



TÉCNICO
LISBOA

Desenvolvimento de Aparato Experimental para Modificação e Caracterização do Comportamento Mecânico de Ligas de Alumínio

Pedro Filipe Gonçalves de Barros

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. Tiago dos Santos
Prof. Carla Maria Moreira Machado

Dezembro 2021

À memória do meu avô, José Gameiro Pião

Agradecimentos

Concluído este trabalho, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos e gratidão a todos os que contribuíram para a realização do mesmo.

Ao Prof. Pedro Rosa, orientador desta dissertação, apresento o meu profundo reconhecimento e agradecimento pela oportunidade, pelo apoio, pelos conhecimentos transmitidos e pelo entusiasmo com que orientou este trabalho.

Ao Eng. Alcino Reis, pela sua total disponibilidade e acompanhamento contínuo, pelos conhecimentos transmitidos, pela constante motivação, pela ajuda e pela amizade ao longo deste período.

Ao Eng. Gonçalo Domingos pelo acompanhamento desde o primeiro ao último dia e por toda a ajuda na superação das dificuldades que foram surgindo no decorrer deste trabalho.

Ao Fábio Garcia por toda a ajuda e acompanhamento na fase inicial deste trabalho. A todos os restantes colegas e amigos do Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3) que acompanharam de perto o meu trabalho e eu o deles, com os quais sempre houve um espírito de amizade e entreajuda, em particular ao Fábio Baptista, Alfredo Passanha e Pedro Freitas.

Ao Eng. Afonso Gregório e restantes elementos do Núcleo de Oficinas (NOF) pelos conhecimentos transmitidos, ajuda e apoio durante o desenvolvimento da componente experimental deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso que tiveram um papel importante em todo o meu percurso académico, em especial à Marta Batalha, Miguel Coelho, Diogo Rodrigues, Ricardo Aniceto e Diogo Carvalho.

À minha mãe e à minha avó por todo o apoio e motivação ao longo de todo o meu percurso académico e por tudo o que fizeram que me permitiu concluir esta etapa.

Resumo

Neste trabalho desenvolveu-se uma bancada de ensaios para caracterização de materiais submetidos ao processo de deformação plástica severa (SPD), *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP). Para tal, melhorou-se e instrumentou-se uma ferramenta de compressão uniaxial já existente no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3). Esta ferramenta foi acoplada a uma prensa do tipo biela-manivela. Desenvolveu-se também uma ferramenta de ECAP, a qual foi acoplada a uma prensa hidráulica de ação manual. Instalaram-se as duas máquinas na bancada. Foram realizados ensaios mecânicos com a liga de alumínio AA 1050 a fim de validar a ferramenta de compressão uniaxial. De seguida realizou-se uma análise do efeito da SPD no alumínio puro (Al 99,999%). Alguns dos provetes foram recozidos a baixa temperatura. Por fim analisou-se a dureza e a resposta dos provetes à compressão, procurando compreender os efeitos do ECAP e do recozimento sobre este material.

Palavras-chave: Deformação plástica, ECAP, compressão uniaxial, dureza, comportamento mecânico, alumínio.

Abstract

In this work, a test bench was developed for the characterization of materials processed by a severe plastic deformation (SPD) process, Equal Channel Angular Pressing (ECAP). For this purpose, a uniaxial compression tool already existing at the Machining and Micro-Manufacturing Laboratory (LabM3) was improved and instrumented. This tool was coupled to a crankshaft type press. It was also developed an ECAP tool, which was coupled to a manual action hydraulic press. The two machines were installed on the bench. Mechanical tests on aluminum alloy AA 1050 were carried out in order to validate the uniaxial compression tool. Then, it was performed an analysis of the effect of SPD on pure aluminum (Al 99.999%). Some of the specimens were annealed at low temperature. Finally, the hardness and response of the specimens to compression were analyzed, seeking to understand the effects of ECAP and annealing on this material.

Keywords: Plastic deformation, ECAP, uniaxial compression, hardness, mechanical behavior, aluminum.

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Símbolos	xii
Glossário	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Ensaios Mecânicos	3
2.1.1 Ensaio de Compressão	3
2.1.2 Ensaio de Dureza	5
2.2 Fundamentos do ECAP	6
2.2.1 Influência dos Ângulos e do Coeficiente de Atrito	8
2.2.2 Influência do Caminho	9
2.2.3 Aquecimento Interno	10
2.2.4 Mecanismos de Endurecimento	10
2.3 Tratamento Térmico	12
2.4 Comportamento Mecânico do Alumínio após ECAP	14
2.5 Recozimento do Alumínio a Baixa Temperatura	15
3 Desenvolvimento Experimental	18
3.1 Prensa Biela-Manivela	19
3.1.1 Melhorias na Máquina	20
3.2 Ferramenta de Compressão Uniaxial	20
3.2.1 Melhorias na Ferramenta	21
3.3 Instrumentação e Aquisição de dados	22
3.3.1 Sensor de Deslocamento	23
3.3.2 Célula de Carga	24
3.3.3 Melhorias na Eletrônica	25

3.3.4	Sistema de Calibração de Célula de Carga	26
3.4	Prensa de Hidráulica	28
3.5	Ferramenta de ECAP	28
4	Materiais e Métodos	32
5	Análise de Resultados	37
5.1	Validação da Ferramenta de Compressão Uniaxial	37
5.1.1	Calibração do Sensor de Deslocamento	37
5.1.2	Calibração da Célula de Carga	38
5.1.3	Deflexão da Máquina-Ferramenta	38
5.1.4	Ensaio de Compressão	40
5.2	Evolução da Tensão com a Extensão	40
5.3	Evolução da Dureza com o ECAP	42
6	Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuros	46
	Referências	48
A	Desenhos Técnicos	50
B	Programa LabVIEW	55
C	Procedimentos Experimentais	57
D	Fichas Técnicas	65

Lista de Tabelas

4.1	Composição química do alumínio puro (Al 99,999%).	32
4.2	Composição química da liga de alumínio AA 1050.	32
4.3	Propriedades físicas dos materiais ensaiados.	32
4.4	Durezas iniciais AA 1050.	33
4.5	Durezas dos provetes de alumínio puro (Al 99,999%) antes e pós ECAP.	35
4.6	Durezas iniciais dos provetes da liga de alumínio AA 1050.	35

Lista de Figuras

2.1	(a) Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial [1]; (b) Representação esquemática do efeito barril [2].	4
2.2	Influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do material [7] . . .	5
2.3	Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers [7].	7
2.4	Representação esquemática do processo de ECAP [12].	8
2.5	Representação esquemática dos quatro caminhos possíveis do ECAP [14]	9
2.6	Distorções introduzidas nos planos X, Y e Z dos elementos de volume para os caminhos A, B _A , B _C e C para cada uma das passagens [1 – 8] [14].	10
2.7	Aumento da temperatura local no plano de deformação durante o ECAP. (a) Aumento da temperatura no plano de deformação do ECAP a temperatura ambiente, para uma velocidade de deformação de 18 mm s^{-1} . (b) Valores experimentais de aumento de temperatura em alumínio puro e três ligas de alumínio em função em função da tensão de máxima, usando velocidades de deformação de 0.18 mm s^{-1} e 18 mm s^{-1} . [14] . . .	11
2.8	Ilustração dos limites de grão e da forma como funcionam como barreira ao escorregamento contínuo, alterando a sua direção. [17]	11
2.9	Influência da temperatura do recozimento (tempo de 1 hora) na resistência à tração e na ductilidade de uma liga de latão. Variação do tamanho de grão e representação das fases de recuperação, recristalização e crescimento do grão em função da temperatura de recozimento [17].	13
2.10	Curvas tensão-extensão dos provetes com diferentes tamanhos de grão submetidos ao ECAP a diferentes velocidades de deformação. [19]	15
2.11	Valores da dureza Vickers no alumínio puro (Al 99.99%), registados ao longo do eixo Z, em secções transversais após 1 e 4 passagens pela matriz de ECAP. [11]	16
2.12	Curvas tensão-extensão logarítmica obtidas em tração uniaxial a velocidades de deformação de: (a) $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. [20]	16
3.1	Modelo da bancada desenvolvida.	18
3.2	Prensa biela-manivela. (a) Conjunto máquina-ferramenta; (b) Mecanismo biela-manivela	19
3.3	Pino de ligação entre o pé da biela e o carro móvel. (a) Localização do pino; (b) Modelo do novo pino; (c) Novo pino após fabrico e montagem.	20

3.4	Ferramenta de compressão uniaxial. (a) Modelo da ferramenta: 1 - Base da ferramenta; 2 - Base da célula de carga; 3 - Casquilho; 4 - Célula de carga; 5 - Placa inferior; 6 - Sensor de deslocamento; 7 - Prato de aço; 8 - Prato de compressão; 9 - Guia; 10 - Placa superior; 11- Atuador do sensor de deslocamento. (b) Ferramenta.	21
3.5	Componente responsável por transmitir o movimento do prato compressor da ferramenta ao sensor de deslocamento: (a) Anterior; (b) Novo	22
3.6	Sensor deslocamento.	23
3.7	Curva de calibração do sensor de deslocamento após montagem do mesmo.	24
3.8	Célula de carga.	24
3.9	(a) Esquema das ligações do aparato de aquisição de dados; (b) Caixa da eletrónica dos sensores.	25
3.10	Princípio de funcionamento da alavanca.	26
3.11	Esquema da alavanca.	27
3.12	Modelo do sistema “alavanca” para calibração da célula de carga. 1 - Suporte do sistema; 2 - Alavanca; 3 - Pino.	27
3.13	Sistema alavanca para calibração da célula de carga. (a) Modelo do sistema montado no pilar; (b) Modelo do sistema com carga aplicada na extremidade	28
3.14	Prensa <i>MEGA PRS15</i>	29
3.15	Material apresentando escoamento por entre os módulos da matriz e extrusão inversa. (a) Provette retirado da matriz a meio de um ensaio; (b) Material num dos módulos da matriz durante o ensaio; (c) Provette apresentando extrusão inversa na parte superior. . .	29
3.16	Ferramenta de ECAP. (a) Modelo da ferramenta: 1 - Base da ferramenta; 2 - Matriz ECAP; 3 - Guia; 4 - Punção; 5 - Casquilho; 6 - Placa superior; 7 - Componente de ligação à prensa; (b) Ferramenta fabricada.	31
4.1	(a) Durómetro <i>HARDRULER HVS-1000</i> ; (b) Centro de ensaios de micro-maquinagem <i>PROTEO</i>	33
4.2	Provetes de alumínio puro (Al 99,999%) após processo de ECAP: (a) 1 passagem; (b) 2 passagens; (a) 4 passagens; (a) 8 passagens.	34
4.3	Forno Nabertherm N 11.	35
5.1	Comparação das curvas de calibração do sensor de deslocamento antes e após as melhorias.	38
5.2	Curva de calibração da célula de carga.	39
5.3	Gráficos correspondentes à deformação elástica da máquina: (a) Curva obtida por Santos [21]; (b) Curva obtida pelo autor desta dissertação.	39
5.4	Curvas Tensão-Extensão da liga AA 1050 obtidas pelo autor e por Reis [4] em condições de deformação quasi-estáticas.	40
5.5	Curvas da tensão em função da extensão obtidas para o alumínio puro (Al 99,999%) após ter sido submetido ao ECAP, componente plástica.	41

5.6	Curvas da tensão em função da extensão obtidas para o alumínio puro (Al 99,999%) após recozimento dos provetes submetidos ao ECAP, componente plástica.	42
5.7	Curvas da tensão em função da extensão obtidas para a liga de alumínio AA 1050 após ter sido submetido ao ECAP, componente plástica.	43
5.8	Evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.	43
5.9	Evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) recozido (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.	44
5.10	Evolução da dureza da liga de alumínio AA 1050 (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.	44
B.1	Interface do utilizador.	55
B.2	Diagrama de blocos.	56
B.3	Parâmetros de aquisição de dados. (a) Deslocamento; (b) Força.	56
B.4	Fator multiplicativo para obtenção de valores de Força [N] a partir dos valores de tensão [v].	56

Lista de Símbolos

Simbolos gregos

- $\dot{\epsilon}$ Velocidade de deformação.
 ϕ Diâmetro do provete.
 μ Coeficiente de atrito.
 Φ Ângulo de curvatura.
 ψ Ângulo externo da curvatura.
 σ Tensão real.
 ϵ Extensão real.

Simbolos romanos

- A Área do provete.
 d Diagonal da indentação.
 d Tamanho médio do grão.
 F Força aplicada.
 f Fator multiplicativo da força pela alavanca.
 h Altura do provete.
 N Número de passagens pelo ECAP.
 P Carga aplicada no ensaio de dureza.

Subscritos

- 0 Inicial.
 ac Acumulado após cada passagem pela matriz.
 i Instantâneo.
 m Médio.
 y Cedência.

Glossário

AA Aluminium Association. iv, v, 1, 2, 7, 10, 14, 15, 32, 34, 37, 41, 44–46

ASCII American Standard Code for Information Interchange. 22

CAD Computer Aided Design. 20, 30

CFC Cúbica de faces centradas. 10

DAQ Data Acquisition System. 22, 25

ECAP Equal Channel Angular Pressing. iv, v, ix, x, 1–3, 6–10, 12, 14–17, 28, 32–34, 36, 37, 41, 42, 44–47, 57

HV Dureza Vickers. 6

LabM3 Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico. iv, v, 26, 32–34

LabVIEW Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. 22, 55

NOF Núcleo de Oficinas. 19, 21, 22, 28, 30, 34

SPD Severe Plastic Deformation. iv, v, 1, 6, 17

Capítulo 1

Introdução

A engenharia lida com a pesquisa e desenvolvimento de soluções para os constantes desafios que surgem. Um desses desafios deve-se ao constante progresso da indústria, que torna mais exigentes os requisitos para os materiais, o que pode causar dificuldade em encontrar materiais que possuam as propriedades necessárias a determinadas aplicações. No entanto, as propriedades dos materiais existentes podem ser melhoradas de modo a corresponderem aos requisitos, como por exemplo através de tratamentos térmicos e termoquímicos, tais como a têmpera, revenido e cementação, técnicas estas que são comumente aplicadas para endurecer aço. Por outro lado, os metais puros, tal como o alumínio, não podem ser endurecidos por processos térmicos, o que leva à utilização de processos mecânicos para este fim. Ao longo das últimas décadas tem-se considerado que os grãos ultra finos produzidos por deformação plástica severa (SPD) levam a um grande aumento da resistência mecânica dos materiais. É, portanto, necessário compreender a forma como estes processos influenciam a resposta mecânica dos materiais. Este trabalho é assim motivado pela necessidade de compreender a influência do processo de deformação plástica severa (SPD) através do processo de ECAP na resposta mecânica do alumínio puro (Al 99,999%).

O principal objetivo desta dissertação passa pela instalação de uma bancada de ensaios que permita a caracterização mecânica de materiais. Nesta bancada será instalada uma ferramenta com vista à deformação plástica severa (SPD) de materiais pelo processo de *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP). Será também instalada uma ferramenta de ensaios de compressão uniaxial com vista a estudar as propriedades mecânicas dos materiais após estes serem submetidos ao processo de ECAP. Para tal, começou-se pela instalação da bancada propriamente dita, seguido da instalação da máquina de ensaios de compressão uniaxial devidamente ajustada aos ensaios a realizar e respetivo sistema de aquisição de dados. A última ferramenta instalada foi a do processamento dos materiais por ECAP. Foi testada uma já existente que revelou algumas falhas, pelo que foi decidido projetar e fabricar uma nova.

Nesta investigação foi analisada a resposta mecânica do alumínio puro (Al 99,999%) e da liga de alumínio AA 1050 após serem submetidas ao processo de deformação plástica severa ECAP. Após o ECAP, alguns dos provetes de alumínio puro (Al 99,999%) foram recozidos a baixa temperatura 175 °C

durante 30 minutos.

Antes da realização dos ensaios necessários à análise pretendida nesta investigação, foram feitos ensaios de compressão na liga de alumínio AA 1050 para validar a máquina de ensaios de compressão uniaxial desenvolvida. O comportamento mecânico dos materiais nas diferentes condições foi avaliado através de ensaios de compressão uniaxial e de ensaios de dureza Vickers. Foi feita a análise da evolução da tensão com a extensão e da evolução da dureza com o número de passagens do material pela ferramenta de ECAP para cada condição obtida.

O documento encontra-se estruturado em seis capítulos, sendo que o primeiro corresponde à presente introdução. O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica onde são abordadas matérias necessárias à compreensão do presente trabalho, tais como os ensaios mecânicos de compressão uniaxial e os ensaios de dureza. É também abordada a teoria que sustenta o processo ECAP, o qual foi tido em conta para o projeto e fabrico da ferramenta. Este capítulo termina com a apresentação de investigações, bem como resultados, feitas em relação ao comportamento mecânico do alumínio quando sujeito ao ECAP.

O capítulo 3 descreve todo o procedimento experimental, começando pela descrição e instalação da bancada de ensaios. De seguida é feita a descrição da prensa biela-manivela e da ferramenta de compressão uniaxial, bem como todas as melhorias feitas. É também referida a instrumentação utilizada e o aparato desenvolvido a fim de ser possível a calibração de células de carga. Segue-se uma breve descrição da prensa hidráulica adquirida a fim de instalar a ferramenta de ECAP, terminando este capítulo com o desenvolvimento desta ferramenta.

No capítulo 4 são apresentados os materiais ensaiados, bem como os processos de preparação dos provetes nas diferentes condições.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos, começando pela validação do aparato, nomeadamente da máquina de compressão uniaxial. Segue-se depois a apresentação dos resultados obtidos para os materiais que se propôs analisar, avaliando a influência do processo de ECAP no comportamento mecânico desses materiais, quando ensaiados à compressão e quando sujeitos a ensaios de dureza, nas diferentes condições referidas no capítulo 4.

Por fim, no capítulo 6 é feita uma reflexão do trabalho realizado, onde se apresentam as principais conclusões e são também feitas sugestões de melhorias ao aparato bem como de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que servem de base para a presente dissertação. O capítulo inicia pelos ensaios mecânicos utilizados para avaliar a forma como um material se comporta de acordo com determinada solicitação. De seguida é abordado o mecanismo de deformação plástica severa ECAP, assim como os principais fatores que influenciam o resultado final da deformação. É também abordada a influência do tratamento térmico na microestrutura do material, bem como no alívio de tensões. Por fim, são apresentados resultados obtidos em investigações acerca do comportamento mecânico do alumínio após ECAP em diferentes condições.

2.1 Ensaios Mecânicos

Para avaliar a forma como um material se comporta a determinada solicitação, estes são submetidos a ensaios mecânicos. Estes ensaios são ensaios experimentais e variam consoante a propriedade que se pretende estudar (tensão-extensão, dureza) e do tipo de solicitação (tração, compressão, flexão, torção). Neste sentido, e de acordo com o objetivo desta dissertação, irá ser analisado o comportamento mecânico do alumínio após ser submetido a um mecanismo de deformação plástica severa, o ECAP. Esta análise será feita através de ensaios de compressão e ensaios de dureza, os quais serão detalhados nas subsecções seguintes.

2.1.1 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão uniaxial consiste em comprimir um provete cilíndrico entre dois pratos planos. Normalmente, neste tipo de ensaios, um dos pratos mantém-se estático, sendo o movimento imposto pelo outro, reduzindo assim a distância entre os mesmos e conseqüentemente a altura do provete. À medida que o provete é comprimido, ocorre redução da altura e aumento da secção transversal. Na Figura 2.1 (a), encontra-se uma representação esquemática deste tipo de ensaio. Para registar os valores de força e de deslocamento em cada instante de tempo, são utilizados sensores de força e de deslocamento, respetivamente, os quais se encontram instalados no aparato experimental.

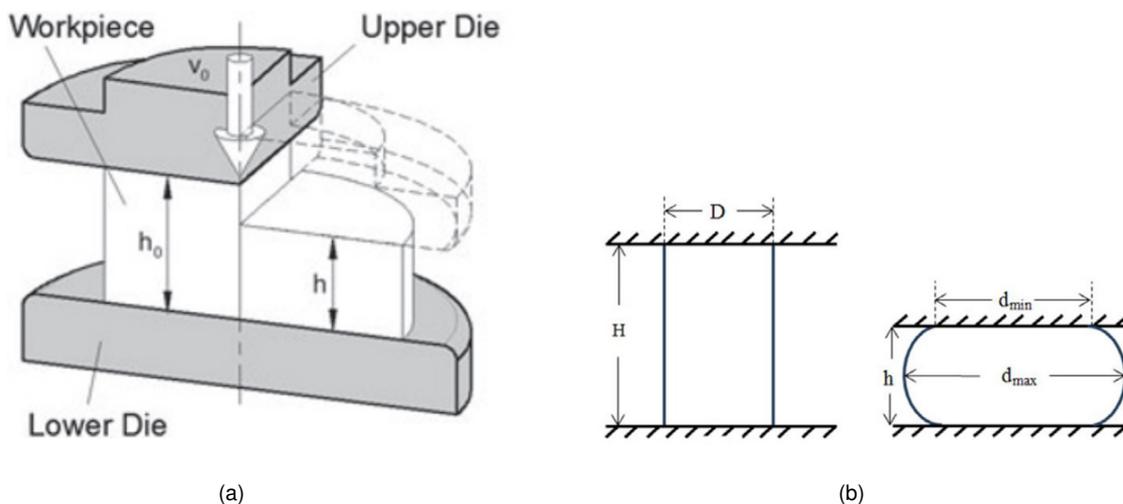


Figura 2.1: (a) Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial [1]; (b) Representação esquemática do efeito barril [2].

No decorrer dos ensaios de compressão, um dos problemas que surge é o atrito entre as superfícies dos pratos de compressão e o provete. Este atrito causa estrangulamento ao movimento lateral do material, originando uma curvatura na superfície lateral do provete, designada por efeito barril, o que implica que a deformação plástica não seja homogénea. Este efeito encontra-se esquematizado na Figura 2.1 (b). À medida que o provete é comprimido, a sua altura reduz-se e o seu diâmetro aumenta, fazendo com que a área de contacto entre o provete e os pratos compressores aumente também, o que leva a um aumento da força necessária para comprimir o provete. As dimensões do provete utilizado são um fator importante na contribuição para o atrito, uma vez que quando a relação altura/diâmetro (h_0/ϕ_0) é inferior a 1, o atrito entre as faces do provete e os pratos revela-se maior. Isto acontece porque o atrito faz com que a pressão normal aumente exponencialmente em direção ao centro dos provetes na proporção inversa à relação h_0/ϕ_0 . Ou seja, para provetes com uma relação h_0/ϕ_0 muito baixa, um mínimo aumento de atrito provoca um aumento significativo na pressão normal, logo será necessária uma maior força de compressão [3]. Por outro lado, provetes com uma relação $h_0/\phi_0 > 3$ poderão originar falhas no ensaio de compressão devido a empenamento ou flexão [3].

Deste modo, em condições quasi-estáticas, para que ocorra uma deformação quasi-homogénea ao longo do provete e de forma a ser possível realizar uma boa caracterização mecânica do material, a lubrificação é essencial, sendo a massa grafitada o lubrificante utilizado [4].

As curvas tensão-extensão contêm grande parte da informação que se pretende analisar neste trabalho. Ao longo desta dissertação, considera-se que os termos tensão e extensão se referem a tensão real e extensão real, respetivamente. A tensão real, σ , considera a dimensão real do provete. À medida que o provete é comprimido, a sua altura reduz-se e o seu diâmetro aumenta, e conseqüentemente a sua área de secção transversal também. Assim, a tensão real é calculada pela expressão (2.1).

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (2.1)$$

Onde a área instantânea do provete, A_i , é calculada através da condição de incompressibilidade a partir da expressão (2.2).

$$A_i = \frac{V}{h_i} = \frac{A_0 h_0}{h_i} = \frac{\pi \phi_0^2 h_0}{4h_i} \quad (2.2)$$

A extensão real, ε , considera a deformação incremental do provete, em que para o seu cálculo é considerada a diferença de deformação instantânea. O seu cálculo é feito através da expressão (2.3).

$$\varepsilon = - \int_{h_0}^{h_i} \frac{1}{h} dh = \ln \left(\frac{h_0}{h_i} \right) \quad (2.3)$$

É pretendido que o material deformado apresente uma boa resistência mecânica, tanto quando este é deformado em condições quasi-estáticas como em condições dinâmicas. A velocidade de deformação, $\dot{\varepsilon}$, é um fator que influencia as propriedades mecânicas do material comprimido, pelo que é expectável que as propriedades do material obtido a baixa velocidade de deformação sejam diferentes das que se obtêm a alta velocidade de deformação. Sabe-se, do que tem sido demonstrado em estudos anteriores (por exemplo Ghosh [5]), que em ensaios de compressão dinâmicos, as curvas de tensão de escoamento têm tendência a aumentar quando comparadas com as obtidas em ensaios quasi-estáticos. O comportamento verificado deve-se ao aumento da resistência a deslocamentos na microestrutura do material, uma vez que não têm tempo suficiente para se deslocarem [6]. A variação expectável na curva tensão-extensão encontra-se representada no gráfico da Figura 2.2.

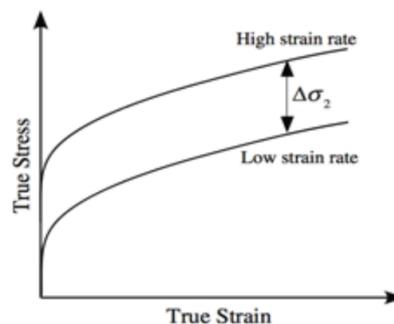


Figura 2.2: Influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do material [7]

A velocidade (ou taxa) de deformação é a taxa à qual se dá a deformação. Pode ser definida como sendo a derivada da extensão em relação ao tempo, como se mostra na equação (2.4), exprimindo-se em unidades s^{-1} [7].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.4)$$

2.1.2 Ensaio de Dureza

A dureza é outra característica importante dos materiais. Esta pode ser definida como sendo a resistência que o material oferece à deformação permanente, à penetração, ao desgaste, à riscagem,

à maquinagem ou à resistência mecânica. Todas estas características estão relacionadas com a capacidade que o material apresenta para se deformar plasticamente [8]. Desta forma, admite-se que a dureza é uma característica do material correspondente à capacidade deste resistir a se deformar plasticamente, quando sujeito à penetração de um outro material mais duro, de forma localizada.

Este tipo de ensaios encontra-se bastante disseminado pela indústria não só pela celeridade com que podem ser executados e pelo baixo custo dos equipamentos, como também pelo facto de estes ensaios poderem ser não destrutivos [8]. É de realçar a importância desta última característica, na medida em que este tipo de ensaios não inutiliza o material a ser testado, seja um componente produzido ou um provete destinado a ser alvo, além do ensaio de dureza, de outro tipo ensaio.

Dada a sua importância, foram sendo desenvolvidos vários tipos de técnicas, podendo deste modo dividir-se os ensaios de dureza em três tipos: dureza por risco, dureza dinâmica ou por ressaltos e dureza por indentação ou penetração. Na elaboração da presente dissertação recorreu-se a este último tipo.

Ao longo dos tempos desenvolveram-se várias técnicas de medição de dureza por indentação, tais como o ensaio de Vickers, ensaio de dureza Brinell, ensaio de dureza Rockwell e ensaio de dureza Knoop. Todos estes testes são realizados com recurso a um indentador, de geometria específica, o qual exerce uma carga pré-determinada durante um intervalo de tempo específico. Os dados da força aplicada, da geometria do indentador e do intervalo de tempo de aplicação da carga são tidos em conta para se tirarem as conclusões acerca da dureza.

Em todas as técnicas referidas, quanto maior o índice de dureza, mais duro é o material e consequentemente menor será a marca deixada pelo indentador [4].

Na presente dissertação recorreu-se ao ensaio de dureza Vickers, no qual é utilizado um indentador de diamante, com forma piramidal, cujas faces opostas fazem um ângulo de 136° . Na Figura 2.3 encontra-se uma representação esquemática deste ensaio.

O número de dureza Vickers, dado pela equação (2.5), é calculado pelo quociente entre a força aplicada e a área da superfície indentada.

$$HV = 1.854 \frac{P}{d_m^2} \quad (2.5)$$

Onde P [N] é a carga aplicada e d_m [mm] corresponde ao valor médio das diagonais do losango resultante da indentação.

O ensaio de dureza Vickers apresenta ainda a vantagem que reside no facto de existir semelhança geométrica entre indentações provocadas por diferentes cargas, o que torna o número de dureza Vickers independente da carga aplicada [9].

2.2 Fundamentos do ECAP

O ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*) é um processo mecânico de deformação plástica severa (SPD) com vista a aumentar a resistência mecânica dos materiais pela acumulação de deformação plástica. Este processo, que surgiu nos anos 70 do século 20 na União Soviética, consiste em fazer

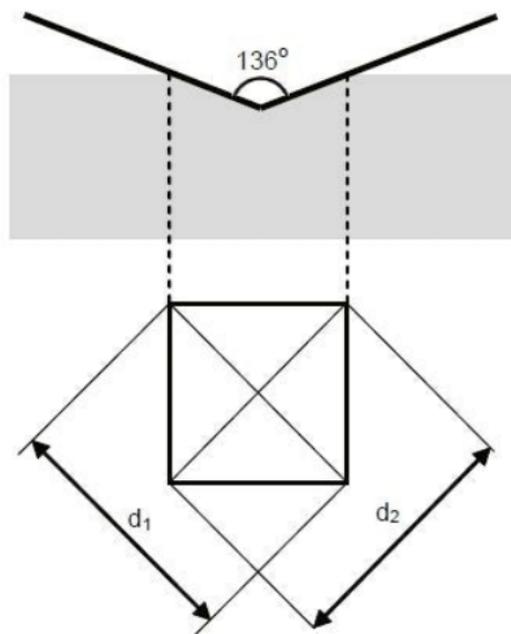


Figura 2.3: Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers [7].

passar, com aplicação de força através de um punção, um pedaço de material por uma matriz tantas vezes quanto o pretendido, até se obter a resistência desejada. A matriz possui um canal no seu interior, o qual pode ter secção quadrada ou circular e que permanece constante ao longo do processo. Na Figura 2.4 encontra-se uma representação esquemática do processo. O canal possui uma curvatura de ângulo Φ , cujo valor é tipicamente entre 90° e 150° , e define o quão severa é a deformação. Este é o principal parâmetro que define a deformação imposta ao provete. Outro parâmetro é o ângulo externo da curvatura, ψ , o qual pode ou não existir. A extensão acumulada pelo material após N passagens pela matriz é dada pela equação (2.6), onde são tidos em conta os ângulos Φ e ψ e o número de passagens N [10].

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi + \psi}{2} \right) + \psi \csc \left(\frac{\Phi + \psi}{2} \right) \right] \quad (2.6)$$

É expectável que o provete à saída possua um refinamento de grão que pode ser tanto ao nível micro como nanométrico [11], dependendo do número de passagens e de outros parâmetros, como o caminho.

Existem ainda mais duas variáveis do processo a ter em conta - a temperatura e a velocidade do punção. O efeito da temperatura no ECAP foi analisado por Shaeri et al. [13]. Neste estudo, fizeram-se três e quatro passagens pelo ECAP de provetes da liga de alumínio AA 7075 a diferentes temperaturas - 25°C , 120°C , 150°C e 180°C . Concluiu-se que aumentando a temperatura para 120°C , as propriedades mecânicas dos provetes aumentam significativamente. No entanto, ao fazer-se um incremento na temperatura de 120°C para 180°C observou-se que a resistência mecânica dos provetes era menor do que a daqueles que foram submetidos ao processo a temperaturas inferiores. Na presente dissertação

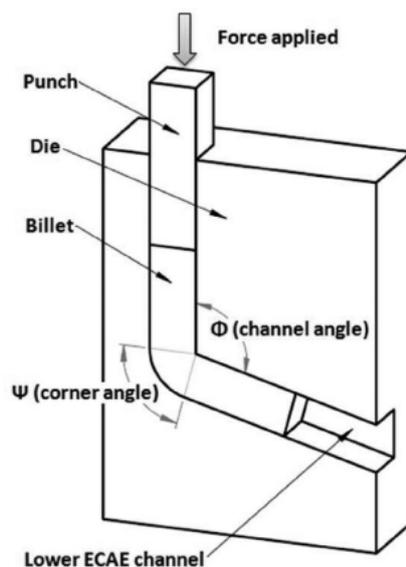


Figura 2.4: Representação esquemática do processo de ECAP [12].

os ensaios a realizar serão à temperatura ambiente.

Em relação à velocidade do punção, na investigação realizada por Valiev and Langdon [14], para velocidades de 10^{-2} a 10 mm s^{-1} , concluiu-se que a velocidade não tem influência significativa no tamanho dos grãos ultra finos, apesar da recuperação ocorrer mais facilmente quando o ensaio é realizado a velocidades mais baixas, uma vez que promovem microestruturas mais equilibradas. Na maioria das investigações, este factor não é considerado devido ao facto de ser comum o uso de prensas hidráulicas, de elevada força e baixa velocidade. A prensa a utilizar na presente dissertação é hidráulica de actuação manual, pelo que também não irá ser possível precisar a velocidade de cada passagem. No entanto, sabe-se que as gamas de velocidades estão dentro daquelas que foram objeto de estudo de Valiev and Langdon [14], pelo que se não se irá considerar a influência deste parâmetro.

2.2.1 Influência dos Ângulos e do Coeficiente de Atrito

Na maioria das investigações acerca do ECAP as matrizes utilizadas possuem canais com ângulos de curvatura, Φ , de 90° , apesar de ser mais fácil usar valores superiores uma vez que reduzem a força necessária ao processo. Esta escolha reside no facto deste ser o mais eficiente em obter microestruturas ultra finas [11, 12], pelo que será este o valor utilizado na presente dissertação. O ângulo externo da curvatura, ψ , tem menos influência na deformação, no entanto quanto menor o seu valor, maior será a parte homogénea do provete, o que foi demonstrado no trabalho desenvolvido por Xu and Langdon [11], sendo que nesse trabalho se obteve uma estrutura mais homogénea para um ângulo externo da curvatura de $\psi = 28^\circ$. Apesar dos resultados obtidos, em Xu and Langdon [11] considera-se que um ângulo $\psi = 20^\circ$ é a melhor opção ao desenvolver-se a ferramenta de ensaios. Existem outros fatores que podem interferir com os resultados obtidos, como o atrito. No entanto, a conclusão de que um valor baixo de ψ tem um efeito insignificante ao nível da homogeneidade é bastante importante na medida em que é praticamente impossível fabricar um canal numa matriz com um ângulo $\psi = 0^\circ$, devido a

limitações inerentes aos processos de maquinagem [11]. Outro parâmetro considerado de relevo para Xu and Langdon [11] consiste na forma como a matriz é construída. Esta deve ser, preferencialmente, peça única (monolítica) para evitar problemas de extrusão entre os módulos da matriz, Figura 3.15 (a).

Na investigação de Agwa et al. [12], para além de se ter analisado a influência dos ângulos Φ e ψ , analisou-se também a influência do atrito, tendo-se chegado à conclusão de que o coeficiente de atrito ótimo, com o objetivo de melhor a homogeneidade, é de $\mu = 0,3$. No entanto, a carga exercida pelo punção é bastante afetada pelo coeficiente de atrito. No trabalho de Agwa et al. [12], testou-se para um aumento de 0 para 0,2 do coeficiente de atrito, tendo-se verificado que a carga no punção passou para o dobro. Concluiu-se assim que o coeficiente de atrito tem mais influência na carga aplicada no punção do que a geometria do canal da matriz.

2.2.2 Influência do Caminho

Outro parâmetro do ECAP que também influencia consideravelmente as propriedades mecânicas do material é a orientação com que o provete é colocado na matriz após cada passagem, tendo em conta o eixo longitudinal. Cada uma incute no material uma textura e microestrutura diferentes. As diferentes hipóteses encontram-se esquematizadas na Figura 2.5.

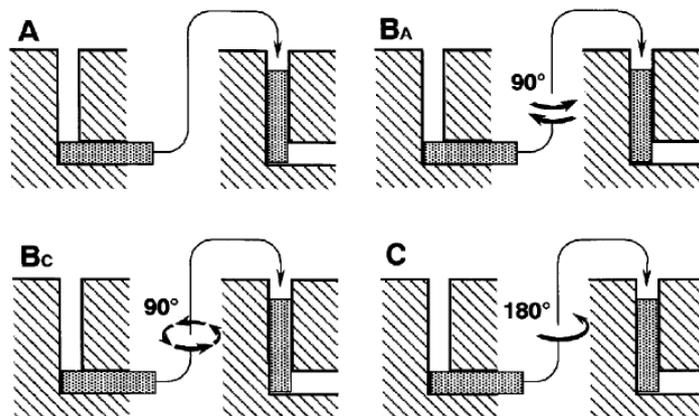


Figura 2.5: Representação esquemática dos quatro caminhos possíveis do ECAP [14]

No caminho A, a orientação é mantida constante entre passagens sem qualquer rotação. No caminho B_A , o provete é rodado 90° em torno do seu eixo longitudinal entre passagens de forma alternada, isto é, a direção permanece constante (em torno do eixo longitudinal), no entanto o sentido de rotação muda após cada passagem. No caminho B_C , o provete é rodado 90° em torno do seu eixo longitudinal entre passagens, sempre no mesmo sentido, seja horário ou anti-horário. No caminho C, o provete é rodado 180° em torno do seu eixo horizontal entre passagens, sempre no mesmo sentido. Além destas hipóteses é ainda possível fazer combinações das mesmas, como por exemplo os caminhos B_C e C alternando entre rodar 90° e 180° entre passagens. No entanto, demonstrações experimentais sugerem que estas combinações mais complexas não levam a melhorias adicionais às propriedades mecânicas aos materiais [14, 15]. Na Figura 2.6, encontra-se uma representação das distorções nos planos X, Y e Z num elemento de volume de material após 8 passagens pelo ECAP para os caminhos

A, B_A, B_C e C. De acordo com o estudo realizado por Venkatachalam et al. [16], o caminho que mais aumentou a resistência mecânica da liga de alumínio AA 2014 foi o B_C.

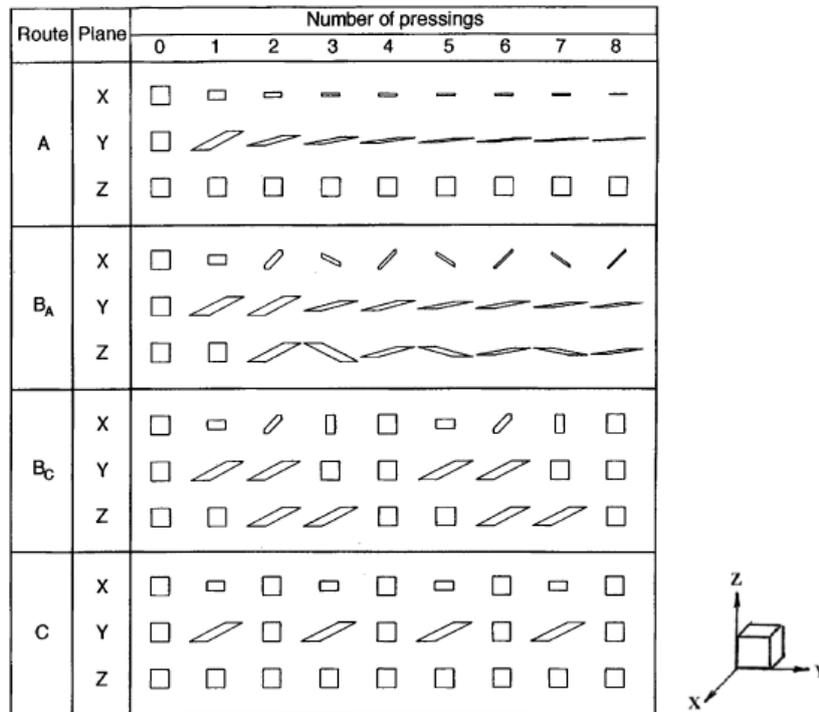


Figura 2.6: Distorções introduzidas nos planos X, Y e Z dos elementos de volume para os caminhos A, B_A, B_C e C para cada uma das passagens [1 – 8] [14].

2.2.3 Aquecimento Interno

Durante a investigação de Valiev and Langdon [14], analisou-se o aumento da temperatura durante o ECAP, tendo-se verificado que existe um aumento significativo de temperatura do provete aquando da passagem pelo plano de deformação. Para o alumínio puro, à temperatura ambiente de 11 °C, verificou-se um aumento da temperatura para 40 °C na zona de deformação, Figura 2.7 (a). Posteriormente verificou-se que os valores da variação da temperatura variam com a tensão máxima dos materiais. Estes resultados encontram-se presentes no gráfico da Figura 2.7 (b). Neste gráfico, pode ainda verificar-se que o aumento de temperatura é tanto mais significativo quanto maior a resistência do material.

2.2.4 Mecanismos de Endurecimento

A resistência conferida ao material após o ECAP consiste na combinação de dois mecanismos: redução do tamanho de grão e endurecimento devido ao encruamento. O resultado depende em grande parte da microestrutura inicial do material a ser processado. No caso em estudo, trata-se de alumínio, que é um metal policristalino com uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC).

O tamanho médio dos grãos nos metais policristalinos influencia as propriedades mecânicas. Os

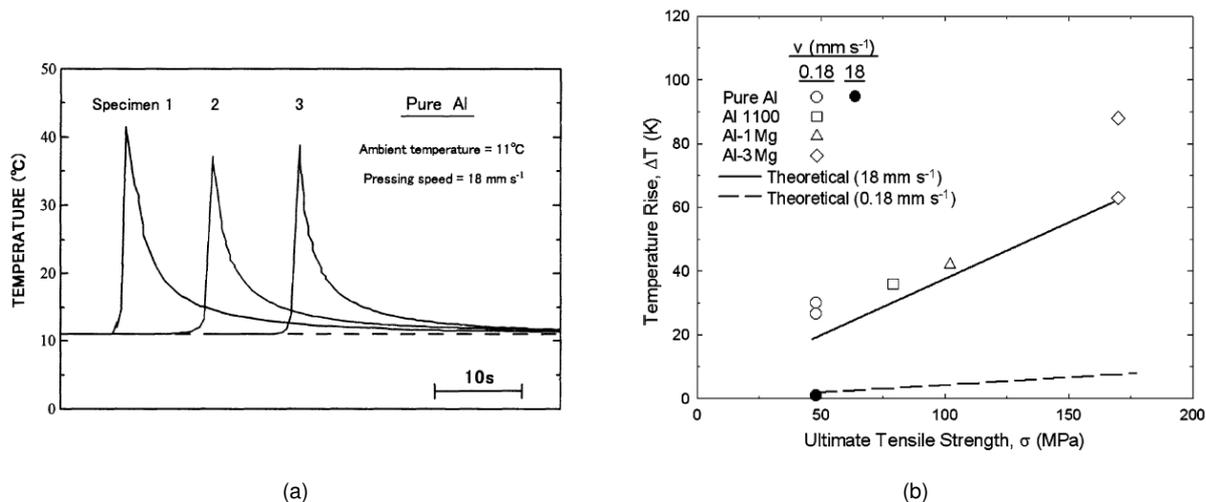


Figura 2.7: Aumento da temperatura local no plano de deformação durante o ECAP. (a) Aumento da temperatura no plano de deformação do ECAP a temperatura ambiente, para uma velocidade de deformação de 18 mm s^{-1} . (b) Valores experimentais de aumento de temperatura em alumínio puro e três ligas de alumínio em função em função da tensão de máxima, usando velocidades de deformação de 0.18 mm s^{-1} e 18 mm s^{-1} . [14]

grãos com diferentes orientações cristalográficas encontram-se separados por limites de grão. Estes limites são uma barreira ao movimento das deslocações, uma vez que nestes limites as deslocações ao passar de grão para grão têm de alterar a direção do seu movimento, como representado na Figura 2.8.

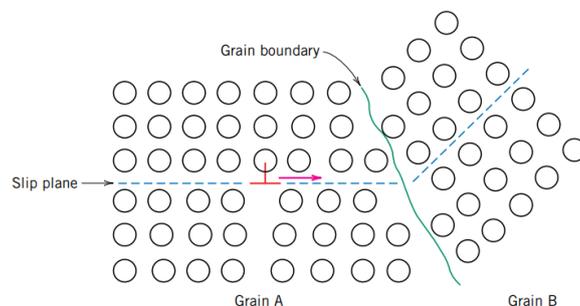


Figura 2.8: Ilustração dos limites de grão e da forma como funcionam como barreira ao escorregamento contínuo, alterando a sua direção. [17]

Este efeito torna-se mais notável com o ângulo de desvio entre grãos. Os limites de grão criam ainda descontinuidade nos planos de escorregamento. É de notar que no caso de limites de grão com ângulos pronunciados, pode ocorrer acumulação de deslocações nos limites de grão, o que impede a sua passagem ao próximo. Todos estes aspectos dificultam a deformação, logo estruturas de grão fino são mais duras e mecanicamente mais resistentes em relação a estruturas de grão mais grosseiro. Existe um modelo matemático, denominado modelo de Hall-Petch, descrito na equação (2.7), que relaciona a tensão de cedência com o tamanho médio do grão.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{1/2} \quad (2.7)$$

Onde σ_0 e k são constantes do material. A redução do tamanho de grão também aumenta a tenacidade de muitas ligas. No entanto, ensaios experimentais mostram que abaixo de um tamanho de grão de $\sim 10 \text{ nm}$ a resistência diminui com o aumento do refinamento do grão, sendo este efeito chamado de “relação inversa de Hall-Petch” [18].

O comportamento mecânico também é influenciado pelo movimento de deslocações. De facto, a deformação corresponde a uma grande quantidade de deslocações. A facilidade de um material se deformar plasticamente está diretamente relacionada com a capacidade de as deslocações passarem entre grão. A redução desta capacidade resulta na necessidade de se aumentarem as forças necessárias para deformar o material plasticamente e, em consequência, aumenta a tensão de cedência e a resistência mecânica. Neste caso, ocorre endurecimento devido ao encruamento.

A deformação a frio promove a formação de novas deslocações, aumentando assim a sua densidade, expressa em comprimento total de deslocações por unidade de volume. Em consequência, a distância entre deslocações é encurtada. As tensões entre deslocações têm carácter repulsivo, o que aliado à sua aproximação, resulta no impedimento de haver deslocações pela presença de outras deslocações. Assim, com o aumento da densidade de deslocações, a resistência ao movimento de deslocações pela presença de outras torna-se mais pronunciado, resultando na necessidade de uma maior tensão para deformar o material. Assim, o material endurece e, por outro lado, a ductilidade baixa [17].

Por norma, o ECAP é realizado em provetes de material na sua condição recozida ou outra condição em que apresentem estruturas cristalográficas grosseiras. A condição inicial do material, antes da redução do tamanho de grão e do endurecimento por encruamento, pode ser restaurada com recurso a tratamento térmico de alta temperatura (recozimento).

2.3 Tratamento Térmico

Parte da energia fornecida durante a deformação plástica é acumulada no material em forma de extensões, o que introduz no material tensões residuais. Além das propriedades mecânicas do material, há ainda outras que podem ser alteradas com a deformação a frio, tais como a resistência à corrosão e condutividade elétrica. No entanto, as características iniciais do material podem ser repostas através de um recozimento. Este tratamento compreende dois estágios diferentes: recuperação e recristalização, e eventualmente crescimento de grão.

Recuperação

Durante o processo de recuperação, parte das tensões residuais são aliviadas através do movimento das deslocações, na ausência de tensões externas aplicadas. O movimento das deslocações é facilitado pela difusão atômica a temperaturas elevadas. Assim, há uma redução na densidade das deslocações no decorrer da recuperação, bem como na sua energia interna. Além disso, também as propriedades físicas, como a condutividade elétrica e a condutividade térmica, voltam ao estado inicial, antes de qualquer deformação a frio [17].

Recristalização

Durante a recristalização dá-se a formação de novos grãos uniaxiais (dimensões aproximadamente iguais em todas as direções) e livres de deformações. Os novos grãos formam-se como núcleos de pequenas dimensões, que crescem até consumirem completamente o material original por difusão atômica. Nesta fase, as propriedades mecânicas que foram alteradas com a deformação a frio vão sendo repostas para a condição inicial. O material fica mais macio e mais dúctil, Figura 2.9. Alguns tratamentos térmicos são concebidos para permitir que a recristalização ocorra e assim obter as modificações pretendidas nas propriedades mecânicas.

A recristalização depende ainda da temperatura e do tempo do tratamento térmico. A influência da temperatura é ilustrada na Figura 2.9, que apresenta a resistência à tração e a ductilidade (a temperatura ambiente) de uma liga de alumínio em função da temperatura e para um tratamento térmico com a duração de 1 hora. As estruturas do grão nos diferentes estágios do processo também se encontram representadas esquematicamente na Figura 2.9. O valor da temperatura à qual o material se recristaliza na sua totalidade numa hora é denominado de temperatura de recristalização. Este valor depende de diversos fatores, tal como a percentagem de deformação a frio e o grau de pureza da liga. A temperatura de recristalização é, tipicamente, entre um terço e metade da temperatura absoluta de fusão do material [17]. A temperatura de fusão do alumínio puro é de 660 °C, pelo que a sua temperatura de recristalização será [220, 330] °C.

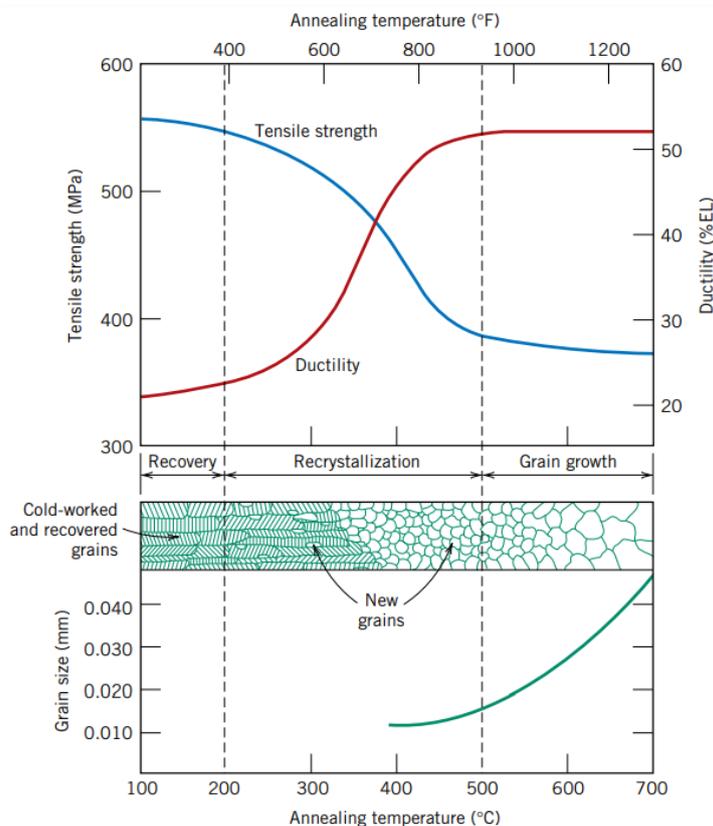


Figura 2.9: Influência da temperatura do recozimento (tempo de 1 hora) na resistência à tração e na ductilidade de uma liga de alumínio. Variação do tamanho de grão e representação das fases de recuperação, recristalização e crescimento do grão em função da temperatura de recozimento [17].

O aumento da percentagem de deformação a frio aumenta a taxa de recristalização, ou seja, reduz a temperatura de recristalização. Por outro lado, a presença de impurezas impede o movimento dos limites de grão, o que resulta na diminuição da taxa de recristalização, aumentando desta forma a temperatura de recristalização, por vezes de forma considerável [17].

Crescimento do Grão

Após a recristalização, caso o material se mantenha à temperatura elevada, ocorre a fase de crescimento do grão. Nesta fase dá-se o crescimento dos grãos recristalizados, com o crescimento dos grãos de maiores dimensões e desaparecimento dos menores, formando-se novos contornos de grão. Os limites de grão da nova estrutura assumem uma configuração de menor energia e consequentemente mais estável termodinamicamente. Apesar de a recuperação e recristalização removerem as deslocações, o material continua a possuir limites de grão, que são termodinamicamente instáveis, que pode levar a um crescimento anormal dos grãos [17].

2.4 Comportamento Mecânico do Alumínio após ECAP

Após se ter analisado, na subsecção 2.2.4, a forma como a microestrutura do material influencia o comportamento mecânico do material, nesta secção será mostrado o comportamento da microestrutura resultante do processo de ECAP quando sujeita a ensaios mecânicos de compressão e de dureza.

Ensaio de Compressão

Na investigação de Sun et al. [19] submeteram-se provetes de alumínio AA 1050 ao ECAP com um ângulo de curvatura $\Phi = 90^\circ$, utilizando caminho B_C a temperatura ambiente até uma extensão equivalente de 8,4. Daqui resultou um material com microestrutura de grão ultra fino com tamanho médio de $0,35 \mu m$. Posto isto, o material foi recozido em seis condições diferentes de temperatura e tempo de forma a obter microestruturas com tamanhos de grão de $0,47 \mu m$ a $20 \mu m$. Após o recozimento, preparam-se os provetes cilíndricos com $4 mm$ de diâmetro e $5 mm$ de comprimento, cujas faces foram polidas antes de serem submetidos ao ensaio de compressão. Realizaram-se ensaios de compressão quasi-estáticos ($1 \times 10^{-3} s^{-1}$), intermédios ($1 s^{-1}$) e dinâmicos ($2800 s^{-1}$), tendo a temperatura variado entre $77 K$ e $298 K$.

Na Figura 2.10, encontram-se os gráficos com as curvas tensão-extensão cada ensaio de compressão com diferentes velocidades de deformação realizados à temperatura ambiente ($298 K$). Os resultados mostram que existe influência da microestrutura e da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas do material. Verifica-se um aumento significativo da tensão de cedência com a diminuição do tamanho de grão. A velocidade de deformação favorece igualmente o aumento da tensão de cedência. Os três provetes com maior tamanho de grão ($1,03$, $1,72$ e $20 \mu m$) apresentam encruamento. O provete com tamanho de grão intermédio ($0,78 \mu m$) apenas apresenta encruamento até à tensão de cedência - aproximadamente a 5% da extensão. Já os três provetes

com menores tamanhos de grão (0,35, 0,47 e 0,59 μm) apresentam taxas negativas de encruamento até 20% da extensão [19].

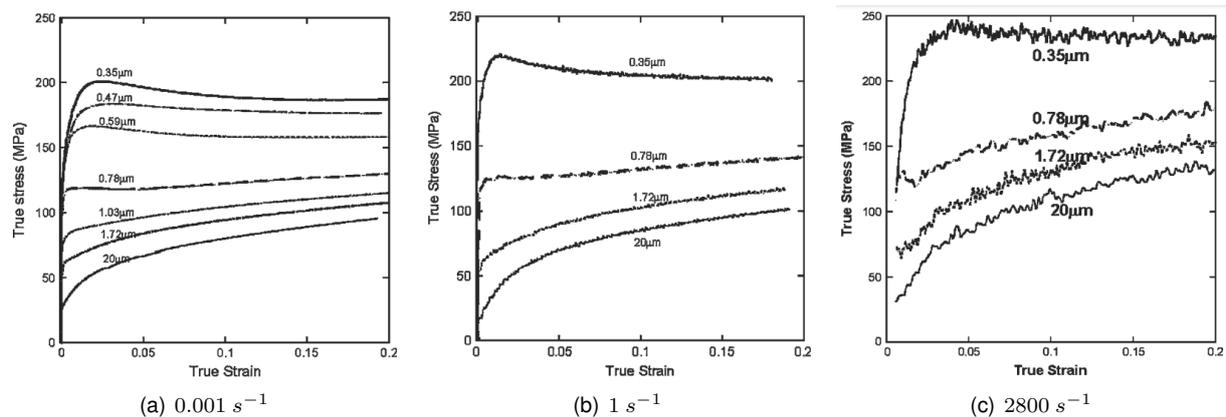


Figura 2.10: Curvas tensão-extensão dos provetes com diferentes tamanhos de grão submetidos ao ECAP a diferentes velocidades de deformação. [19]

Ensaio de Dureza

A dureza encontra-se diretamente relacionada com a tensão de cedência, logo os ensaios de dureza Vickers podem servir de complemento aos ensaios de compressão. A dureza Vickers tende a aumentar com o aumento da resistência mecânica causada pelo número de passagens pela ferramenta de ECAP. A homogeneidade das durezas é um aspecto também a ter em conta [6]. Este tema foi alvo de estudo por Xu and Langdon [11], que no seu estudo analisaram a distribuição da dureza Vickers na secção transversal de provetes de alumínio puro (Al 99,99%) e de liga de alumínio AA 6061 submetidos ao processo de ECAP até 8 passagens. O canal da matriz utilizada possuía uma curvatura de ângulo $\Phi = 90^\circ$ e ângulo externo $\psi = 0^\circ / 20^\circ$. O processo ocorreu à temperatura ambiente, tendo sido utilizado o caminho B_C. Os resultados obtidos encontram-se presentes na Figura 2.11, onde se pode observar que o processo aumenta, de facto, a dureza logo após a primeira passagem. Pode observar-se também que após a primeira passagem a distribuição de durezas torna-se não homogénea, ao longo do eixo Z, tomando valores mais baixos junto à superfície inferior. Ficou também provado que para um maior número de passagens o material torna-se mais homogéneo. No entanto, verificou-se que no alumínio puro a homogeneidade desenvolve-se mais rapidamente comparativamente à liga AA 6061 [11].

É de notar que, ainda nesta investigação, se verificou que não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos pelas matrizes com ângulo externo de curvatura de $\psi = 0^\circ$ ou $\psi = 20^\circ$ [11].

2.5 Recozimento do Alumínio a Baixa Temperatura

Koizumi et al. [20] na sua investigação submeteu alumínio puro (JIS A1070-H, 99,7% pureza) ao ECAP, tendo obtido provetes nas seguintes condições: 0 passagens, 1 passagem, 4 passagens e 8 passagens. O canal da matriz utilizada possuía um diâmetro de 10 mm, ângulo de curvatura $\Phi = 90^\circ$

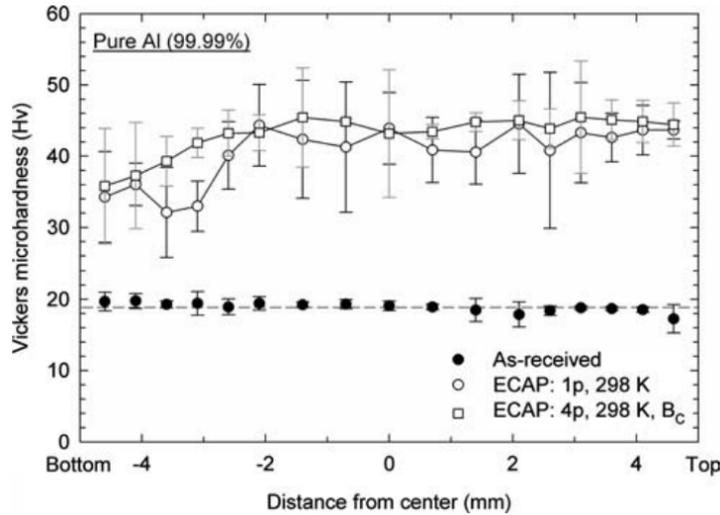


Figura 2.11: Valores da dureza Vickers no alumínio puro (Al 99.99%), registados ao longo do eixo Z, em secções transversais após 1 e 4 passagens pela matriz de ECAP. [11]

e um ângulo externo da curvatura $\psi = 36,87^\circ$. O processo decorreu à temperatura ambiente, tendo sido utilizado o caminho B_C a uma velocidade de aproximadamente $0,3$ a $0,5 \text{ mm s}^{-1}$. Posteriormente, alguns dos provetes com 8 passagens foram recozidos a uma temperatura de 175°C durante 30 minutos e 6 horas, estando estes identificados no gráfico da Figura 2.12 por “8 passagens - O1” e “8 passagens - O2”, respetivamente. O provete na condição 0 passagens foi recozido a 425°C durante 1 hora para ser tomado como estando na condição inicial.

Após a preparação do material (ECAP e recozimento), os provetes foram submetidos a ensaios de tração a duas velocidades de deformação diferentes, $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Os resultados obtidos encontram-se nos gráficos da Figura 2.12.

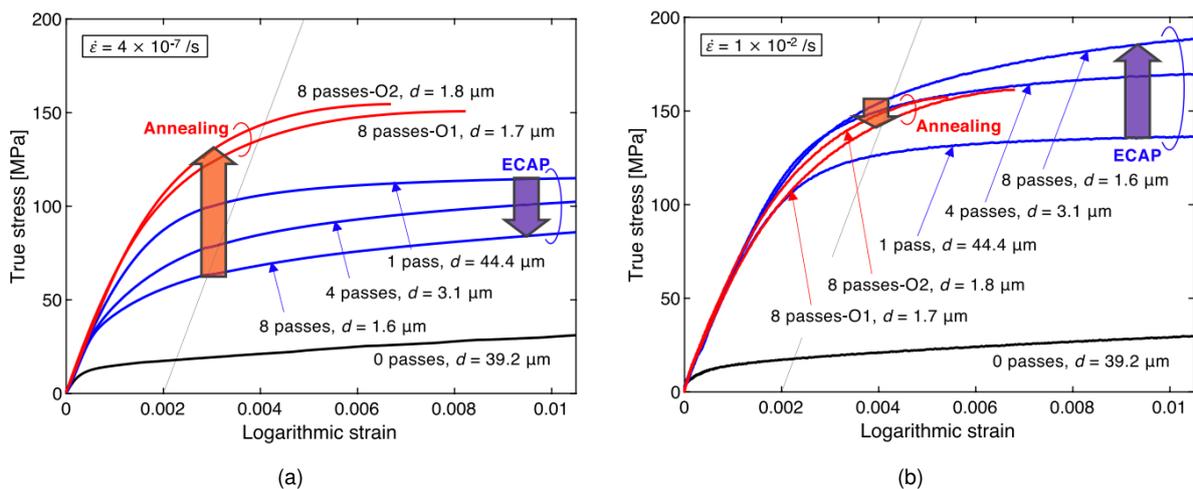


Figura 2.12: Curvas tensão-extensão logarítmica obtidas em tração uniaxial a velocidades de deformação de: (a) $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. [20]

Através dos resultados obtidos é possível observar que para os ensaios de tração realizados à velocidade de deformação mais baixa, $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, a tensão de escoamento do provete 0 passagens

quadruplicou após a primeira passagem pelo ECAP. Nas passagens seguintes, a tensão de escoamento desceu acentuadamente. Verificou-se um amaciamento significativo de 1 para 8 passagens pelo ECAP. Não se observou endurecimento devido ao refinamento do tamanho de grão. O posterior recozimento a baixa temperatura duplicou aproximadamente a tensão de cedência do provete na condição 8 passagens, o que pode ser observado nas curvas “8 passes-O1” e “8 passes-O2” do gráfico mostrado na Figura 2.12 (a) [20].

Os provetes ensaiados à velocidade de deformação $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ apresentaram aumento de resistência mecânica com o aumento do número de passagens pelo ECAP, no entanto o posterior recozimento a baixa temperatura levou a uma ligeira redução da resistência, o que pode ser observado no gráfico mostrado na Figura 2.12 (b). Estas curvas são as mais frequentemente mostradas na literatura existente, logo pode concluir-se que o refinamento do grão por deformação plástica severa (SPD) aumenta a resistência mecânica do material. No entanto, esta compreensão é errónea, uma vez que os resultados obtidos e apresentados no gráfico da Figura 2.12 (a) mostram amaciamento com a SPD [20].

Capítulo 3

Desenvolvimento Experimental

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do aparato experimental que permitiu a elaboração desta dissertação, bem como a instrumentação necessária para adquirir os dados pretendidos e necessários. Antes de instalar o aparato experimental, foi necessário proceder à instalação de uma bancada na parede, Figura 3.1.

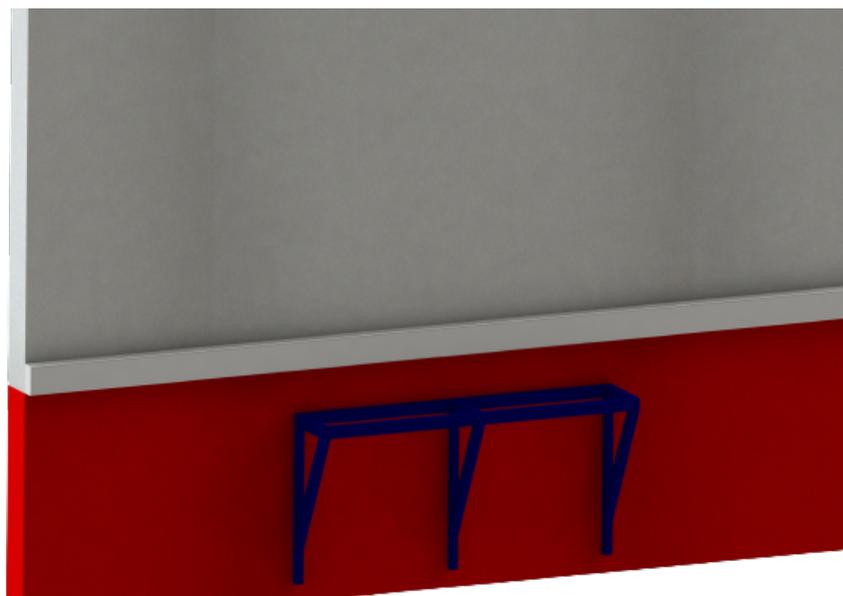


Figura 3.1: Modelo da bancada desenvolvida.

A estrutura da bancada foi projetada e posteriormente construída a partir de perfis de secção retangular $40 \times 60 \text{ mm}$ e com espessura de 2 mm . Após a sua construção, foi pintada e posteriormente procedeu-se à sua fixação na parede, o que foi feito com recurso a bucha química, a varão roscado de aço inox $M16$ e porcas com a mesma rosca. Primeiramente foram abertos furos de diâmetro 18 mm na parede alinhados com os furos existentes na estrutura da bancada. Depois cortaram-se troços de varão roscado, com 200 mm cada, os quais foram fixados nos furos com recurso a bucha química. Aguardou-se que a bucha química secasse, inseriu-se a bancada nos varões e procedeu-se ao seu aperto através das porcas. Esta bancada tem como finalidade servir de suporte às máquinas necessárias para esta

dissertação, o que levou à decisão de colocar placas de aço sobre a estrutura da bancada de forma a que as máquinas a utilizar tivessem uma base sólida e estável. Antes da sua instalação, as placas adquiridas foram fresadas no NOF para ficarem com as faces planas e paralelas entre si. Depois abriram-se furos roscados necessários tanto para a fixação das placas à estrutura, como para a fixação das máquinas a estas. As placas foram ainda pintadas de forma a ficarem protegidas da corrosão. Posto isto, fixaram-se as placas à estrutura recorrendo novamente ao uso de perfis de secção retangular, de varão roscado de aço inox $M10$ e porcas com a mesma rosca. Entre os perfis usados para fixar as placas foi ainda construído suporte retráctil para o rato e teclado do computador.

3.1 Prensa Biela-Manivela

Para a realização dos ensaios de compressão utilizou-se uma prensa biela-manivela, Figura 3.2. À semelhança do trabalho desenvolvido por Santos [21], escolheu-se esta máquina devido ao facto de esta permitir uma velocidade de deformação praticamente constante ao longo do ensaio. O painel de controlo desta máquina possui um variador de frequência que permite ajustar a velocidade de rotação do mecanismo à pretendida, sendo possível realizar ensaios a diferentes velocidades de deformação, de $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} s^{-1}$ a $\dot{\epsilon} = 3 s^{-1}$. Neste trabalho foi utilizada a velocidade mínima, $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} s^{-1}$. Esta prensa atinge uma carga máxima de $40 kN$, força esta suficiente para comprimir os provetes do material que se pretende analisar. A esta prensa está acoplada uma ferramenta que permite a realização de ensaios de compressão uniaxial, também esta desenvolvida por Santos [21], Figura 3.4. Antes de se realizar qualquer ensaio foram feitas algumas melhorias tanto na máquina como na ferramenta, de forma a tirar melhor proveito do aparato e possibilitar a execução dos ensaios pretendidos.



(a)



(b)

Figura 3.2: Prensa biela-manivela. (a) Conjunto máquina-ferramenta; (b) Mecanismo biela-manivela

3.1.1 Melhorias na Máquina

Começou-se por desacoplar a máquina da ferramenta a fim de se poder verificar o estado da mesma sem risco de danificar a ferramenta. Após se ter ligado o painel de controlo à corrente, atuou-se sobre este e verificou-se que tanto os motores como o mecanismo biela-manivela funcionavam corretamente. De seguida, acoplou-se de novo a ferramenta à prensa e colocou-se o conjunto em funcionamento. Verificou-se a existência de uma folga no componente que faz a ligação entre o pé da biela e o carro móvel, Figura 3.3. Esta ligação é feita através de um pino, o qual atua como junta de revolução. Identificada a folga, procedeu-se ao projeto, fabrico e montagem do componente, Figura 3.3. O pino foi fabricado a partir de um varão de aço inox com recurso ao torno da sala de máquinas-ferramenta.

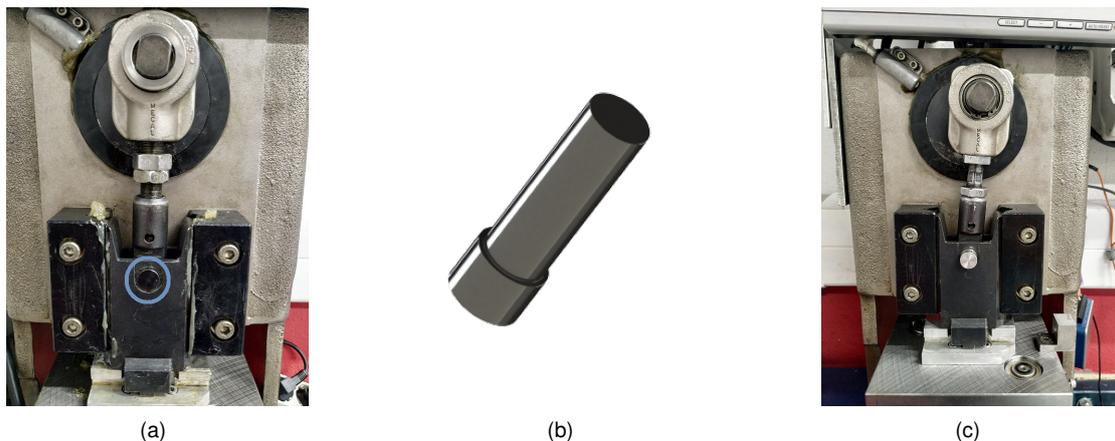


Figura 3.3: Pino de ligação entre o pé da biela e o carro móvel. (a) Localização do pino; (b) Modelo do novo pino; (c) Novo pino após fabrico e montagem.

3.2 Ferramenta de Compressão Uniaxial

Os ensaios a realizar serão ensaios de compressão, e para tal, como foi referido na secção anterior, 3.1, recorreu-se a uma prensa biela-manivela, Figura 3.2, e de forma a possibilitar estes ensaios utilizou-se uma ferramenta de compressão, Figura 3.4, a qual permite comprimir provetes de pequenas dimensões. Na Figura 3.4 (a) encontra-se o modelo CAD da ferramenta com todos os seus componentes.

A ferramenta é constituída por uma base sólida em aço, Figura 3.4 (a), componente 1, na qual estão montadas duas guias, Figura 3.4 (a), componente 9, que em conjunto com os casquilhos de bronze, Figura 3.4 (a), componente 3, nelas montados, conferem a orientação, guiamento, paralelismo e o movimento retilíneo da placa superior, Figura 3.4 (a), componente 10, e inferior, Figura 3.4 (a), componente 5. Nas placas superior e inferior encontram-se montados pratos de aço, Figura 3.4 (a), componente 7, sobre os quais se encontram os pratos de compressão, Figura 3.4 (a), componente 8, fabricados de carboneto de tungsténio, pois irão suportar todo o esforço envolvido na compressão. A célula de carga, Figura 3.4 (a), componente 4, encontra-se instalada sobre uma base que lhe confere o alinhamento necessário, Figura 3.4 (a), componente 2. Por sua vez, o conjunto destes dois componentes encontra-se

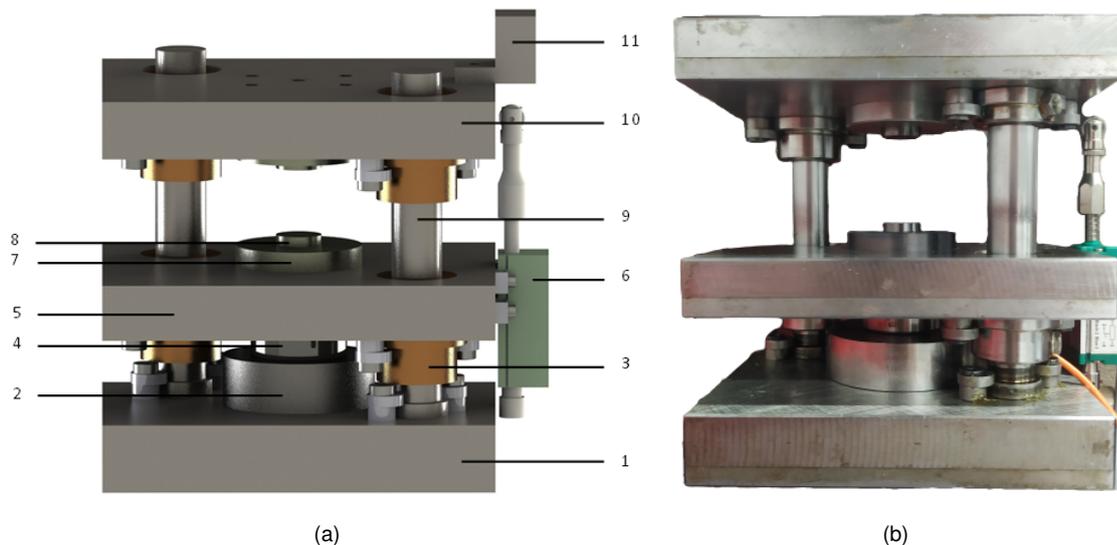


Figura 3.4: Ferramenta de compressão uniaxial. (a) Modelo da ferramenta: 1 - Base da ferramenta; 2 - Base da célula de carga; 3 - Casquilho; 4 - Célula de carga; 5 - Placa inferior; 6 - Sensor de deslocamento; 7 - Prato de aço; 8 - Prato de compressão; 9 - Guia; 10 - Placa superior; 11- Atuador do sensor de deslocamento. (b) Ferramenta.

entre a base da ferramenta e a placa inferior. O sensor de deslocamento, Figura 3.4 (a), componente 6, foi montado na placa inferior. Na subsecção 3.2.1 encontra-se detalhadamente explicada a escolha da localização dos sensores.

3.2.1 Melhorias na Ferramenta

Na ferramenta, verificou-se que a forma como os sinais eram adquiridos por parte dos sensores poderia ser melhorada. O componente responsável por transmitir o movimento do prato compressor da ferramenta ao sensor de deslocamento era pouco robusto e não tinha a geometria mais adequada. Além disso, não estava na posição mais correta para as medições que se pretendiam, Figura 3.5 (a). O sensor de deslocamento estava montado no prato inferior da ferramenta, mas uma vez que o ensaio ocorre entre o prato superior (compressor) e o intermédio, decidiu-se montar este no prato intermédio ao centro, de modo que ficasse alinhado com o local onde ocorre o ensaio.

Identificadas estas falhas, procedeu-se à substituição do componente, bem como da sua localização, Figura 3.5 (b). Para tal foi necessário desacoplar a máquina da ferramenta, para que se pudessem retirar os pratos. Retirados os pratos (compressor e intermédio), estes foram levados ao NOF, onde foram furados com recurso a uma fresadora.

A célula de carga localiza-se entre a base e a placa inferior, onde está montado o prato compressor inferior. No entanto, esta tem de estar alinhada com os pratos compressores, uma vez que estes suportam todo o esforço envolvido na deformação do provete.

De forma a garantir este alinhamento, projetou-se e fabricou-se um componente que permitisse o alinhamento da célula de carga com os pratos compressores bem uma medição o mais correta possível, encontrando-se o seu desenho técnico no anexo A.

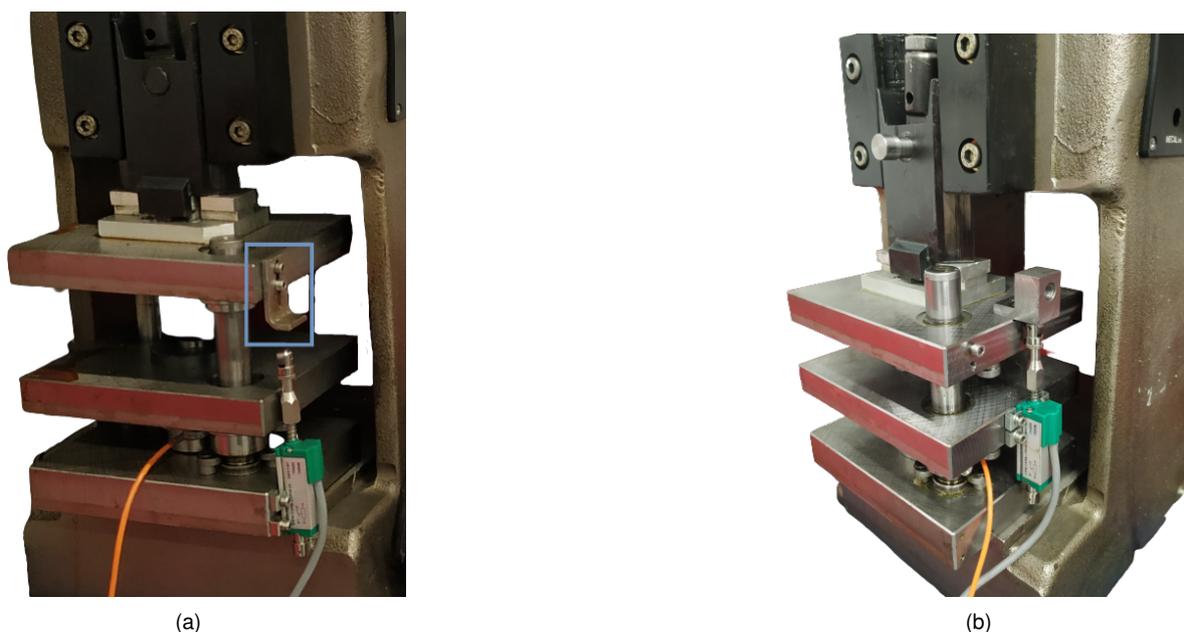


Figura 3.5: Componente responsável por transmitir o movimento do prato compressor da ferramenta ao sensor de deslocamento: (a) Anterior; (b) Novo

O componente fabricado tem forma cilíndrica com uma saliência que permite o seu encaixe e auto-centramento na base da ferramenta. A célula de carga por sua vez encaixa num rebaixo, existente na parte superior deste componente, ficando assim alinhada e centrada com os pratos compressores. O componente foi fabricado com recurso a um torno do NOF a partir de um bruto cilíndrico de aço inox, encontrando-se o desenho técnico no anexo A.

3.3 Instrumentação e Aquisição de dados

De modo a adquirir os dados necessários à análise pretendida, instrumentou-se a ferramenta com uma célula de carga, que mede a força envolvida na compressão, e um sensor de deslocamento, que mede a distância entre os pratos de compressão. Os dados provenientes destes sensores são sinais analógicos de tensão, que por sua vez são enviados para uma placa de aquisição de dados que os recebe e converte em sinal digital, o qual pode ser registado em ficheiro ASCII.

A placa de aquisição de dados (DAQ) tem como função adquirir, à entrada, os sinais elétricos provenientes dos sensores e fornecer, à saída, um sinal digital. A DAQ utilizada foi a *NI-USB 6001* da *National Instruments*®, a qual possui 8 entradas, 14 bits e uma capacidade de leitura de até 20000 pontos por segundo. Os sinais analógicos provenientes dos sensores caracterizam-se como sendo uma diferença de potencial entre os seus terminais, e como tal, estes foram conectados em modo diferencial sem referência à rede.

Para se ter o controlo da DAQ e se fazer o registo dos dados registados pelos sensores a cada instante, foi necessário desenvolver-se um programa em LabVIEW, onde se criou uma interface gráfica que além de permitir a visualização das variáveis em tempo real, permitindo também o seu registo num ficheiro ASCII. No anexo B mostra-se o diagrama de blocos construído para o funcionamento do

programa, a interface do mesmo e os parâmetros definidos de forma a observarem-se e registarem-se os valores obtidos.

3.3.1 Sensor de Deslocamento

Para se saber instantaneamente a distância entre os pratos compressores, utilizou-se o sensor de deslocamento comercial *KTR-10MM* do fabricante *SONSEIKO*, Figura 3.6. Este sensor tem uma amplitude de 10 mm , o que é suficiente uma vez que serão utilizados provetes com dimensões inferiores a esta.



Figura 3.6: Sensor deslocamento.

Calibração do Sensor de Deslocamento

Como referido na secção 3.3, os sinais provenientes dos sensores são de tensão. Desta forma, foi necessário proceder à calibração do sensor, isto é, determinar a curva que a cada valor de tensão [V] faz corresponder um valor da distância entre os pratos de compressão [mm].

A máquina já possuía um quadro elétrico que continha toda a eletrónica e controlo da mesma, bem como a alimentação dos sensores. Desta forma, bastou ligar os sensores utilizados (sensor de deslocamento e célula de carga, 3.3.2) à alimentação já existente. Posto isto, iniciou-se o processo necessário para se obter a curva de calibração. Começou-se por desacoplar a ferramenta da máquina. Desta forma a placa superior ficou livre, possibilitando assim a sua livre movimentação em altura ao longo das guias, Figura 3.4 (9), e aplicação do procedimento experimental que pode ser consultado no anexo C. Após se terem adquirido os dados dos pontos correspondentes às diferentes distâncias entre pratos, procedeu-se ao seu tratamento de modo a obter pontos que a cada valor de tensão [V] fizessem corresponder um valor de altura [mm] e assim traçar o gráfico apresentado na Figura 3.7.

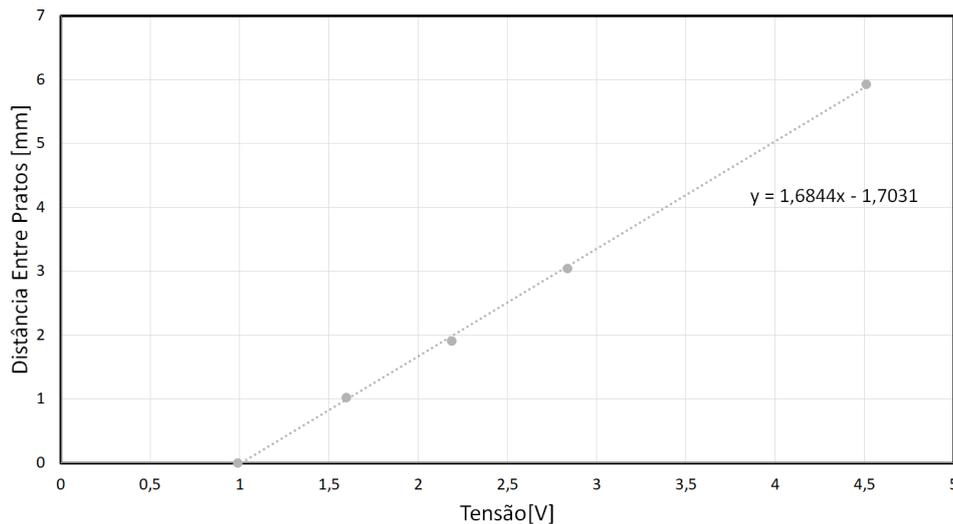


Figura 3.7: Curva de calibração do sensor de deslocamento após montagem do mesmo.

Como foi referido anteriormente, este sensor tem uma amplitude de 10 mm . Além disso, sabemos que o sinal de saída deste sensor é de $[0, 5]\text{ V}$ e, como este é linear, era expectável que o declive desta reta fosse igual a 2. Posto isto procedeu-se a algumas melhorias, subsecção 3.3.3, de forma a que o valor obtido fosse ao encontro do valor teórico.

3.3.2 Célula de Carga

Para monitorizar a força envolvida na compressão, utilizou-se a célula de carga comercial *DAYSENSOR*, modelo *DYHW-16*, com capacidade máxima de 49 kN , Figura 3.8. Esta célula de carga, que utiliza a tecnologia de transdutores resistivos do tipo extensométricos, contém quatro destes extensómetros, os quais estão acoplados a um circuito de ponte *Wheatstone*.



Figura 3.8: Célula de carga.

Os valores de tensão à saída desta célula são de 2 mV por cada *Volt* de excitação, logo é necessária a utilização de um sistema de amplificação e condicionamento de sinal. A alimentação desta célula (excitação) pode ser feita em intervalos desde 0 V a um determinado alcance, podendo este ser 5 V , 10 V ou 15 V . Utilizou-se um valor máximo de excitação de 10 V . Como referido na subsecção 3.3.1, a máquina já se encontrava com toda a eletrónica e controlo instalados, de forma que foi apenas

necessário conectar a célula de carga à instalação existente. De forma a ser possível efetuar uma calibração representativa da capacidade da célula de carga, desenvolveu-se um sistema de alavanca para esse efeito, secção 3.3.4.

3.3.3 Melhorias na Eletrónica

Após se verificar que a máquina estava funcional, fez-se um ensaio para testar a aquisição de dados e verificou-se a existência de algum ruído. Procedeu-se à abertura do quadro elétrico e verificou-se que tanto a alimentação dos motores, como a dos sensores (célula de carga e sensor de deslocamento) se encontrava dentro deste quadro. Além disso, para alimentar os sensores, estavam a ser utilizados transformadores destinados a alimentar outro tipo de equipamentos.

Foi então decidido separar estes circuitos, em que de um lado permaneceu a alimentação dos motores juntamente com o painel de controlo e do outro a alimentação dos sensores. Substituíram-se também as fontes de tensão dos sensores e o amplificador de sinal da célula de carga.

Deste modo, foi necessário construir uma caixa para acondicionar a alimentação dos sensores. Para tal reutilizou-se uma caixa metálica, onde se inseriram as fontes de tensão e o amplificador de sinal, Figura 3.9 (b). Foram também instalados conectores de forma a permitir a portabilidade desta caixa bem como a facilitar a conexão dos sensores, o que até aqui era feito através de soldadura.

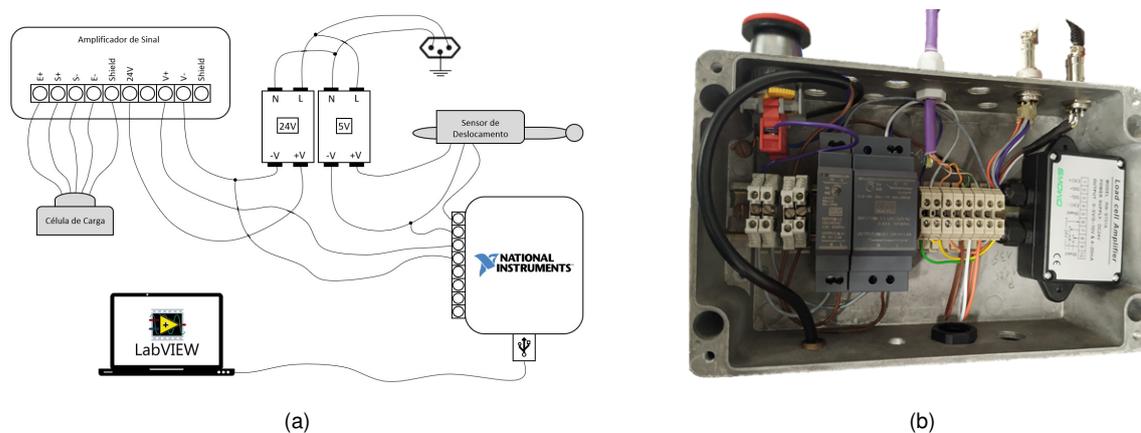


Figura 3.9: (a) Esquema das ligações do aparato de aquisição de dados; (b) Caixa da eletrónica dos sensores.

Para alimentar o sensor de deslocamento, utilizou-se uma fonte de tensão do fabricante *MEAN WELL*, modelo *HDR-15-5*, a qual tem uma tensão de saída de 5 V. As especificações técnicas deste equipamento encontram-se no anexo D. Para alimentar a célula de carga, utilizou-se uma fonte de tensão do fabricante *MEAN WELL*, modelo *HDR-30-24*, a qual tem uma tensão de saída de 24 V. As especificações técnicas deste equipamento encontram-se no anexo D. O amplificador de sinal utilizado é do fabricante *SMOWO*, modelo *RW-ST01A*, que tem como função excitar a célula de carga, receber o sinal proveniente desta, amplificá-lo e enviá-lo para o DAQ. Este amplificador permite ter à saída uma tensão de [0, 5] V ou [0, 10] V, tendo-se escolhido a segunda opção.

O amplificador de sinal será alimentado pela fonte de tensão *MEAN WELL HDR-30-24* com uma

tensão de 24 V, que por sua vez vai excitar a célula de carga com uma tensão de [0, 10] V, que quando solicitada com carga máxima terá uma resposta de 20 mV. Na Figura 3.9 (a) encontra-se o esquema com todos os equipamentos referidos anteriormente e respectivas ligações.

Para evitar ruídos de alta frequência causados por interferências eletromagnéticas emitidas tanto pelo motor da prensa biela-manivela, como pelos restantes equipamentos eletrónicos presentes no LabM3, colocaram-se núcleos de ferrite em torno dos cabos dos sensores.

3.3.4 Sistema de Calibração de Célula de Carga

De forma a obter uma calibração representativa da capacidade da célula de carga, desenvolveu-se um sistema de alavanca que o permita, cujo modelo se encontra na Figura 3.12. Tal como o nome indica, este sistema baseia-se no princípio de funcionamento de uma alavanca, Figura 3.10, em que a força a aplicar num corpo é multiplicada usando uma alavanca (onde se exerce força) e um ponto fixo que lhe serve de apoio.

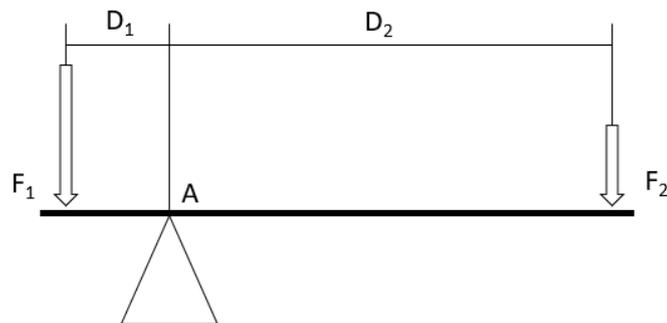


Figura 3.10: Princípio de funcionamento da alavanca.

Pelo princípio dos momentos obtém-se o fator multiplicativo da força, equação (3.1).

$$F_1 \times D_1 = F_2 \times D_2 \quad (3.1)$$

A alavanca desenvolvida, cujo esquema se encontra na Figura 3.11, permite ter um fator multiplicativo de força, $f = 24,96$, equação (3.2).

$$f = \frac{1248}{50} = 24,96 \quad (3.2)$$

Feito o estudo procedeu-se ao projeto e fabrico do sistema. Este sistema é composto por um suporte, Figura 3.12, componente (1), fabricado através da soldadura de quatro placas de aço. Posteriormente foram abertos seis furos na parte destinada à fixação e seis furos destinados ao posicionamento da alavanca. Este componente tem como função servir de suporte a todo o mecanismo. Considerando as infraestruturas do LabM3, fixou-se o suporte a um pilar recorrendo a bucha química, varão roscado M16 e a porcas com a mesma rosca. A alavanca, Figura 3.12, componente (2), foi fabricada a partir de uma barra de aço de secção $50 \times 25 \text{ mm}$ com recurso a uma fresadora. Este componente é conectado ao suporte através de um pino que pode ser colocado em diferentes alturas (em relação à base do

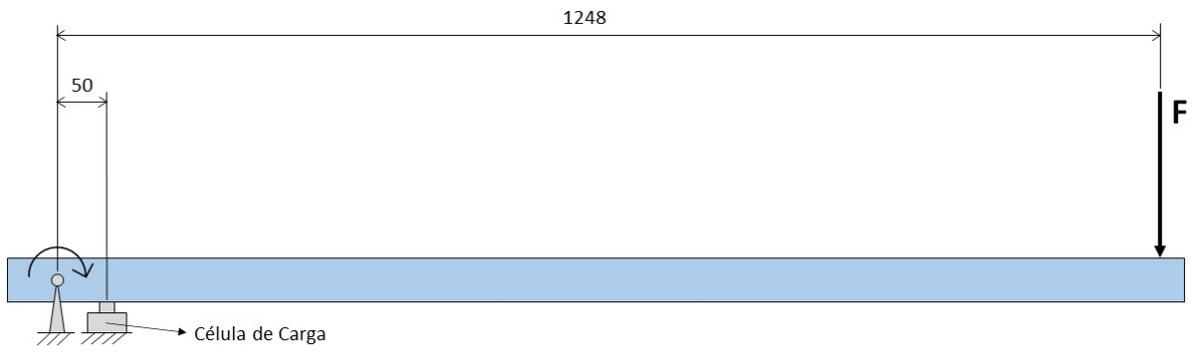


Figura 3.11: Esquema da alavanca.

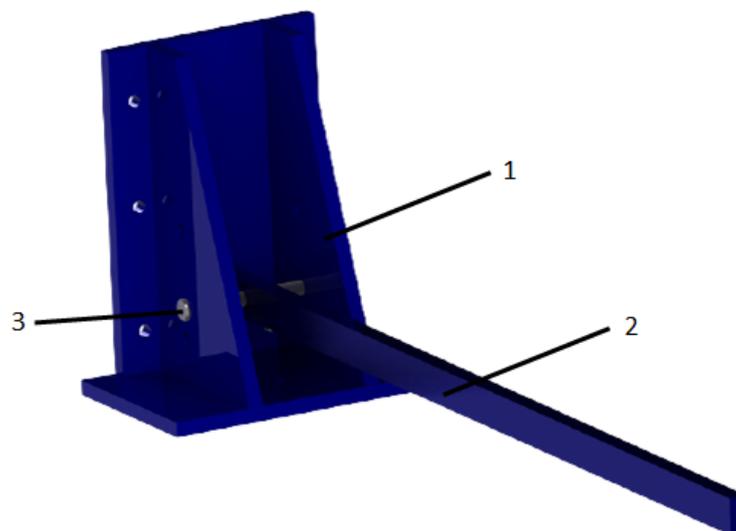


Figura 3.12: Modelo do sistema “alavanca” para calibração da célula de carga. 1 - Suporte do sistema; 2 - Alavanca; 3 - Pino.

suporte) dependendo das dimensões da célula de carga a calibrar. O pino, Figura 3.12, componente (3), foi fabricado a partir de um varão de aço de diâmetro 20 mm recorrendo a um torno. Todos os componentes deste sistema foram fabricados no NOF. Na Figura 3.13 (a), encontra-se o modelo do sistema acima descrito montado no pilar. Pode-se observar, pousado na base do suporte, um objecto que representa a célula de carga. Na Figura 3.13 (b), encontra-se a representação do sistema com carga aplicada na extremidade da alavanca. Através da distância do ponto de aplicação da massa ao pino e deste à célula de carga, é possível determinar a fator multiplicativo da força.

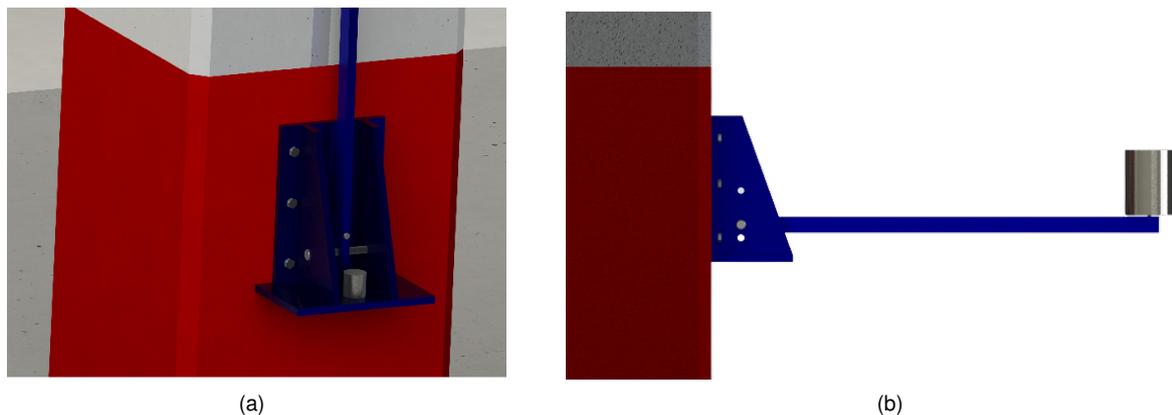


Figura 3.13: Sistema alavanca para calibração da célula de carga. (a) Modelo do sistema montado no pilar; (b) Modelo do sistema com carga aplicada na extremidade

3.4 Prensa de Hidráulica

Para completar a bancada de ensaios, adquiriram-se duas prensas de bancada do fabricante *MEGA*, modelo *PRS15*, Figura 3.14, as quais têm uma capacidade de carga de 15 ton . Estas prensas são hidráulicas de acionamento manual, com pistão de retorno automático. Possuem ainda uma mesa de trabalho ajustável em diferentes alturas, o que as torna versáteis e possibilita a sua utilização com diversas ferramentas e acessórios. Os restantes dados técnicos deste equipamento encontram-se presentes no anexo D.

De modo a acoplar as ferramentas a serem instaladas nestas prensas, projetou-se e fabricou-se um componente para estabelecer essa ligação. Este foi fabricado em aço inox, encontrando-se o desenho técnico no anexo A.

3.5 Ferramenta de ECAP

Alguns dos provetes a serem alvo de ensaios de compressão serão previamente submetidos ao ECAP. Desta forma testou-se a ferramenta desenvolvida por Mota [22], na qual se detetaram algumas falhas. Esta ferramenta foi construída de forma modular de modo a permitir a sua utilização em provetes com diferentes alturas. No entanto, quando se testou a ferramenta, uma das falhas que esta apresentou deve-se ao facto de o material (quando empurrado pelo punção) se escoar por entre os módulos e



Figura 3.14: Prensa *MEGA PRS15*

de aí se acumularem lascas de material proveniente desta extrusão, Figura 3.15, o que originou um afastamento sequencial dos módulos com deformação das superfícies em contacto. Este afastamento anulou o alinhamento do canal, pelo que contribuiu para a flexão do punção. Estes acontecimentos foram potenciados pelo facto de a ferramenta se apresentar pouco robusta. Esta havia sido construída em aço inox, que não é o mais indicado para o fabrico de ferramentas, e a ligação dos componentes havia sido feita com recurso a quatro parafusos *M3*. Além disso, o diâmetro exterior da matriz era de *30 mm*. O material também apresentou escoamento entre a matriz e o punção (extrusão inversa), Figura 3.15 (a) e (c), causando assim atrito nesta superfície de contacto, que levou à gripagem do punção e conseqüente aumento da força exercida sobre o punção, provocando desta forma o seu empenamento. Por outro lado, tal acontecimento originou também um aumento do diâmetro do canal de extrusão, de *6 mm* para *6,60 mm*.

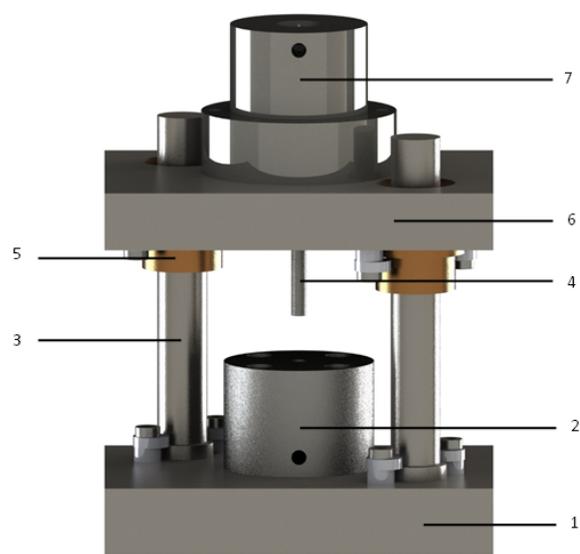


Figura 3.15: Material apresentando escoamento por entre os módulos da matriz e extrusão inversa. (a) Provete retirado da matriz a meio de um ensaio; (b) Material num dos módulos da matriz durante o ensaio; (c) Provete apresentando extrusão inversa na parte superior.

Tendo em conta as falhas verificadas foi decidido projetar e fabricar uma nova ferramenta mais robusta, encontrando-se o respetivo desenho técnico no anexo A. Esta nova ferramenta, fabricada a

partir de um bruto de aço P20, é uma peça única, tal como sugerido no trabalho de Xu and Langdon [11], de diâmetro exterior 60 mm , podendo apenas ser utilizada para provetes com altura inferior a 35 mm . No entanto, o facto de ser monolítica anula por completo a hipótese de escoamento de material por entre módulos (que neste caso são inexistentes) e de empeno. Para a fixar à base foram utilizados quatro parafusos $M6$. Tal como foi referido na subsecção 2.2.1, um ângulo de curvatura $\Phi = 90^\circ$ é o mais eficiente, pelo que na presente dissertação se optou por fabricar uma matriz com um ângulo de curvatura $\Phi = 90^\circ$. Quanto ao ângulo exterior da curvatura do canal, este tem um valor de $\psi = 36,87^\circ$, devido ao método de fabrico utilizado e ferramentas disponíveis no NOF. Como referido acima, a nova matriz fabricada é uma peça única. Para abrir o canal, começou-se por fazer um pré-furo com uma broca de $5,8 \text{ mm}$ e depois passou-se um mandril de 6 mm para que o canal ficasse com esta cota exata, uma vez que corresponde ao diâmetro dos provetes e do punção, e assim minimizar ao máximo o efeito de extrusão inversa. Por fim, para fazer a curvatura usou-se uma fresa de topo esférico de raio 3 mm , o que resultou num ângulo exterior da curvatura do canal $\psi = 36,87^\circ$. Tendo em conta os parâmetros acima mencionados foi possível fazer o cálculo da extensão acumulada pelo material através da equação 3.1.1, tendo-se obtido que para cada passagem, o valor da extensão acumulada é de 0,993.

Na Figura 3.16 (a), encontra-se o modelo CAD da ferramenta montada nos pratos compressores. À semelhança de ferramenta de compressão uniaxial, esta é composta por uma base sólida em aço, Figura 3.16 (a), componente 1, na qual estão montadas duas guias, Figura 3.16 (a), componente 3, que em conjunto com os casquilhos de bronze, Figura 3.16 (a), componente 5, nelas montados, conferem a orientação, guiamento, paralelismo e o movimento retílineo da placa superior, Figura 3.16 (a), componente 6, onde se encontra montado o punção, Figura 3.16 (a), componente 4. A matriz do ECAP, Figura 3.16 (a), componente 2, encontra-se montada na base da ferramenta, sendo a ligação assegurada por 4 parafusos $M6$. A ligação à prensa é assegurada pelo componente projetado para esse efeito, Figura 3.16 (a), componente 7, que se encontra ligado à placa superior.



(a)



(b)

Figura 3.16: Ferramenta de ECAP. (a) Modelo da ferramenta: 1 - Base da ferramenta; 2 - Matriz ECAP; 3 - Guia; 4 - Punção; 5 - Casquilho; 6 - Placa superior; 7 - Componente de ligação à prensa; (b) Ferramenta fabricada.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão explicitados os ensaios realizados, bem como a preparação prévia dos materiais a serem ensaiados. Um dos objetivos desta dissertação é analisar os efeitos do ECAP na resistência mecânica do alumínio puro (Al 99,999%). Antes de fazer qualquer ensaio, foi necessário validar a máquina de ensaios de compressão uniaxial. Para tal, utilizaram-se provetes de liga de alumínio AA 1050, uma vez que as suas características são bem conhecidas, tendo este já sido objeto de estudo também no LabM3. A composição química do alumínio puro (Al 99,999%) e da liga de alumínio AA 1050 encontra-se explicitada nas tabelas 4.1 e 4.2, respetivamente. As propriedades físicas de ambos os materiais encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.1: Composição química do alumínio puro (Al 99,999%).

Elementos	Al	Ce	Cu	Ge	Fe	La	Mg	Hg	Pd	P	Pt	Si
Composição Química [ppm]	99,999%	0,74	0,702	0,1 (<)	0,48	0,489	1,21	0,3 (<)	0,1 (<)	0,71	0,1 (<)	1,2

Tabela 4.2: Composição química da liga de alumínio AA 1050.

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Composição Química [%]	99,50	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03

Tabela 4.3: Propriedades físicas dos materiais ensaiados.

Material	Estrutura Cristalina	Densidade [g/cm ³]	HV	Módulo de Young [GPa]	Temperatura de Fusão [°C]	Tensão de Cedência (0,2%) [MPa]
Alumínio puro (Al 99,999%)	CFC	2,6989	15	70	660	10
AA 1050	CFC	2,7	22	69	660	25

Começou-se por preparar os provetes da liga de alumínio AA 1050, a fim de validar a máquina de ensaios de compressão uniaxial. Estes provetes foram fabricados a partir de pedaços da liga AA 1050 existentes no LabM3 com recurso ao centro de ensaios de micro-maquinação *PROTEO* existente neste

laboratório, Figura 4.1 (b). As faces foram cuidadosamente facejadas de modo a ficarem paralelas. Fabricaram-se diversos provetes de diâmetro $\phi = 6 \text{ mm}$ e de altura variável entre $h = 6,15 \text{ mm}$ e $h = 6,27 \text{ mm}$. De notar que todos os provetes fabricados para esta investigação tiveram em conta a influência da esbelteza, de forma a minimizar os efeitos de atrito (no caso de $h_0/\phi_0 < 1$) e o risco de empenamento ou flexão (no caso de $h_0/\phi_0 > 3$). Além dos provetes, fabricou-se uma amostra deste mesmo material, também de diâmetro $\phi = 6 \text{ mm}$ e altura $h = 35 \text{ mm}$, a fim de ser submetida ao ECAP. Após terem sido produzidos, fizeram-se medições das durezas de cada um dos provetes utilizando uma força de indentação de $2,94 \text{ N}$. Estas medições foram feitas com recurso ao durómetro *HARDRULER HVS-1000* existente no LabM3, Figura 4.1 (a), seguindo o procedimento experimental que pode ser consultado no anexo C. Desta medição obtiveram-se os resultados presentes na tabela 4.4.



Figura 4.1: (a) Durómetro *HARDRULER HVS-1000*; (b) Centro de ensaios de micro-maquinação *PRO-TEO*.

Tabela 4.4: Durezas iniciais AA 1050.

AA 1050	HV ₁	HV ₂	HV ₃	h ₀ [mm]	φ ₀ [mm]
Proвете:					
1	19,43	21,68	20,50	6,26	5,99
2	24,32	21,07	25,30	6,15	5,99
3	21,40	20,93	19,73	6,24	5,99
4	25,04	21,45	22,72	6,27	5,99
5	21,45	22,34	22,34	6,23	6,00
6	21,73	23,44	22,06	6,19	6,00

Após preparados, estes provetes foram ensaiados na máquina de compressão uniaxial, cujo procedimento experimental se encontra no anexo C. Os resultados deste ensaio foram utilizados para validar

a própria máquina de compressão uniaxial, o que é mostrado e analisado no capítulo 5.

As amostras de alumínio puro (Al 99,999%) submetidas ao ECAP foram obtidas de barras deste material, com diâmetro $\phi = 6 \text{ mm}$. Estas barras foram adquiridas ao fornecedor *Goodfellow* na condição recozida por um período de 1 hora. Destas barras cortaram-se amostras com altura $h = 37 \text{ mm}$, que posteriormente foram facejadas até uma altura $h = 35 \text{ mm}$ com recurso ao centro de ensaios de micro-maquinagem *PROTEO*. Prepararam-se quatro destas amostras. Fabricou-se também um provete com o mesmo diâmetro das amostras anteriores e com altura $h = 6,02 \text{ mm}$.

Apesar de se ter mostrado no capítulo 2 que o caminho B_C é o melhor para a realização do ECAP, optou-se por realizar o processo utilizando o caminho A para simplificar e facilitar o processo, uma vez que o objetivo principal do projeto e fabrico da ferramenta de ECAP foi conseguir que esta funcionasse corretamente.

As quatro amostras foram submetidas ao ECAP, tendo-se obtido uma amostra em cada uma das condições: 1, 2, 4 e 8 passagens, Figura 4.2. O processo foi realizado a temperatura ambiente, a uma velocidade de aproximadamente $0,3$ a $0,5 \text{ mm s}^{-1}$, seguindo o procedimento experimental que pode ser consultado no anexo C. De notar a utilização de massa grafitada a fim de evitar qualquer atrito entre o punção e a matriz, o que poderia levar a empenamento do punção e dano na matriz.

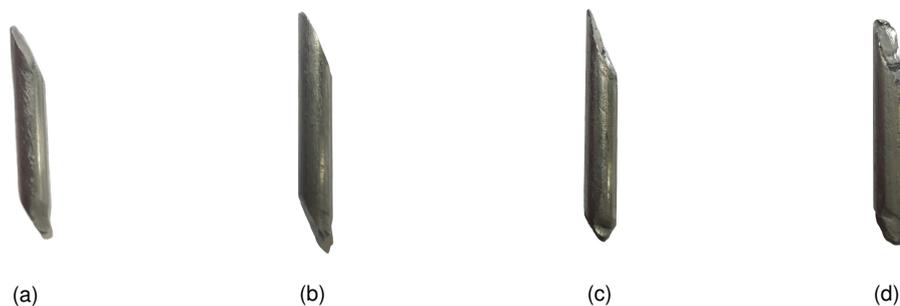


Figura 4.2: Provetes de alumínio puro (Al 99,999%) após processo de ECAP: (a) 1 passagem; (b) 2 passagens; (c) 4 passagens; (d) 8 passagens.

A amostra da liga de alumínio AA 1050 fabricada foi também submetida a este processo seguindo o mesmo caminho até à condição de 6 passagens. De cada uma destas amostras obtiveram-se 2 provetes através de corte com recurso à eletroerosora por fio *Charmilles Robofil 190* existente no NOF. Posteriormente, passou-se uma lixa fina nas faces dos provetes para remover asperezas mais salientes e dar um melhor acabamento, facilitando a medição da dureza e o contacto entre o provete e os pratos de compressão da ferramenta de compressão uniaxial. A dureza foi medida com recurso ao durómetro anteriormente referido. Os resultados obtidos foram registados, encontrado-se na tabela 4.5 os dados relativos ao alumínio puro (Al 99,999%) e na tabela 4.6 os dados relativos à liga de alumínio AA 1050.

Feitas as medições, procedeu-se ao recozimento de um provete de cada passagem a uma temperatura de $175 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 minutos, de forma a verificar se as conclusões do trabalho de Koizumi et al. [20] também se verificam para a compressão. Para tal utilizou-se o forno existente no LabM3, Figura 4.3.

Por fim, após se ter validado a máquina de compressão uniaxial, realizaram-se os ensaios de com-

Tabela 4.5: Durezas dos provetes de alumínio puro (Al 99,999%) antes e pós ECAP.

Al 99,999%		HV ₁	HV ₂	HV ₃	h ₀ [mm]	φ ₀ [mm]
Nº de Passagens:	Provete:					
0	1	19,92	20,07	19,98	6,02	5,92
1	1	19,31	23,08	17,49	5,98	5,98
	2	18,91	19,86	18,91	5,97	5,98
2	1	18,52	17,65	18,45	5,98	5,97
	2	17,48	17,25	18,13	5,44	5,98
4	1	17,99	16,39	17,48	5,99	5,98
	2	16,73	17,76	16,82	5,96	5,98
8	1	19,43	17,89	18,58	6,00	5,69
	2	17,61	17,54	18,25	5,95	5,95

Tabela 4.6: Durezas iniciais dos provetes da liga de alumínio AA 1050.

AA 1050		HV ₁	HV ₂	HV ₃	h ₀ [mm]	φ ₀ [mm]
Nº de Passagens:	Provete:					
6	1	47,75	49,05	51,68	6,19	6,00
	2	49,03	51,31	47,48	6,10	6,00



Marca	Nabertherm
Modelo	N 11
Controlador	Program Controller C19
Temperatura Máxima	1100 °C
Potência	3,3 kW

Figura 4.3: Forno Nabertherm N 11.

pressão uniaxial dos provetes de alumínio puro (Al 99,999) nas diferentes condições: condição recozida, submetidos ao ECAP e recozidos após ECAP. Estes ensaios ocorreram a uma velocidade de deformação $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} s^{-1}$. Após os ensaios de compressão foram também medidas as durezas. Os resultados obtidos e a sua análise encontram-se no capítulo 5.

Capítulo 5

Análise de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados. O material foi submetido à ferramenta de ECAP, efetuaram-se ensaios de compressão uniaxial e medições de dureza. O principal objetivo da presente dissertação é o desenvolvimento de uma bancada de ensaios. Desta forma, os procedimentos desenvolvidos para a instalação e validação das máquinas-ferramenta utilizadas constituem por si só resultados pertinentes.

O capítulo começa pela validação das melhorias feitas à máquina e à ferramenta de compressão uniaxial, bem como à eletrônica e aquisição de dados. De seguida, é feita uma análise do comportamento mecânico do alumínio puro (Al 99,999%) e da liga de alumínio AA 1050 após a submissão destes materiais à ferramenta de ECAP, também esta projetada e fabricada pelo autor. É analisada a evolução da tensão com a extensão e a evolução da dureza com o número de passagens do material pela ferramenta de ECAP.

5.1 Validação da Ferramenta de Compressão Uniaxial

Após as melhorias efetuadas na prensa biela-manivela, ferramenta de compressão uniaxial e respetiva instrumentação, efetuou-se uma nova calibração dos sensores e por fim foram realizados ensaios para validar a máquina.

5.1.1 Calibração do Sensor de Deslocamento

Após as melhorias referidas, realizou-se uma nova calibração ao sensor de deslocamento, aplicando o procedimento experimental presente no anexo C, tendo-se obtido o resultado que se encontra no gráfico apresentado na Figura 5.1. Neste gráfico encontra-se também presente a curva de calibração obtida antes das melhorias. Como se pode observar, o declive da reta obtida após as melhorias é de 2,006, valor este que está de acordo com o esperado tendo em conta as especificações do sensor.

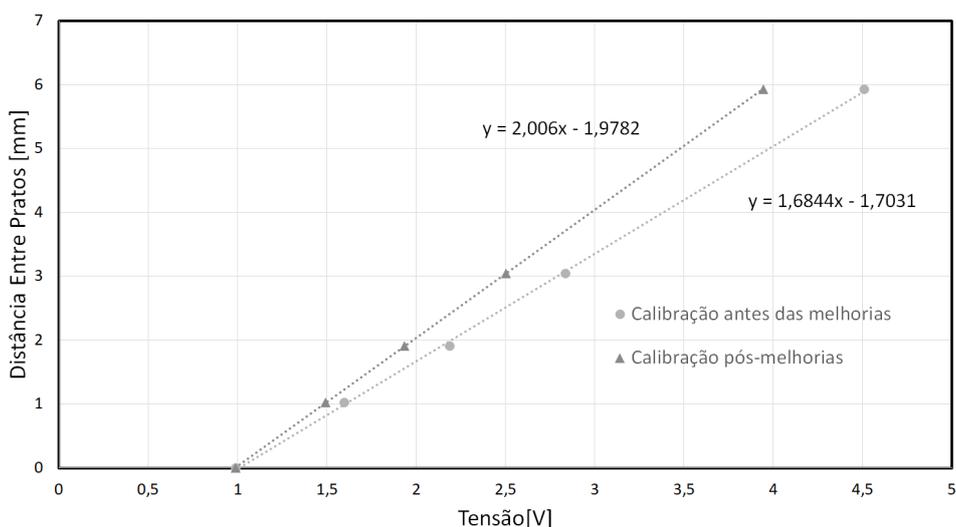


Figura 5.1: Comparação das curvas de calibração do sensor de deslocamento antes e após as melhorias.

5.1.2 Calibração da Célula de Carga

Como referido na subsecção 3.3.2, os sinais provenientes do sensor são de tensão [V], logo, à semelhança do sensor de deslocamento, foi necessário proceder à sua calibração, ou seja, determinar a curva que a cada valor de tensão [V] faz corresponder um valor de carga aplicada [N]. Para se realizar a calibração, foi desenvolvido um sistema de alavanca, 3.3.4, o que levou a que apenas se calibrasse a célula de carga após este sistema ter sido construído e após terem sido efetuadas todas as melhorias. Para dar início ao processo de calibração, levou-se a célula de carga juntamente com a respetiva caixa da eletrónica à alavanca desenvolvida e aí aplicou-se o procedimento experimental que se encontra no anexo C. A calibração foi feita até aos 23 kN, uma vez que está dentro da gama de valores a utilizar e também para não induzir propagação de erros que possam advir do sistema.

A curva de calibração obtida para a célula de carga encontra-se no gráfico da Figura 5.2. Como se pode verificar, esta curva contém pontos dentro da gama de valores esperados para os ensaios a realizar, tendo-se obtido um declive de 4459,05.

5.1.3 Deflexão da Máquina-Ferramenta

É sabido que os valores das medições do sensor deslocamento são afetados pela falta de rigidez do conjunto máquina-ferramenta e conseqüente deformação elástica no decorrer do ensaio. No trabalho desenvolvido por Santos [21], foi feita uma análise dessa deformação, Figura 5.3 (a).

Na presente dissertação, e após todas as melhorias efetuadas, fez-se a mesma análise. Esta análise foi feita realizando um ensaio de compressão em vazio, isto é, fazer a compressão de um prato contra outro. Este ensaio foi feito até uma carga de 20 kN, valor suficiente dada a gama de valores de força durante os ensaios a realizar, [10, 15] kN. Após o ensaio determinou-se uma equação (linear) que relaciona a deformação com a força. Os resultados obtidos encontram-se no gráfico da Figura 5.3 (b).

Como se pode observar pelos gráficos da Figura 5.3, através das melhorias implementadas foi

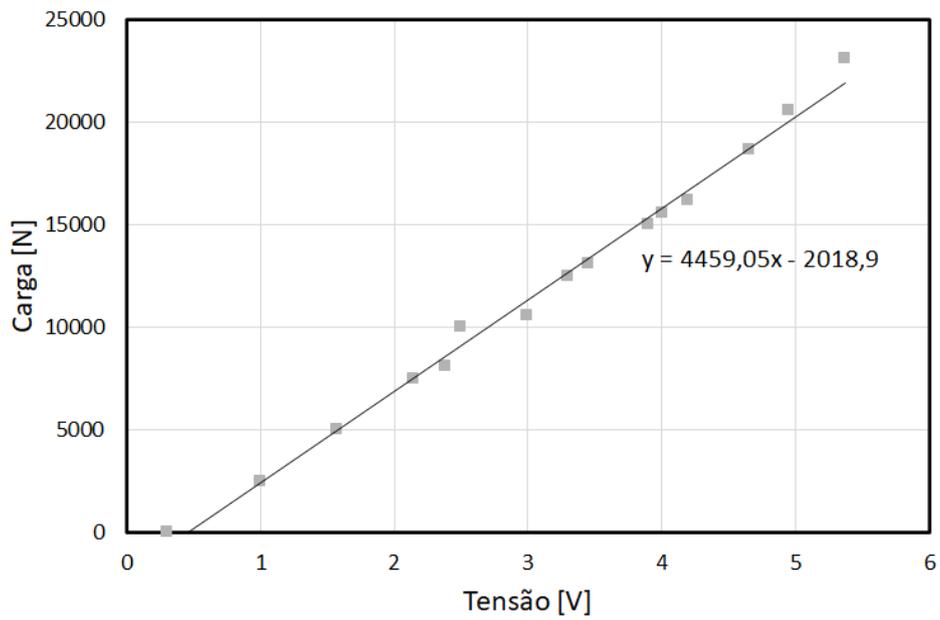
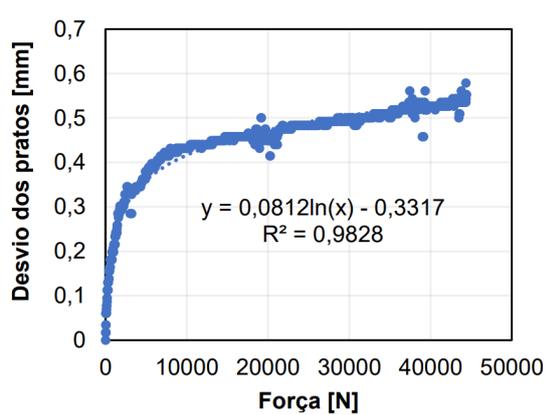
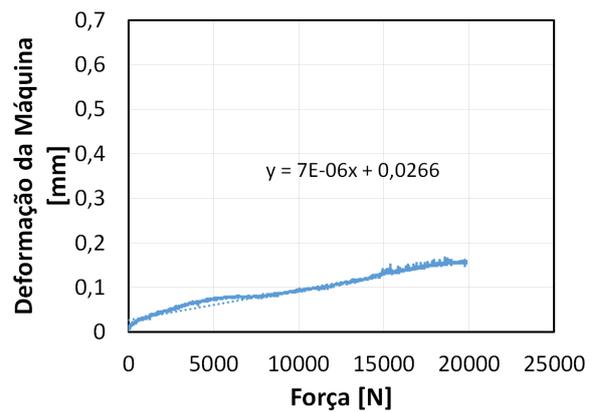


Figura 5.2: Curva de calibração da célula de carga.



(a)



(b)

Figura 5.3: Gráficos correspondentes à deformação elástica da máquina: (a) Curva obtida por Santos [21]; (b) Curva obtida pelo autor desta dissertação.

possível reduzir em 65% a deformação elástica captada pelo sensor de deslocamento. Apesar desta melhoria, continuou-se a compensar os valores da deformação utilizando a equação obtida pelo autor, equação (5.1), onde a cada valor de força $[N]$, x , é feito corresponder um valor de deformação da máquina $[mm]$, y .

$$y = 7 \times 10^{-6}x + 0.0266 \quad (5.1)$$

5.1.4 Ensaio de Compressão

Feitas as calibrações finais, procedeu-se à validação da ferramenta de compressão uniaxial. A validação foi feita por comparação dos resultados para a liga de alumínio AA 1050 obtidos nesta máquina com resultados já existentes obtidos por Reis [4]. Após se terem preparado os provetes com a mesma condição metalúrgica e com as mesmas dimensões procedeu-se ao ensaio, tendo-se obtido os resultados presentes no gráfico da Figura 5.4. Por observação das curvas do gráfico presente na Figura 5.4 pode concluir-se que ambas as curvas têm evoluções semelhantes e encontram-se bastante próximas, tendo um erro máximo inferior a 5%, permitindo assim validar tanto a ferramenta como o procedimento adotado.

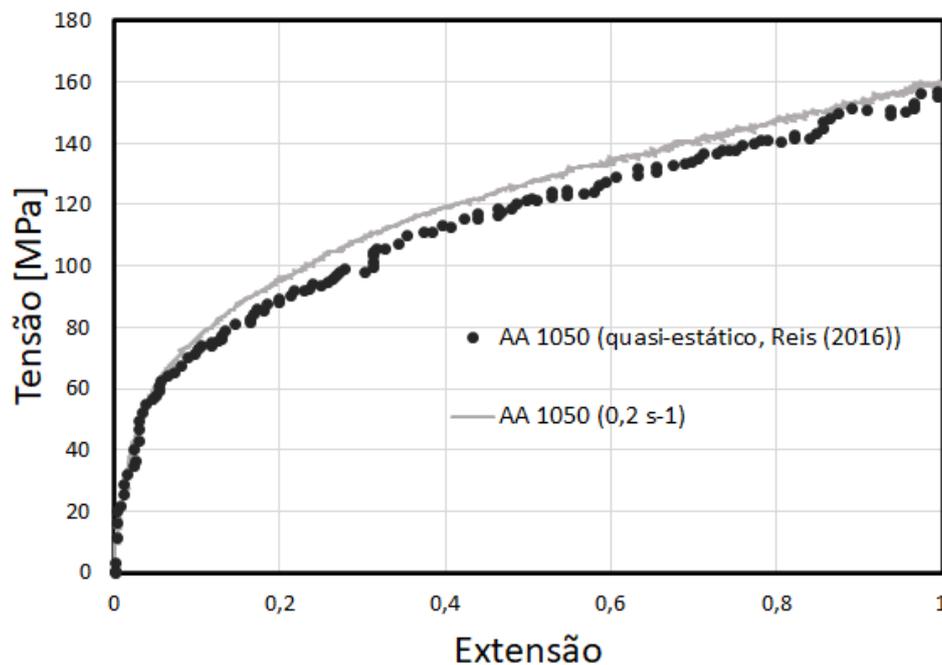


Figura 5.4: Curvas Tensão-Extensão da liga AA 1050 obtidas pelo autor e por Reis [4] em condições de deformação quasi-estáticas.

5.2 Evolução da Tensão com a Extensão

A Figura 5.5 apresenta o gráfico com as curvas da tensão real em função da extensão real para o alumínio puro (Al 99,999%) nas condições de 0 passagens, 1 passagem, 2 passagens, 4 passagens e

8 passagens, quando ensaiado à compressão a uma velocidade de deformação de $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

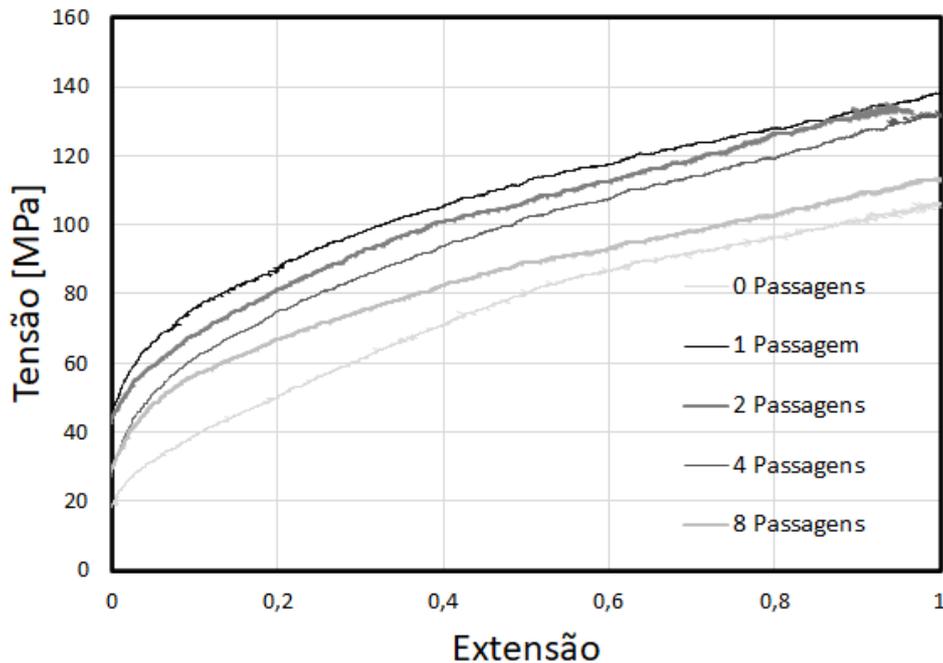


Figura 5.5: Curvas da tensão em função da extensão obtidas para o alumínio puro (Al 99,999%) após ter sido submetido ao ECAP, componente plástica.

É possível observar que houve um aumento considerável da tensão de escoamento após a primeira passagem em relação à condição inicial com 0 passagens. Os resultados mostram também que após a primeira passagem, a tensão de cedência desce, o que sugere a ocorrência de amaciamento do alumínio. Estes resultados vão de encontro aos obtidos por Koizumi et al. [20]. Como referido no capítulo 2, no trabalho de Koizumi et al. [20], fez-se um recozimento a baixa temperatura, 175 °C durante 30 minutos dos provetes provenientes do ECAP na condição de 8 passagens. Nesta dissertação, além de se procurar replicar a experiência de Koizumi et al. [20], fez-se também uma avaliação dos efeitos deste recozimento nas restantes condições, tendo se realizado um recozimento de cada um dos provetes nas condições: 1, 2, 4 e 8 passagens. A Figura 5.6 apresenta o gráfico com as curvas da tensão real em função da extensão real para o alumínio puro (Al 99,999%) nas condições referidas após recozimento, quando ensaiado à compressão a uma velocidade de deformação de $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

É possível observar que houve aumento da tensão de escoamento do provete na condição de 8 passagens quando recozido, o que vai ao encontro dos resultados de Koizumi et al. [20]. No entanto, como referido anteriormente nesta dissertação, recozeram-se também os provetes nas restantes condições, verificando-se que para as restantes condições (1, 2 e 4 passagens) o material sofreu um amaciamento, tendo os valores da tensão de escoamento dos provetes de todas as condições convergindo para valores bastante próximos. É de notar que no presente trabalho as velocidades de deformação nos ensaios de compressão uniaxial foram de $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, submeteu-se também uma amostra da liga de alumínio AA 1050 ao ECAP, tendo-se obtido apenas provetes na condição de 6 passagens. Os valores obtidos

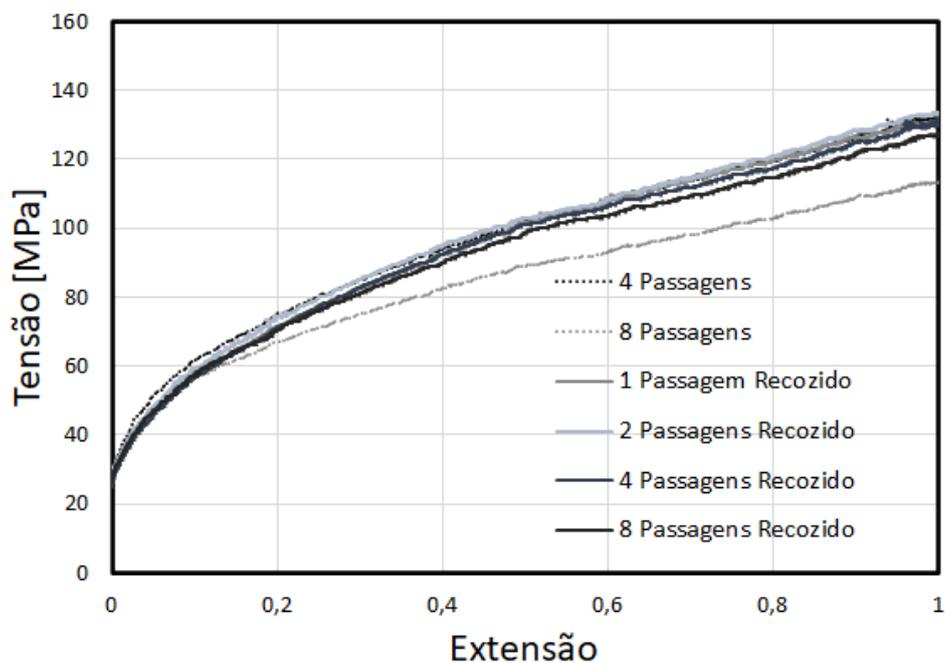


Figura 5.6: Curvas da tensão em função da extensão obtidas para o alumínio puro (Al 99,999%) após recozimento dos provetes submetidos ao ECAP, componente plástica.

para este ensaio encontram-se no gráfico da Figura 5.7. Analisando o gráfico, é possível observar um aumento na tensão de cedência do material para cerca de 3 vezes o valor desta tensão para o material na sua condição inicial. Verifica-se também que após extensão $\varepsilon = 0,2$, a tensão de escoamento do material na condição de 6 passagens permanece praticamente constante, ao passo que no material na condição inicial, este parâmetro aumenta com a extensão.

5.3 Evolução da Dureza com o ECAP

Antes e após cada ensaio de compressão foram medidas as durezas dos provetes para todas as condições analisadas, referidas na secção anterior. Na Figura 5.8 encontra-se o gráfico da evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) com o número de passagens pelo ECAP, N . Neste gráfico constam as curvas correspondentes a este material antes e após compressão uniaxial para cada condição.

Para o caso do material imediatamente após ser submetido ao ECAP, é possível observar um amaciamento logo após as duas primeiras passagens seguido de um ligeiro aumento na dureza. De notar que o valor inicial da dureza ($\approx 20 HV$) encontra-se acima do valor teórico do material na sua condição de recozido ($15 HV$). O material foi utilizado conforme fornecido, sendo que, segundo o fornecedor, o material tinha sido recozido durante $1 h$ a uma temperatura de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Seria expectável a obtenção de durezas na ordem de $15 - 16 HV$, no entanto tal não aconteceu, o que se pode dever ao tempo a que o material se encontrava armazenado, podendo este ter sofrido envelhecimento. Após se terem submetido estes provetes ao ensaio de compressão uniaxial, verificou-se um aumento das durezas em todas as condições, à exceção da condição 8 passagens em que os valores de dureza convergiram

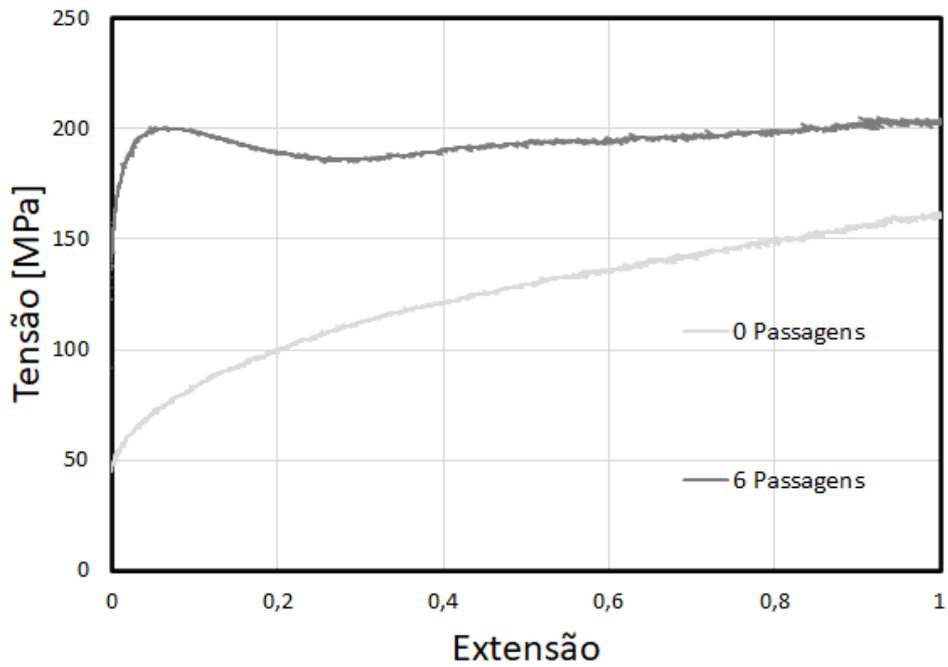


Figura 5.7: Curvas da tensão em função da extensão obtidas para a liga de alumínio AA 1050 após ter sido submetido ao ECAP, componente plástica.

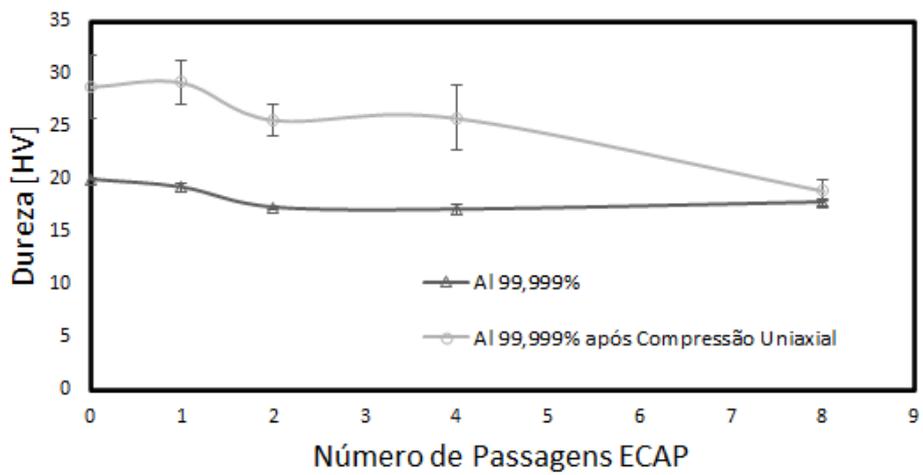


Figura 5.8: Evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.

para valores muito próximos: 17,8 HV antes da compressão uniaxial e 18,95 HV após.

Na Figura 5.9 encontra-se o gráfico da evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) recozido com o número de passagens pelo ECAP, N . Neste gráfico constam as curvas correspondentes a este material antes e após compressão uniaxial para cada condição.

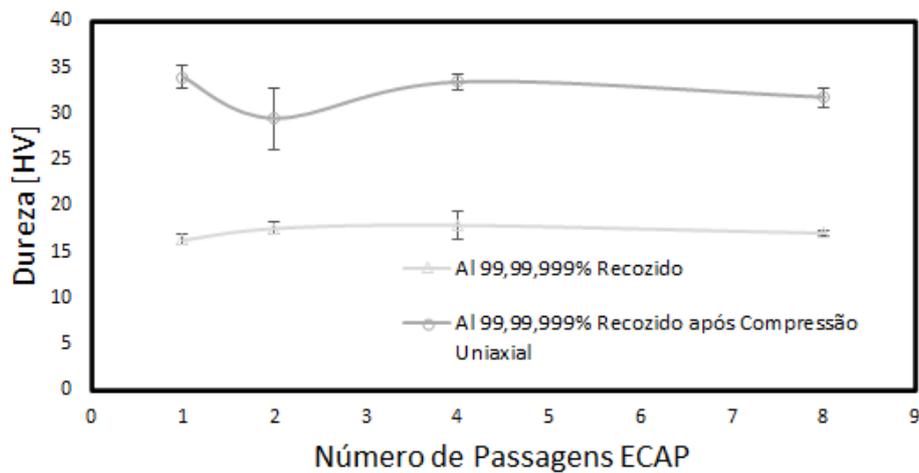


Figura 5.9: Evolução da dureza do alumínio puro (Al 99,999%) recozido (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.

É possível observar que após o recozimento, as durezas medidas para cada condição se mantiveram praticamente constantes ao longo das passagens pelo ECAP, variando entre 16,3 HV e 17,88 HV. Após a compressão deste material, verificou-se uma descida entre a primeira e a segunda passagem, seguida de uma subida para a condição de 8 passagens.

Na Figura 5.10 encontra-se o gráfico da evolução da dureza da liga de alumínio AA 1050 com o número de passagens pelo ECAP, N . Neste gráfico constam as curvas correspondentes a este material antes e após compressão uniaxial para cada condição.

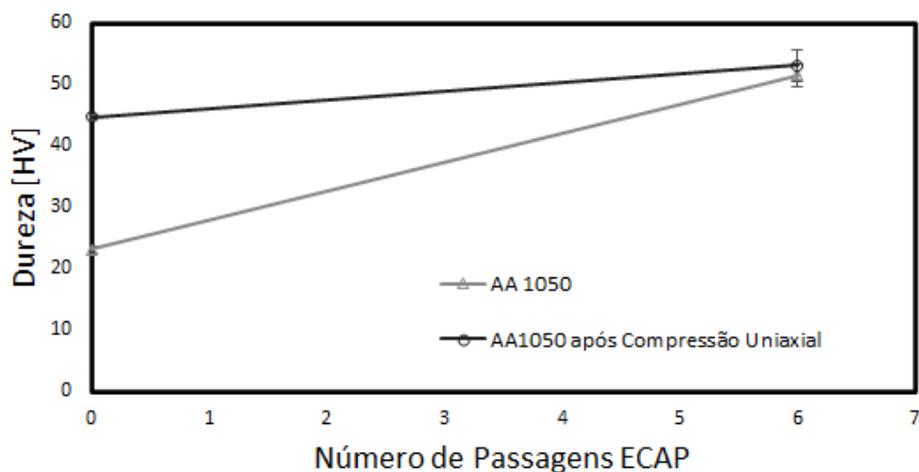


Figura 5.10: Evolução da dureza da liga de alumínio AA 1050 (antes e após compressão uniaxial) com o número de passagens pelo ECAP.

Como referido anteriormente, além do alumínio puro (Al 99,999%), também se fez uma análise da liga de alumínio AA 1050 apenas para as condições de 0 e 6 passagens. Por observação do gráfico, verifica-se que houve um aumento de dureza com o ECAP. Esse aumento tem mais expressão antes da compressão uniaxial. Após a compressão, o aumento de dureza entre passagens é menos notório. Verifica-se também que os valores de dureza convergiram para valores semelhantes na condição de 6 passagens, 51,58 *HV* e 53,22 *HV* para esta liga antes e após compressão uniaxial, respetivamente.

Capítulo 6

Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, bem como perspetivas de trabalhos futuros que possam ser implementadas de modo a dar continuidade ao que foi desenvolvido ao longo desta investigação. Terminado todo o trabalho experimental, seguido da análise de resultados obtidos, conclui-se que os objetivos estabelecidos foram atingidos. A bancada de ensaios bem como os respetivos equipamentos foram projetados, fabricados e instalados. De seguida, realizaram-se os ensaios pretendidos, utilizando os equipamentos desenvolvidos, a ferramenta de ECAP e máquina de ensaios de compressão uniaxial. Estes equipamentos mostraram-se funcionais através da realização de ensaios que permitiram a validação do aparato pela obtenção de resultados onde se procurou obtenção de características mecânicas de materiais já conhecidas e documentadas.

Posto isto, submeteram-se dois tipos de material, alumínio puro (Al 99,999%) e liga de alumínio AA 1050 ao ECAP, que posteriormente foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial quasi-estáticos, $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. No que ao alumínio puro (Al 99,999%) diz respeito, verificou-se um aumento da resistência mecânica quando submetido ao ECAP. No entanto, após a primeira passagem (2, 4 e 8 passagens) verificou-se uma descida nos valores da tensão de escoamento com o número de passagens, permanecendo sempre superiores à tensão na condição inicial. No que à dureza diz respeito, verificou-se uma descida com o número de passagens, o que vai de encontro ao que ocorreu com a tensão de escoamento.

Após o ECAP, houve amostras que foram recozidas a baixa temperatura, as quais também foram submetidas a ensaios de compressão uniaxial e medição de dureza. Verificou-se um aumento da resistência no provete na condição de 8 passagens recozido em relação ao provete antes do recozimento, o que vai de encontro ao estudo de Koizumi et al. [20]. Já para as restantes condições o mesmo não se verificou, havendo um amaciamento após o recozimento. Neste caso, não houve variação nos valores de dureza.

Foi ainda testada a liga de alumínio AA 1050. Esta, após 6 passagens pelo ECAP, revelou um grande aumento da tensão de cedência, bem como da tensão de escoamento. O mesmo ocorreu com

os valores observados após o ensaio de dureza de Vickers, havendo uma convergência dos valores observados para a condição de 6 passagens antes e após o ensaio de compressão uniaxial.

O aparato revelou-se funcional, pelo que se sugere a repetição da análise realizada na presente dissertação para o alumínio puro (Al 99,999%), devendo este ser recozido a uma temperatura de 400 °C durante 1 *h* antes de ser sujeito ao ECAP. Isto para averiguar se o envelhecimento do material teve influência nos resultados obtidos. Será também relevante a realização deste tipo de ensaios em outros materiais de forma a analisar o seu comportamento quando submetidos ao ECAP.

De forma a complementar a caracterização mecânica dos materiais submetidos ao ECAP, sugere-se a instalação de um equipamento de ensaios de fratura na bancada desenvolvida na presente dissertação.

Referências

- [1] C. M. A. Silva, P. A. R. Rosa, and P. A. F. Martins. Innovative Testing Machines and Methodologies for the Mechanical Characterization of Materials. *Experimental Techniques*, 40:569–581, 2016. ISSN 1747-1567. doi: 10.1007/s40799-016-0058-0. URL <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0058-0>.
- [2] X. Wang, H. Li, K. Chandrashekhara, S. Rummel, S. Lekakh, D. Van Aken, and R. O'Malley. Inverse Finite Element Modeling of the Barreling Effect on Experimental Stress-Strain Curve for High Temperature Steel Compression Test. *Journal of Materials Processing Technology*, 243:465–473, 2017. ISSN 0924-0136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.012>.
- [3] L. Alves, C. Nielsen, and P. Martins. Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test. *Experimental Mechanics*, 51:1565–1572, 11 2011.
- [4] A. P. d. Reis. Efeito de Escala na Resistência Mecânica de Materiais. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2016.
- [5] A. K. Ghosh. The Influence of Strain Hardening and Strain-Rate Sensitivity on Sheet Metal Forming. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99(3):264–274, 07 1977. ISSN 0094-4289. doi: 10.1115/1.3443530.
- [6] d. L. Z. d. B. Carvalhosa. The Influence of Microstructure on the Mechanical Behaviour of Commercially Pure Aluminium . Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2018.
- [7] A. J. d. V. L. Gregório. Ensaios de Impacto e Elevadas Velocidades de Deformação. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2017.
- [8] J. Rodrigues and P. Martins. *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica*, volume I. Escolar Editora, 2005.
- [9] H. M. M. Santos. Dureza Vickers do Alumínio AA1050 a Elevadas Velocidades de Deformação. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2015.
- [10] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon. Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials. *Scripta Materialia*, 35:143–146, 1996. ISSN 1359-6462. doi: [https://doi.org/10.1016/1359-6462\(96\)00107-8](https://doi.org/10.1016/1359-6462(96)00107-8).

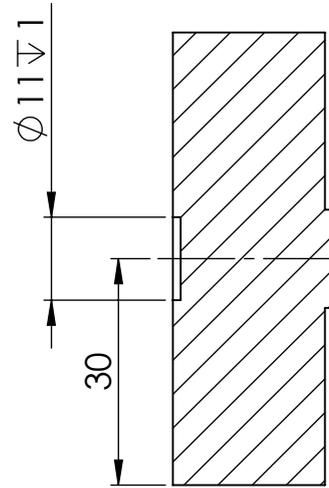
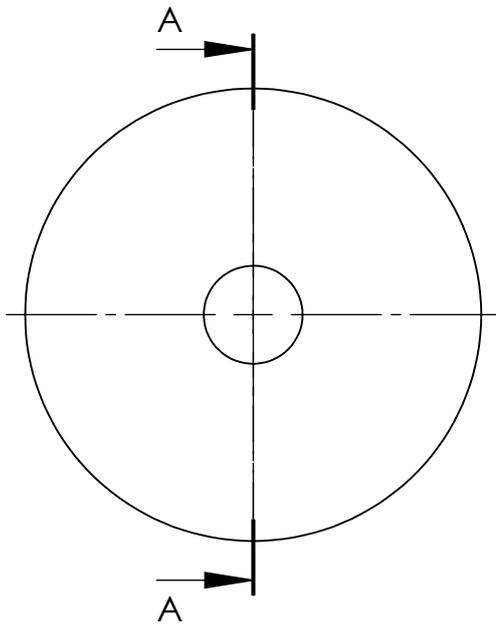
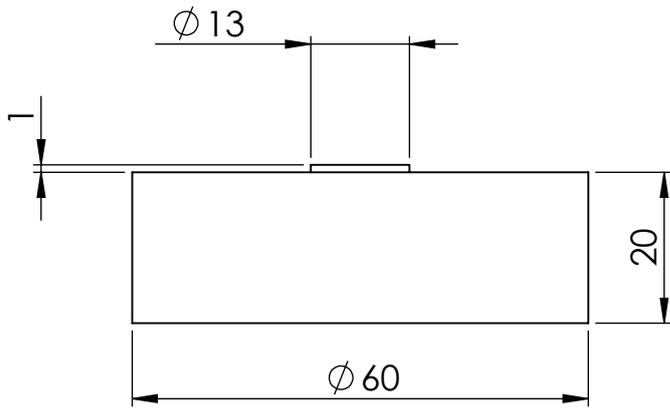
- [11] C. Xu and T. Langdon. The Development of Hardness Homogeneity in Aluminum and an Aluminum Alloy Processed by ECAP. *Journal of Materials Science*, 42:1542–1550, 01 2007. doi: 10.1007/s10853-006-0899-5.
- [12] M. Agwa, M. Ali, and A. Al-Shorbagy. Optimum processing parameters for equal channel angular pressing. *Mechanics of Materials*, 100, 09 2016. doi: 10.1016/j.mechmat.2016.06.003.
- [13] M. Shaeri, M. Shaeri, M. Ebrahimi, M. Salehi, and S. H. Seyyedein. Effect of ECAP Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Al–Zn–Mg–Cu Alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(2):182–191, 2016. ISSN 1002-0071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.03.003>.
- [14] R. Z. Valiev and T. G. Langdon. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. *Progress in Materials Science*, 51:881–981, 2006.
- [15] S. Lee and T. G. Langdon. Influence of Equal-Channel Angular Pressing on the Superplastic Properties of Commercial Aluminum Alloys. *MRS Proceedings*, 601:359, 1999. doi: 10.1557/PROC-601-359.
- [16] P. Venkatachalam, S. Ramesh Kumar, B. Ravisankar, V. Thomas Paul, and M. Vijayalakshmi. Effect of Processing Routes on Microstructure and mechanical Properties of 2014 Al Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(10):1822–1828, 2010. ISSN 1003-6326. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60380-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60380-0).
- [17] W. Callister and D. Rethwisch. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley Global Education, 9th edition, 2014.
- [18] K. S. Kumar, H. Van Swygenhoven, and S. Suresh. Mechanical Behavior of Nanocrystalline Metals and Alloys. *Acta Materialia*, 51(19):5743–5774, 2003. ISSN 1359-6454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.032>. The Golden Jubilee Issue. Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future.
- [19] P. L. Sun, E. K. Cerreta, G. T. G. III, and J. F. Bingert. The Effect of Grain Size, Strain Rate, and Temperature on the Mechanical Behavior of Commercial Purity Aluminum. *Metallurgical and Material Transactions A*, 2006.
- [20] T. Koizumi, A. Kurumatani, and M. Kuroda. Athermal Strength of Pure Aluminum is Significantly Decreased by Severe Plastic Deformation and it is Markedly Augmented by Subsequent Annealing. *Scientific Reports*, 10, 08 2020. doi: 10.1038/s41598-020-70160-5.
- [21] P. M. G. Santos. Ensaio de Compressão Uniaxial: Desenvolvimento de Máquina e Aplicação a Metais e Ligas Metálicas Engenharia Mecânica. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2019.
- [22] T. C. Mota. Development of a Modular Compact ECAP Tool. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2020.

Anexo A

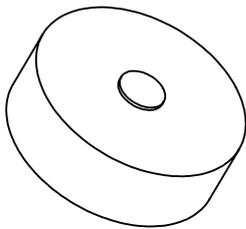
Desenhos Técnicos

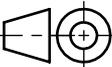
Os desenhos técnicos dos componentes projetados necessários à realização desta investigação encontram-se presentes nas páginas seguintes.

1. Base da Célula de Carga
2. Alavanca
3. Ligação à Prensa
4. Ferramenta de ECAP Monolítica

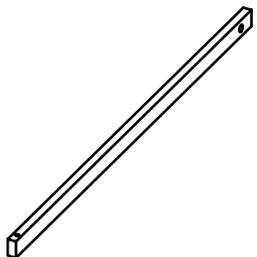
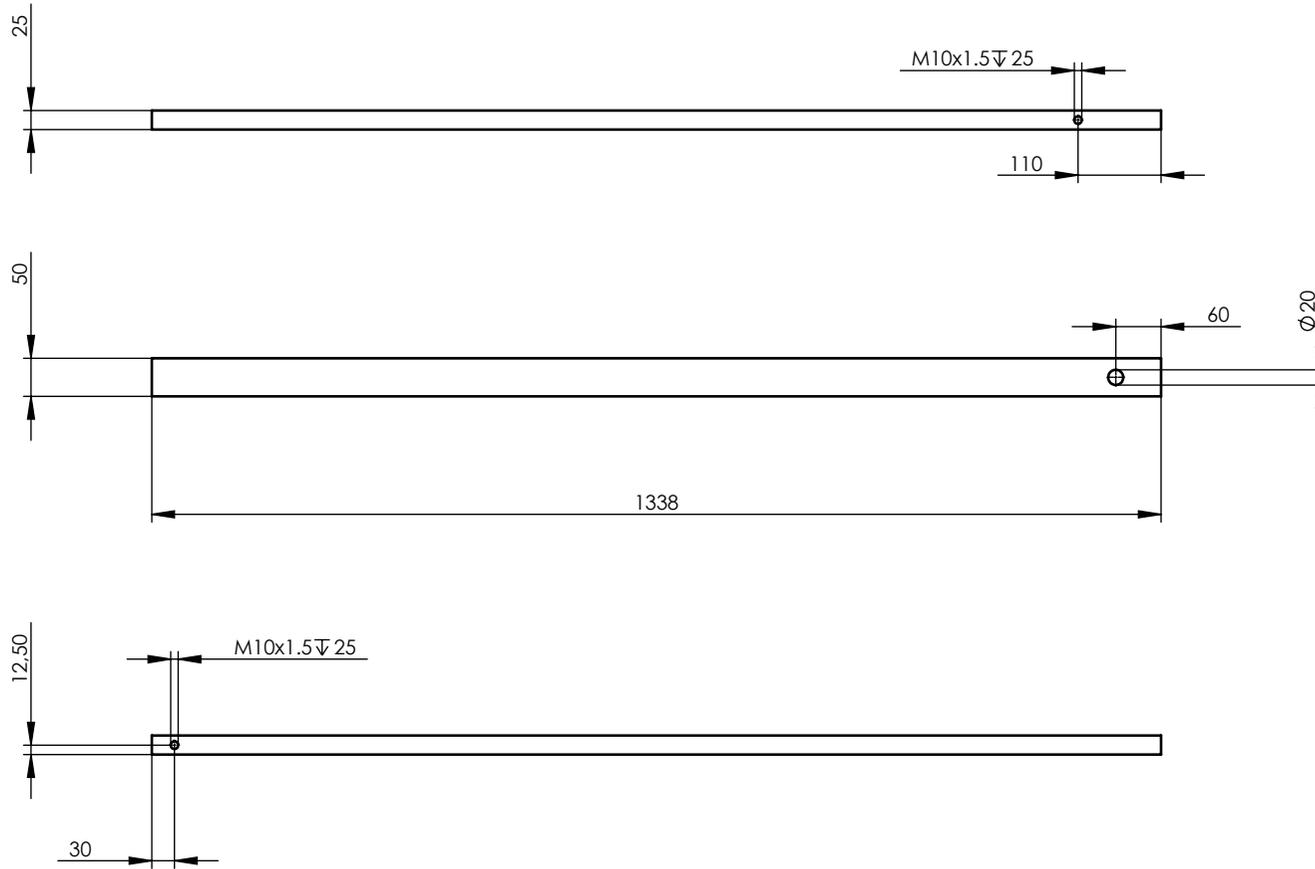


SECTION A-A

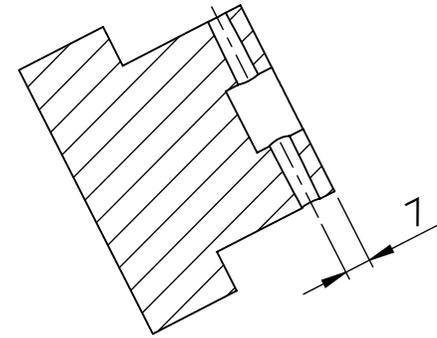
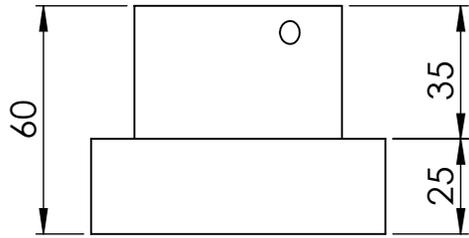


	Escala	Rúbrica	Data		Laboratório de Maquinagem e Microfabrico		
	1:1	Desenhou	30/04/2021				
Material:	Projectou	Autor: Pedro Barros					
Tolerância Geral:	Fabricou						
Acabamentos:	Notas:	Base Célula de Carga					
	51						
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:			
A4		1					

52

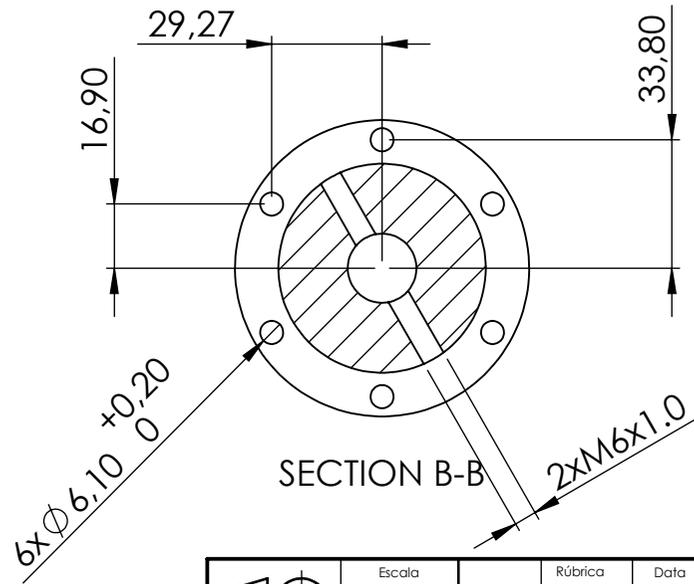
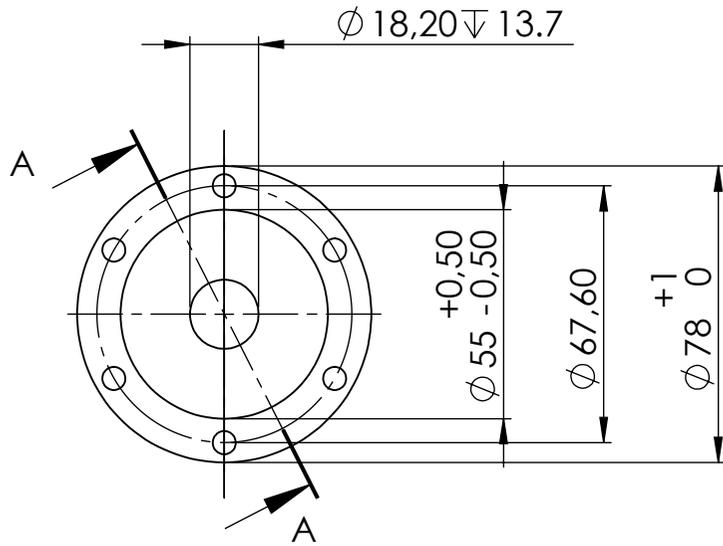


	Escala	Rúbrica	Data		Laboratório de Maquinagem e Microfabrico			
	1:10		15/04/2021		Autor: Pedro Barros			
Material:	Projectou			Alavanca				
Tolerância Geral:	Fabricou							
Acabamentos:	Notas:			Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:
				A4		1		

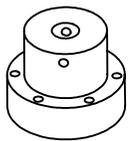
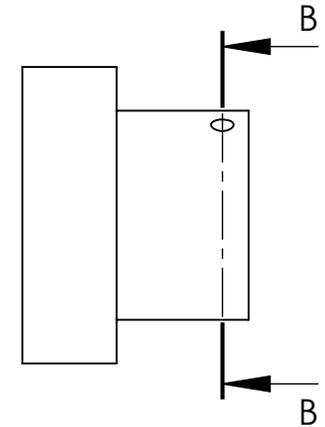


SECTION A-A

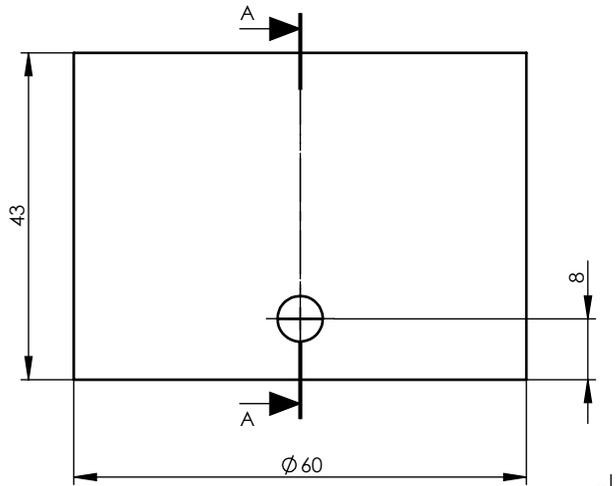
53



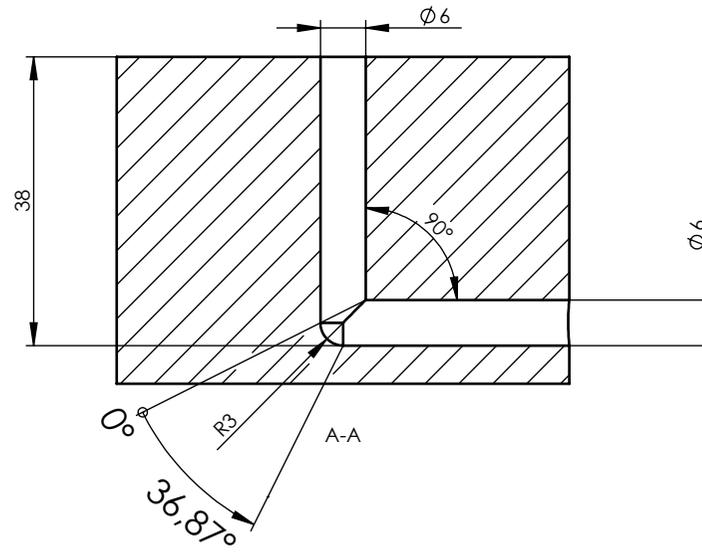
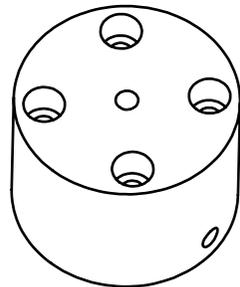
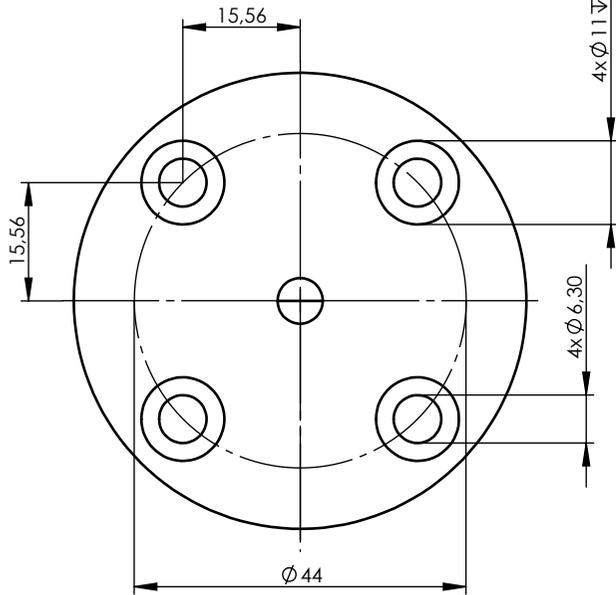
SECTION B-B



	Escala	Rúbrica	Data		Laboratório de Maquinagem e Microfabrico			
	1:2		05/05/2021		Autor: Pedro Barros			
Material:	Projectou	Fabricou		Ligação à Prensa				
Tolerância Geral:	Notas:							
Acabamentos:				Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:
				A4		1		



54



	Escala	Rúbrica	Data		Laboratório de Maquinagem e Microfabrico			
	1:1		02/09/2021		Autor: Pedro Barros			
Material:	Projectou	Fabricou		<h2 style="text-align: center;">ECAP Monolítico</h2>				
Tolerância Geral:	Notas:							
Acabamentos:				Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:
				A4		1		

Anexo B

Programa LabVIEW

Neste anexo encontra-se a interface gráfica do programa LabVIEW desenvolvido para monitorizar a aquisição de dados, o diagrama de blocos construído e os parâmetros definidos de forma a obter os dados pretendidos.

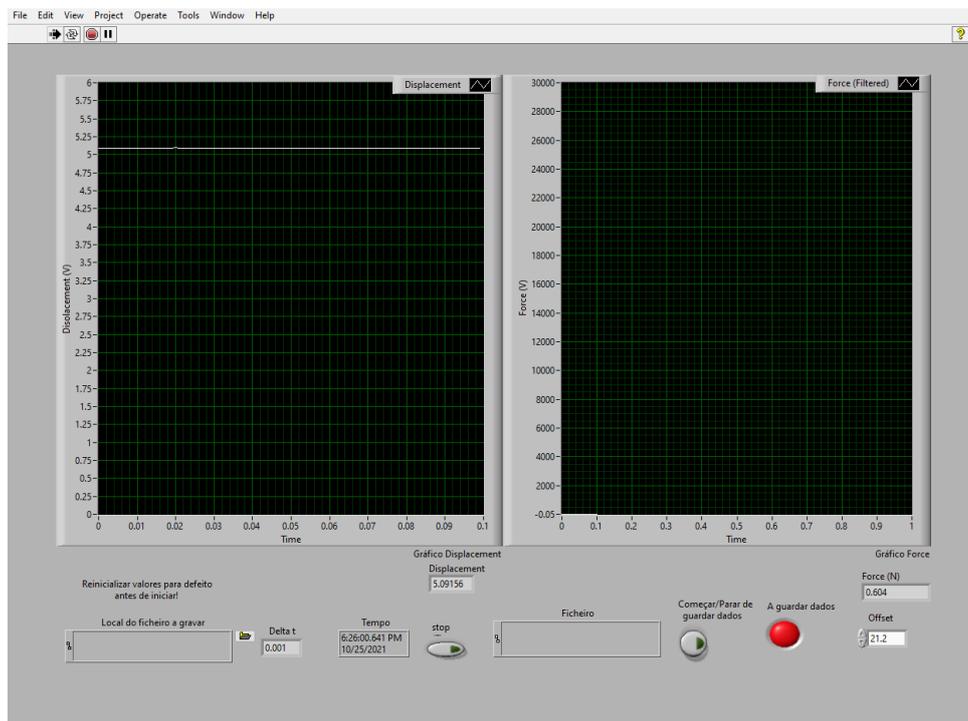


Figura B.1: Interface do utilizador.

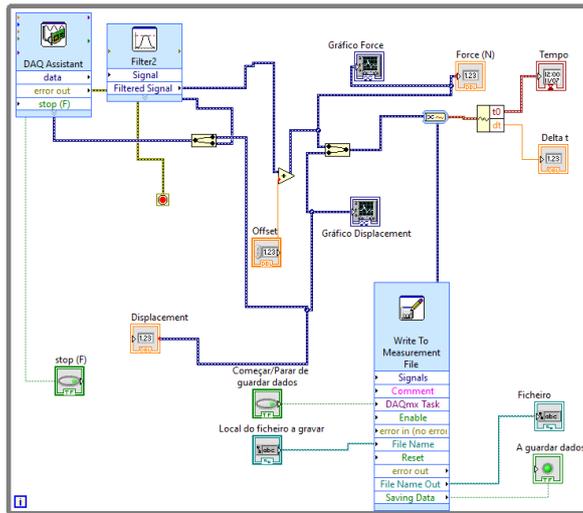
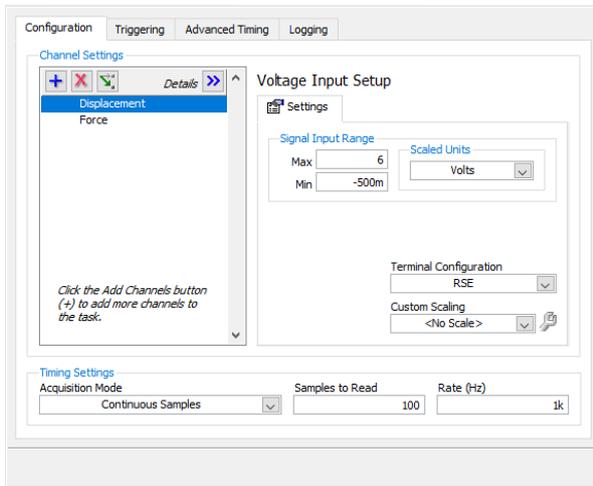
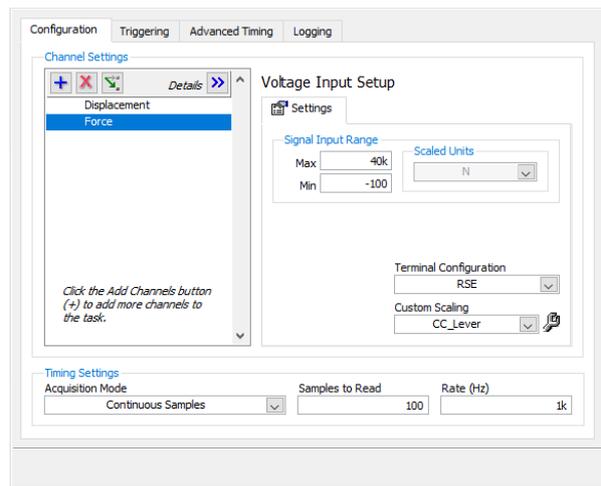


Figura B.2: Diagrama de blocos.



(a)



(b)

Figura B.3: Parâmetros de aquisição de dados. (a) Deslocamento; (b) Força.

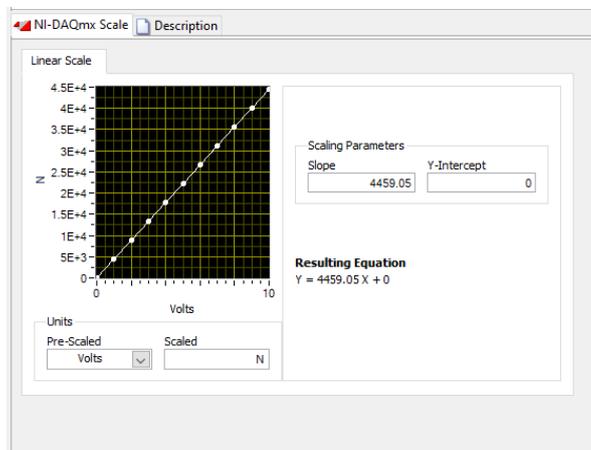


Figura B.4: Fator multiplicativo para obtenção de valores de Força [N] a partir dos valores de tensão [V].

Anexo C

Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais seguidos nesta investigação encontram-se presentes nas páginas seguintes.

1. Calibração do Sensor de Deslocamento
2. Calibração da Célula de Carga
3. Ensaio de Compressão Uniaxial
4. Ensaio de Dureza Vickers
5. ECAP

Procedimento – Calibração do Sensor de Deslocamento

1. Ligar o computador;
2. Abrir o software LabVIEW® com o programa *Pedro_Prensa*;
3. Deixar o sistema de aquisição de dados e sensores em funcionamento durante 30 minutos para que a corrente aqueça os cabos até atingir a temperatura estacionária;
4. Desconectar o prato compressor da máquina – Figura 1, retângulo 1;
5. Selecionar a diretoria onde se pretende guardar os dados do ensaio – Figura 2, retângulo 3;
6. Encostar o prato compressor à base – Figura 1. Retângulo 2;
7. Clicar no botão *Começar/Parar de guardar dados* para iniciar o registo dos dados do ensaio e registar durante 6 segundos – Figura 2, retângulo 4;
8. Clicar no botão *Começar/Parar de guardar dados* para parar o registo dos dados do ensaio – Figura 2, retângulo 4;
9. Colocar o provete com altura calibrada de 1.02 mm entre a base e o prato compressor;
10. Repetir os pontos 7 e 8 para efetuar o registo de dados;
11. Colocar o provete de altura calibrada de 1.91 mm entre a base e o prato compressor;
12. Repetir os pontos 7 e 8 para efetuar o registo de dados;
13. Colocar o provete de altura calibrada de 3.04 mm entre a base e o prato compressor;
14. Repetir os pontos 7 e 8 para efetuar o registo de dados;
15. Colocar o provete de altura calibrada de 5.93 mm entre a base e o prato compressor;
16. Repetir os pontos 7 e 8 para efetuar o registo de dados;
17. Após a aquisição dos dados, proceder ao tratamento dos mesmos a fim de se obter a curva de calibração.

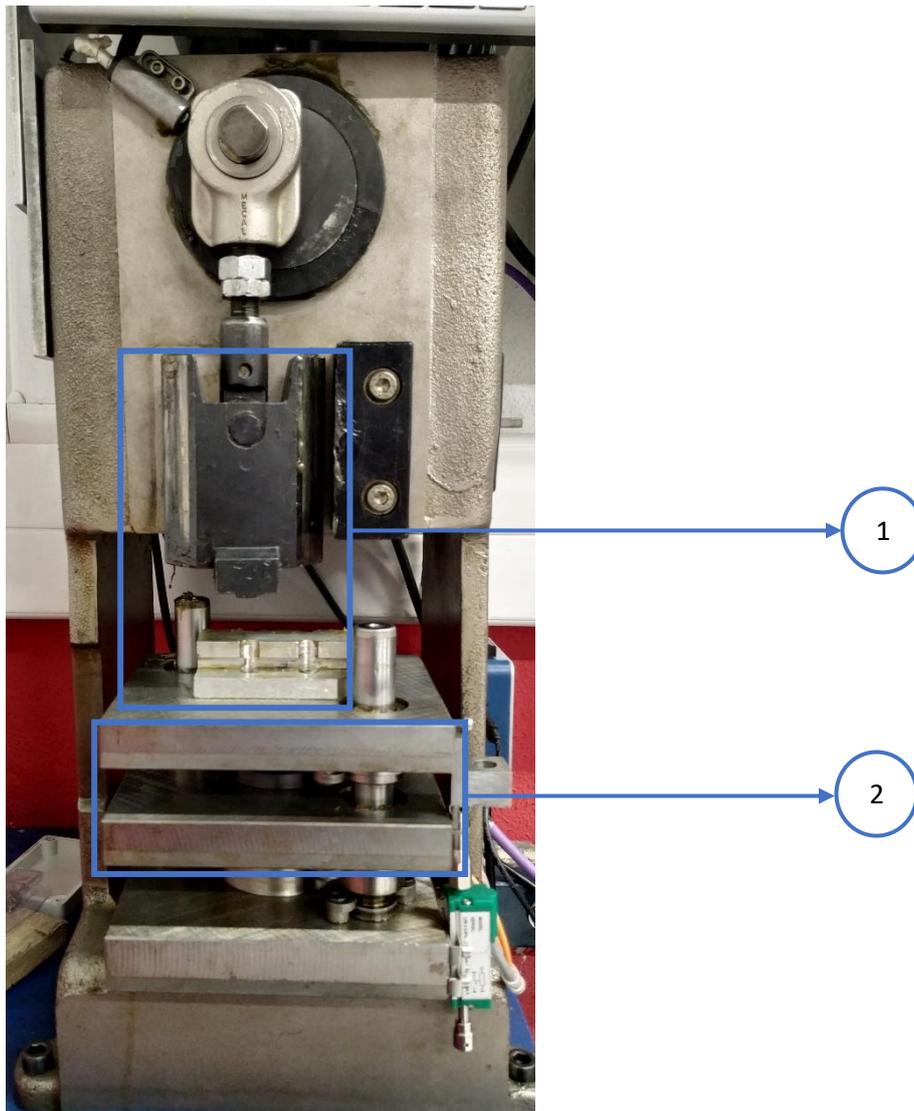


Figura 1 - Prensa

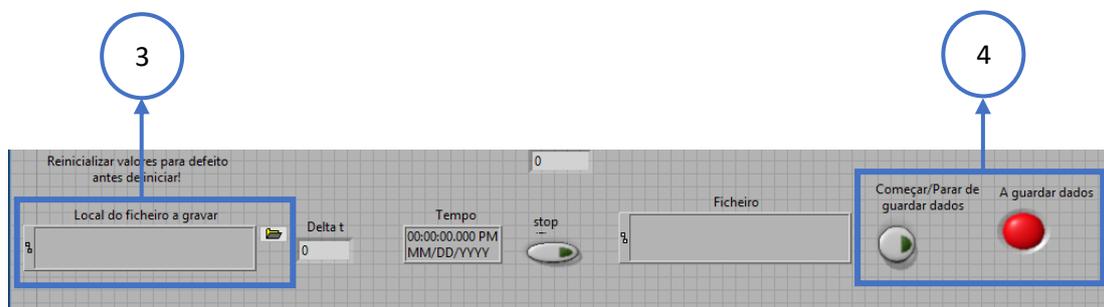


Figura 2 - Interface do programa de aquisição de dados

Procedimento – Calibração da Célula de Carga

1. Ligar o computador;
2. Abrir o software LabVIEW® com o programa Pedro_Prensa;
3. Ligar o sistema de aquisição de dados e deixar ligado durante 30 minutos para que a corrente aqueça os cabos até atingir a temperatura estacionária;
4. Colocar a célula de carga na base da estrutura de suporte – Figura 1, retângulo 1;
5. Baixar a alavanca e centrar o parafuso com a célula de carga;
6. Colocar a massa calibrada pretendida na extremidade da alavanca – Figura 2, retângulo 2;
7. Registrar valores de tensão obtidos;
8. Aumentar massa e registrar novos valores;
9. Repetir até à massa pretendida;

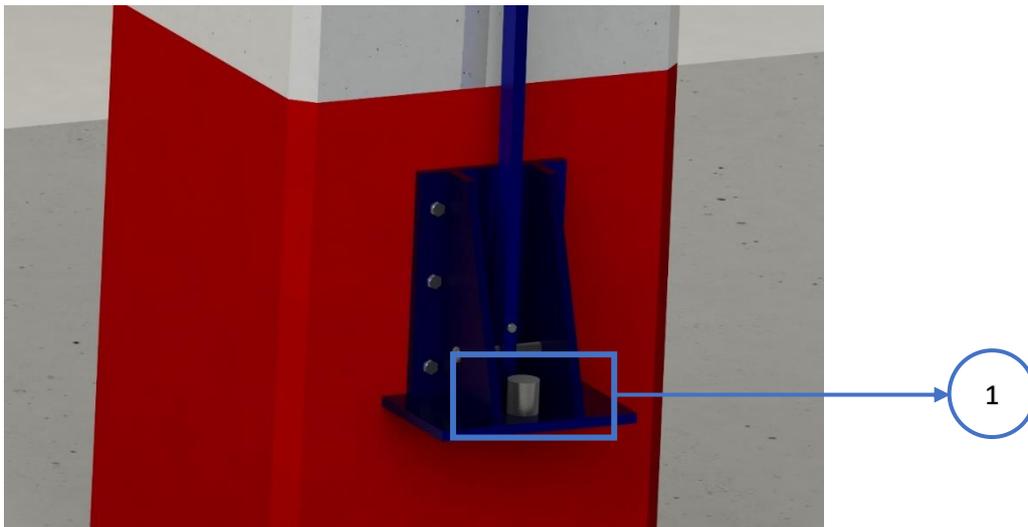


Figura 1-Estrutura de Suporte

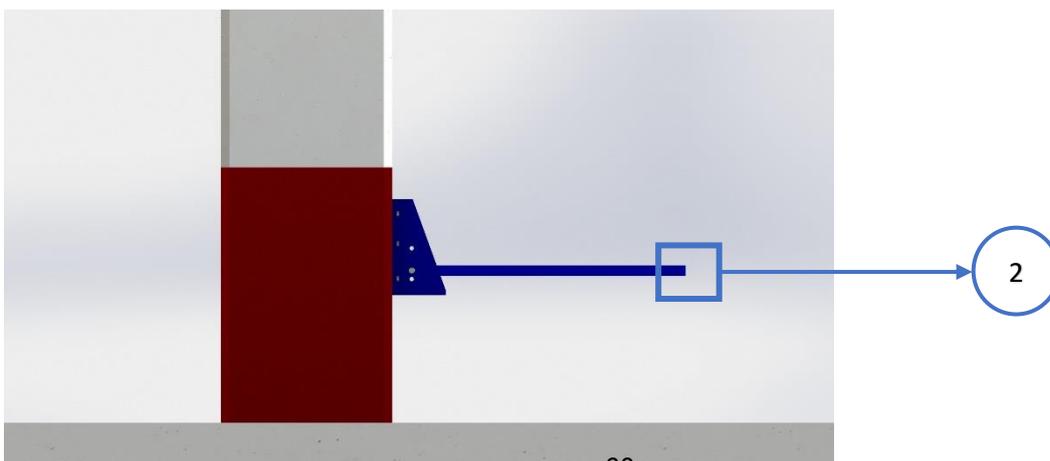


Figura 2-Alavanca sobre a célula de carga

Procedimento – Prensa Biela-Manivela – Ensaio de Compressão Uniaxial

1. Ligar os disjuntores – Figura 1, retângulo 1;
2. Ligar o computador;
3. Abrir o software LabVIEW® com o programa *Pedro_Prensa*;
4. Deixar o sistema de aquisição de dados e sensores em funcionamento durante 30 minutos para que a corrente aqueça os cabos até atingir a temperatura estacionária;
5. Se necessário, desativar o botão de emergência – Figura 1, retângulo 4;
6. Carregar no botão verde para acionar o motor secundário da prensa – Figura 1, retângulo 2;
7. Ligar o sistema biela-manivela e realizar 3 ciclos, a fim de lubrificar a máquina e a ferramenta – Figura 1, retângulo 6;

Atenção: Não carregar no botão preto, Figura 3, sem antes retirar a cavilha, uma vez que este botão aciona o motor principal da prensa

8. Definir a altura final do provete ajustando o curso da máquina através das duas porcas existentes no mecanismo biela-manivela – Figura 2, retângulo 7;
9. Passar lixa fina na zona de trabalho dos pratos compressores para retirar pequenos depósitos de metal resultantes da compressão anterior;
10. Passar um papel/pano para remover possíveis resíduos de abrasivo;
11. Realizar controlo dimensional do provete;
12. Passar lixa fina nos topos do provete para remover asperezas mais salientes, o que facilita o contacto e a medição da dureza;
13. Medir dureza do material;
14. Aplicar uma fina camada de lubrificante no provete e na zona de trabalho dos pratos compressores;
15. Selecionar a diretoria onde se pretende guardar os dados do ensaio – Figura 3, retângulo 8;
16. Regular o *Offset* de modo que a carga seja 0 N – Figura 3, retângulo 9;
17. Clicar no botão *Começar/Parar de guardar dados* para iniciar o registo dos dados do ensaio – Figura 3, retângulo 10;

18. Regular a velocidade pretendida no variador de frequência – Figura 1, retângulo 5;
19. Ligar o sistema biela-manivela – Figura 1, retângulo 6;
20. Após se ter completado o ciclo, desligar o sistema biela-manivela – Figura 1, retângulo 6;
21. Clicar no botão *Começar/Parar de guardar dados* para parar o registo dos dados do ensaio – Figura3, retângulo 10;
22. Realizar controlo dimensional do provete comprimido;
23. Passar lixa fina nos topos do provete;
24. Medir dureza do material comprimido;

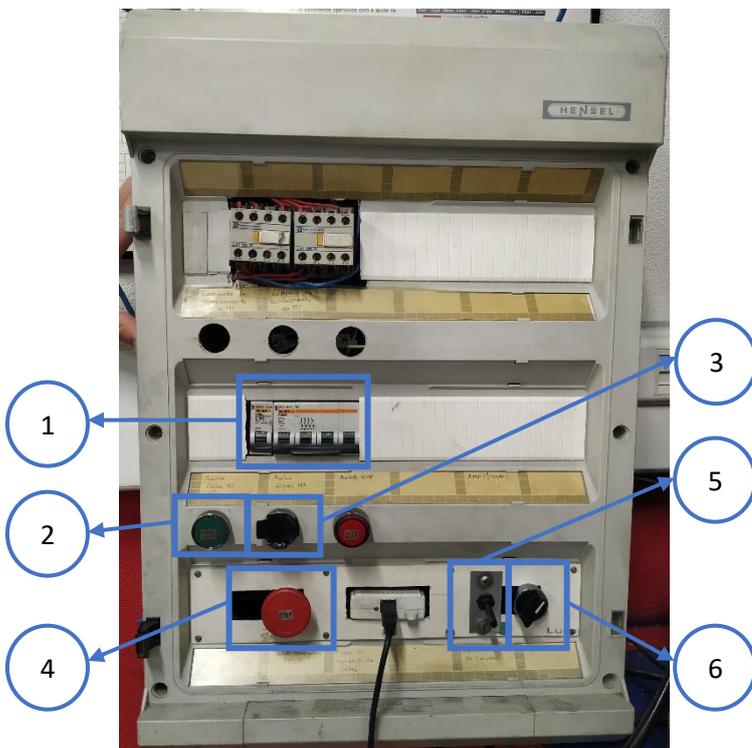


Figura 1 - Quadro Elétrico

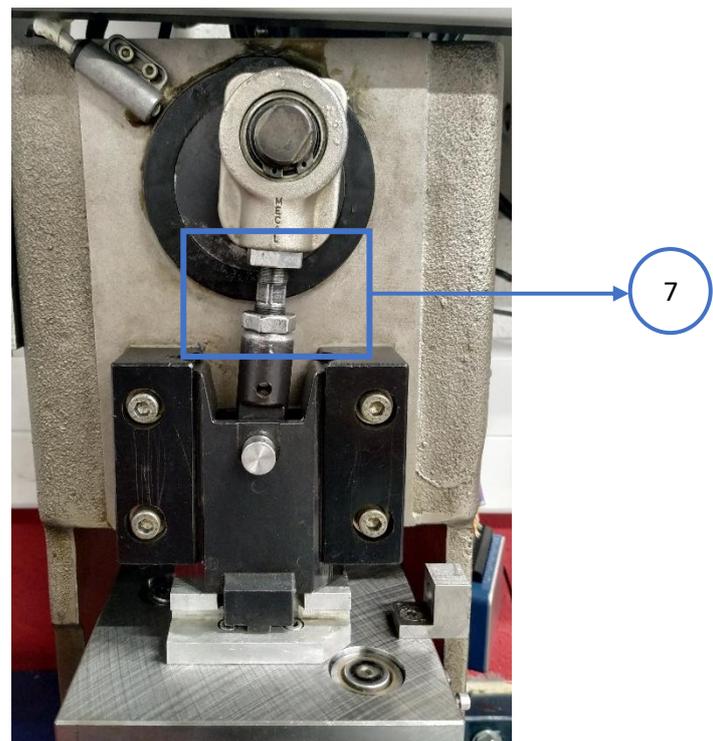


Figura 2 - Sistema Biela-Manivela

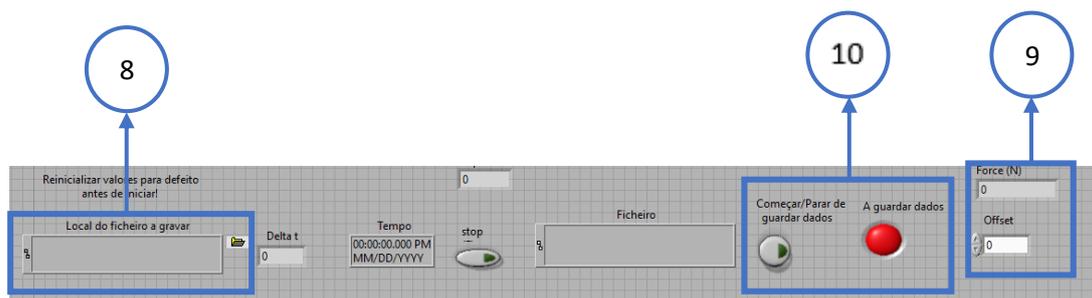


Figura 3 - Interface do programa de aquisição de dados

Durómetro Digital *Micro Vickers Hardruler HVS-1000* - PROCEDIMENTO

1. Se necessário desativar emergência (rodar botão vermelho que se encontra em baixo, à direita);
2. Ligar potência (botão que se encontra na parte traseira da máquina);
3. Definir carga (rodar manípulo que se encontra do lado direito, em cima). Recomenda-se 9.8 N;
4. Definir tempo de carga (botões *TIME* na parte frontal da máquina – ver **Figura 1**). Recomenda-se 15 segundos;
5. Verificar o zero da escala (recorrendo ao óculo do durómetro, juntar as duas linhas verticais, rodando os manípulos esquerdo e direito da lente, e de seguida carregar em *CLR*, que se encontra no painel frontal – ver **Figura 2**);
6. De entre as duas lentes existentes, ativar a lente pretendida;
7. Aproximar a lente até a imagem estar focada (rodar o manípulo do lado direito) sempre com o cuidado de não a danificar;
8. Ajustar a luz (usando os botões *LIGHT* no painel frontal – ver **Figura 1**);
9. Selecionar o indentador (rodar o revólver até ouvir “click”);
10. Carregar no botão *START*;
11. Esperar que *LOADING*, *DWELL* e *UNLOADING* acendam e apaguem, por esta ordem, e que o temporizador chegue a zero (a máquina emitirá um “bip”), sem nunca tocar na máquina ou na mesa de trabalho – ver **Figura 1**;
12. Rodar o revólver para a lente, sem tocar na amostra, até ouvir “click”;
13. Aproximar a lente, até a imagem estar focada (rodar o manípulo do lado direito, em baixo);
14. Colocar as duas linhas verticais em ambas as pontas da diagonal da indentação e carregar no botão preto que se encontra junto da lente – ver **Figura 3**;
15. Rodar a lente 90° e repetir o ponto 14;
16. Para **repetir uma medição** que não corra como esperado, carregar em *SPEC* seguido de *DEL* e recomeçar no ponto 14 – ver **Figura 1**.



Figura 1. Painel frontal



Figura 2. Manípulos da lente

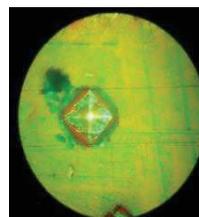


Figura 3. Exemplo de indentação

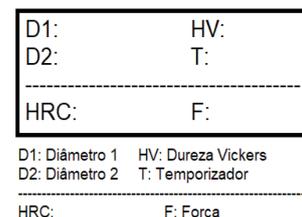


Figura 4. Ecrã do painel frontal

NOTA: Ao terminar a medição, certifique-se que retirou a amostra da mesa de trabalho, que colocou a lente com a objetiva de menor zoom na posição de observação, que a mesa se encontra na posição mais afastada das objetivas, que desligou o equipamento e que colocou a capa de proteção do durómetro.

Procedimento – ECAP

1. Lubrificar provete;
2. Inserir provete no orifício da ferramenta – Figura 1, retângulo 1;
3. Verificar se a válvula de descarga da prensa *MEGA PRS15* está fechada;
4. Acionar a bomba através da alavanca para fazer descer o êmbolo, o qual está conectado ao prato superior da ferramenta;
5. Verificar se o punção entra corretamente na ferramenta;
6. Continuar a acionar a alavanca até que o punção atinja o limite da ferramenta;
7. Abrir a válvula de descarga prensa para subir o punção;
8. Lubrificar e inserir outro provete na ferramenta;
9. Repetir os pontos 3-7;
10. Retirar o provete anterior extrudido;
11. Repetir tantas vezes quanto o número de provetes ou número, N, de passagens a realizar.

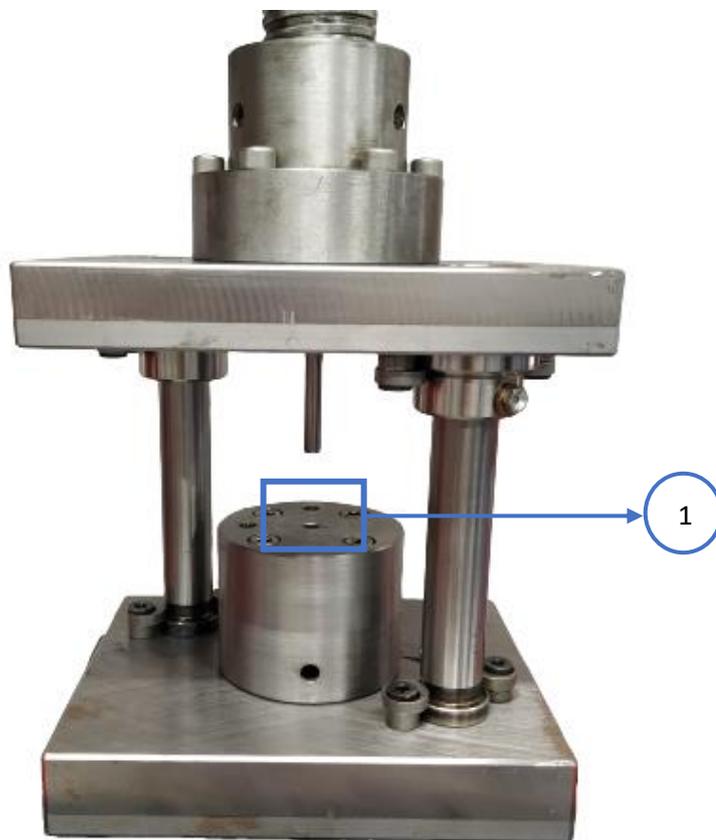


Figura 1 - Ferramenta de ECAP

Anexo D

Fichas Técnicas

As fichas técnicas relativas a alguns equipamentos comerciais utilizados no desenvolvimento desta investigação encontram-se presentes nas páginas seguintes.

1. Fonte de Tensão *MEAN WELL HDR-15-5*
2. Fonte de Tensão *MEAN WELL HDR-30-24*
3. Prensa *MEGA PRS15*



Features

- Ultra slim design with 17.5mm(1SU) width
- Universal input 85~264VAC(277VAC operational)
- No load power consumption<0.3W
- Isolation class II
- Pass LPS (Limited power source)
- DC output voltage adjustable
- Protections : Short circuit / Overload / Over voltage
- Cooling by free air convection (working temperature:-30~+70°C)
- DIN rail TS-35/7.5 or 15 mountable
- Over voltage category III
- LED indicator for power on
- 3 years warranty

Applications

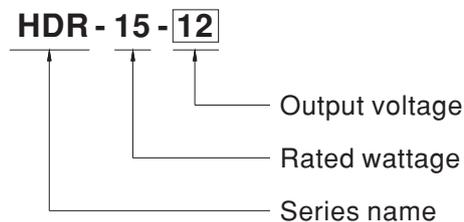
- Household control system
- Building automation
- Industrial control system
- Factory automation
- Electro-mechanical apparatus

Description

HDR-15 is one economical ultra slim 15W DIN rail power supply series, adapt to be installed on TS-35/7.5 or TS-35/15 mounting rails. The body is designed 17.5mm(1SU) in width, which allows space saving inside the cabinets. The entire series adopts the full range AC input from 85VAC to 264VAC(277VAC operational) and conforms to BS EN/EN61000-3-2, the norm the European Union regulates for harmonic current.

HDR-15 is designed with plastic housing that it can effectively prevent user from electric hazards. With working efficiency up to 87%, the entire series can operate at the ambient temperature between -30°C and 70°C under air convection. The complete protection functions and relevant certificates for home automations and industrial control apparatus (IEC62368-1, UL508, UL62368-1, BS EN/EN61558-2-16) make HDR-15 a very competitive power supply solution for household and industrial applications.

Model Encoding



SPECIFICATION

MODEL		HDR-15-5	HDR-15-12	HDR-15-15	HDR-15-24	HDR-15-48	
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	48V	
	RATED CURRENT	2.4A	1.25A	1A	0.63A	0.32A	
	CURRENT RANGE	0 ~ 2.4A	0 ~ 1.25A	0 ~ 1A	0 ~ 0.63A	0 ~ 0.32A	
	RATED POWER	12W	15W	15W	15.2W	15.4W	
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	80mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	240mVp-p	
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.5 ~ 5.5V	10.8 ~ 13.8V	13.5 ~ 18V	21.6 ~ 29V	43.2 ~ 55.2V	
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	LINE REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	SETUP, RISE TIME	2000ms, 80ms/230VAC 2000ms, 80ms/115VAC at full load					
HOLD UP TIME (Typ.)	30ms/230VAC 12ms/115VAC at full load						
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC (277VAC operational)		120 ~ 370VDC (390VDC operational)			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz					
	EFFICIENCY (Typ.)	80%	85%	85.5%	86%	87%	
	AC CURRENT (Typ.)	0.5A/115VAC 0.25A/230VAC					
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 25A/115VAC 45A/230VAC					
PROTECTION	OVERLOAD	110 ~ 145% rated output power Hiccup mode when output voltage <50%, recovers automatically after fault condition is removed Constant current limiting within 50% ~ 100% rated output voltage, recovers automatically after fault condition is removed					
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 6.75V	14.2 ~ 16.2V	18.8 ~ 22.5V	30 ~ 36V	56.5 ~ 64.8V	
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-30 ~ +70°C (Refer to "Derating Curve")					
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing					
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH non-condensing					
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C) RH non-condensing					
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axes; Mounting: Compliance to IEC60068-2-6					
	OPERATING ALTITUDE	2000 meters					
	OVER VOLTAGE CATEGORY	III ; According to EN61558, EN50178, EN60664-1, EN62477-1 ; altitude up to 2000 meters					
SAFETY & EMC (Note 4)	SAFETY STANDARDS	UL62368-1, UL508, TUV BS EN/EN61558-2-16, BS EN/EN61558-1, IEC62368-1, EAC TP TC 004, BSMI CNS14336-1 approved; Design refer to TUV BS EN/EN62368-1					
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:4KVAC					
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH					
	EMC EMISSION	Parameter	Standard			Test Level / Note	
		Conducted	BS EN/EN55032(CISPR32), CNS13438			Class B	
		Radiated	BS EN/EN55032(CISPR32), CNS13438			Class B	
		Harmonic Current	BS EN/EN61000-3-2			Class A	
		Voltage Flicker	BS EN/EN61000-3-3			-----	
	EMC IMMUNITY	BS EN/EN55024, BS EN/EN55035, BS EN/EN61000-6-2, BS EN/EN61204-3					
		Parameter	Standard			Test Level / Note	
ESD		BS EN/EN61000-4-2			Level 3, 8KV air; Level 2, 4KV contact, criteria A		
Radiated Susceptibility		BS EN/EN61000-4-3			Level 3, criteria A		
EFT/Burest		BS EN/EN61000-4-4			Level 3, criteria A		
Surge		BS EN/EN61000-4-5			Level 4, 2KV/L-N, criteria A		
Conducted		BS EN/EN61000-4-6			Level 3, criteria A		
Magnetic Field		BS EN/EN61000-4-8			Level 4, criteria A		
Voltage Dips and interruptions	BS EN/EN61000-4-11			> 95% dip 0. 5 periods, 30% dip 25 periods, > 95% interruptions 250 periods			
OTHERS	MTBF	1166K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)					
	DIMENSION	17.5*90*54.5mm (W*H*D)					
	PACKING	78g;160pcs/13.5Kg/1.14CUFT					
NOTE	<p>1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature.</p> <p>2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1μf & 47μf parallel capacitor.</p> <p>3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation.</p> <p>4. The power supply is considered as an independent unit, but the final equipment still need to re-confirm that the whole system complies with the EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com)</p> <p>5. The ambient temperature derating of 3.5°C/1000m with fanless models and of 5°C/1000m with fan models for operating altitude higher than 2000m(6500ft).</p> <p>※ Product Liability Disclaimer : For detailed information, please refer to https://www.meanwell.com/serviceDisclaimer.aspx</p>						



Features

- Ultra slim design with 35mm(2SU) width
- Universal input 85~264VAC(277VAC operational)
- No load power consumption<0.3W
- Isolation class II
- Pass LPS (Limited power source)
- DC output voltage adjustable
- Protections : Short circuit / Overload / Over voltage
- Cooling by free air convection (working temperature:-30~+70°C)
- DIN rail TS-35/7.5 or 15 mountable
- Over voltage category III
- LED indicator for power on
- 3 years warranty

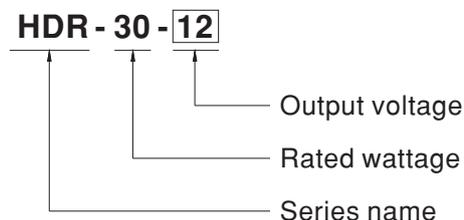
Applications

- Household control system
- Building automation
- Industrial control system
- Factory automation
- Electro-mechanical apparatus

Description

HDR-30 is one economical ultra slim 30W DIN rail power supply series, adapt to be installed on TS-35/7.5 or TS-35/15 mounting rails. The body is designed 35mm(2SU) in width, which allows space saving inside the cabinets. The entire series adopts the full range AC input from 85VAC to 264VAC(277VAC operational) and conforms to BS EN/EN61000-3-2, the norm the European Union regulates for harmonic current. HDR-30 is designed with plastic housing that it can effectively prevent user from electric hazards. With working efficiency up to 90%, the entire series can operate at the ambient temperature between -30°C and 70°C under air convection. The complete protection functions and relevant certificates for home automations and industrial control apparatus (IEC62368-1, UL508,UL62368-1, BS EN/EN61558-2-16) make HDR-30 a very competitive power supply solution for household and industrial applications.

Model Encoding



SPECIFICATION

MODEL		HDR-30-5	HDR-30-12	HDR-30-15	HDR-30-24	HDR-30-48	
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	48V	
	RATED CURRENT	3A	2A	2A	1.5A	0.75A	
	CURRENT RANGE	0 ~ 3A	0 ~ 2A	0 ~ 2A	0 ~ 1.5A	0 ~ 0.75A	
	RATED POWER	15W	24W	30W	36W	36W	
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	80mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	240mVp-p	
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.5 ~ 5.5V	10.8 ~ 13.8V	13.5 ~ 18V	21.6 ~ 29V	43.2 ~ 55.2V	
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	LINE REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	
	SETUP, RISE TIME	500ms, 50ms/230VAC 500ms, 50ms/115VAC at full load					
	HOLD UP TIME (Typ.)	30ms/230VAC 12ms/115VAC at full load					
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC (277VAC operational)		120 ~ 370VDC (390VDC operational)			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz					
	EFFICIENCY (Typ.)	82%	88%	89%	89%	90%	
	AC CURRENT (Typ.)	0.88A/115VAC 0.48A/230VAC					
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 25A/115VAC 45A/230VAC					
PROTECTION	OVERLOAD	105 ~ 160% rated output power Hiccup mode when output voltage <50%, recovers automatically after fault condition is removed Constant current limiting within 50% ~ 100% rated output voltage, recovers automatically after fault condition is removed					
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 7.5V	15 ~ 18V	18.8 ~ 22.5V	30 ~ 36V	57.6 ~ 67.2V	
		Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover					
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-30 ~ +70°C (Refer to "Derating Curve")					
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing					
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH non-condensing					
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C) RH non-condensing					
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axes; Mounting: Compliance to IEC60068-2-6					
	OPERATING ALTITUDE	2000 meters					
SAFETY & EMC (Note 4)	OVER VOLTAGE CATEGORY	III ; According to EN61558, EN50178, EN60664-1, EN62477-1 ; altitude up to 2000 meters					
	SAFETY STANDARDS	UL62368-1, UL508, TUV BS EN/EN61558-2-16, BS EN/EN61558-1, IEC62368-1, EAC TP TC 004, BSMI CNS14336-1 approved; Design refer to TUV BS EN/EN62368-1					
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:4KVAC					
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH					
	EMC EMISSION	Parameter	Standard			Test Level / Note	
		Conducted	BS EN/EN55032(CISPR32), CNS13438			Class B	
		Radiated	BS EN/EN55032(CISPR32), CNS13438			Class B	
		Harmonic Current	BS EN/EN61000-3-2			Class A	
		Voltage Flicker	BS EN/EN61000-3-3			-----	
	EMC IMMUNITY	BS EN/EN55024, BS EN/EN55035, BS EN/EN61000-6-2, BS EN/EN61204-3					
		Parameter	Standard			Test Level / Note	
ESD		BS EN/EN61000-4-2			Level 3, 8KV air; Level 2, 4KV contact, criteria A		
Radiated Susceptibility		BS EN/EN61000-4-3			Level 3, criteria A		
EFT/Burest		BS EN/EN61000-4-4			Level 3, criteria A		
Surge		BS EN/EN61000-4-5			Level 4, 2KV/L-N, criteria A		
Conducted		BS EN/EN61000-4-6			Level 3, criteria A		
Magnetic Field		BS EN/EN61000-4-8			Level 4, criteria A		
Voltage Dips and interruptions	BS EN/EN61000-4-11			> 95% dip 0. 5 periods, 30% dip 25 periods, > 95% interruptions 250 periods			
OTHERS	MTBF	968.1K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)					
	DIMENSION	35*90*54.5mm (W*H*D)					
	PACKING	0.12Kg;96pcs/12.5Kg/1.1CUFT					
NOTE	<ol style="list-style-type: none"> All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1µf & 47µf parallel capacitor. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. The power supply is considered as an independent unit, but the final equipment still need to re-confirm that the whole system complies with the EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) The ambient temperature derating of 3.5°C/1000m with fanless models and of 5°C/1000m with fan models for operating altitude higher than 2000m(6500ft). <p>※ Product Liability Disclaimer : For detailed information, please refer to https://www.meanwell.com/serviceDisclaimer.aspx</p>						



MEGA
 PRENSA HIDRAULICA 15 Toneladas PRS15
 CÓDIGO: MI-MEG-049591

CARACTERÍSTICAS:

Prensa hidráulica de 15 toneladas, sobremesa.

Diseño compacto y funcional que integra todos los elementos hidráulicos del chasis, protegiéndolos y ahorrando espacio en el taller. Se suministran completamente montadas y listas para trabajar. Manómetro integrado en el chasis, con amortiguación para prolongar su vida útil. Mesa ajustable. Husillo para aproximación rápido y/o ajuste fino. Incluyen 2 apoyos en V. Pistón con retorno automático. Válvula de seguridad contra sobrecargas. Limitador hidráulico de recorrido.

Seguridad:

Válvula de seguridad contra sobrecargas.

Limitador hidráulico de recorrido

Ficha Técnica

MODELO	PRS15
MAXIMA LUZ HORIZONTAL	430mm
MAXIMA LUZ VERTICAL	508 mm
RECORRIDO DEL CILINDRO	95 mm
RECORRIDO HUSILLO	75 mm



RECORRIDO TOTAL 170 mm

PESO 48 Kg

GARANTIA 1 Año.