sensor de deslocamento baseia-se na tecnologia de transdutores indutivos, com base no princípio de indução eletromagnética entre bobines. A força eletromotriz induzida varia com a distância entre bobines (Figura 3.5 (b)) sendo máxima na posição fechada. A bobine emissora do campo eletromagnético foi montada no prato móvel e a bobine recetora do sinal induzido foi montada no prato fixo junto à célula de carga. Esta opção de montagem permite simultaneamente minimizar o acoplamento eletromagnético entre os sinais das bobines e os sinais da célula de carga e, aumentar o rigor da medida ao evitar contribuições indesejadas provenientes das deformações elásticas da ferramenta, da máquina de ensaios e da redução das folgas entre componentes durante a carga.

A construção dos sensores é feita em placa plana em fibra de vidro com bobine espiralada em camada de cobre de $40\ \mu\text{m}$ para permitir a integração direta do sensor no prato de compressão. A sua envolvente consiste numa forma anelar com diâmetro interior $17\ \text{mm}$ e diâmetro exterior $39\ \text{mm}$ para compatibilidade com os pratos de compressão. Foi utilizado o processo de maquinagem química com máscara em papel fotográfico e transferência térmica. A remoção da placa de transporte foi feita com água corrente e a remoção do cobre remanescente foi dissolvido numa solução de Cloreto férrico (FeCl_3). Por último, a máscara polimérica foi retirada com recurso a um solvente à base de acetona. As bobines em bruto foram posteriormente furadas para montagem e soldadura dos terminais elétricos de ligação ao gerador de funções e ao retificador de sinal. Em seguida foi aplicado um revestimento dielétrico à base de epoxy para eliminar a ocorrência de curto-circuitos, bem como aumentar a rigidez estrutural do sensor (Figura 3.5 (c)).

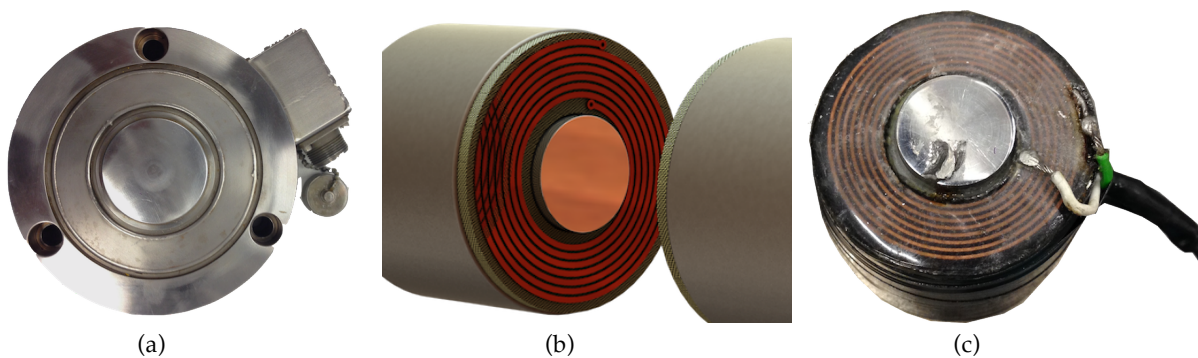


Figura 3.5 – (a) Célula de carga para medição de força; (b) Representação de bobines de indução eletromagnética utilizadas como sensores de deslocamento para medir a distância entre pratos compressores; (c) Sensor de deslocamento fabricado e implementado num prato de compressão.

A bobine emissora foi ligada a um gerador de funções do fabricante TTI, modelo TG120, enquanto que a bobine recetora foi ligada a um osciloscópio do fabricante Tektronix, modelo TDS220, para observação do sinal AC necessário para o estabelecimento do acoplamento eletromagnético. Esta montagem permitiu a análise da morfologia do sinal AC induzido e o dimensionamento de um

circuito eletrônico para converter este num sinal DC para facilidade do tratamento de dados. O circuito eletrônico é constituído por uma ponte retificadora de 4 díodos semicondutores em silício. Esta configuração de ponte de díodos completa fornece um sinal ondulado pelo que foi necessário introduzir componentes capacitivos para uniformizar a resposta de saída (Figura 3.6). Porém, esta configuração atrasa o sinal de saída tornando a resposta do sensor mais lenta e constringindo a sua aplicação em alta velocidade. Deste modo, foi necessário estabelecer um compromisso entre a qualidade do sinal de saída e o tempo de resposta do sensor através do desenvolvimento de placas retificadoras dedicadas a cada uma das gamas de velocidade de ensaio: (i) compressão em condições quasi-estáticas e, (ii) compressão em média e alta velocidade. Na placa destinada aos ensaios dinâmicos foi reduzida a capacitância e introduzido um elemento dissipativo para aumentar a velocidade de resposta do circuito. As placas retificadoras foram isoladas eletricamente do exterior e reforçadas estruturalmente através da aplicação de várias camadas de resina dielétrica à base de epoxy. Estas placas retificadoras foram posteriormente ligadas a uma placa de aquisição de dados de forma a registar o sinal DC medido pelos sensores.

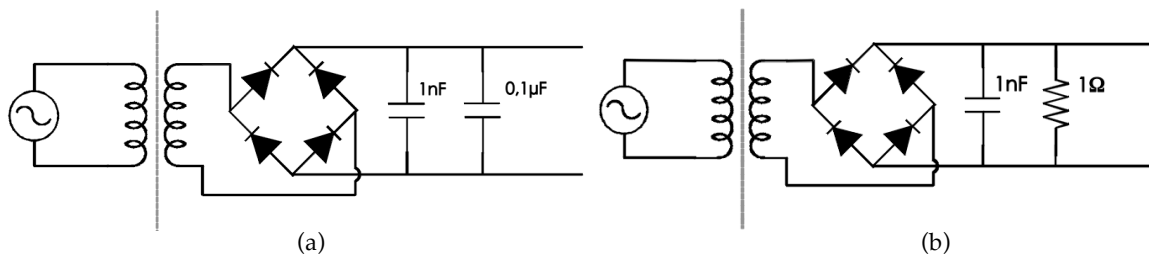


Figura 3.6 – Circuitos retificadores utilizados para os sensores de deslocamento. (a) Circuito desenvolvido para ensaios em condições quasi-estáticas; (b) Circuito desenvolvido para dinâmicos. As linhas verticais em tom cinza demarcam as partes emissora (à esquerda desta) e receptora do sistema (à direita desta).

Para calibrar um sensor indutivo é necessário numa primeira fase (i) otimizar o sinal de excitação e verificar a existência de interferência eletromagnéticas com outros componentes elétricos ou eletrônicos do aparato experimental e, numa segunda fase (ii) estabelecer a curva de calibração que correlaciona a distância física com a resposta elétrica do sensor. A assinatura elétrica do sinal AC (tipo de onda, frequência e tensão pico-a-pico) influencia o rácio entre o sinal e o ruído, devendo ser verificada qual a melhor combinação de parâmetros elétricos a utilizar. Porém, este processo de otimização só pode ser realizado após montado todo o aparato experimental. No estudo realizado obtiveram-se bons resultados para onda sinusoidal com frequência de 2 MHz e tensão de pico-a-pico de 20 V, observando-se porém interferência indesejada com o sinal da célula de carga. Esta situação poderá estar também relacionada com o transiente (tempo de recuperação inverso) entre os estados condutor e não-condutor dos semicondutores, que no caso dos díodos utilizados não garantia um bom funcionamento para frequências superiores a 1 MHz, segundo a ficha técnica do fabricante. Considerando estes constrangimentos, foi encontrada uma nova gama de parâmetros para a assinatura elétrica, tendo estes sido utilizados ao longo da tese, passando a descrever, uma onda quadrada com frequência de 990 KHz e tensão de pico-a-pico de 12 V. Nesta gama de parâmetros, a

onda quadrada mostrou funcionar tão bem quanto a sinusoidal, ainda com a vantagem de fornecer um sinal com menos ruído.

Para determinar a curva de calibração do sensor de deslocamento foram realizadas medidas decrementais controladas da altura de cilindros em alumínio. Este procedimento permitiu uma calibração do sensor próxima das condições operativas do ensaio de compressão. A gama de calibração teve em consideração a altura inicial (aproximadamente 7 mm) e final (aproximadamente 7 mm) do provete antes e após compressão, respetivamente, para assim se eliminarem procedimentos de extrapolação das curvas de calibração que possam comprometer a qualidade dos dados experimentais. As Figuras 3.7 (a) e (b) apresentam os dados experimentais de calibração que relacionam os valores elétricos do sensor de deslocamento com a medida física do afastamento entre pratos. O ajuste de uma equação polinomial aos pontos experimentais permitiu obter a curva de calibração do sensor. Porém, a verificação periódica da calibração do sensor mostrou existirem desvios através da translação da curva de ajuste conforme ilustrado na Figura 3.7 (a). Esta questão inesperada foi objeto de investigação tendo-se verificado que o sensor tem como equivalente elétrico um gerador flutuante e deste modo fica dependente da auto-indução da bobine e das cablagens constituintes. Esta questão foi ultrapassada através do controlo do posicionamento relativo (menor possível e coaxial) dos fios elétricos soldados no ânodo e cátodo. Igualmente através da qualidade das próprias soldaduras, tanto nos terminais das bobines como na placa retificadora, pois este tipo de circuito-elétrico sensor é solicitado por sinais elétricos de alta frequência. A Figura 3.7 (b) mostra a excelente estabilidade da curva de calibração após a introdução das referidas melhorias. A verificação da curva de calibração foi realizada periodicamente e/ou quando realizadas operações de manutenção ou substituição dos pratos de compressão.

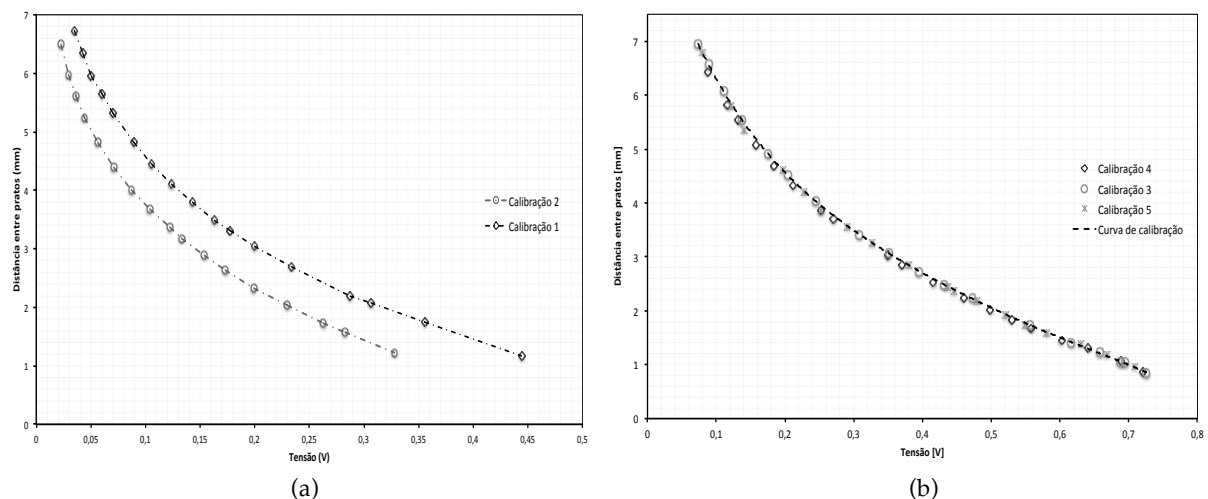


Figura 3.7 – Evolução dos valores da tensão do sensor de deslocamento em função da distância entre os pratos de compressão; Os gráficos apresentam diferentes verificações da calibração do sensor (a) na configuração original de projeto e (b) após a introdução de melhorias relacionadas com as ligações dos cabos elétricos, para as mesmas condições de excitação.

A definição do sistema de condicionamento e de aquisição de sinal requer especial atenção quando o(s) evento(s) a monitorizar ocorrem num período de tempo muito reduzido^[25]. O condicionamento de sinal (geralmente analógico) deve ser rápido e sensível a qualquer variação dos sensores,

nomeadamente quando é necessário amplificar sinais de baixa amplitude e limitar os valores de saída por compatibilidade com os sistemas de aquisição. Na presente investigação foi utilizado um amplificador do fabricante VISHAY, modelo 2310B, para condicionamento da célula de carga. O amplificador foi configurado com um ganho de 500. Importa referir a necessidade de confirmar periodicamente o valor de excitação do amplificador e informar 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 da aplicação de cargas calibradas. A saída do amplificador foi ligada numa das portas disponíveis na placa de aquisição de dados.

A aquisição de dados (geralmente digital) deve ser constituída por um conversor analógico-digital (ADC) rápido, pois é geralmente este o componente eletrónico que estrangula a taxa de aquisição de dados. De igual modo, as placas de aquisição de dados onde estão montados os ADCs devem possuir uma memória dedicada e adequada à dimensão da amostragem que se pretende recolher. Isto porque a taxa de transferência de dados combinada com o tempo de latência dos computadores e dos programas informáticos utilizados para aquisição de dados (mesmo os mais modernos) não permitem a transferência/registo direto das medidas experimentais para ficheiro digital. A resolução com que as medidas experimentais são obtidas depende simultaneamente do valor de bits da precisão na conversão analógico-digital e da gama de medida. A definição da frequência de aquisição e da resolução das medidas que se pretende registar é geralmente controlada através do programa de controlo da placa e/ou aquisição de dados. Este acesso remoto permite refazer as ligações internas da placa de aquisição num esquema mais adequado ao tipo de sensor e utilização pretendida.

Na presente investigação foi utilizada uma placa de aquisição de dados do fabricante NI, modelo PCI 6115, que permite a aquisição simultânea de 4 canais de 12 bits, até 10 MHz e 42 V. Esta placa está conectada por cabo, bidireccionalmente, a uma caixa de ligações do fabricante NI, modelo BNC-2120, que permite a utilização dos cabos coaxiais vindos dos sensores de deslocamento e força. O controlo da placa e o registo dos dados num ficheiro digital foi realizado através de um programa desenvolvido pelo autor em Labview. Este programa foi desenhado com interface homem-máquina simples e intuitiva e, mostrando graficamente a evolução da força e do deslocamento em tempo real. Este programa regista simultaneamente o tempo, o deslocamento e a força num ficheiro ASC.

A configuração da placa teve em consideração (i) a taxa de aquisição de dados procurando um mínimo de 150 sem exceder 300 medidas por ensaio para facilidade do tratamento dos dados experimentais, (ii) o ajuste da gama de medida entre um valor nulo de força/deslocamento e sem ultrapassar excessivamente o valor máximo espectável para permitir melhorar a resolução da medida e a estabilidade do programa às variações de sinal, (iii) o tipo de sinal, que para ambos os sensores pode ser considerado DC, num (iv) esquema elétrico diferencial, e (v) a aplicação de filtros ao sinal adquirido. No presente trabalho não foram utilizados quaisquer filtros ou operações sobre os sinais a registar para manter o maior rigor da medida efetuada.

Para facilitar o transporte do sistema de aquisição de dados, foi utilizado um carro móvel onde foram colocados todos os equipamentos necessários ao condicionamento e aquisição dos sinais elétricos associados aos sensores de força e deslocamento (Figura 3.8).

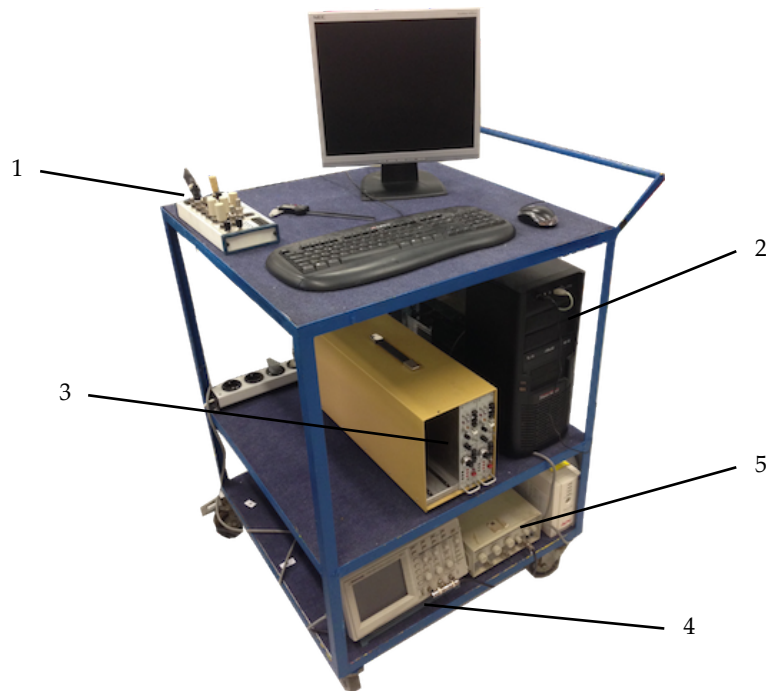


Figura 3.8 – Carro móvel com os equipamentos necessários à excitação de sensores e aquisição de dados. 1 – Placa de aquisição de dados; 2 – PC; 3 – Amplificador; 4 – Osciloscópio; 5 – Gerador de sinais.

3.4 Máquinas de Ensaio

Na impossibilidade física de utilizar uma única máquina de ensaios para realizar ensaios de compressão numa gama alargada de velocidade, a presente investigação teve como objetivo o desenvolvimento de três máquinas de ensaios para gamas diferentes de velocidade de deformação. Deste modo, foram desenvolvidos/instalados: (i) uma prensa hidráulica para ensaios em regime quasi-estático (até 1 s^{-1}); (ii) um martelo de queda para regime de média velocidade de deformação (entre 1 e 10^2 s^{-1}); e (iii) um canhão pneumático para regimes de alta velocidade de deformação (entre 10^2 e $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$). Estes equipamentos têm em comum a compatibilidade com a única ferramenta de compressão desenvolvida na presente investigação.

3.4.1 Prensa Hidráulica

Os ensaios de compressão quasi-estáticos foram realizados numa prensa hidráulica do fabricante CIATA, modelo 30T, modificada e instalada no Laboratório de Maquinagem e Microfabrico. Esta prensa tem uma capacidade de 30 toneladas-força e uma velocidade máxima de $0,01 \text{ m/s}$. Esta máquina-ferramenta foi adaptada para permitir a montagem das ferramentas de compressão e a incorporação dum sensor de pressão para verificação simultânea da força exercida pela máquina. Optou-se ainda por separar o grupo hidráulico da estrutura da máquina para minimizar interferências externas ao ensaio. O equipamento possui um grupo hidráulico motorizado com controlo manual, sendo a sua utilização fácil e intuitiva. A representação esquemática deste equipamento e do aparato utilizado podem ser vistos na Figura 3.9.

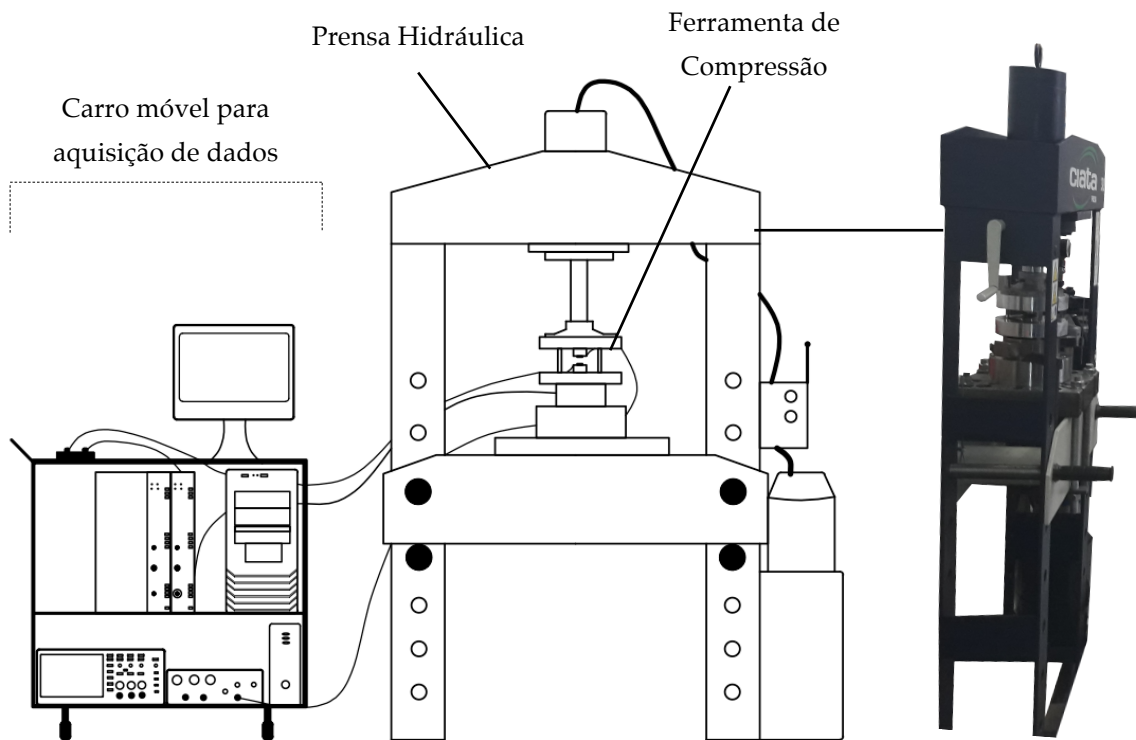


Figura 3.9 – Aparato experimental para a realização de ensaios de compressão quasi-estáticos.

3.4.2 Martelo de queda

Para realizar ensaios na gama média de velocidades foi necessário desenvolver, no Laboratório de Maquinagem e Microfabrico, um martelo de queda que tem por base o princípio da queda de graves. Este equipamento foi projetado considerando as infraestruturas existentes, tendo sido instalado num pilar do LabM3. Esta máquina de ensaios é constituída por 3 tubos quadrangulares em construção soldada com 200, 100 e 50 mm de secção, de modo a permitir a utilização de diferentes massas para a mesma altura. Estes tubos permitem a queda controlada/guiada das massas duma altura útil de 2,5 m e, distam do solo cerca de 0,5 m para permitir a montagem da ferramenta de compressão. Devido ao elevado peso da estrutura e das massas de queda foi necessário fazer a ancoragem chumbada ao pilar em três zonas distintas. A elevação das massas é realizada através de um guincho elétrico com gancho magnético que, quando atuado, liberta a massa. Esta máquina de ensaios permite uma gama de velocidades de impacto entre 1 e 7,7 m/s e uma gama de massas entre 1 a 100 Kg, permitindo configurar diferentes relações velocidade – energia. Importa lembrar a importância do controlo da energia de impacto, pois a energia remanescente da compressão vai ser dissipada na ferramenta. Se o valor da energia remanescente for muito elevado pode acontecer que a tensão de cedência dos pratos ou de qualquer outro elemento da ferramenta seja ultrapassada e ocorram danos permanentes. Isto aplica-se igualmente aos limites de resistência mecânica da célula de carga. Observou-se durante a

investigação que estas ocorrências promovem avarias permanentes e paragens prolongadas para substituição de componentes mecânicos e sensores.

A Tabela 3.3 apresenta alguns valores de referência que foram utilizados durante os ensaios.

Tabela 3.3 – Tabela com valores de referencia para o martelo de queda implementado.

	Tubo		
	1	2	3
Secção [mm²]	200x200	100x100	50x50
Capacidade de elevação [Kg]	33 / 66 / 99	10	1
Velocidade mínima aconselhada [m/s]	1	1	1
Velocidade máxima [m/s]	7,7	7,7	7,7
Energia máxima disponível [J]	2912,6	294,2	29,4
Altura máxima de elevação [m]	3	3	3
Princípio de funcionamento	Gravidade		

A elevação das massas é feita com recurso a 3 eletroímãs independentes, um por cada tubo, podendo apenas ser elevadas massas num tubo de cada vez – isto visa garantir que não se está a trabalhar num tubo e há por negligência uma massa elevada num dos outros. As massas mais pequenas (1 e 10 Kg) são elevadas manualmente através de um cabo de aço que passa por roldanas que se fixaram ao teto do laboratório e permitem ao conjunto eletroímã e cabo percorrer o total comprimento dos tubos. Já massas maiores (33, 66, e 99 Kg) são elevadas por um guincho elétrico que se instalou, especialmente para o efeito, no pilar do Laboratório e uma vez mais, o seu curso de elevação é o total comprimento do tubo.

Para se controlar a altura de elevação foram introduzidas escalas graduadas em cada um dos tubos em unidades de 1 cm. De forma a permitir a correta utilização do martelo de queda, foi desenvolvido um painel de controlo que permite ligar e desligar a máquina, ativar e desativar cada eletroímã e, escolher qual destes se pretende utilizar. Por questões de flexibilidade do aparato, o motor elétrico é acionado por um comando à parte.

A ferramenta de compressão foi então colocada no chão e fixada numa base sólida em aço. De maneira a poder-se alternar os ensaios entre tubos, consoante energia e velocidade requeridas, foi colocada uma base com diversos furos distribuídos pela mesma, para assim permitir a fixação da ferramenta em diferentes posições. Visando amortecer o impacto dos graves maquinou-se uma peça em ertacetil, que se colocou e prendeu com parafusos no encabadouro da ferramenta.

O aparato experimental utilizado nestes ensaios pode ser visto na Figura 3.10.

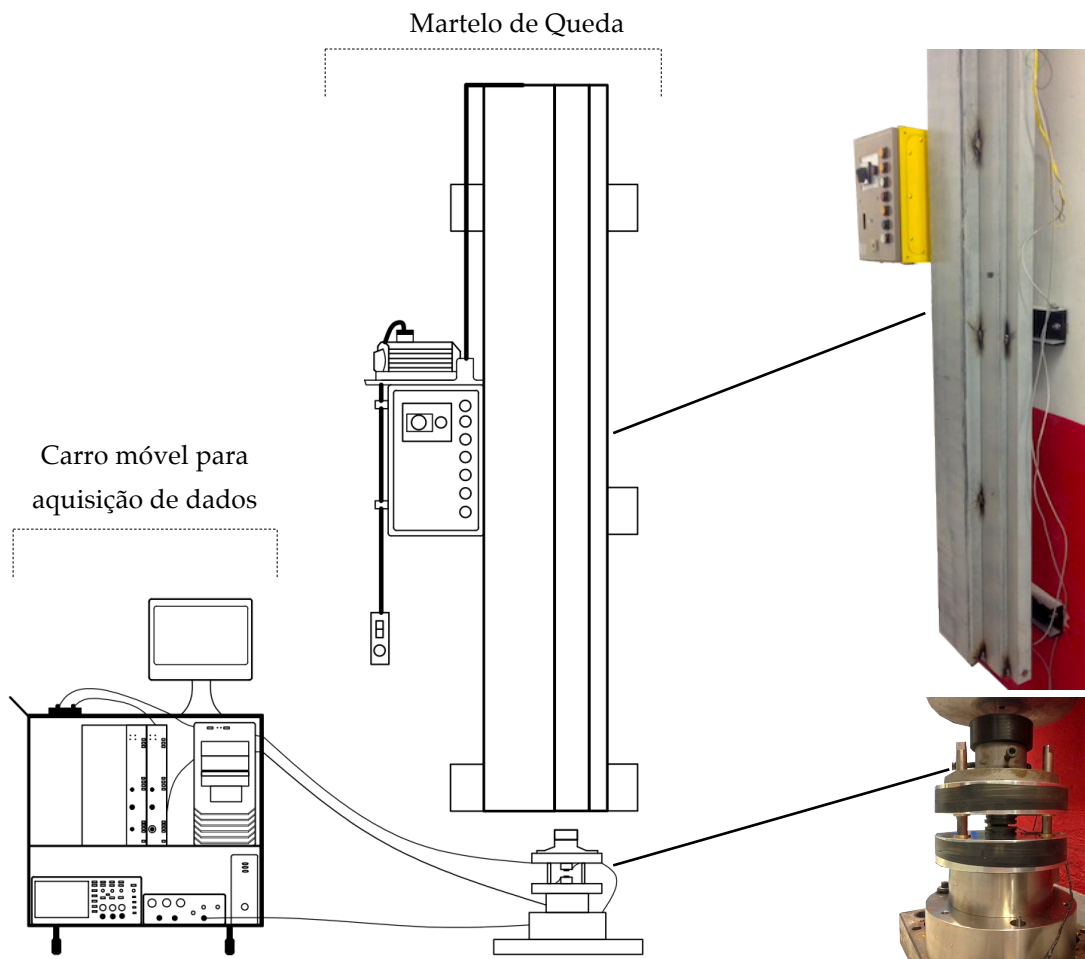


Figura 3.10 – Aparato experimental utilizado para os ensaios a média velocidade. É possível ver a representação esquemática do aparato, bem como o martelo de queda implementado e a ferramenta de compressão preparada para realizar ensaios.

3.4.3 Canhão pneumático

Para a realização dos ensaios de compressão a alta velocidade foi fabricado e instalado um canhão pneumático no LabM3. Este é essencialmente composto por uma câmara de pressão e um tubo que permite o guiamento e aceleração dum projétil. O acionamento duma válvula permite que o ar pressurizado na câmara se escoe para o cano, impulsionando o projétil. A energia disponível para o ensaio de compressão está relacionada com a energia cinética E_c , sendo esta função da velocidade e da massa do projétil (equação 15).

$$E_c = \frac{1}{2} M v^2 \quad (15)$$

A energia do disparo carece de ser cuidadosamente calculada para evitar que a energia remanescente da compressão possa vir a danificar algum elemento da ferramenta e/ou sensores. O canhão pneumático permite impulsionar facilmente projéteis até velocidades balísticas (superiores a 100 m/s) e, uma vez que a energia evolui com o quadrado da velocidade, facilmente se obtêm também energias de impacto elevadas. De forma a controlar a quantidade de energia, consoante a velocidade de impacto pretendida, existe um conjunto de projéteis de diferentes massas. Neste contexto, utilizou-se um sistema de impacto composto por uma barra intermédia na qual o projétil embate, transferindo a sua quantidade de movimento, sendo depois esta barra intermédia a responsável pela compressão do provete. É a razão entre as massas do projétil e da barra intermédia que permite controlar a velocidade e energia do ensaio. No presente caso, utilizou-se um projétil de bronze com 25 mm de diâmetro e a massa de $1,2\text{ Kg}$, que era disparado contra uma barra polimérica com o mesmo diâmetro mas massa inferior, de $0,3\text{ Kg}$. A barra polimérica era então acelerada para efeito de compressão dos provetes. Utilizou-se uma barra polimérica por ter uma massa mais baixa quando comparada com uma barra em aço das mesmas dimensões, com a vantagem de servir ainda de amortecedor ao impacto do projétil.

A instalação do canhão pneumático foi feita numa viga, de forma a permitir disparar horizontalmente. A barra intermédia foi alinhada com o cano do canhão e depois integrada no sistema com recurso a uma chumaceira. Esta chumaceira é de aço inoxidável austenítico AISI304L e apresenta um orifício central, onde se colocou um casquilho de acrílico, com a folga adequada para permitir o movimento longitudinal da barra suave, sem comprometer o seu guiamento. O conjunto casquilho/barra foi depois oleado de forma a formar uma fina película lubrificante e reduzir o atrito na interface de contacto. Para se utilizar a ferramenta de compressão durante os ensaios de alta velocidade foi necessário adaptar a mesma, removendo-se o encabadouro e porta pratos superior desta. De seguida fixou-se horizontalmente a ferramenta na viga, alinhada com o cano do canhão e com a barra intermédia, numa estrutura de aço capaz de absorver a energia remanescente do impacto. De forma a medir o deslocamento durante o ensaio fixou-se o segundo prato de compressão na barra intermédia com recurso a um perno roscado, utilizando-se assim a mesma instrumentação dos ensaios anteriores. Esta foi então a configuração utilizada para realizar ensaios a alta velocidade, cujo aparato pode ser visto na Figura 3.11.

De forma a estimar a velocidade de impacto foi ainda necessário desenvolver uma metodologia para medir a velocidade em função da pressão fornecida à câmara pneumática. Para tal desenvolveu-se um dispositivo que fazia uso de dois feixes laser e dois fotodíodos, montados em paralelo. Os feixes de laser incidiam nos fotodíodos que distavam 15 mm entre si e o sinal recebido era transmitido para um osciloscópio. Aquando dos disparos de calibração, media-se então no osciloscópio o tempo que a barra intermédia demorava a cortar os dois feixes de laser, podendo-se assim calcular a velocidade média da mesma nesse percurso. O dispositivo foi colocado junto à zona de compressão de forma a medir a velocidade da barra intermédia após ser acelerada pelo projétil, para assim se calibrar, com maior rigor, a velocidade de impacto na compressão.

Carro móvel para aquisição de dados

Zona de Compressão

Canhão Pneumático

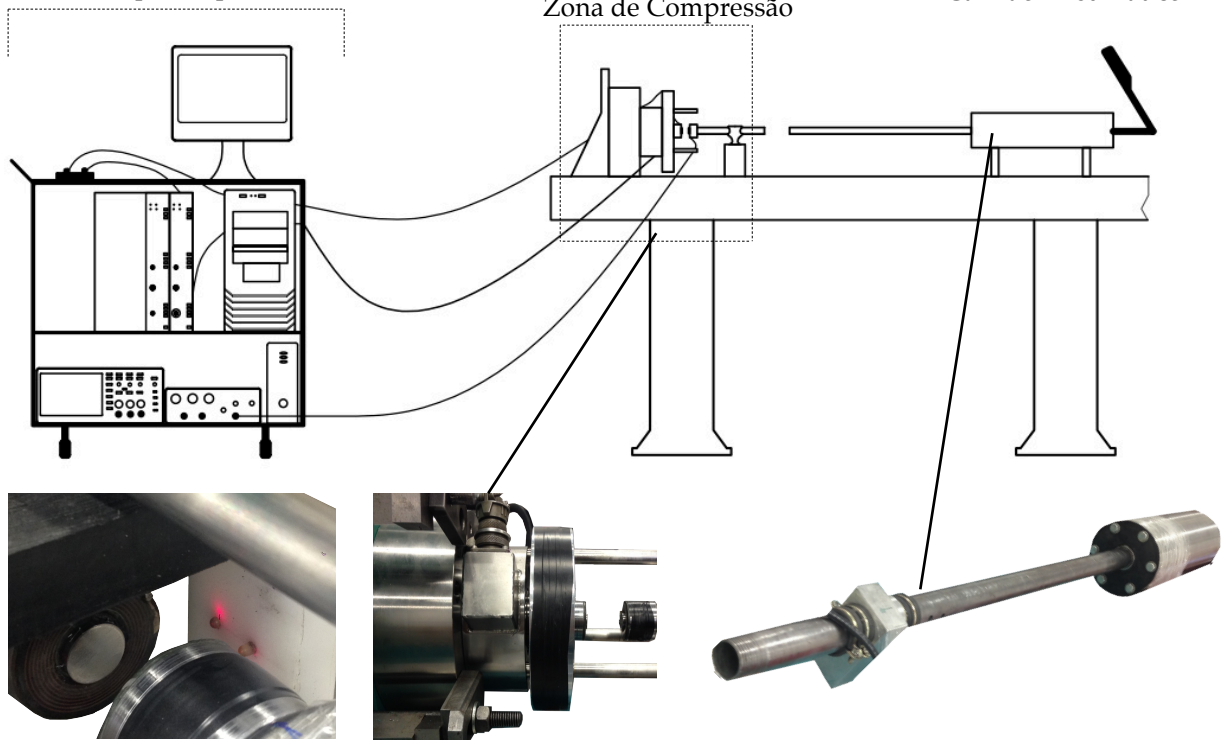


Figura 3.11 – Aparato experimental utilizado para ensaios a alta velocidade. É possível ver a representação esquemática do aparato, bem como o dispositivo utilizado para medir a velocidade de impacto, a ferramenta de compressão e, o canhão pneumático.

A Figura 3.12 apresenta a curva de calibração que relaciona a pressão fornecida ao sistema com a velocidade de impacto.

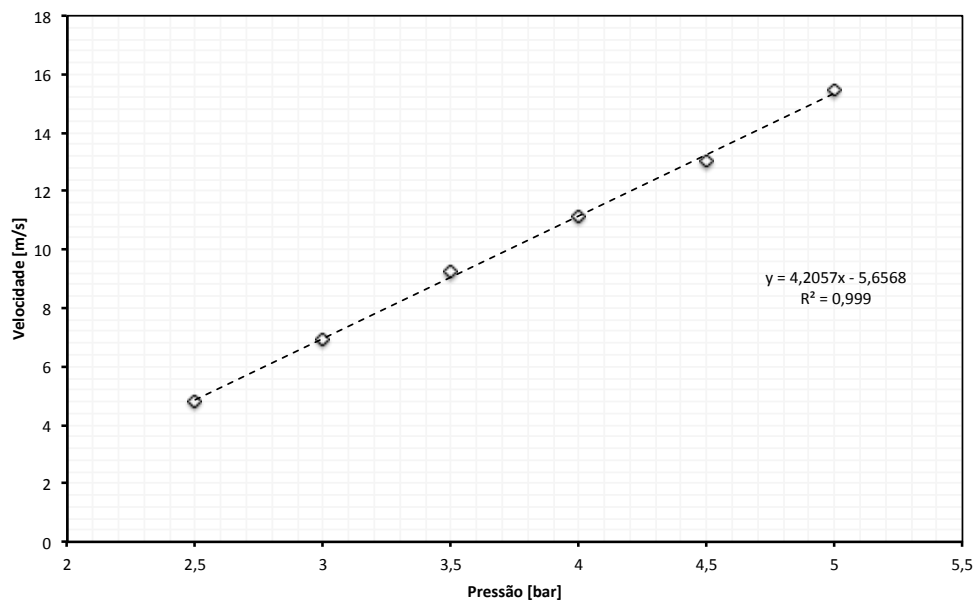


Figura 3.12 – Calibração pressão-velocidade para os ensaios no canhão pneumático, para pressões entre os 2,5 e 5 bar.

3.5 Ensaios de compressão

O plano de ensaios consistiu na realização paralela de ensaios de compressão uniaxial e ensaios de dureza dos materiais de teste. Os ensaios de dureza tiveram o propósito duplo de controlar a qualidade dos provetes antes da realização dos ensaios de compressão e evitar alguma possível troca de provetes. Mas também, permitir aferir a existência de diferenças entre a tensão de cedência em recarregamento e a tensão instantânea de escoamento. Os ensaios de compressão foram utilizados para avaliar a influência da velocidade de deformação em diferentes materiais puros, de baixa liga e ligados. Estes ensaios foram conduzidos para observar igualmente a influência dos elementos de liga, a homogeneidade do material, entre outros aspectos. Os ensaios de compressão foram ainda realizados em duas condições distintas, de modo incremental e monotónico, permitindo aferir a contribuição do atrito nas curvas de escoamento obtida diretamente dos dados experimentais. Os parâmetros utilizados nos ensaios permitiram varrer uma gama de deformações até 1 e uma gama de velocidades de deformação até $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.

4 Análise e Discussão de Resultados

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios mecânicos obtidos com as máquinas e os procedimentos desenvolvidos especificamente para condições de deformação severa a alta velocidade. De facto, o desenvolvimento das máquinas de ensaios e dos procedimentos experimentais é por si só um dos principais resultados da presente investigação. O presente capítulo começa pela validação da ferramenta de ensaios desenvolvida pelo autor para os ensaios de compressão uniaxial. De seguida apresenta e discute a relação entre a dureza dos materiais representativa da sua tensão de cedência após recarregamento e a tensão de escoamento durante o carregamento. É observada a resistência mecânica de vários metais puros e, metais de baixa e alta liga representativos de vários setores industriais. Por último, mas não menos importante, apresenta a influência da velocidade de deformação na resistência mecânica de vários materiais com particular destaque para as ligas de engenharia por serem aquelas mais difíceis ensaiar mecanicamente.

4.1 Validação da Ferramenta

O projeto, fabrico e montagem dos componentes da ferramenta foram realizados de forma cuidada, assim como as tarefas de instrumentação da ferramenta de ensaios. Após calibração dos sensores, foram realizados ensaios mecânicos numa liga AA1050 procurando reproduzir o trabalho de Alcino Reis (2016). Os provetes foram recolhidos do mesmo lingote e fabricados com as mesmas dimensões. A comparação dos resultados da presente investigação com os de Alcino Reis (2016) mostra boa concordância entre as curvas de escoamento. Isto permite validar tanto a ferramenta como o procedimento experimental da presente investigação.

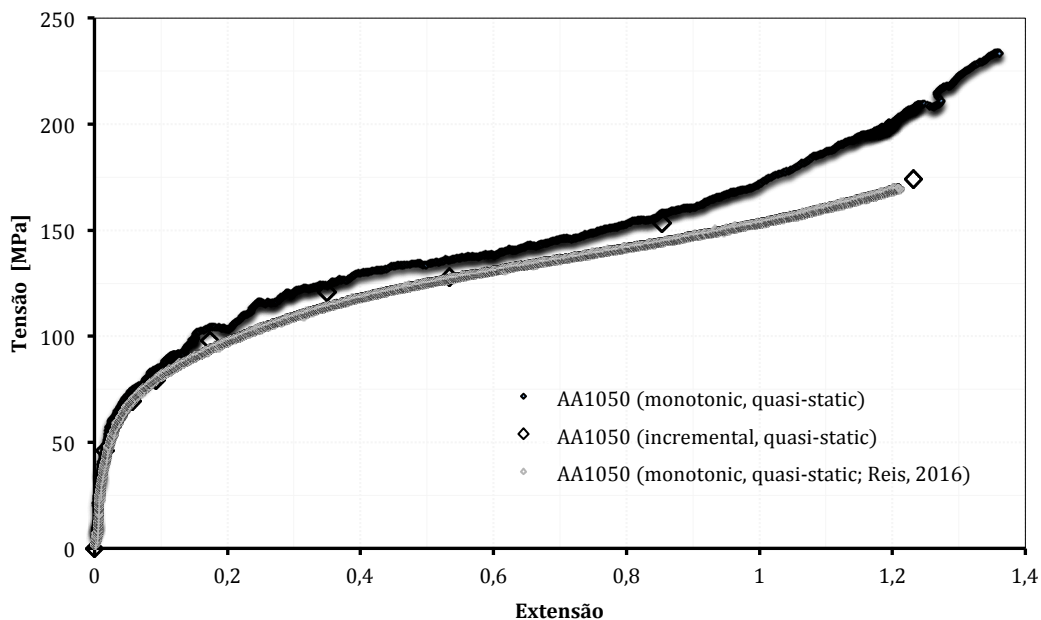


Figura 4.1 – Comparação das curvas de escoamento obtidas na presente tese com as obtidas por Alcino Reis (2016) para o AA1050-O em condições quasi-estáticas; Os provetes foram obtidos do mesmo lingote.

4.2 Relação entre a Dureza e a Tensão de Escoamento

A Figura 4.2 apresenta os resultados para a relação entre tensão de escoamento e dureza de alguns metais puros, obtidas em condições estáticas e de alta velocidade de deformação. A tensão de escoamento mostra uma relação aproximadamente linear com a dureza medida no material entre ensaios de compressão incrementais. Porém, é possível observar que esta relação sofre uma ligeira alteração da curvatura à medida que a taxa de deformação aumenta. Este efeito pode ser ilustrado pela evolução do Zinco, cuja dureza após deformação a alta taxa de deformação iguala a dureza inicialmente medida nos provetes antes dos ensaios de compressão. Efeito semelhante acontece no Cobre, porém sem regressar à dureza inicial do material. Esta evolução atípica de alguns destes materiais aparenta estar relacionada com fenómenos de recristalização promovidos pelo aumento de temperatura durante a deformação. De facto, a temperatura de recristalização de alguns materiais tais como o Zinco e o Estanho estão próximas da temperatura ambiente. Outro aspeto está relacionado com os modelos teóricos que relacionam a tensão de escoamento (tensão de cedência em recarregamento) com a dureza do material. Estas relações mostram uma evolução linear e independente do material contrária às evidências experimentais da Figura 4.2. Deste modo, importa a calibração experimental deste tipo de relação para que a tensão de cedência possa ser determinada com segurança através da realização de ensaios pouco-intrusivos de microdureza.

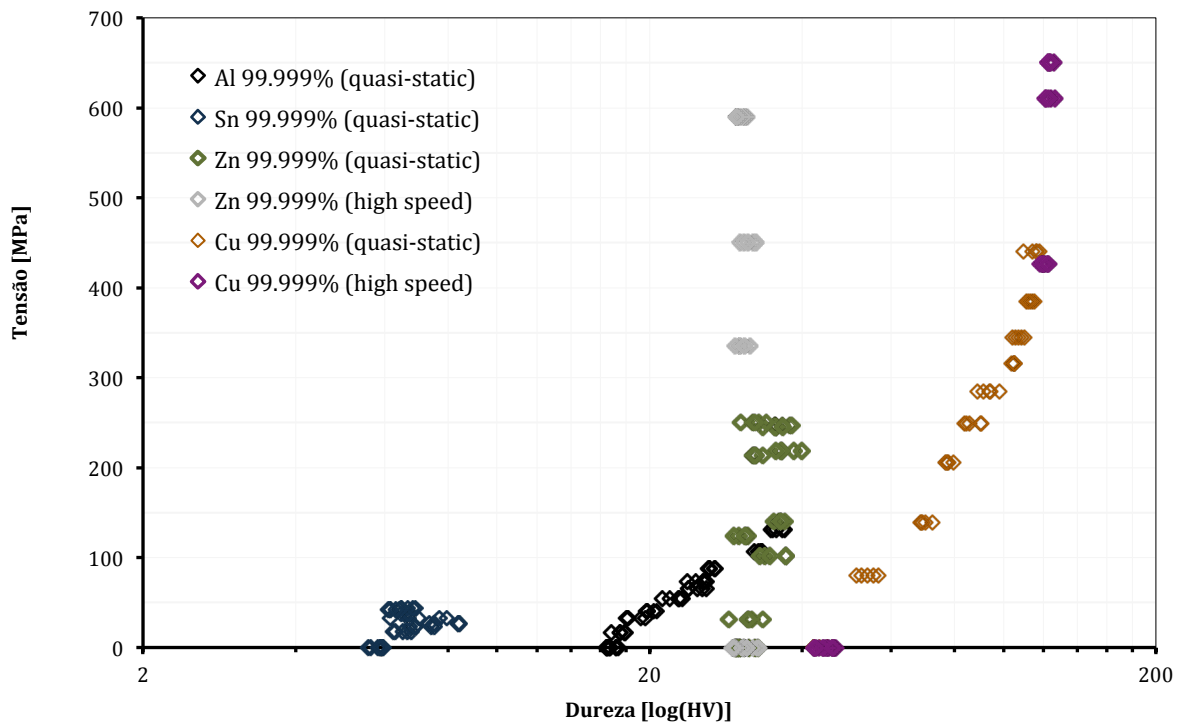


Figura 4.2 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza medida entre ensaios de compressão incrementais para os metais puros (Cu, Zn, Al e Sn) em condições de deformação quasi-estáticas e de alta velocidade.

A dureza do material é uma excelente técnica para complementar os ensaios de compressão uniaxial. Veja-se esta técnica com uma medida de controlo de qualidade da condição inicial do material. Deste modo foram realizadas medidas de dureza de todos os provetes antes e após ensaios. Foram ainda realizados ensaios de compressão em condições de deformação interrompida e incremental, de modo a permitir determinar a evolução da dureza durante a deformação. Estes valores foram comparados com os da literatura, de modo a garantir uma condição metalúrgica recozida para os metais puros e de baixa liga. No caso dos materiais de engenharia foi utilizada como técnica para avaliar a homogeneidade do material fornecido. Os materiais ensaiados mostram boa homogeneidade com exceção para a liga Ti6Al4V. A Figura 4.3 mostra evolução da dureza inicial dos provetes deste material ao longo da direção radial do varão, sendo o material mais macio no centro e mais duro na periferia. Este resultado demonstra a importância dos procedimentos de recolha das amostras de material e expõe a dificuldade da universalidade dos ensaios realizados em diferentes laboratórios. No presente caso, tomou-se a opção de ensaiar provetes da zona central do varão por ser aquela onde o material permite uma deformação mais uniforme sem formação de fissuras abruptas como se pode observar nas imagens sobrepostas ao gráfico da Figura 4.3. Este resultado é mais uma vez corroborado pelo gráfico da Figura 4.4 onde se observam diferentes resultados para amostras recolhidas em diferentes zonas. Pelo contrário, quando as amostras correspondem a uma posição radial similar é então possível observar uma boa correlação entre as várias medidas experimentais (Figura 4.5).

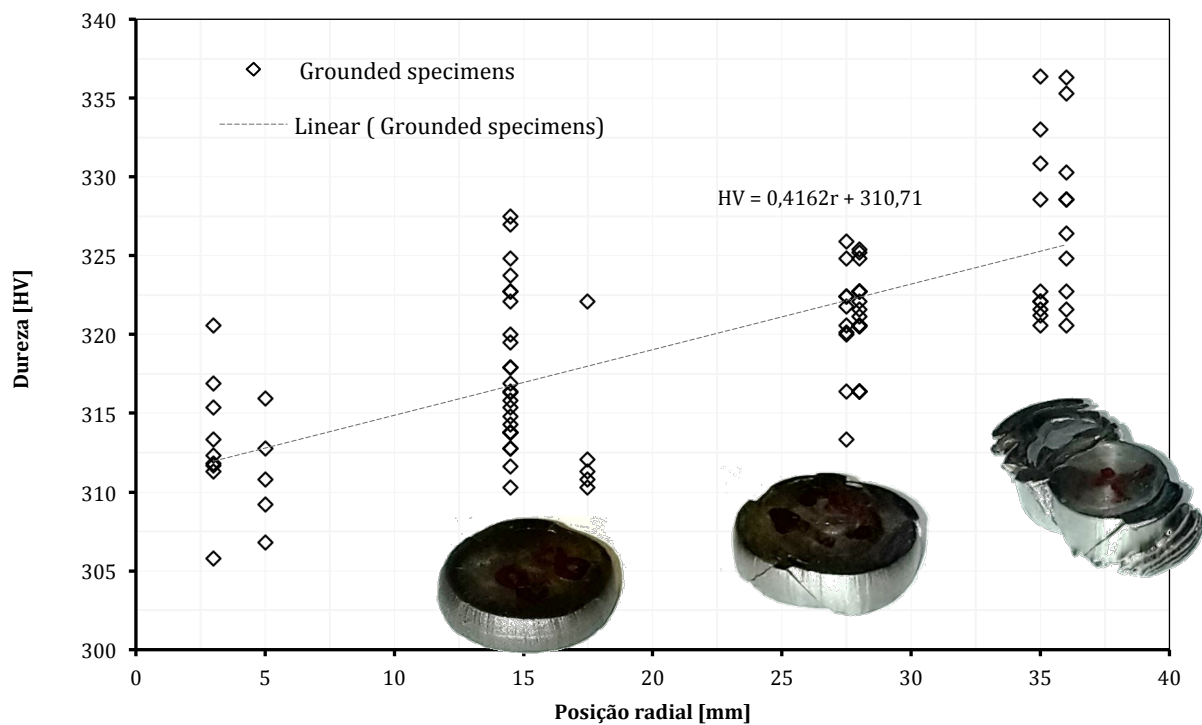


Figura 4.3 – Dureza inicial dos provetes da liga Ti6Al4V em função da posição radial de amostragem no varão fornecido.

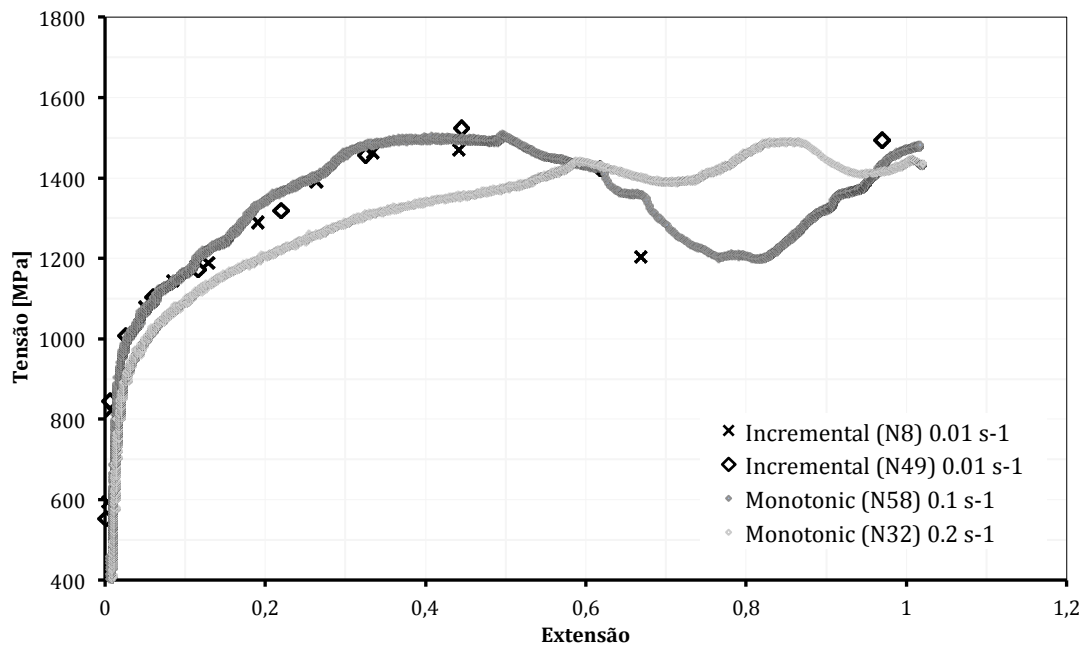


Figura 4.4 – Evolução da curva de escoamento plástico para Ti6Al4V em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais, para amostras recolhidas em diferentes posições radiais do varão fornecido. As amostras N58, N8 e N49 ficam a 35 mm do centro, enquanto a amostra N32 fica a 8 mm do centro.

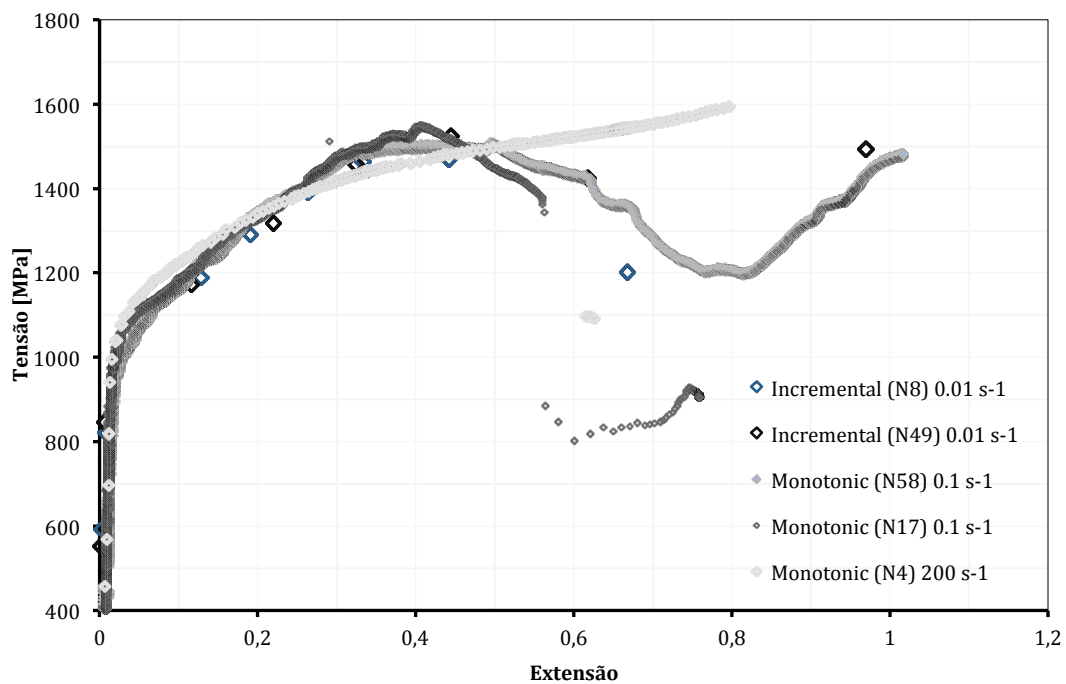


Figura 4.5 – Evolução da curva de escoamento plástico para Ti6Al4V em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais, mas para amostras recolhidas em posições radiais similares do varão fornecido (a 35 mm do centro do varão). N8 e N49 foram testados em condições incrementais, enquanto N58, N17 e N4 foram testados em condições monotônicas.

4.2.1 Influência da Percentagem de Elementos nas Ligas de Alumínio

A influência que a introdução de elementos de liga tem na resposta mecânica do material é um dos aspectos mais importantes no domínio da engenharia dos materiais e das aplicações mecânicas. Esta importância está essencialmente direcionada para a tensão de cedência, tensão de escoamento e, a ductilidade dos materiais. A observação da Figura 4.6 permite verificar que pequenas alterações na percentagem dos elementos de liga provocam uma alteração significativa nas principais respostas mecânicas. Observa-se que o Alumínio puro (99,999 %) tem uma dureza bastante inferior às ligas comercialmente puras AA1085 (99,85 %) e AA1050 (99,5 %) com 16 HV, 20 HV e 22 HV, respetivamente. No mesmo sentido, a tensão de escoamento de saturação (máxima) é de 140 MPa, 200 MPa e 240 MPa para condições extremas com altas taxas de deformação. Porém, é interessante notar que a relação dureza – tensão não é significativamente alterada para uma variação de 5 décimas percentuais com exceção no início da deformação. Contudo, ligas de alumínio complexas fazendo intervir Silício, Cobre, Titânio, Zinco entre outros, mesmo para valores na ordem dos 93 % de Alumínio, sofrem alterações muito significativos na sua resposta mecânica. Temos como exemplo o AlSi9Cu3 e o AS7G03+05U com 75 HV e 115 HV, respetivamente. Novamente, o valor assintótico da tensão de escoamento ronda os 375 MPa e os 433 MPa, respetivamente.

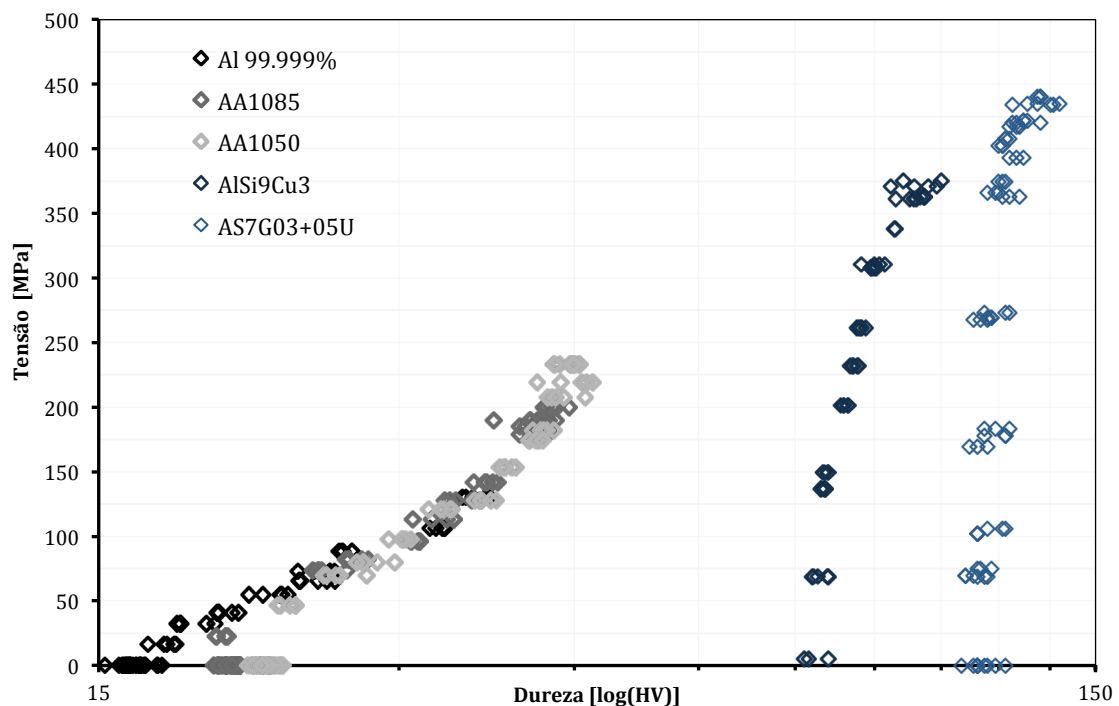


Figura 4.6 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza dos materiais após deformação plástica para o Alumínio puro (99,999%) e ligas de alumínio (AS7G03+05U, AlSi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas incrementais.

4.3 Tensão de Escoamento dos Metais e Ligas Metálicas

A Figura 4.7 apresenta a relação da tensão de escoamento com a dureza para vários materiais representativos em aplicações de engenharia mecânica, nomeadamente o AlSi9Cu3 e o AS7G03+05Cu, utilizados em aplicação de fundição e moldação injetada. Ainda o AISI1045 utilizado em aplicações estruturais gerais e o Ti6Al4V de elevada resistência mecânica para aplicações em sistemas de elevado desempenho, tais como aeronáutica e aeroespacial. Para efeitos de comparação com outros resultados da tese é incluído o Alumínio 99,999%. Da observação do gráfico é notório o acentuar do declive das curvas tensão – dureza para os materiais cuja condição metalúrgica envolve uma combinação de elementos de liga mais complexa (AlSi9Cu3, AS7G03+05Cu e Ti6Al4V) com o objetivo de aumentar a sua resistência mecânica. Esta comparação pode ser feita entre as duas ligas de Alumínio e o Alumínio puro. O declive pouco acentuado do Alumínio puro permite uma maior definição do ensaio de microdureza para a determinação não-intrusiva da tensão de cedência e do nível de deformação a que o material foi sujeito. Este resultado é igualmente corroborado pela maior dispersão de resultados observados nas ligas de engenharia.

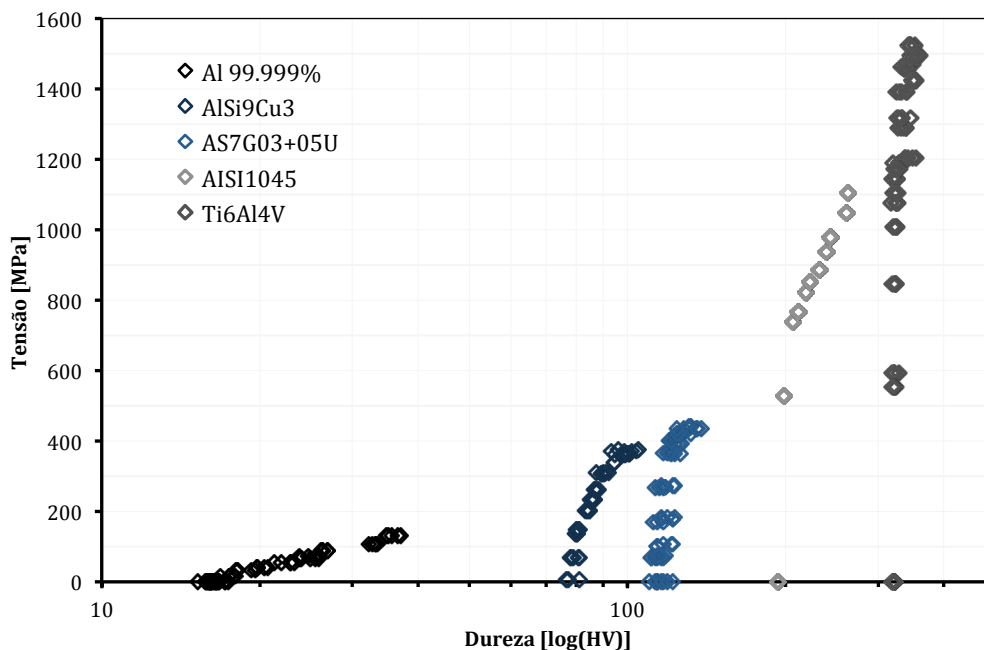


Figura 4.7 – Evolução da relação entre a tensão de escoamento e dureza dos materiais após deformação plástica para as ligas de engenharia ensaiadas na presente investigação (Ti6Al4V, AISI1045, AS7G03+05U, AlSi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas. Para referência foi adicionada a curva de escoamento do Alumínio puro em condições de deformação similares.

A Figura 4.8 apresenta as curvas de escoamento de alguns metais puros obtidas em condições estáticas. Estas curvas permitem uma análise comparativa da resistência mecânica para diferentes metais puros. Permite igualmente mostrar que a tensão de escoamento tem uma evolução positiva com a deformação. Pelo contrário, materiais como o Zinco e o Estanho mostram uma clara saturação da tensão de escoamento. Este comportamento parece mais uma vez estar relacionado com as baixas temperaturas de recristalização destes metais puros. O Estanho já se encontra em recristalização à

temperatura ambiente e a elevada tensão de escoamento do Zinco permite fornecer o calor suficiente para elevar a temperatura até essa zona de recristalização. Importa ainda salientar o elevado encruamento do Cobre que permite mais do que triplicar a sua resistência mecânica. Obviamente esta análise sumária mostra uma tendência do ponto de vista mecânico sem no entanto abordar a formação de diferentes condições metalúrgicas. Os dados experimentais da curva de escoamento são geralmente utilizados para a calibração de leis material (e também constitutivas). As relações mais comuns são a lei de Ludwik-Holloman, Voce e Johnson-Cook simplificada, utilizadas para modelar a tensão de escoamento para a simulação numérica dos principais processos de fabrico. Porém, todas estas leis consideram a existência de encruamento positivo, quanto muito o modelo de Voce permite modelar valores assintóticos da tensão de escoamento. Deste modo, a calibração de qualquer uma destas leis mostra-se ineficaz para modelar a tensão de escoamento do Zinco que mostra um amaciamento da sua resposta com a taxa de deformação. Nestes caso e similares, a utilização da lei de Silva^[26] ou a lei de Johnson-Cook expandida^[27] mostra-se, potencialmente, mais adequada. Deste modo, importa conhecer previamente a existência de situações de encruamento nulo ou negativo para permitir escolher a lei que melhor se adequa à modelação da tensão de escoamento possa ser determinada com segurança através das diferentes técnicas de calculo teórico.

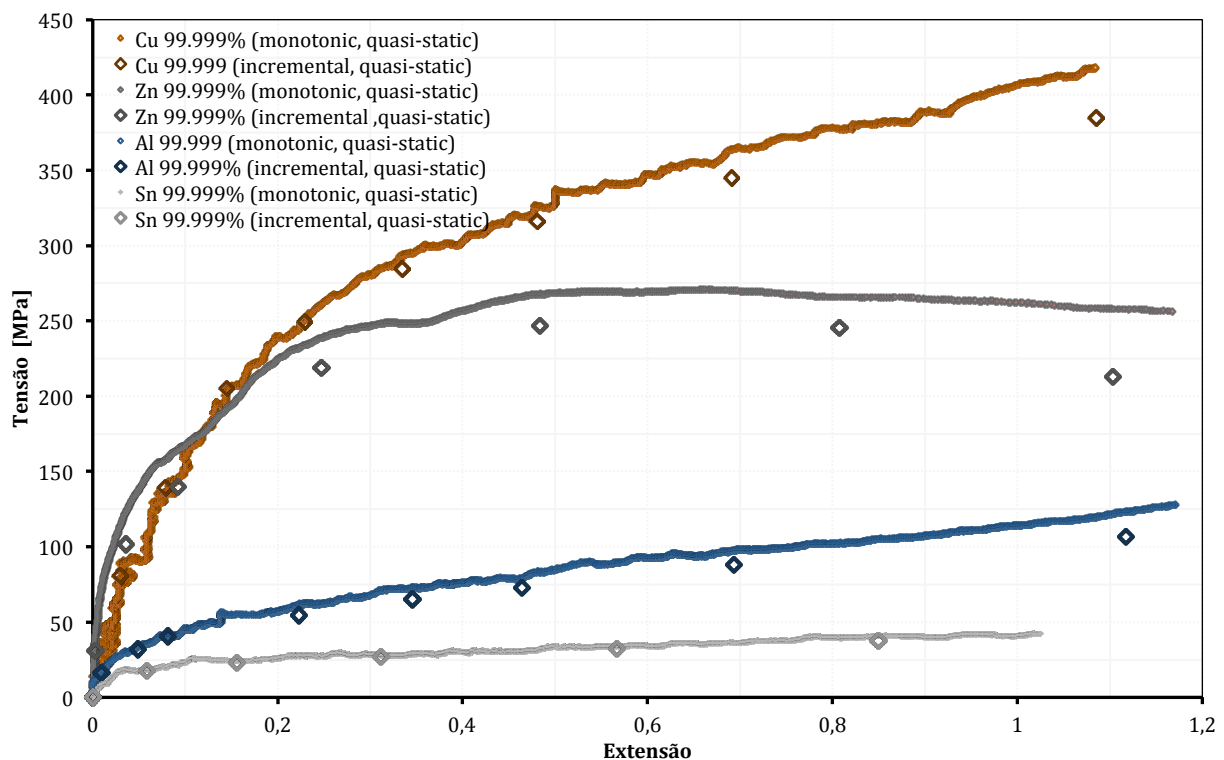


Figura 4.8 – Evolução da curva de escoamento plástico para os metais puros ensaiadas na presente investigação (Cu, Zn, Al e Sn) em condições de deformação quasi-estáticas monotônicas e incrementais.

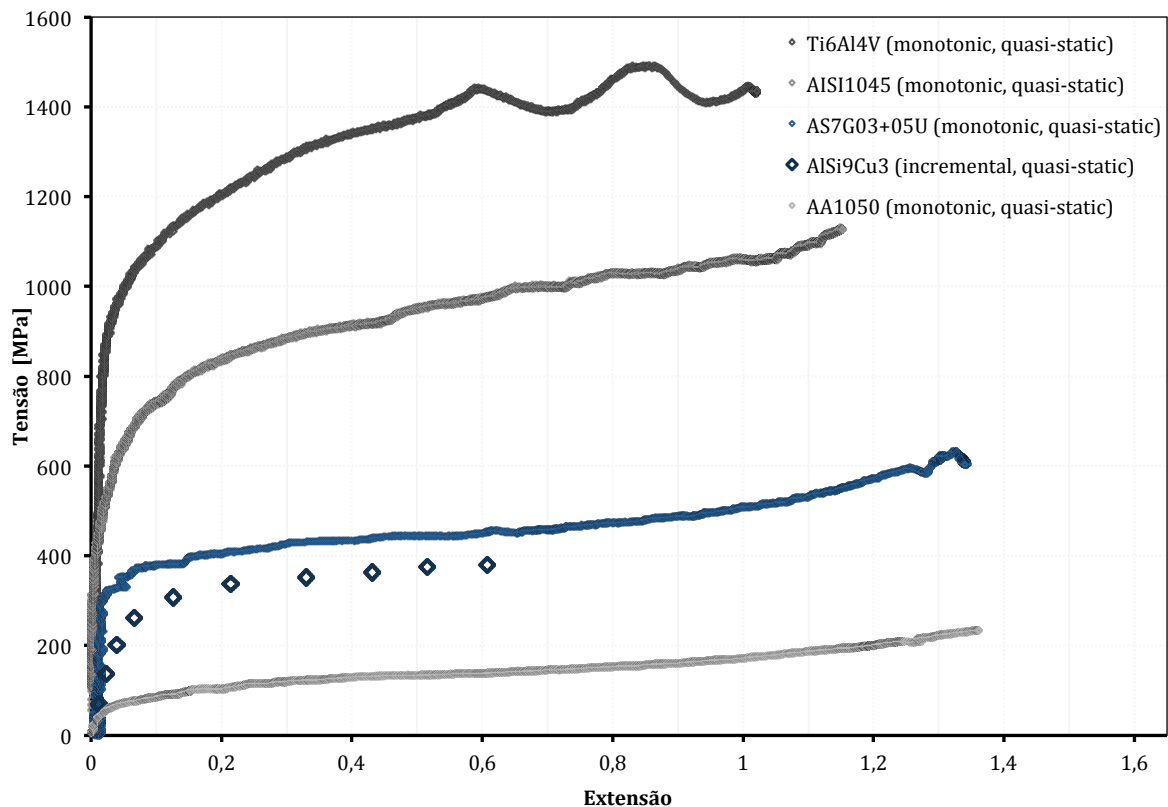


Figura 4.9 – Evolução da curva de escoamento plástico para as ligas de engenharia ensaiadas na presente investigação (Ti6Al4V, AISI1045, AS7G03+05U, AISi9Cu03, AA1050 e AA1085) em condições de deformação quasi-estáticas.

A Figura 4.9 mostra as curvas de escoamento para diferentes ligas metálicas utilizadas numa gama alargada de aplicações em engenharia. A resistência mecânica destes materiais contrasta com a resistência dos metais puros da Figura 4.8. Para efeitos comparativos, podemos tomar como referência o material de baixa liga AA1050 que apresenta uma resistência mecânica 10 vezes inferior à liga de titânio Ti6Al4V. As ligas de alumínio para fundição e injeção, assim como o aço macio, ocupam posições intermédias de resistência mecânica. Adicionalmente, é possível observar que estas ligas metálicas têm um comportamento mais regular, tipicamente apresentando um encruamento positivo.

4.3.1 Influência da Quantidade Percentual de Elementos na Tensão de Escoamento de Ligas de Alumínio

A Figura 4.10 mostra a evolução da tensão de escoamento para o Alumínio puro e as ligas comercialmente puras. Estes resultados mostram claramente a influência dos elementos (e também impurezas) nas ligas de Alumínio. A variação de 5 décimas percentuais (de 99,999 para 99,5 %) na quantidade de Alumínio promove um aumento de 75 % da resistência mecânica destas ligas de alumínio. No mesmo sentido, o valor assintótico da tensão de escoamento aumenta com a percentagem dos elementos de liga. Porém, a evolução assintótica referida não é nítida no gráfico da Figura 4.10 pois a curva de escoamento é progressivamente incrementada por um outro fenómeno que não a deformação plástica. À medida que o provete é comprimido ocorre um aumento quadrático da área em função do raio promovendo os efeitos do atrito. Este efeito torna-se ainda mais pronunciado pois a expansão da área de contacto entre o provete e o prato plano não é acompanhada pela

quantidade de lubrificante existente nessa interface. Deste modo é de esperar um aumento da área relativa com contacto metal-metal e conseqüentemente o aumento do coeficiente de atrito. Este efeito pode ser facilmente demonstrado através da realização de ensaios de compressão incrementais e ensaios de compressão monotônicos. Quando os ensaios de compressão são interrompidos para acondicionamento das condições tribológicas na interface de contacto (limpeza de partículas metálicas e adição de lubrificante) é possível observar a existência de um desvio entre a curva monotônica e a curva incremental. A curva incremental apresenta sempre uma tensão de escoamento mais baixa com características assintóticas (comparar as curvas para o material AA1050). Infelizmente nem mesmo com a utilização de técnicas incrementais é possível eliminar por completo a contribuição paralela do atrito no valor da tensão de escoamento. Uma alternativa seria a realização de ensaios tribológicos representativos deste par material (provetes – pratos compressão) e a posterior utilização de técnicas de correção inversa da tensão de escoamento eliminando a contribuição indesejada. Contudo é possível observar que o desvio entre a curva monotônica e a curva incremental só se torna significativa para deformações superiores a 0,8. Este deve ser um valor de referência a utilizar para o ajuste matemático das leis de material na medida que, mesmo existindo dados experimentais para extensões maiores, esse ajuste seja feito numa gama de extensões entre 0,05 e 0,8. O valor mais elevado dessa gama é suficiente para abranger as deformações observadas na generalidade dos processos de deformação plástica e o valor inferior é suficientemente sensível para modelar as zonas de pequena deformação. Quando existe a necessidade de modelar processos onde a influência das pequenas deformações são significativas para a simulação numérica dos processos de fabrico então existe a necessidade de complementar este tipo de estudo com a realização de ensaios de tração. Os ensaios de tração estão limitados à deformações na ordem dos 0,1 / 0,2 mas permitem um excelente reprodução da zona inicial da curva de escoamento.

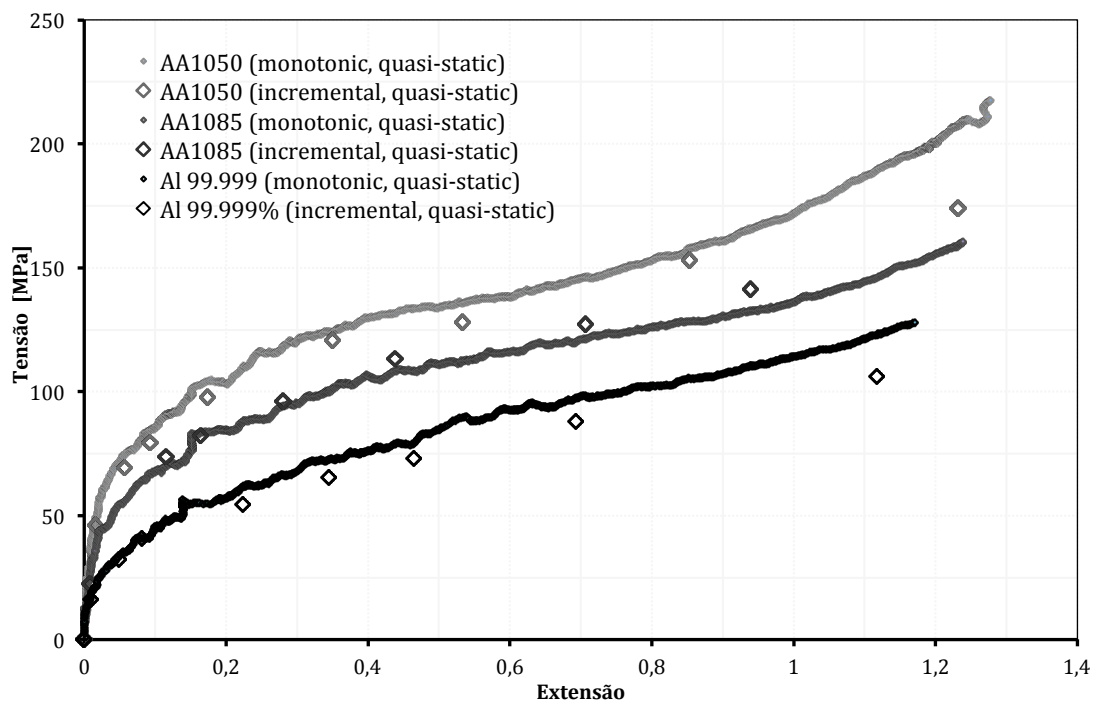


Figura 4.10 – Evolução da curva de escoamento plástica para o Alumínio puro e para as ligas comercialmente puras AA1085 e AA1050 em condições de deformação quasi-estáticas obtidas através de ensaios de compressão uniaxial monotônicos e incrementais.

4.4 Influência da Velocidade de Deformação na Tensão de Escoamento Plástica

É conhecido que a velocidade com que as ferramentas atuam sobre o material têm influência nos esforços envolvidos no processo de fabrico assim como na resistência mecânica final do componente estrutural fabricado. Neste sentido interessa que a caracterização mecânica dos materiais considere a taxa de deformação como um parâmetro a definir para os ensaios mecânicos. Poder-se-ia dar como exemplo o ensaio mecânico de tração em condições estáticas para a modelação do processo de forjamento em martelo de queda. Esta prática estaria totalmente desadequada tanto do ponto de vista da tensão de escoamento a utilizar no dimensionamento das ferramentas como do ponto de vista do projeto estrutural do componente mecânico.

O gráfico da Figura 4.11 mostra a influência da taxa de deformação nas curvas de escoamento para o Alumínio e para a liga comercialmente pura AA1050. Nestas é possível observar que a tensão de escoamento aumenta com a velocidade de deformação num valor que ronda os 50 % para uma taxa de deformação nos 10^4 s^{-1} em relação aos ensaios quasi-estáticos. Porém, a análise deste mesmo gráfico é difícil para uma gama intermédia da velocidade de deformação devido à ondulação da curva de escoamento característica das máquinas de ensaios gravíticas (martelos de queda)^[21]. Outro resultado interessante está relacionado com a influência combinada da taxa de deformação e a percentagem de elementos de liga. A literatura indica que a existência de elementos de liga tende a diminuir os efeitos viscoplásticos do material, no entanto os ensaios experimentais da presente investigação não corroboram estas afirmações^[28].

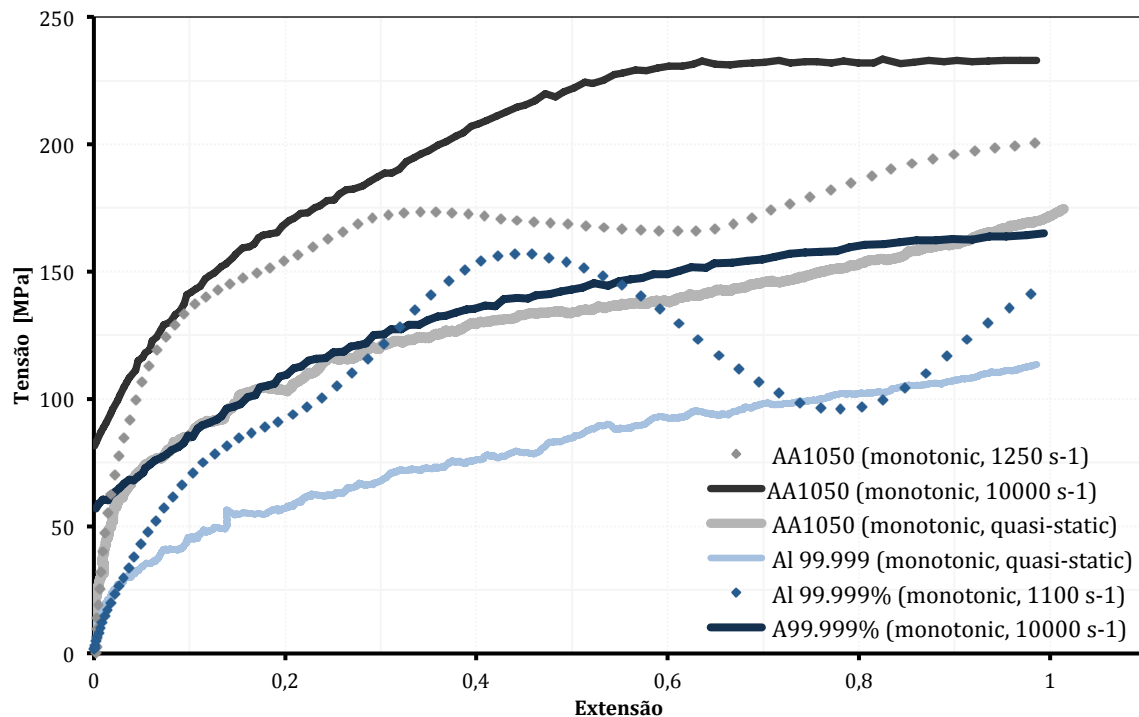


Figura 4.11 – Evolução da curva de escoamento plástico para o Alumínio puro e para a liga comercialmente pura AA1050 em diferentes taxas de deformação.

A Figura 4.12 apresenta as curvas de escoamento para o Cobre puro a diferentes taxas de deformação, para extensões efetivas de 1. Pode-se observar que a tensão de escoamento evolui no sentido crescente com a velocidade de deformação, sendo que para 10^4 s^{-1} , a tensão de escoamento aumenta sensivelmente 70 % em relação à condição quasi-estática. Pode-se observar, mais uma vez, a ondulação da curva de escoamento para taxas de deformação média, típica das máquinas de ensaios gravíticas^[21] Pode-se ainda verificar que, para todas as taxas de deformação estudadas, o material apresenta encruamento com a evolução da extensão.

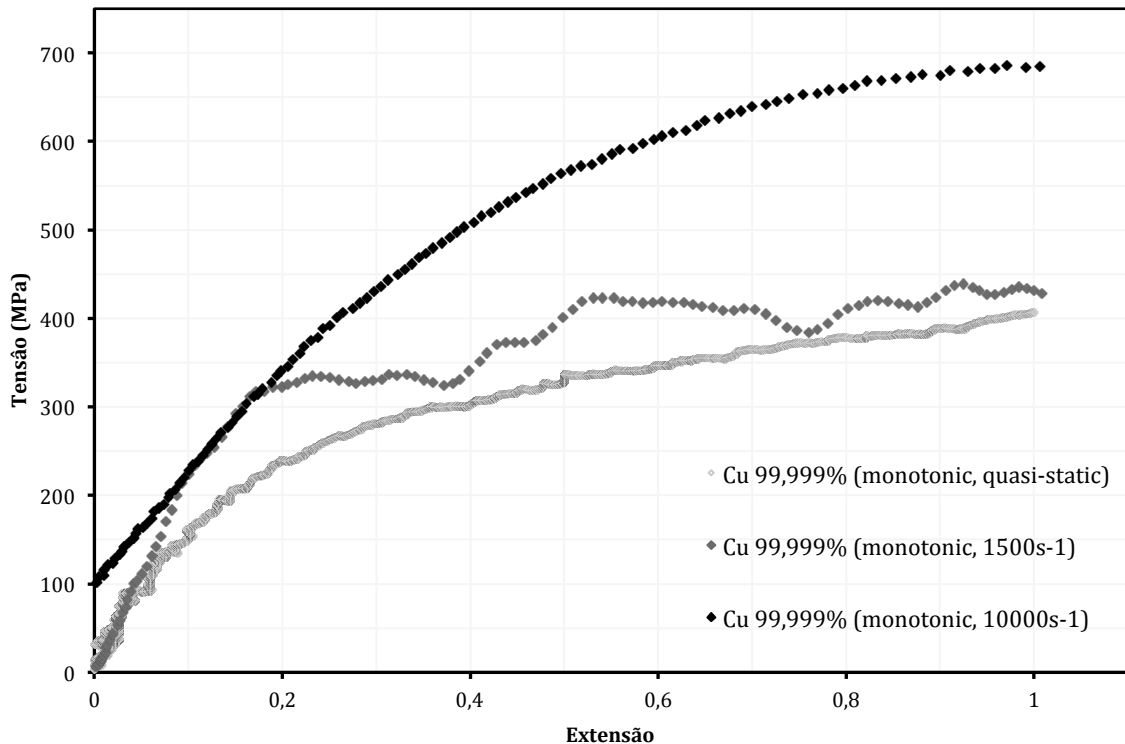


Figura 4.12 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Cobre puro a diferentes taxas de deformação.

A Figura 4.13 mostra a influencia da velocidade de deformação na tensão de escoamento do Zinco puro. Dos materiais estudados, o Zinco é o material cujas curvas de escoamento apresentam, de forma mais acentuada, amaciamento. Este amaciamento aparenta estar relacionado com fenómenos de recristalização que correm aquando dos ensaios de compressão. Também este material é sensível à velocidade de deformação e verifica-se ainda que o amaciamento é tanto mais pronunciado quanto maior a taxa de deformação. Isto corrobora o observado através dos ensaios de dureza, sendo que, de facto, que após ensaios a taxas de deformação mais elevadas, a dureza do material iguala a sua dureza inicial. A tensão máxima para as condições mais severas de deformação ($3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$) sofreu um aumento de mais de 100 % em relação à condição quasi-estática.

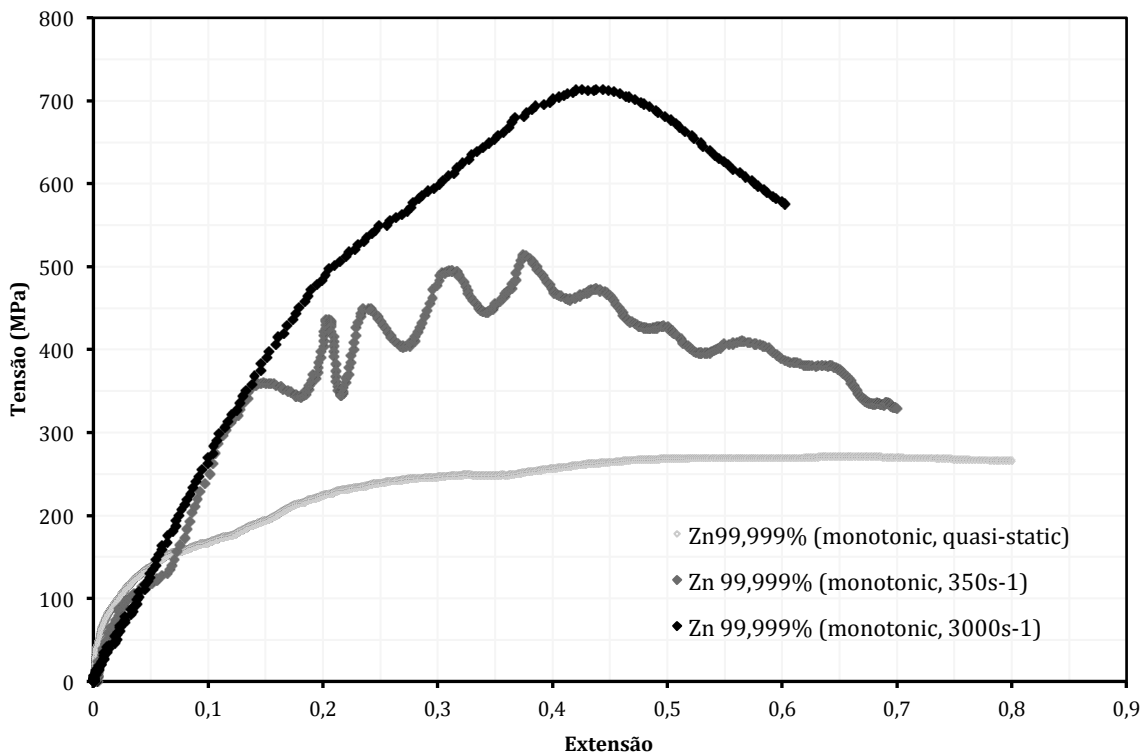


Figura 4.13 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Zinco puro a diferentes taxas de deformação.

A Figura 4.14 mostra a influência da taxa de deformação para as ligas complexas de Alumínio ensaiadas na presente investigação. Os resultados estão em linha com os observados para o Alumínio puro e comercialmente puro no que respeita ao sentido de influência da taxa de deformação. Porém, voltam-se a observar discrepâncias relativamente à percentagem dos elementos de liga, onde o AS7G03+05 apresenta uma sensibilidade à taxa de deformação inferior e a liga AlSi9Cu3 apresenta uma sensibilidade superior relativamente à do Alumínio puro. Este resultado mostra a necessidade de melhorar a compreensão em como os elementos de liga se combinam com o metal base e influenciam a sensibilidade à taxa de deformação da liga metálica. Mais uma vez estes resultados parecem contradizer a literatura de referência nesta área^[27]. Não questionando a qualidade dos trabalhos previamente publicados nem duvidando dos resultados da presente investigação é sugestão do autor uma futura revisão detalhada deste tema.

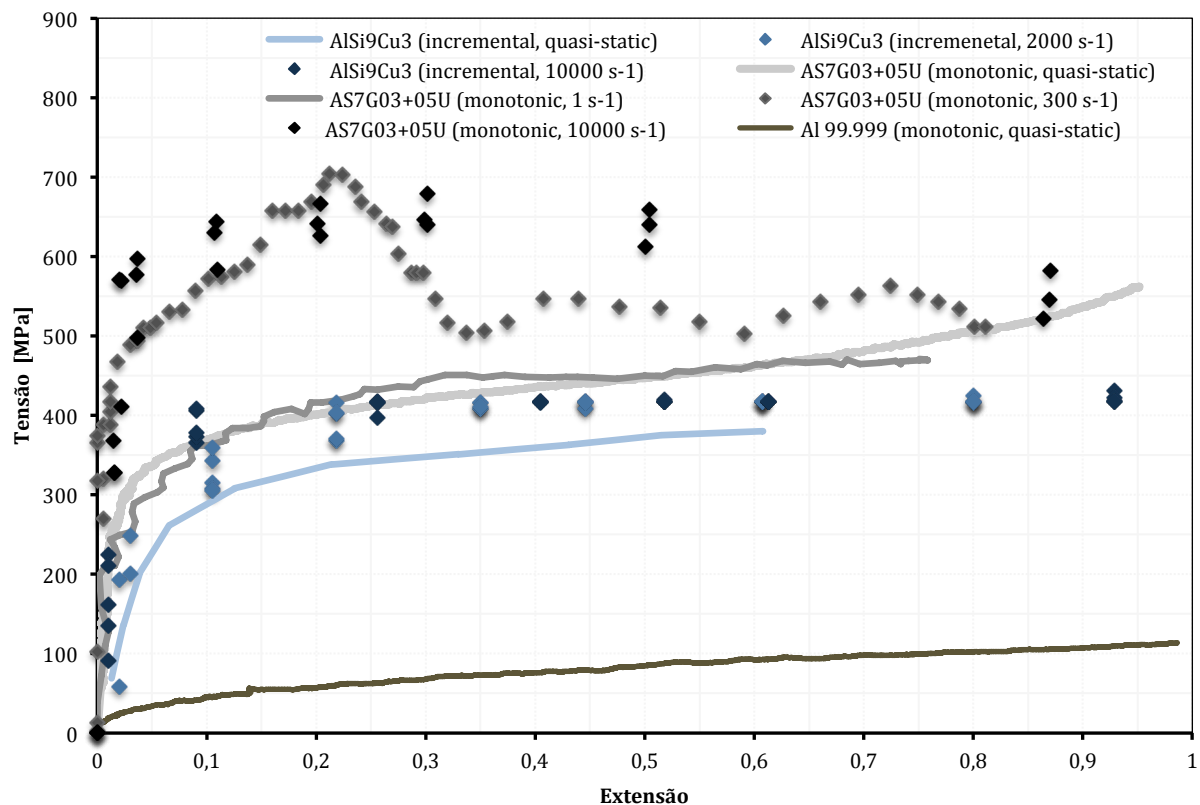


Figura 4.14 - Evolução da curva de escoamento plástico para as ligas de alumínio AlSi9Cu3 e AS7G03+05U em diferentes taxas de deformação. Para referência foi adicionada a curva de escoamento do Alumínio puro em condições de deformação quasi-estáticas.

Dos materiais apresentados no gráfico da Figura 4.14 importa destacar o comportamento mecânico da liga AS7G03+05 por apresentar um comportamento que desvia do usualmente observado nos ensaios mecânicos dos materiais. Contrariamente ao que seria esperado para uma liga de fundição, o comportamento é muito dúctil, sem fissuras e com um aspeto brilhante. É sensível à velocidade de deformação mas de uma forma menos usual. A tensão de escoamento aumenta com a deformação e com a taxa de deformação. Porém, para valores de deformação acima dos 0,4 e para velocidades de deformação acima de $5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ o material não apresenta encruamento; Para valores ainda mais severos de deformação (superiores a 0,6) o material apresenta amaciamento. Estes valores podem ser comprovados simultaneamente através dos ensaios de compressão e dos ensaios de dureza. Na condição mais severa de todas, 10^4 s^{-1} , para deformação efetiva de 1, o material apresentou uma dureza após compressão inferior à do material base. Importa referir que esta liga metálica foi testada na condição fornecida e não sofreu nenhum recozimento. Isto só é possível quando o material apresenta tensões residuais e ocorre alguma espécie de recristalização durante o processo de deformação. A combinação destas características torna esta liga adequada para aplicações onde a formação de porosidades durante o processamento (a quente ou frio) seja problemática, assim como, a existência de tensões residuais na massa ou superfície. Teríamos como exemplo a fundição injetada de um bloco automóvel que devido às suas características funcionais não pode ter tensões residuais ou permeabilidade para evitar a perda da taxa de compressão ou a mistura de diferentes líquidos funcionais (água, óleos, combustível, massas, etc.). O método de ensaio (assinatura extensão-taxa de

deformação) e a modelação matemática das leis de comportamento mecânico para este material requer atenção especial por causa das inflexões da curva tensão-extensão.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam o estudo da influência da taxa de deformação para o AISI1045 e Ti6Al4V, respetivamente. Ambos os materiais apresentam sensibilidade à taxa de deformação embora esta seja maior no AISI1045 com um aumento de 50 % contra 25 % de aumento da tensão de escoamento para o Ti6Al4V. Embora esta diferença não seja suficiente para que o AISI1045 aproxime a resistência mecânica do Ti6Al4V mesmo para condições de muito elevada taxa de deformação (10^4 s^{-1})

De uma forma geral, a liga Ti6Al4V apresenta uma resistência mecânica superior em mais de 40 % com uma densidade 45 % inferior relativamente ao AISI1045. Porém, a comportamento do AISI1045 apresenta um escoamento plástico uniforme e elevada ductilidade em oposição à liga leve. A Figura 4.16 mostra que o Ti6Al4V apresenta mudanças bruscas na curva de escoamento que estão relacionadas com a formação e propagação de fissuras que em breves momentos permitem aliviar a carga nos pratos de compressão. Este mecanismo de fissuração também parece ser influenciado pela taxa de deformação pois a fissuras que aparecem para uma deformação de 0,5 em condições estáticas iniciam tão mais cedo quanto maior a velocidade de deformação.

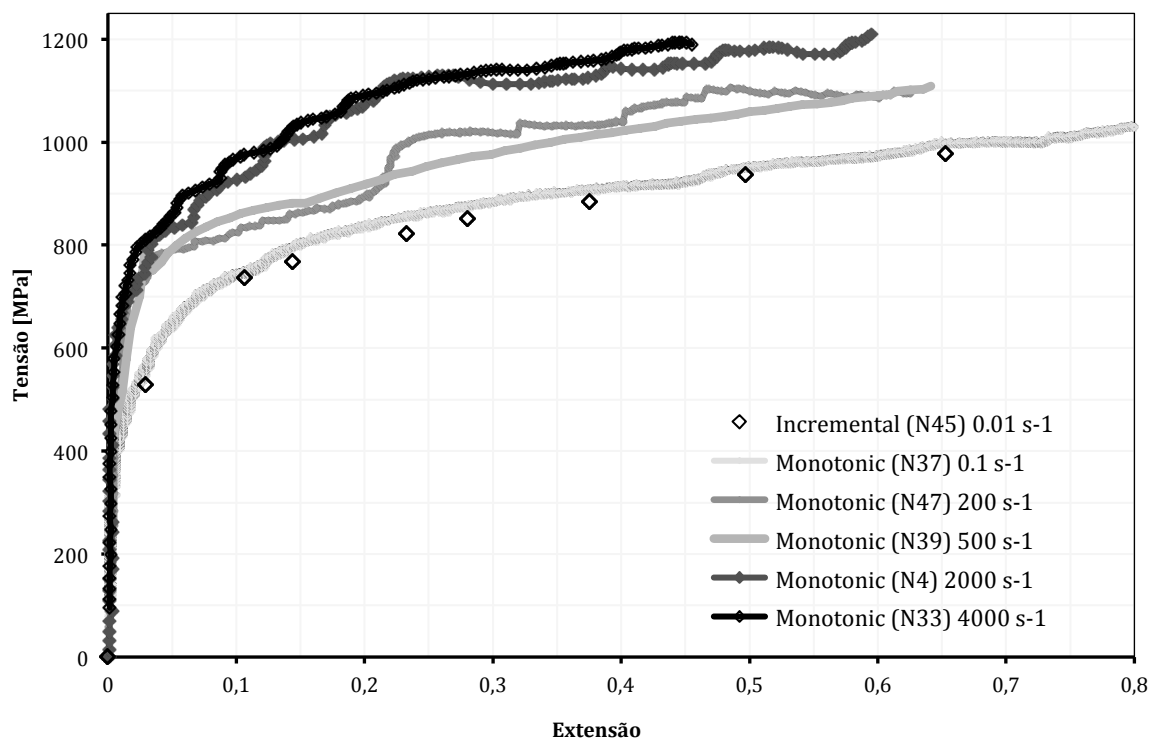


Figura 4.15 - Evolução da curva de escoamento plástico para o AISI1045 em diferentes taxas de deformação (provetes recolhidos na periferia do varão).

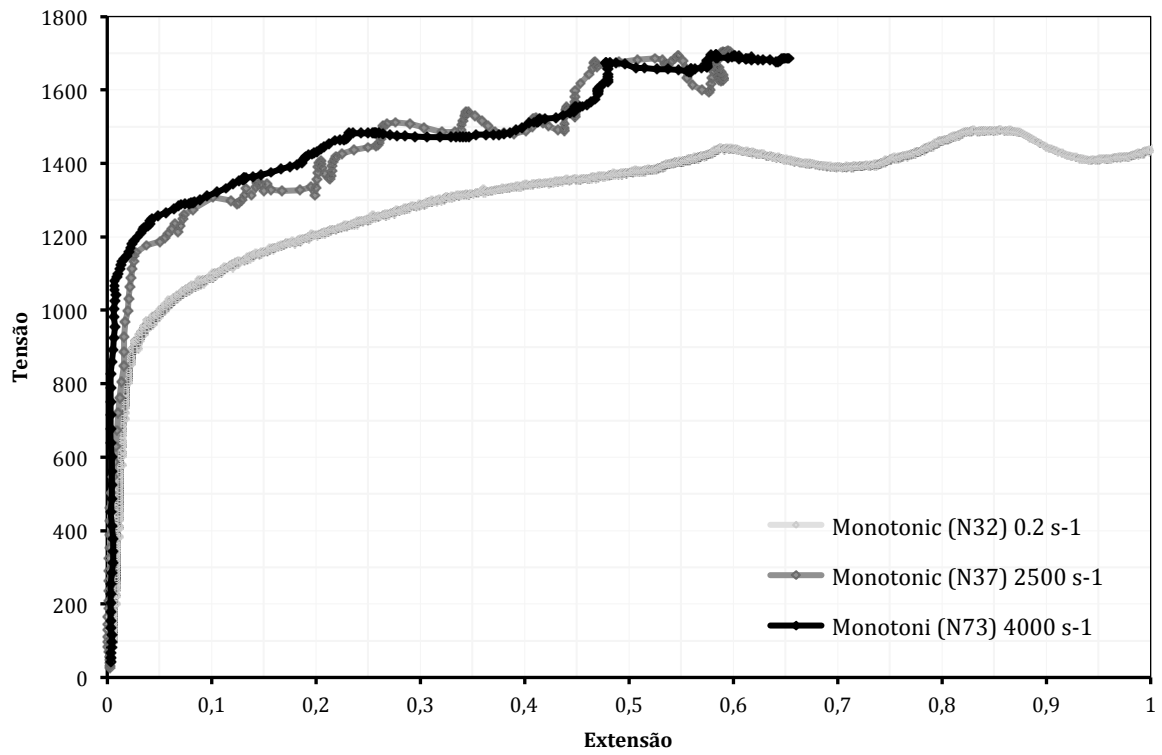


Figura 4.16 - Evolução da curva de escoamento plástico para o Ti6Al4V em diferentes taxas de deformação (provetes recolhidos a aproximadamente 7 mm do centro do varão).

4.5 Calibração do Modelo de Silva

Com base nas observações e dados, obtidos experimentalmente, optou-se por utilizar o modelo de Silva (equação 7) para simular o comportamento visco-plástico dos materiais abordados no presente trabalho, para valores de extensão entre 0,05 e 0,8 e velocidades de deformação entre 10^{-3} e $1,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Este modelo permite reproduzir alguns modelos tradicionais, com a vantagem de permitir ainda prever que o comportamento visco-plástico dos materiais pode sofrer amaciamento. As constantes A, B, C, D, m e n foram otimizadas através do método dos mínimos quadrados não lineares e são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Constantes de calibração do modelo constitutivo de Silva, otimizadas para os materiais ensaiados.

	A	B	C	D	m	n
Alumínio	0,005	174,515	9,081	0,996	-0,525	0,646
Zinco	-0,083	298,965	277,029	16,962	-1,342	0,612
Estanho (β)	-0,104	-959,809	-197,445	-0,003	-2,880	2,590
Cobre	-0,366	-26052,754	2500,356	46436,992	-0,162	0,249
AA1085-O	-0,709	233,586	66,312	100,373	-0,050	0,086
AA1050-O	-0,581	239,567	43,214	103,111	-0,063	0,116
AlSi9Cu3	0,134	592,551	16,366	2,669	-0,903	0,491
AS7G03+05U	0,001	577,320	30,769	0,830	-0,277	0,161
AISI1045	-0,293	1309,919	74,942	12,299	-0,006	0,106
Ti6Al4V	0,738	1020,772	15,470	0,007	-0,292	0,395

5 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, sendo de seguida sugeridas perspetivas de trabalhos futuros para investigações realizadas no seguimento da temática abordada nesta dissertação.

Findo todo o trabalho desenvolvido no âmbito experimental, seguido da respetiva análise de resultados, conclui-se primeiramente que os objetivos estabelecidos para esta dissertação foram cumpridos.

Foram levados a cabo, com sucesso, ensaios mecânicos de dureza e compressão uniaxial para uma vasta gama de velocidades de deformação, começando-se por velocidades típicas de regime quasi-estático ($0,01s^{-1}$) e chegando-se a valores de $1,5 \times 10^4 s^{-1}$. Para tal, implementaram-se três equipamentos de ensaio, tendo que se projetar e desenvolver para além destes uma ferramenta de compressão. A ferramenta mostrou-se funcional, bem como versátil para ser utilizada em todos os equipamentos desenvolvidos. Mostrou também a capacidade de permitir reproduzir resultados que se encontram documentados na literatura. Permitiu ainda realizar ensaios mecânicos em materiais cujas propriedades mecânicas intrínsecas dos mesmos fazem com que sejam difíceis de ensaiar, nomeadamente por serem duros e apresentarem elevados valores de tensão de escoamento.

No que ao comportamento mecânico dos materiais diz respeito, concluiu-se que diferentes materiais apresentam evoluções diferentes de tensão de escoamento em função da extensão. Existe portanto a necessidade de adequar a escolha do modelo empírico, para fins de modelação do comportamento do material, a cada material em específico.

A velocidade de deformação é um fator cujo peso tem que ser devidamente contabilizado aquando da caracterização mecânica de materiais. Caso contrário, para processos que ocorram em condições dinâmicas, não se conseguirá modelar o comportamento da deformação plástica do material de forma realista.

A realização de ensaios de dureza a par de ensaios de compressão é uma excelente técnica para avaliar o comportamento mecânico dos materiais. Os ensaios de dureza são ainda de elevada utilidade para realizar o controlo de qualidade da condição inicial do material, apresentando a vantagem adicional de serem pouco intrusivos.

O tipo de equipamento utilizado para diferentes regimes de deformação mostrou ter impacto direto na qualidade das curvas tensão de escoamento-extensão obtidas. As vibrações típicas dos ensaios de impacto provocam ruído no sinal adquirido, especialmente para o equipamento de queda de graves. Pelo que, para efeitos de continuidade do trabalho realizado, sugere-se o desenvolvimento de metodologias de ensaio que permitam atenuar parte das vibrações.

Existe ainda espaço para melhoria da ferramenta de compressão, nomeadamente no que toca aos materiais estruturais que compõem os pratos de compressão. Isto uma vez que, aquando os ensaios da liga Ti6Al4V, as forças originadas pela compressão eram tais que levavam os insertos de carboneto de tungsténio a penetrar os pratos de aço.

Referências

- [1] Silva C.M.A., Rosa P.A.R. and Martins P.A.F., Innovative Testing Machines and Methodologies for the Mechanical Characterization of Materials, *Experimental Techniques*, 40, 569-581 (2016)
- [2] Franulovic, M., Basan, R., Prebil, I., Trajkovski, A., & Maronić, T. (2017). Materials characterization – From metals to soft tissues. *Materials Discovery*, 7, 1–7
- [3] Martins, P., Rodrigues, J. (2005), Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica. Volumes I e II, Escolar Editora
- [4] Silva, Carlos, (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
- [5] Rosa P.A.R., Cristino V.A.M., Silva C.M.A. e Martins P.A.F., Input Data for the Numerical Simulation of Metal Cutting, *Trans Tech Publications, Advanced Materials Research*, 223, 257-266 (2011)
- [6] Alves, L.M., Nielsen, C.V., Martins, P.A.F. (2011), Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test, *Experimental Mechanics*, 51, 1565-1572
- [7] Santos, H. (2015), Dureza Vickers do alumínio AA 1050 a elevadas velocidades de deformação, Tese de Mestrado, IST
- [8] J. Hopkinson: 'On the rupture of iron wire by a blow', *Proc. Manch. Liter. Philos. Soc.*, 1872, 11, 40–45
- [9] J. Hopkinson: 'Further experiments on the rupture of iron wire', *Proc. Manch. Liter. Philos. Soc.*, 1872, 11, 119–121
- [10] J. Hopkinson: 'Original papers', 2-'Scientific papers', 316–324; 1901, Cambridge, Cambridge University Press
- [11] Meyers, M. A. (1994) Dynamic Deformation and Waves, in *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9780470172278.ch1
- [12] Clifton RJ. High Strain Rate Behavior of Metals. *ASME. Appl. Mech. Rev.* 1990;43(5S):S9-S22
- [13] Diot S., Guines D., Gavrus A., Ragneau E., Two-step procedure for identification of metal behavior from dynamic compression tests, *International Journal of Impact Engineering*, 34, (2007), 1163-1184

- [14] Grässel L.K., Frommeyer G., Meyer L.W., High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development – properties – application, *International Journal of Plasticity*, 16, (2000), 1391-1409
- [15] Wang Z.J., Cheng L.D., Experimental research and numerical simulation of the dynamic cylinder upsetting, *Materials Science and Engineering: A*, 499, (2009), 138-141
- [16] Taylor G.I., The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress -Theoretical considerations, *Proceedings Royal Society London A*, 194, (1948), 289-299
- [17] Silva C.M.A., Rosa P.A.R. e Martins P.A.F., Mechanical Characterization of Materials for Bulk Forming Using a Drop Weight Testing Machine, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 (9) 1795-1804 (2010)
- [18] J. Field, S. Walley, W. Proud, H. Goldrein, and C. Siviour. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7):725–775, 2004
- [19] Ramesh, K. T. (2008). High Strain R 33.1. *Handbook of Experimental Solid Mechanics*, 874
- [20] Guo Y. B. (2003) An integral method to determine the mechanical behaviour of materials in metal cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 72-81
- [21] Silva C.M.A., Rosa P.A.R. e Martins P.A.F., Electromagnetic Cam Driven Compression Testing Equipment, *Experimental Mechanics*, Springer, 52 (8) 1211-1222 (2012)
- [22] Choda, T., OYAMA, H., & MURAKAMI, S. (2015). Technology for process design of titanium alloy forging. *Kobelco Technology Review*, (33), 460–465
- [23] Callister, W., Rethwisch, D. (2014) *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th Edition, Wiley Global Education.
- [24] Irina Boguslavsky. *Recrystallization Principles Applied to Whisker Growth in Tin.*, University at Buffalo
- [25] Sadeghbeigi, R. (2012). Chapter 2. Process Control Instrumentation Technology. In *Fluid Catalytic Cracking Handbook (Third Edition)* (pp. 43–49). Amsterdam, The Netherlands.: Elsevier Science & Technology Books
- [26] Tiago dos Santos, J.C. Outeiro, Rodrigo Rossi, Pedro Rosa A new methodology for evaluation of mechanical properties of materials at very high rates of loading Article reference: PROCIR5111 Journal title: Procedia CIRP, Final version published online: 31-May-2017

[27] Johnson, G.R., Cook, W.H. A constitutive model for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the seventh international symposium, Ballis, Hague, Netherlands, (1983), 541-547

[28] Lindholm, U.S. (1971). "Techniques in Metals Research," Interscience, Vol. 1