



TÉCNICO
LISBOA

Nova Técnica de Amortecimento para a Onda Refletida em Ensaios de Compressão Uniaxial a Alta Taxa de Deformação

Pedro Afonso Almada Freitas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Prof. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista
Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Vogais: Prof. Rodrigo Rossi
Prof. Maria Alexandra Sousa Rodrigues

Dezembro 2021

Resumo

A diferença entre as condições de deformação obtidas durante os ensaios típicos para a caracterização mecânica dos materiais e os processos de fabrico a que estes são expostos, representa uma grande limitação ao trabalho desenvolvido nesta área. Um material ao sofrer deformações durante o fabrico pode apresentar um comportamento muito diferente daquele que é obtido nos ensaios de compressão uniaxiais convencionais, tipicamente no regime quasi-estático.

Motivado por esta lacuna na área, o presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento, partindo de um aparato já existente e introduzindo grandes alterações de forma a obter um aparato experimental universal capaz de realizar ensaios de compressão uniaxiais com condições de deformação muito variadas. Desde as baixas velocidades de deformação até às muito elevadas. A validação do equipamento foi feita reproduzindo os resultados existentes na literatura para o alumínio AA1050-O e o aço AISI 1045.

Palavras-chave: Compressão uniaxial, Velocidade de deformação, caracterização mecânica dos materiais, AA1050, AISI 1045

Abstract

The difference in deformation conditions between the typical mechanical characterization of materials tests and manufacturing processes represents a great limitation in the work developed in this area. Deformation suffered during manufacturing can cause the material to have a very different behaviour to that which is obtained using conventional uniaxial compression tests which occur typically in the quasi-static regimen.

Motivated by this lapse, the present work aims for the development, coming from an existantant apparatus and introducing major upgrades to it in order to obtain an universal mechanical apparatus capable of realizing uniaxial compression tests with a wide variety of deformation conditions. From quasi-static to very high strain-rates. The equipment was validated by reproducing results in the bibliography for Aluminium Alloy AA 1050-O and AISI 1045 steel.

Keywords: Uniaxial compression, strain-rate, mechanical characterization of materials, AA1050, AISI 1045

Conteúdo

Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Símbolos	ix
Glossário	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Comportamento Mecânico dos Materiais	3
2.1.1 Comportamento elástico	3
2.1.2 Comportamento plástico	4
2.2 Modelos Constitutivos	5
2.2.1 Modelo de Ludwik-Holloman	7
2.2.2 Modelo de Voce	7
2.2.3 Johnson-Cook	8
2.2.4 Modelo de Silva	8
2.3 Ensaios Mecânicos	9
2.3.1 Ensaio de compressão uniaxial	9
2.4 Equipamentos e técnicas de ensaios	11
2.4.1 Barra de Hopkinson	11
3 Desenvolvimento Experimental	20
3.1 Instalação atual	20
3.2 Soluções estudadas	20
3.2.1 Extensão da barra transmissora	20
3.2.2 Introdução da barra dissipadora	22
3.3 Soluções Implementadas	22
3.3.1 Carro móvel de atuadores	22
3.3.2 Barra Dissipadora	23
3.4 Componentes Auxiliares	26

3.4.1	Forno Elétrico	26
3.5	Aquisição de Dados	27
3.5.1	Sensores de Deslocamento	27
3.5.2	Célula de carga	29
3.5.3	Sistema de Aquisição de Dados	31
3.6	Disposição final do aparato	32
4	Demonstração de Resultados	33
4.1	Validação do Aparato Experimental	33
4.1.1	Alumínio AA1050-O	33
4.1.2	Aço AISI 1045	34
4.2	Estudo do sinal captado e ruídos	34
4.2.1	Possíveis Melhorias	37
5	Conclusões	41
	Referências	42
A	Procedimentos Experimentais	44

Lista de Tabelas

2.1 Modelos Constitutivos	7
4.1 Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas	36
4.2 Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas no aparato melhorado	39
4.3 Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas com diferente posição da célula de carga	40

Lista de Figuras

2.1	Regime de deformação elástica num gráfico tensão-extensão [1]: (a) Regime unicamente elástico; (b) Entrada em cedência	4
2.2	Comportamento plástico: (a) Representação esquemática do encruamento [2]; (b) Efeito da temperatura no ferro fundido [1]	5
2.3	Representação genérica da influência da velocidade de deformação na curva tensão-extensão	6
2.4	Condições de velocidade de deformação para diferentes processos de fabrico [4]	6
2.5	Representação esquemática de alguns comportamentos típicos [2]: (a) Elástico-Perfeitamente Plástico; (b) Encruamento Linear; (c) Encruamento Não-Linear	7
2.6	Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial [4]	9
2.7	Representação esquemática do efeito de barril [6]	10
2.8	Diagrama da estrutura de uma SHPB típica [12]	12
2.9	Diagrama de propagação das ondas [13]	12
2.10	Trabalho desenvolvido por Pinto (2009) [12]: (a) Vista em corte do atuador; (b) Barra de Hopkinson e atuador desenvolvidos	13
2.11	Aparato experimental desenvolvido por Gregório (2017) [16]	14
2.12	Trabalho desenvolvido por Saragoça (2020): (a) Modelo CAD do aparato; (b) Estado inicial dos componentes	15
2.13	Componentes estruturais da máquina [15]: (a) Estrutura base; (b) Estrutura Suporte	15
2.14	Extremidades das barras transmissoras com hastes de compressão [15]: (a) Hastes Curtas; (b) Hastes Longas	16
2.15	Bloco dissipador e sistema de amortecimento [15]	17
2.16	Aparato experimental com os diferentes atuadores [15]: (a) Configuração com atuador hidráulico; (b) Configuração com atuador pneumático	17
2.17	Projéteis disponíveis [15]	18
3.1	Diagrama representativo da instalação de Saragoça (2020)	21
3.2	Diagrama representativo da solução com extensão da barra transmissora	21
3.3	Diagrama representativo da solução com barra dissipadora	22
3.4	Bancada do atuador eletromagnético: (a) Estrutura do atuador eletromagnético; (b) Modelo CAD da montagem	23

3.5	Carro móvel de atuadores: (a) Configuração para alta e média velocidade; (b) Configuração para baixa velocidade	24
3.6	Projeto CAD do aparato a desenvolver	24
3.7	Processos de fabrico dos componentes no Núcleo de Oficinas (NOF): (a) Fresagem da viga suporte; (b) Torneamento da Barra Dissipadora	25
3.8	Interface das barras transmissora e dissipadora: (a) Sistema de amortecimento antigo; (b) Sistema de amortecimento desenvolvido	25
3.9	Forno elétrico e respetivo controlador	27
3.10	Implementação do retificador desenvolvido: (a) Ponte de Díodos; (b) Caixa Isoladora	28
3.11	Sistema de aquisição de dados: (a) Caixa de aquisição de dados; (b) Instalação dos potenciômetros lineares	30
3.12	Ponte de Wheatstone instalada	30
3.13	Calibração da carga comercial: (a) Alavanca de calibração e pesos; (b) Instalação da célula de carga	31
3.14	Carrinho móvel de aquisição de dados	32
3.15	Configuração final do aparato experimental: (a) Ensaio Quasi-estáticos, (b) Ensaio Dinâmicos	32
4.1	Curvas tensão-extensão para a liga de alumínio AA1050-O: (a) Ensaio de compressão Quasi-Estático; (b) Ensaio de compressão com $\dot{\epsilon} = 1500s^{-1}$	34
4.2	Curvas tensão-extensão para Aço AISI 1045: (a) Ensaio de compressão Quasi-Estático; (b) Ensaio de compressão com $\dot{\epsilon} = 1500s^{-1}$	34
4.3	Ensaio de compressão em aço ck45 com $\dot{\epsilon} = 4000s^{-1}$	35
4.4	Diagrama de propagação da onda	36
4.5	Sinal das duas pontes de Wheatstone: ensaio em provete rígido para estudo do sinal	37
4.6	Ensaio de compressão em aço ck45 com $\dot{\epsilon} = 4000s^{-1}$. A vermelho estão os instantes calculados na tabela 4.1	38
4.7	Diagrama de propagação da onda introduzindo a barra maciça	38
4.8	Diagrama de propagação da onda introduzindo a barra incidente mais comprida	39
4.9	Diagrama de propagação da onda variando posição da célula de carga	40

Lista de Símbolos

Simbolos gregos

$\dot{\epsilon}$ Velocidade de deformação

ϕ Diâmetro do provete

ρ Densidade

σ Tensão real

ϵ Extensão real

Simbolos romanos

A Área do provete

c Velocidade de propagação da onda

E Módulo de Young

F Força aplicada

h Altura do provete

L Comprimento

V Volume do provete

Subscritos

0 Inicial

ac Acumulado após cada passagem pela matriz

b Barra

i Instantâneo

st Projétil (*Striker Bar*)

y Cedência

Glossário

AA Aluminium Association. iii, v, viii, 33, 34

AC Corrente Alternada. 28

AISI American Iron and Steel Industry. iii, v, viii, 15, 33–35

DB Data Bus. 29

DC Corrente Contínua. 28

IST Instituto Superior Técnico. 13

LabM3 Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico. 1, 13, 40

NOF Núcleo de Oficinas. viii, 25

SHPB Split Hopkinson Pressure Bar. vii, 2, 11–13

Capítulo 1

Introdução

A compreensão do comportamento mecânico expectável de um material é de extrema importância para o correto projeto, desenvolvimento e produção de qualquer tipo de peça com as mais diversas finalidades. Desde bens de consumo a ferramentas, a escolha do material para um componente depende sempre das condições de carregamento em que este vai ser utilizado. Tão importante como o conhecimento destas condições é o conhecimento do comportamento mecânico do material facilmente obtido para condições quase-estáticas com ensaios de compressão uniaxial. No entanto, a velocidade de deformação varia largamente entre os diferentes processos de fabrico e verifica-se uma ausência de informação na bibliografia em relação ao comportamento dos materiais para diferentes velocidades de deformação. Esta falta de informação deve-se, em grande parte, à complexidade de desenvolver um equipamento capaz de executar ensaios com largas gamas de velocidade de deformação.

A caracterização do comportamento mecânico dos materiais pode ser feita através de modelos constitutivos que descrevem qual a influência das condições de operação, seja, por exemplo, a temperatura ou a velocidade de deformação, na resposta do material. O desenvolvimento de modelos constitutivos empíricos, utilizando curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente, é o primeiro requisito para se poderem realizar cálculos teóricos acerca das propriedades dos materiais, algo de especial importância aquando da introdução de novos materiais, para os quais à partida não se conhece a resposta face a esforços externos. No entanto, estes modelos, sendo empíricos, necessitam de resultados experimentais para serem corretamente desenvolvidos e parametrizados.

O presente trabalho tem como ponto de partida um aparato experimental existente no LabM3 e o principal objetivo é introduzir a este alterações de forma a que este permita a realização de ensaios de compressão uniaxiais a uma gama de velocidades de deformação desde o quasi-estático até à elevada velocidade de deformação e a melhoria do sistema mecânico de forma a que a aquisição e interpretação dos dados seja mais simples e mais nítida. Isto traduz-se então em dois grandes objetivos para serem atingidos pelo autor, a introdução de um novo sistema para a montagem de atuadores e a introdução de um novo sistema de amortecimento da onda refletida.

O documento encontra-se estruturado em 5 capítulos. A presente introdução é seguida de uma revisão bibliográfica do comportamento mecânico dos materiais, modelos constitutivos empíricos exis-

tentes, a importância e influência da velocidade de deformação para estes modelos, bem como uma breve introdução aos ensaios mecânicos e equipamentos que permitem a sua parametrização com especial atenção à SHPB que serve de base para o aparato desenvolvido.

No capítulo 3 descreve-se o processo de implementação do aparato experimental passando pelas etapas de desenvolvimento da bancada de ensaios, começando pela explicação do estado inicial do aparato, seguindo-se alterações e melhorias efectuadas, passando pelo projeto e desenvolvimento de novas peças e sua instalação. Seguidamente mostram-se os sensores e aparelhos periféricos utilizados para a aquisição e registo de dados.

O capítulo 4 inicia-se pela validação da bancada repetindo ensaios com material cujos resultados esperados são conhecidos na literatura e de seguida apresenta-se o estudo feito à onda característica da máquina.

No capítulo 5 retiram-se algumas conclusões do trabalho desenvolvido e sugerem-se futuras melhorias.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, através de uma revisão bibliográfica, apresentam-se os fundamentos teóricos que permitem a realização deste trabalho. Iniciando pela caracterização dos materiais, o seu comportamento quando sujeito a solicitações externas e os modelos constitutivos que o descrevem. Passando pelos ensaios mecânicos relevantes para este trabalho que permitem realizar esta caracterização, com destaque para a Barra de Hopkinson.

2.1 Comportamento Mecânico dos Materiais

A caracterização do comportamento mecânico dos materiais é algo de especial importância para a engenharia. As curvas de tensão-extensão, permitem-nos, como engenheiros, proceder à correta e informada seleção, não só do material como também do método de fabrico adequado para a produção de um componente. De uma forma geral os materiais, quando expostos a esforços externos apresentam dois tipos de comportamento que podem ser caracterizados como elástico e plástico.

2.1.1 Comportamento elástico

O comportamento elástico pode ser representado por uma relação linear entre a tensão σ e a extensão ε conhecida como a lei de Hooke (2.1).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

Como pode ser inferido pela equação (2.1), o comportamento elástico de um dado material, na curva tensão-extensão, é caracterizado por ser linear. Esta deformação é não permanente e reversível quando o material é descarregado [1].

Como pode ser observado na figura 2.1 (a), o módulo de Young (módulo de elasticidade) corresponde ao declive do regime elástico num gráfico tensão-extensão, ou seja, quanto maior o declive, maior o módulo de Young e, para o mesmo carregamento, menor a extensão obtida.

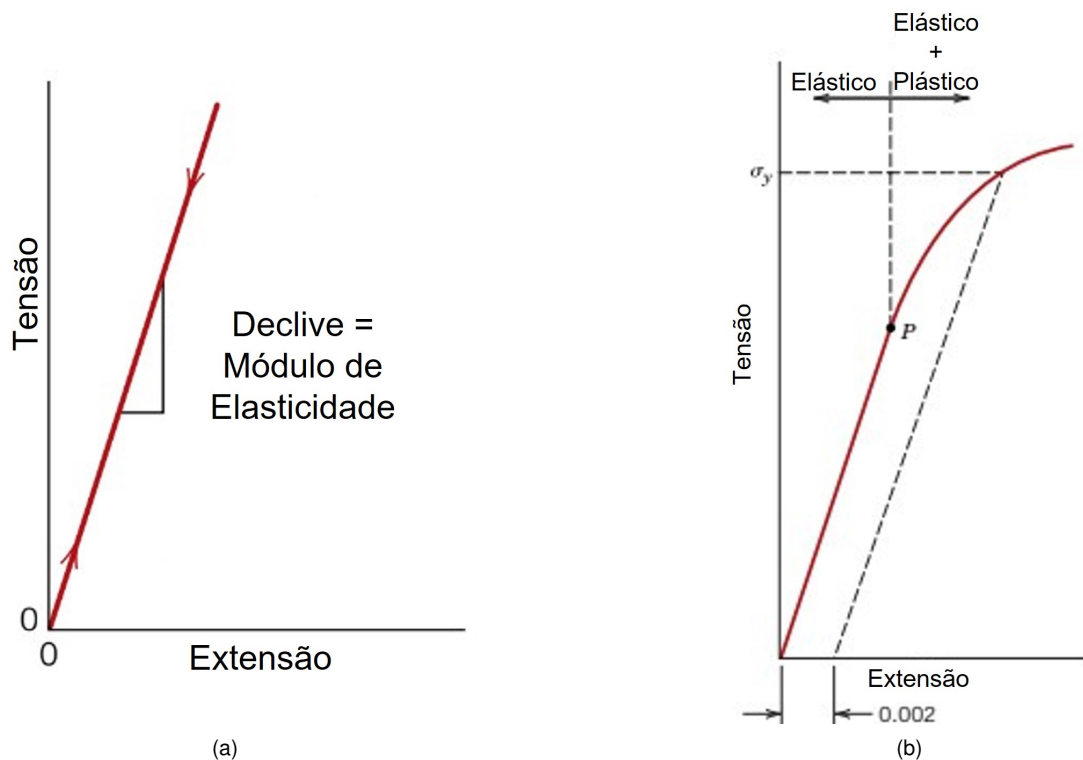


Figura 2.1: Regime de deformação elástica num gráfico tensão-extensão [1]: (a) Regime unicamente elástico; (b) Entrada em cedência

Quando um material começa a deformar de forma não linear, deixa de deformar elasticamente e começa a entrar na deformação plástica, diz-se que entra em cedência.

A determinação do ponto em que um material entra em cedência é de especial importância em engenharia uma vez que, a esmagadora maioria das construções, estruturas, componentes mecânicos, etc., não estão projetados para funcionarem em deformação plástica. Ou seja, assim que um componente entra em deformação plástica considera-se que falhou. Posto isto, é importante prever, com as curvas tensão-extensão, o carregamento que leva ao início deste comportamento.

Idealmente, este ponto corresponde, num gráfico tensão-extensão, ao ponto em que a deformação deixa de ter um comportamento linear, correspondente ao ponto P no gráfico da figura 2.1 (b). No entanto, para muitos materiais, não é possível com simples observação obter este ponto, logo estabeleceu-se uma convenção em que se traça uma linha com o declive do comportamento elástico e que interceta o eixo da extensão no valor de $\varepsilon = 0.2\%$. A interceção desta linha com a curva tensão-extensão corresponde então à tensão de cedência σ_y . Tensão a partir da qual afirma-se com segurança que o material entra em deformação plástica, permanente e irreversível.

2.1.2 Comportamento plástico

No que concerne o comportamento plástico, a sua representação não é tão simples como a lei de Hooke apresentada acima. Este facto deve-se à existência de diferentes fenómenos que afetam a resposta do material neste regime como por exemplo o encruamento e os efeitos viscosos que levam a

que a resposta do material depende da velocidade de deformação e da temperatura.

O encruamento é o nome dado ao fenómeno de endurecimento e aumento da resistência mecânica do material quando sofre deformação, num gráfico tensão-extensão este fenómeno traduz-se numa curva com declive positivo no regime plástico (2.2 (a)).

A temperatura afeta a ductilidade e tenacidade dos materiais tornando-os mais dúcteis para temperaturas mais altas. Esta tem também um efeito a nível do escoamento do material, normalmente baixando a tensão de escoamento e a resistência à fluência. Um exemplo destes efeitos é apresentado para o ferro fundido na figura 2.2 (b).

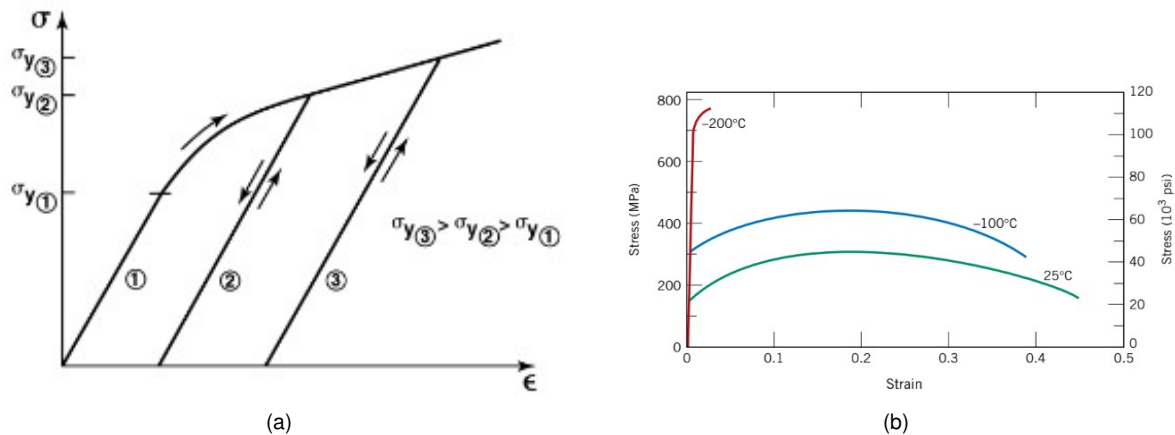


Figura 2.2: Comportamento plástico: (a) Representação esquemática do encruamento [2]; (b) Efeito da temperatura no ferro fundido [1]

Especialmente em processos industriais com elevadas velocidades de deformação verifica-se também um aumento significativo da temperatura durante o processo, afetando ainda mais o comportamento mecânico destes materiais.

A velocidade de deformação, $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$, exprime-se em s^{-1} representa a taxa à qual se processa a deformação. A velocidade de deformação causa efeitos na estrutura cristalina dos metais e no escorregamento do grão [3], efeitos estes que levam a um aumento da tensão de escoamento necessária para os mesmos valores de extensão.

O efeito deste aumento numa curva tensão-extensão representa-se de forma genérica e meramente ilustrativa na figura 2.3.

O parâmetro da velocidade de deformação é de particular interesse quando se pretende estudar o comportamentos dos materiais quando sujeitos a diferentes processos de fabrico.

Na figura 2.4 observam-se as velocidades de deformação características de alguns processos de fabrico.

2.2 Modelos Constitutivos

Todos estes fenómenos referidos anteriormente fazem com que seja mais difícil prever o comportamento dos materiais se não puderem ser estudados com este tipo de condições específicas.

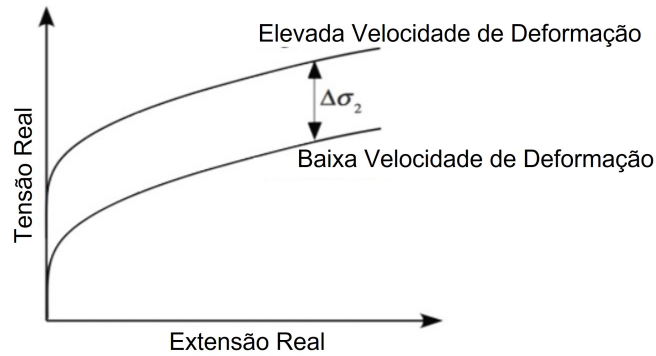


Figura 2.3: Representação genérica da influência da velocidade de deformação na curva tensão-extensão

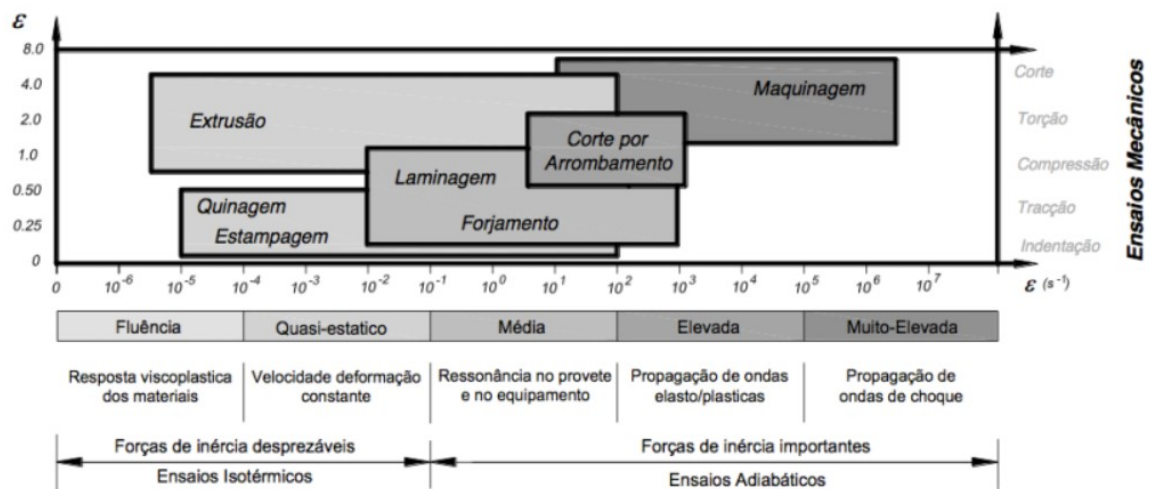


Figura 2.4: Condições de velocidade de deformação para diferentes processos de fabrico [4]

Os resultados retirados dos ensaios podem ser utilizados para parametrizar e teorizar modelos constitutivos empíricos e, quanto maiores forem as bases de dados e as condições diferentes de ensaios realizados, mais sólidos e preditivos são os modelos resultantes.

Os modelos constitutivos, como referidos anteriormente, podem ser usados para prever e obter, teoricamente, as curvas tensão-extensão para qualquer material. Estes modelos podem ser mais simples se considerarem linearidade no comportamento (Fig. 2.5 (a)) e aumentam o seu grau de complexidade com a não-linearidade dos comportamento mecânicos dos materiais (Fig. 2.5 (c)).

Apresentam-se de seguida os tipos de modelos importantes e que se podem parametrizar com o aparato desenvolvido no presente trabalho:

- **Perfeitamente plásticos** - Modelos que não consideram o efeito do encruamento.
- **Rígido-Plásticos** - Modelos que aproximem um comportamento cuja componente plástica é de uma ordem de grandeza muito superior à componente elástica.
- **Visco-Plásticos** - Modelos que contabilizem os efeitos viscosos da temperatura e velocidade de

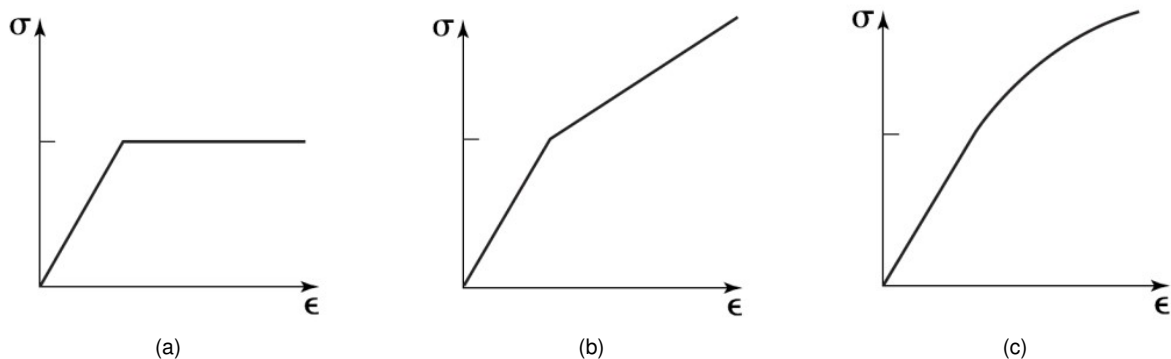


Figura 2.5: Representação esquemática de alguns comportamentos típicos [2]: (a) Elástico-Perfeitamente Plástico; (b) Encruamento Linear; (c) Encruamento Não-Linear

deformação.

- **Híbridos** - Modelos que consistem numa combinação de vários modelos tradicionais.

Na seguinte tabela apresentam-se os modelos constitutivos mais utilizados:

Modelo	Natureza
Ludwik-Hollomon	Rígido-Plástico
Voce	Rígido-Plástico
Johnson-Cook	Visco-Plástico
Silva	Híbrido

Tabela 2.1: Modelos Constitutivos

2.2.1 Modelo de Ludwik-Holloman

O modelo de Ludwik-Hollomon (Hollomon (1945)) pode ser considerado para materiais cujo comportamento é rígido-plástico e rege-se pela equação:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.2)$$

Em que K é uma constante característica que representa a rigidez do material e n um factor entre 0 e 1 que considera o efeito do encruamento do material. Como descrito anteriormente, sendo um modelo rígido-plástico, assume-se que a deformação ocorre sempre no regime plástico.

2.2.2 Modelo de Voce

O modelo de Voce rege-se pela seguinte equação:

$$\sigma = K(1 - me^{-n\varepsilon}) \quad (2.3)$$

Onde K é a assíntota para a qual a curva tensão extensão tende com o aumento da extensão ε . A velocidade com que as curvas tendem para este valor assintótico é representada por n ao passo

que m corresponde ao estado inicial de encruamento, sendo que um material completamente encruado apresenta $m=0$.

Este modelo permite modelar o comportamento de materiais que apresentam um comportamento perfeitamente plástico a partir de um dado valor de extensão, ou seja, para este dado valor de extensão deixa de sofrer encruamento.

2.2.3 Johnson-Cook

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

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_f - T_r}\right)^p\right) \quad (2.4)$$

Esta equação pode ser separada em três parcelas em que cada uma introduz um dos fenómenos referidos anteriormente para o comportamento plástico dos materiais. A primeira representa os efeitos do encruamento, a segunda considera os efeitos da velocidade de deformação e a terceira os efeitos da temperatura. A é uma constante que representa o estado de encruamento do material, ou seja, reflete a pré-extensão do material, B e n são constantes do material equivalentes a K e n , respetivamente, no modelo de Ludwik na equação (2.2). Na segunda parcela, ε_0 é uma constante que tem com função a normalização da velocidade de deformação. $\dot{\varepsilon}$ representa a velocidade de deformação, afetando esta a curva segundo uma função logarítmica e m um fator que mostra a sensibilidade da curva a esta velocidade. Na terceira parcela, p é um fator correspondente ao amaciamento térmico, T_r é uma temperatura de referência e T_f é a temperatura de fusão do material.

2.2.4 Modelo de Silva

O modelo de Silva (Silva, 2013) [4], é um modelo empírico visco-plástico proposto para o comportamento mecânico de materiais a frio, dado pela expressão:

$$\sigma = [A + e^{m\varepsilon}\varepsilon^n] [B + C \ln(D + \dot{\varepsilon})] \quad (2.5)$$

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

2.3 Ensaios Mecânicos

Para permitir a caracterização dos materiais e a parametrização dos modelos constitutivos como os acima apresentados, é necessário utilizar a curva tensão-extensão obtida experimentalmente para o material em questão.

Esta curva tensão-extensão pode ser obtida com recurso a diferentes tipos de ensaios e com diferentes parâmetros, o presente trabalho, no entanto, pretende abordar o ensaio de compressão uniaxial para diferentes condições de velocidade de deformação e temperatura.

2.3.1 Ensaio de compressão uniaxial

Fundamentos do ensaio

Um dos ensaios mais comuns para a obtenção da curva tensão-extensão e o alvo do presente trabalho é o ensaio de compressão uniaxial. Este consiste em sollicitar compressivamente entre dois pratos um provete cilíndrico, registando a força exercida bem como o deslocamento dos pratos que se traduz numa redução da altura do provete. A representação esquemática deste tipo de ensaio pode ser observada na figura 2.6

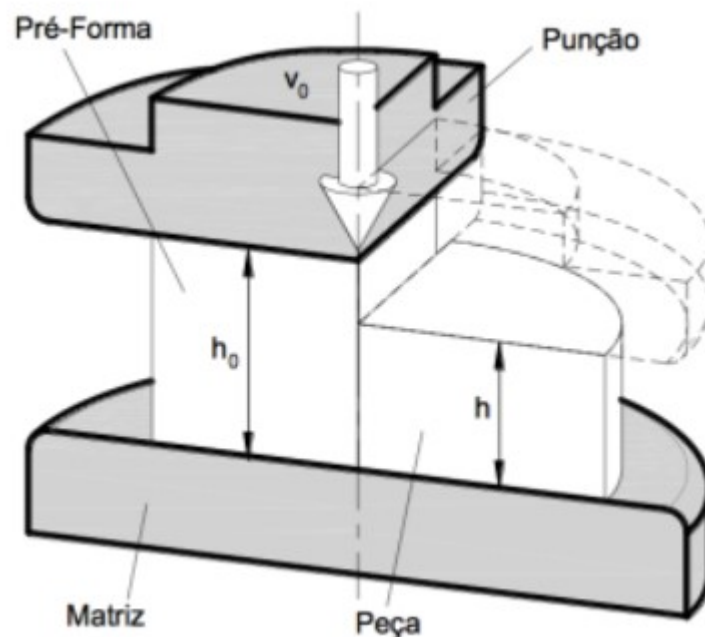


Figura 2.6: Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial [4]

Recorrendo a instrumentação com a qual se possa registar a força exercida e o deslocamento ou a distância entre pratos para cada instante, é possível obter a curva tensão-extensão recorrendo a algumas equações. Sabe-se então que a tensão verdadeira (σ) é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (2.6)$$

onde F é a força exercida e A_i corresponde à área instantânea do provete calculada através da condição de incompressibilidade em que:

$$V_i = V_o \iff A_0 h_0 = A_i h_i \quad (2.7)$$

tem-se então:

$$A_i = \frac{A_0 h_0}{h_i} = \frac{A_0 h_0}{h_0 - \Delta h} \quad (2.8)$$

em que h_i corresponde a altura instantânea do provete que pode ser obtida diretamente ou, através do valor do deslocamento Δh dependendo do tipo de sensor para esta grandeza utilizado.

A extensão, ε , é calculada através da seguinte expressão [4]:

$$\varepsilon = - \int_{h_0}^{h_i} \frac{dh}{h} = \ln \left(\frac{h_0}{h_i} \right) \quad (2.9)$$

Efeito de barril

O efeito de barril é um fenómeno que resulta do excesso de atrito entre o provete e os pratos de compressão, provocando um constrangimento ao deslizamento do material, resultando numa deformação plástica não homogénea e demonstra-se com uma curvatura nas paredes laterais, como pode ser observado na figura 2.7. Este constrangimento leva também a um aumento da força necessária para a deformação do provete, ou seja, a tensão de escoamento verificado é também superior ao esperado.

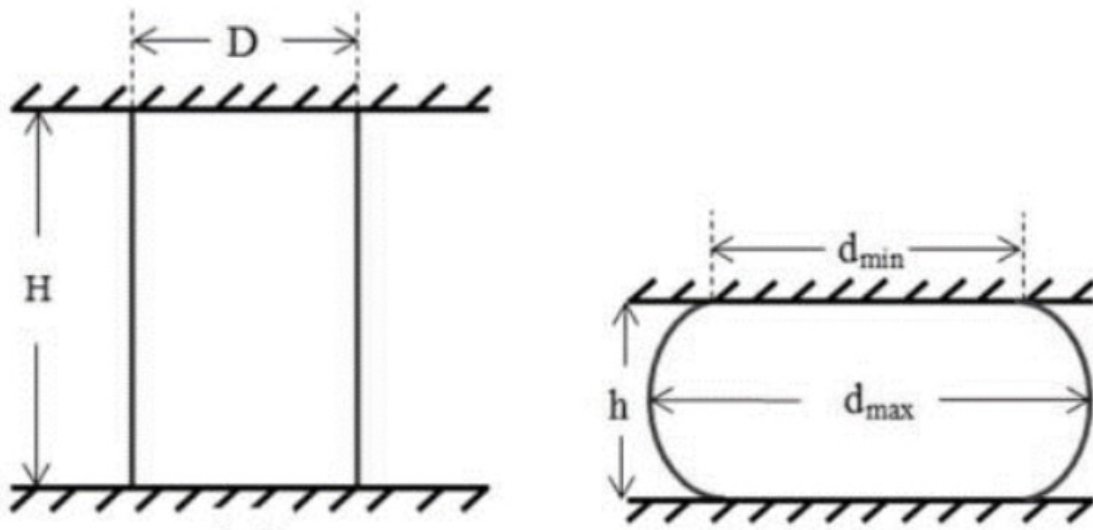


Figura 2.7: Representação esquemática do efeito de barril [6]

Dimensões do provete

A partir do trabalho apresentado por Alves et al. (2011) [7], observa-se que a esbeltez do provete deve estar compreendida entre dois valores limite $1 \leq h_0/d_0 \leq 3$ e que, o limite inferior advém deste mesmo efeito do atrito que se apresentou acima. Alves et al. verificou que, para valores de esbeltez

menores do que 1 o efeito do atrito nos resultados do ensaio é muito mais acentuado do que para valores acima deste limite. O limite superior é também importante para evitar fenómenos de flexão e empeno no provete que acontecem para valores elevados de esbeltez [8].

Retira-se então que, além da especial atenção que deve ser dada à lubrificação para a realização do ensaio, é também muito importante ter atenção às dimensões dos provetes a serem utilizados no estudo.

2.4 Equipamentos e técnicas de ensaios

A caracterização de materiais para condições de deformação quasi-estáticas é o mais comum também por ser o de mais fácil implementação, existindo diversas máquinas capazes de realizar este tipo de ensaio. Para velocidades intermédias, $1s^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2s^{-1}$, os equipamentos já são mais limitados, recorrendo-se habitualmente a sistemas de queda de graves, sistemas hidráulicos ou sistemas mecânicos. Para velocidades elevadas de deformação a oferta de equipamentos é, novamente, ainda mais limitada passando pelas barras de Hopkinson e dispositivos de impacto de Taylor [9].

Como se pode observar na figura 2.4, são poucos os processos de fabrico que se encontram no regime mais comum dos ensaios de compressão convencionais (Quasi-estático), daí a importância de desenvolver aparelhos e fazer o estudo comportamental dos materiais para estes regimes de deformação mais representativos do que acontece na indústria.

2.4.1 Barra de Hopkinson

O equipamento desenvolvido neste trabalho é baseado em grande parte na barra de Hopkinson ou *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB), este é um dos equipamentos mais utilizados para caracterizar o comportamento dos materiais quando submetidos a elevadas taxas de deformação. A figura 2.8 apresenta o esquema de uma implementação típica deste equipamento, onde se realçam os dois principais componentes: a barra incidente e a barra transmissora. A técnica de ensaio consiste em excitar duas barras, fabricadas no mesmo material e com o mesmo diâmetro, em regime elástico acima da sua frequência de ressonância [10].

As barras devem ser fabricadas num material que permita exercer carregamentos suficientes para deformar os provetes plasticamente mas mantendo as barras sempre no regime elástico.

A barra incidente é excitada normalmente com recurso a um projétil que é acelerado por um sistema propulsor (atuador). Este impacto gera uma onda de pressão que é, em parte, transmitida para o provete e barra transmissora enquanto que a restante é refletida na interface da barra. As duas barras são instrumentadas com extensómetros para a monitorização destas ondas de pressão e, com posterior análise e tratamento matemático dos dados é possível retirar os dados necessários para obter as curvas tensão-extensão e taxa de deformação-extensão do ensaio [11]. Existem, no entanto, diversos factores que introduzem erros significativos na execução de um ensaio com uma barra de Hopkinson típica que podem comprometer a segurança e fidelidade dos resultados. Todos estes factores devem ser tomados

em conta aquando da caracterização de materiais utilizando uma SHPB e os seus resultados, apesar da utilização difundida, devem ser interpretados com cuidado.

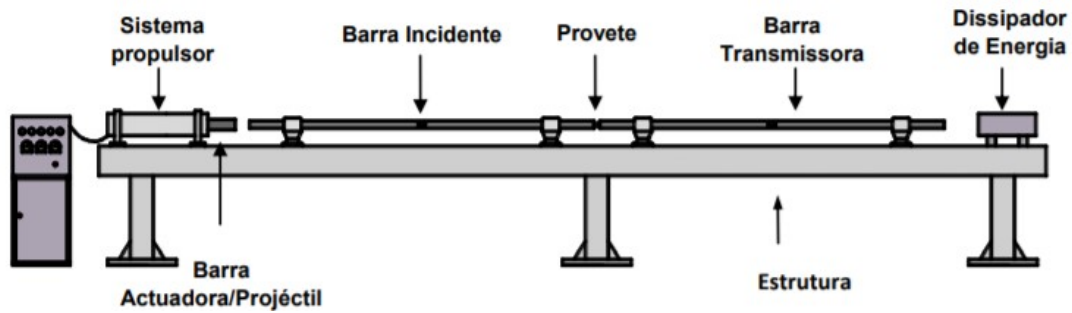


Figura 2.8: Diagrama da estrutura de uma SHPB típica [12]

O princípio de funcionamento acenta na propagação unidimensional de ondas elásticas. A barra incidente excitada com uma onda elástica de tensão impacta com o provete encostado à barra transmissora, transmitindo assim a onda para o mesmo sendo que alguma é refletida de volta. No provete volta a acontecer este fenómeno de reflexão da onda e transmissão para a barra transmissora. As ondas refletidas dentro do provete causam a tensão necessária para o deformar plasticamente. O diagrama apresentado na figura 2.9 facilita a compreensão do fenómeno acima descrito.

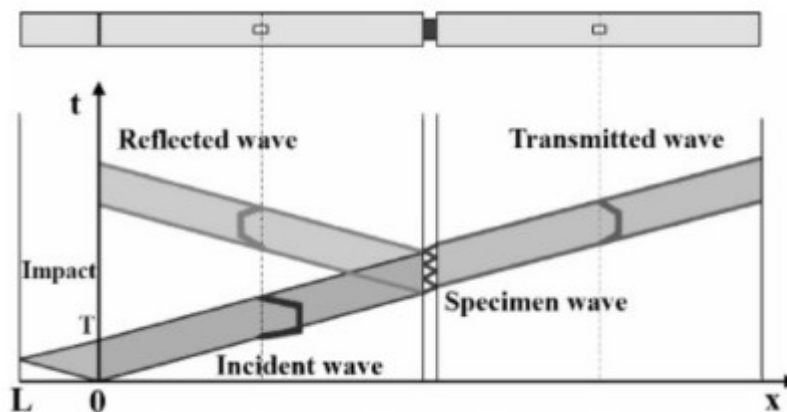


Figura 2.9: Diagrama de propagação das ondas [13]

Estas ondas percorrem as barras à velocidade de propagação elástica do material das mesmas que é dada pela seguinte fórmula:

$$c_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.10)$$

O tempo do pulso que gera a onda elástica é dado, em função do comprimento do projétil (L_{st}) por [14]:

$$t_{pulse} = \frac{2L_{st}}{c_{st}} \quad (2.11)$$

em que c_{st} corresponde à velocidade do som no projétil.

Barra de Hopkinson no Instituto Superior Técnico

Foram desenvolvidos no Instituto Superior Técnico e, ao longo dos anos melhorados, equipamentos similares a e baseados na barra de Hopkinson cujos princípios e funcionamento e até muitos componentes servem de base para o presente trabalho. Pedro Barbosa (2005) foi o primeiro a montar um protótipo deste equipamento no IST, sendo que o sistema de propulsão do projétil consistia num atuador eletromagnético de bobine simples. No ano seguinte, João Palma (2006) melhorou o conceito do atuador passando a ser utilizadas 5 bobines de disparo sequencial. Pedro Monteiro (2007) refez a montagem do aparato de João Palma (2006), utilizando apenas 3 bobines e utilizando o mesmo na avaliação de várias proteções balísticas. Neste caso, o equipamento consistia numa simplificação da barra de Hopkinson; a barra incidente era em simultâneo o projétil. Ainda que o aparelho revelasse uma grande versatilidade no tipo de amostras que podiam ser utilizadas foi observado um desempenho reduzido.

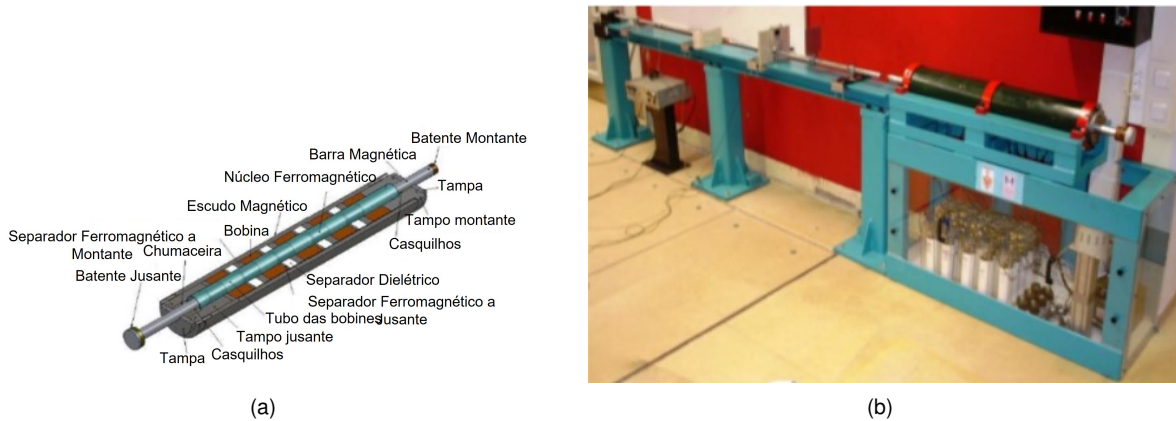


Figura 2.10: Trabalho desenvolvido por Pinto (2009) [12]: (a) Vista em corte do atuador; (b) Barra de Hopkinson e atuador desenvolvidos

Num estudo semelhante, Pinto (2009) voltou a refazer o equipamento com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de algumas proteções balísticas. O atuador eletromagnético voltou a ser melhorado, voltaram a ser utilizadas as 5 bobines de disparo sequencial e foi construída uma estrutura separada para a montagem do atuador, visível na figura 2.10 (b), esta estrutura serviu de base para um dos componentes introduzidos no presente trabalho. Voltou também a ser utilizado um esquema similar à barra de Hopkinson tradicional, em que existe uma barra incidente, diferente da barra projétil, e uma barra transmissora. Estas barras foram montadas na estrutura constituída por uma viga em I suportada por 3 pilares que foi alvo de alterações no trabalho de Saragoça (2020) e que foi também usada no presente trabalho, bem como o atuador eletromagnético observados na figura 2.10

Gregório (2017) realizou ensaios de compressão a elevada taxa de deformação no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3); para este efeito desenvolveu um canhão pneumático, que é também utilizado no presente trabalho, que acelera projéteis a alta velocidade, colidindo com a ferramenta de compressão desenvolvida pelo mesmo, tal como esquematizado na figura 2.11. Neste caso o equipamento tem somente algumas semelhanças ao modelo da barra de Hopkinson (SHPB), adotando o mesmo conceito da colisão do projétil com a barra incidente e, por sua vez, a barra incidente

comprime o provete.

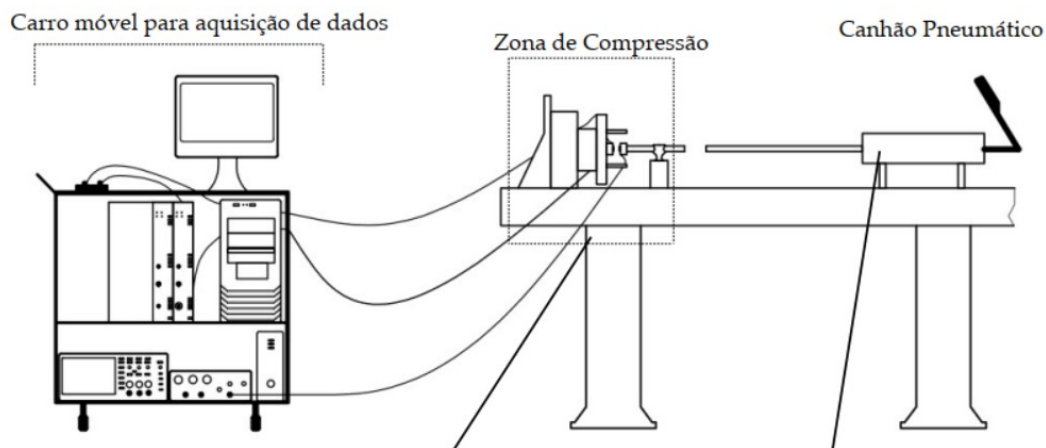


Figura 2.11: Aparato experimental desenvolvido por Gregório (2017) [16]

Finalmente, Saragoça (2020) introduziu grandes alterações no sentido de desenvolver o aparato como um novo conceito de máquina de ensaios de impacto a alta velocidade, introduzindo também a capacidade de realizar ensaios a alta temperatura. O resultado final do trabalho mencionado foi o ponto de partida para o presente trabalho daí este ser descrito mais detalhadamente.

O seu objetivo foi o desenvolvimento de uma máquina de ensaios de compressão uniaxial em condições de elevada velocidade de deformação e alta ou baixa temperatura, possibilitando a obtenção das curvas tensão-extensão características dos materiais e a parametrização dos modelos constitutivos que os descrevem. [15]

A implementação foi baseada numa barra de Hopkinson, no entanto, contrariamente a este modelo, apenas a barra transmissora foi instrumentada com uma ponte de Wheatstone de extensómetros e a altura do provete para cada instante da compressão é registada com recurso a variados sensores de deslocamento, assemelhando-se assim a um equipamento de ensaios de compressão uniaxial convencional. [15]

O resultado final do trabalho mencionado, apresentado na figura 2.12 foi o ponto de partida para o presente trabalho, por esta razão este é descrito mais detalhadamente na secção.

Estrutura

Como descrito em [15], a máquina é composta por uma estrutura base constituída por um perfil em I soldado a 3 pilares fixos ao chão do laboratório e 2 perfis em U ligados através de cordões de soldadura a meia altura dos pilares, de forma a criar um anel estrutural que não sofra deformação elástica quando solicitado com os carregamentos necessários para a execução de ensaios de compressão. Esta estrutura pode ser observada na Figura 2.13 (a).

Acoplados a esta estrutura base estão os componentes que constituem a chamada estrutura de suporte, estes encontram-se fixos à estrutura base. Na Figura 2.13 (b) diferenciam-se duas zonas: Zona de Ensaio onde acontece a compressão do provete e a Zona de Dissipação onde é dissipada a energia fornecida às barras.

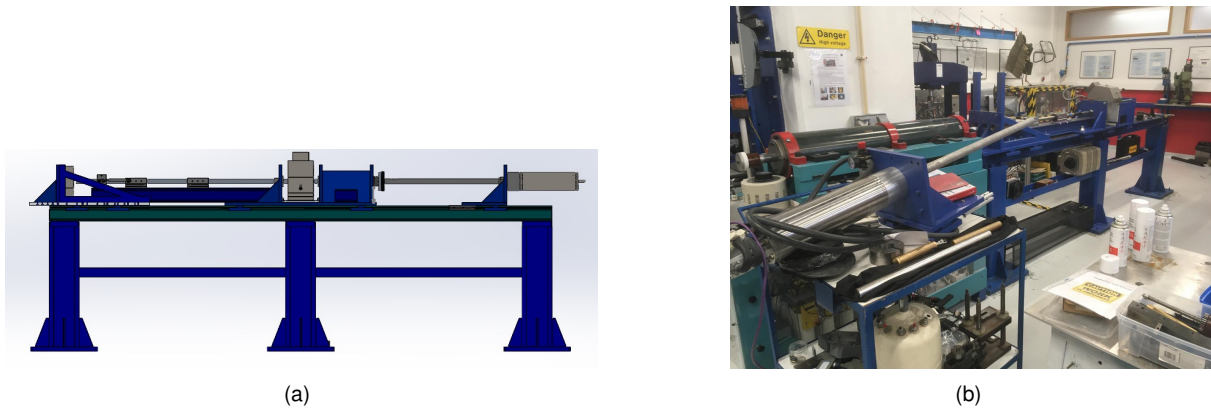


Figura 2.12: Trabalho desenvolvido por Saragoça (2020): (a) Modelo CAD do aparato; (b) Estado inicial dos componentes

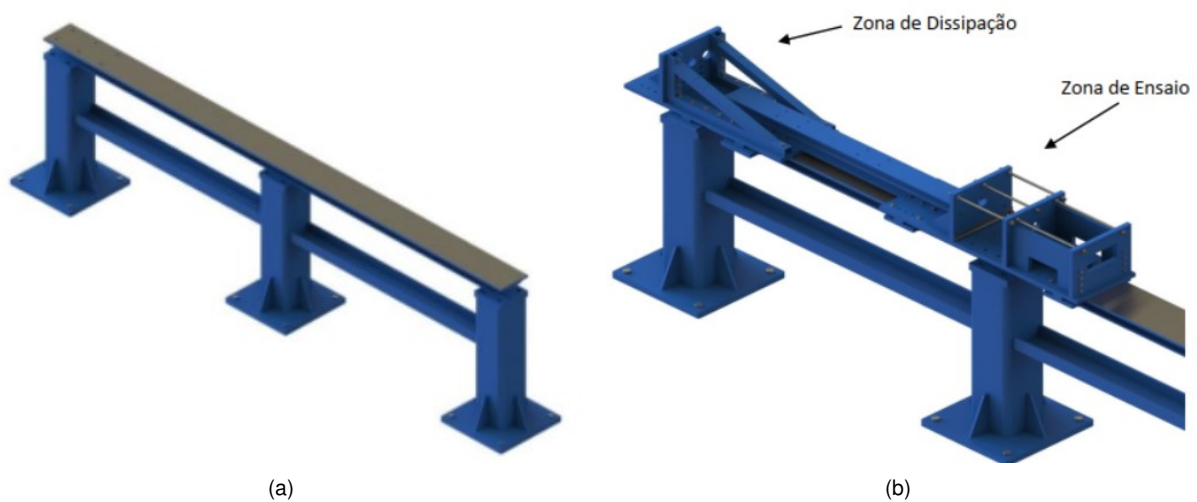


Figura 2.13: Componentes estruturais da máquina [15]: (a) Estrutura base; (b) Estrutura Suporte

Os componentes referidos acima foram fabricados em aço AISI 1045 no formato de placas de 20 mm. Na zona de ensaios adicionaram-se varões roscados apertados com porcas de forma a induzirem um carregamento à tração e diminuir assim a flexão das estruturas em C. Na zona de dissipação foram adicionados esquadros e placas triangulares também para reforçar toda a estrutura e diminuir a deformação elástica da mesma.

Estas duas zonas são conectadas através de um perfil em I aparafusado às placas que se encontram fixas à mesa superior da viga em I da estrutura base. Esta viga serve também de apoio à instalação dos rolamentos lineares da barra transmissora.

Barras Incidente e Transmissora

As barras incidentes e transmissora tratam-se de barras com 30mm de diâmetro fabricadas em liga de Titânio Ti6Al4V com 500mm e 1500mm de comprimento, respetivamente. Nas extremidades das barras onde acontecem os ensaios, foram introduzidas hastes de compressão fabricadas em Carboneto de Tungsténio com matriz de Cobalto com 18mm de diâmetro.

Existem dois conjuntos de barras, apresentados na figura 2.14: um utilizado em ensaios à temperatura ambiente em que as hastes de compressão têm um comprimento saliente de 10mm (Fig. 2.14 (a)) e outro em que as hastes de compressão têm um comprimento saliente de 80mm (Fig. 2.14 (b)) de forma a permitir a instalação do forno elétrico na zona de ensaios. Este segundo conjunto deve apenas ser utilizado para ensaios a alta temperatura devido à esbelteza dos carbonetos que pode levar à fratura precoce destes componentes.



Figura 2.14: Extremidades das barras transmissoras com hastes de compressão [15]: (a) Hastes Curtas; (b) Hastes Longas

Ao contrário de uma barra de Hopkinson tradicional, apenas a barra transmissora está instrumentada com extensómetros para registar a força aplicada, recorrendo a outros tipos de sensores apresentados em baixo regista-se a altura instantânea do provete, analogamente a um equipamento convencional de ensaios de compressão uniaxial.

O comprimento das barras prova ser uma limitação uma vez que se sabe da revisão bibliográfica que as barras de Hopkinson são tanto mais fiáveis e os seus resultados de mais fácil interpretação quanto maior forem as barras incidentes e transmissora. No caso do aparato alvo do presente trabalho isto é especialmente verdade para a barra transmissora pois apenas esta se encontra instrumentada.

Devido a constrangimentos de espaço e à montagem do atuador pneumático, cerca de 50% do espaço existente na viga da estrutura base era "desperdiçado" com a instalação do atuador na configuração de ensaios de alta velocidade (Fig. 2.16 (b)) e espaço vazio na configuração para ensaios Quase-Estáticos (Fig. 2.16 (a)), espaço este que seria muito valioso se permitisse a extensão da barra transmissora ou mesmo a introdução de uma nova barra.

Dissipador de energia

Para a realização dos ensaios de compressão desejados é necessário fornecer uma grande quantidade de energia às barras, energia esta que necessita de ser dissipada na zona de dissipação por forma a não danificar nenhum componente bem como para reduzir o ruído detetados nos extensómetros causado pela onda refletida na interface da barra transmissora.

Para este efeito foi introduzido por Saragoça um bloco de aço com massa de 25kg do qual esperava-se que absorve-se grande parte da energia da barra transmitida no fim do ensaio. Foi também introduzido um sistema composto por dois amortecedores hidráulicos de 80 N reduzindo a intensidade do ressalto da barra quando embate no bloco dissipador. [15]

Estes sistemas podem ser observados na figura 2.15.

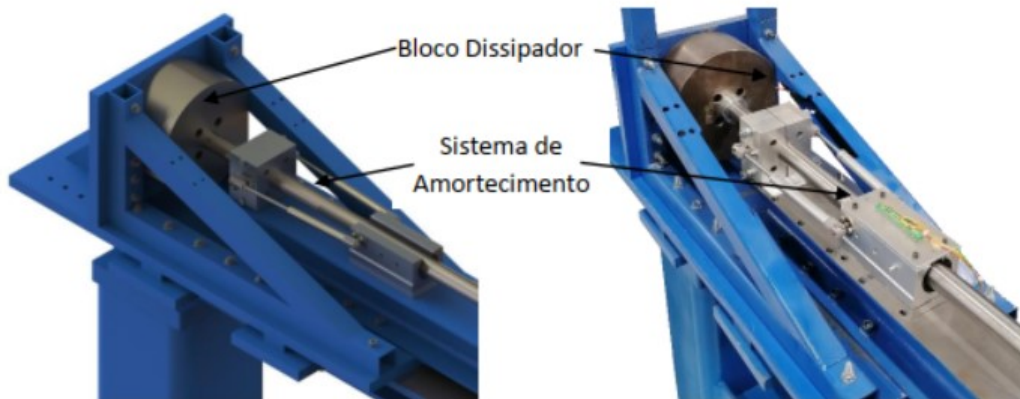


Figura 2.15: Bloco dissipador e sistema de amortecimento [15]

Atuadores

Tendo em conta as diferentes velocidades de deformação que se pretende obter no ensaios com este aparato, é necessário recorrer a diferentes atuadores consoante a velocidade pretendida. Os atuadores utilizados são descritos nesta secção.

As configurações com os diferentes atuadores, resultados do trabalho apresentado em [15] podem ser observadas na figura 2.16.

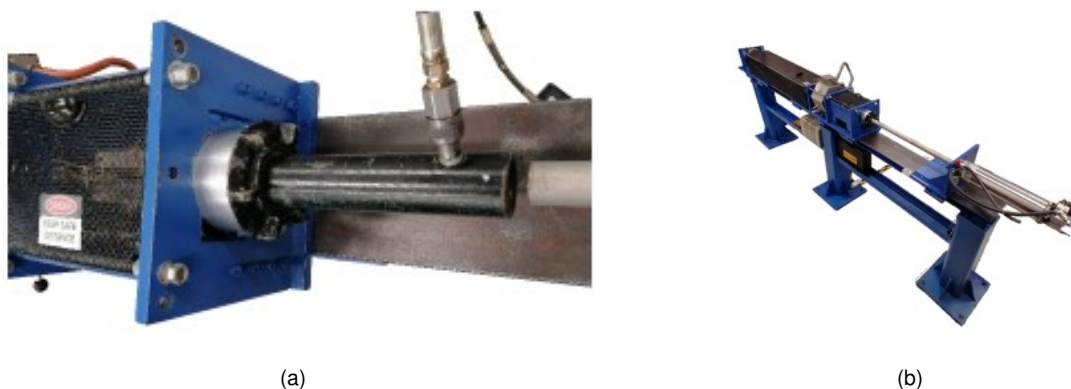


Figura 2.16: Aparato experimental com os diferentes atuadores [15]: (a) Configuração com atuador hidráulico; (b) Configuração com atuador pneumático

Atuador Hidráulico

Para a realização de ensaios de compressão em regime quase-estático é utilizado um atuador hidráulico retirado e adaptado de uma prensa hidráulica (Fig 2.16 (a)). Este atuador é acionado através de uma bomba hidro-pneumática de pedal que permite regular a velocidade de funcionamento do atuador através de um regulador de pressão do ar comprimido.

Atuador Pneumático

Para ensaios com altas velocidades de deformação, ou seja, acima de $1500s^{-1}$ é a vez do atuador pneumático (Fig. 2.16 (b)). Este atuador é composto por uma câmara de pressão, um cano que

mantém o projétil guiado e uma válvula de escape que o acciona. O ar pressurizado dentro da câmara, aquando da abertura da válvula, escoia através do tubo devido ao diferencial de pressão com a atmosfera empurrando o projétil impulsionando-o contra a barra incidente a velocidades elevadas. A energia disponível para empurrar o projétil, uma vez que o volume da câmara é constante, é dependente apenas da pressão do ar no seu interior que é regulada através de um regulador de pressão instalado no sistema de alimentação de ar comprimido. Esta energia transforma-se em energia cinética do projétil que pode ser dada, em função da sua massa e velocidade através da seguinte equação:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.12)$$

Retira-se diretamente da equação (2.12) que a velocidade do projétil diminui com o aumento da sua massa e, por isso, dispõem-se de vários projéteis desde as 250g até as 3000g capazes de, para aproximadamente a mesma energia, atingir a barra incidente com velocidades diferentes e, por consequência, conseguir velocidades de deformação diferentes. Os projéteis consistem em barras fabricadas igualmente com diâmetro de 30mm e diferentes comprimentos para as diferentes massas, podem ser observados na figura 2.17.



Figura 2.17: Projéteis disponíveis [15]

Atuador Eletromagnético

Aquando da utilização da máquina verificou-se uma lacuna na gama de velocidades de deformação capazes de se obter utilizando os atuadores apresentados, nomeadamente na gama de velocidades de deformação médias ($1s^{-1} < \dot{\epsilon} < 1000s^{-1}$). No entanto dispõem-se no laboratório de um atuador capaz de reproduzir estas condições, o atuador eletromagnético, desenvolvido por Pinto (2009) como referido na secção 2.4.1. Este é capaz de conferir à barra incidente valores de energia elevados e suficientes para a deformação plástica do material em estudo, no entanto com uma velocidade menor da barra projétil em relação ao atuador pneumático, capacitando assim a execução de ensaios de compressão bem sucedidos com menores velocidades de deformação.

A configuração inicial da máquina aqui a ser descrita, no entanto, não permite a utilização deste atuador uma vez que este se encontra montado numa bancada fixa ao chão do laboratório, e do lado contrário da barra incidente do aparato. A máquina encontrava-se nesta disposição pois esta era a única

hipótese até então de utilizar o atuador pneumático recorrendo a uma estrutura instalada diretamente na viga de suporte da máquina de ensaios, ou seja, na bancada experimental.

Capítulo 3

Desenvolvimento Experimental

O presente capítulo apresenta os passos desenvolvidos ao longo do processo de reformulação da máquina de ensaios a alta velocidade.

É feita uma descrição das soluções implementadas. Segue-se a apresentação dos sensores desenvolvidos e instalados por forma a, não só adquirir e registar dados experimentais de ensaios mecânicos, bem como o estudo das alterações efetuadas no presente trabalho.

3.1 Instalação atual

No diagrama da figura 3.1 pretende-se esquematizar a instalação atual e estabelecer um ponto de partida para a análise das soluções possíveis a implementar e possíveis vantagens a nível mecânico e a nível de reflexão da onda de deformação elástica.

3.2 Soluções estudadas

Com o intuito de reduzir o ruído causado pela reflexão da onda de pressão consideraram-se duas hipóteses de alterações a fazer à barra transmissora e sistema de amortecimento do aparato.

3.2.1 Extensão da barra transmissora

Considerou-se a introdução de uma barra transmissora mais comprida, com $2,6m$, como pode ser observado no diagrama da figura 3.2 esta instalação aumentaria em 2 vezes a distância percorrida pela onda refletida até ser captada pela célula de carga atrasando assim a detecção de ruído pela célula de carga de uma maneira significativa.

No entanto, esta implementação apresenta diversas desvantagens, no sentido em que seria necessário fabricar novas barras transmissoras de dois tipos, para alta e baixa temperatura como apresentado anteriormente e o próprio processo de fabrico apresenta diversas dificuldades.

A mudança de barra a utilizar, de baixa temperatura para alta temperatura, também se tornaria um processo extremamente complicado.

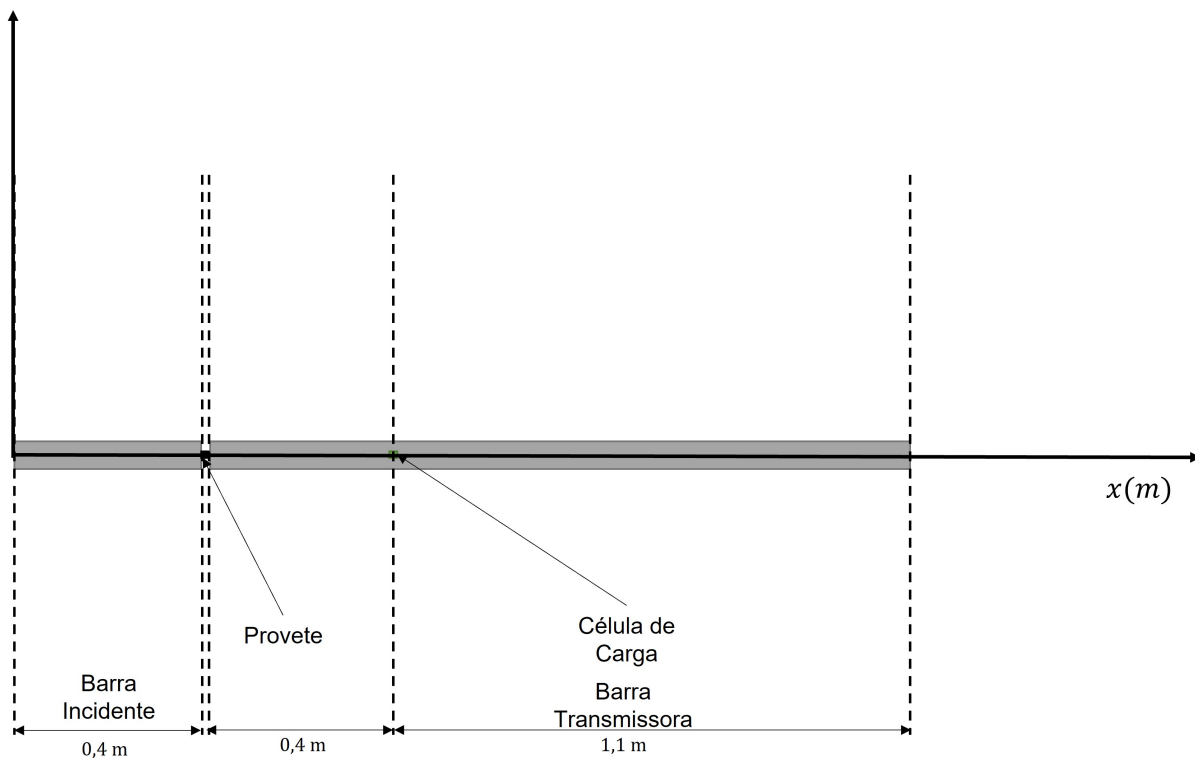


Figura 3.1: Diagrama representativo da instalação de Saragoça (2020)

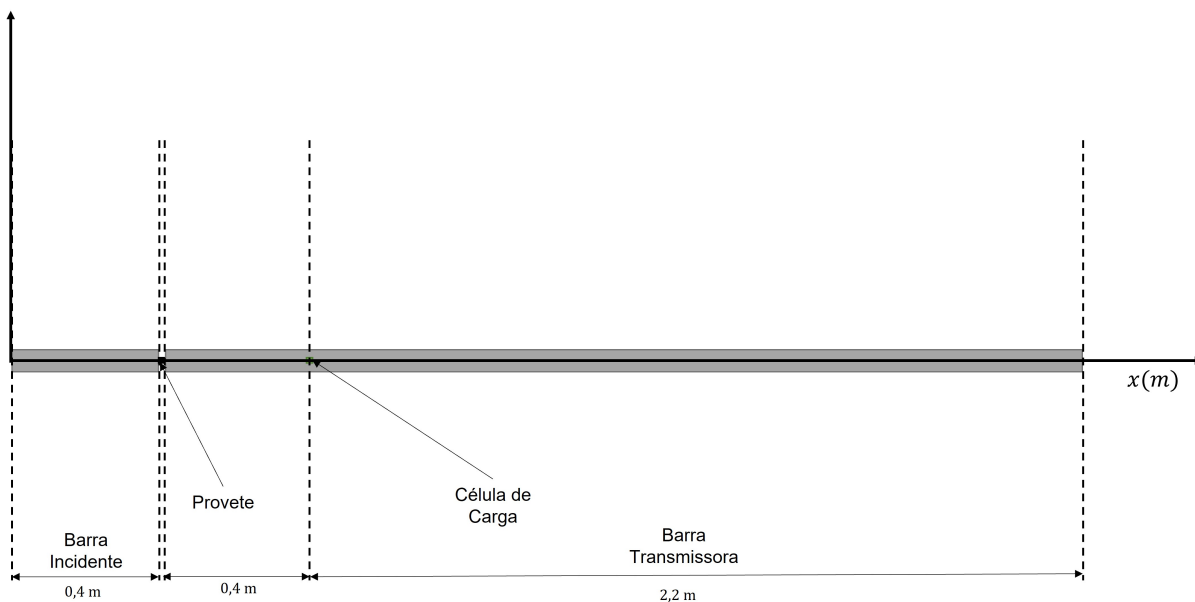


Figura 3.2: Diagrama representativo da solução com extensão da barra transmissora

Com estas desvantagens em mente, considerou-se uma opção alternativa, que mantivesse a versatilidade e facilidade de operação do aparato mas que provasse ser um bom dissipador de ruído

3.2.2 Introdução da barra dissipadora

A opção considerada para suprir esta necessidade de reduzir o ruído, sem dificultar demasiado o fabrico e operação do aparato é apresentada no diagrama da figura 3.3

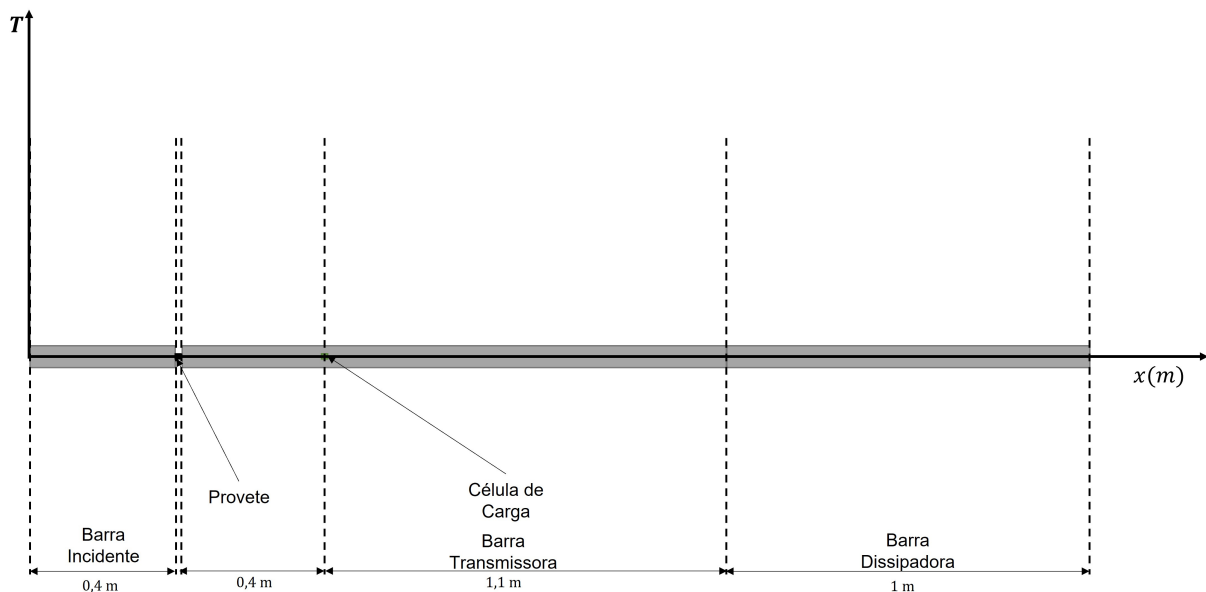


Figura 3.3: Diagrama representativo da solução com barra dissipadora

Esta solução permitia uma utilização mais versátil do aparato, utilizando as barras já existentes, com a introdução de uma nova barra, denominada de barra dissipadora, cujo propósito seria o de receber a onda que seria transmitida pela barra transmissora e dissipar esta onda.

Com esta solução, apesar de não se eliminar a reflexão da onda na interface da barra transmissora completamente espera-se conseguir reduzi-la ao máximo, transmitindo a onda para a barra dissipadora.

O processo de fabrico, bem como o manuseamento do aparato seria consideravelmente mais fácil.

Considerando as vantagens e desvantagens das duas opções apresentadas, optou-se por implementar a solução descrita nesta secção.

3.3 Soluções Implementadas

Com vista a solucionar os constrangimentos descritos acima, apresentam-se agora as soluções projetadas e desenvolvidas pelo autor ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

3.3.1 Carro móvel de atuadores

Optou-se numa fase inicial por desenvolver um carro móvel para o armazenamento, montagem e fácil utilização dos atuadores supra-mencionados.

Reutilizou-se a estrutura que fixava o atuador eletromagnético à sua bancada e introduziram-se algumas alterações, a estrutura mencionada visível na figura 3.4 (a), foi cortada de forma a ser possível

a montagem do atuador pneumático, nesta foram também montados rolamentos lineares compatíveis com guias lineares que foram instaladas na bancada. O modelo CAD, desenvolvido para apoiar o fabrico pode ser observado na figura 3.4 (b).

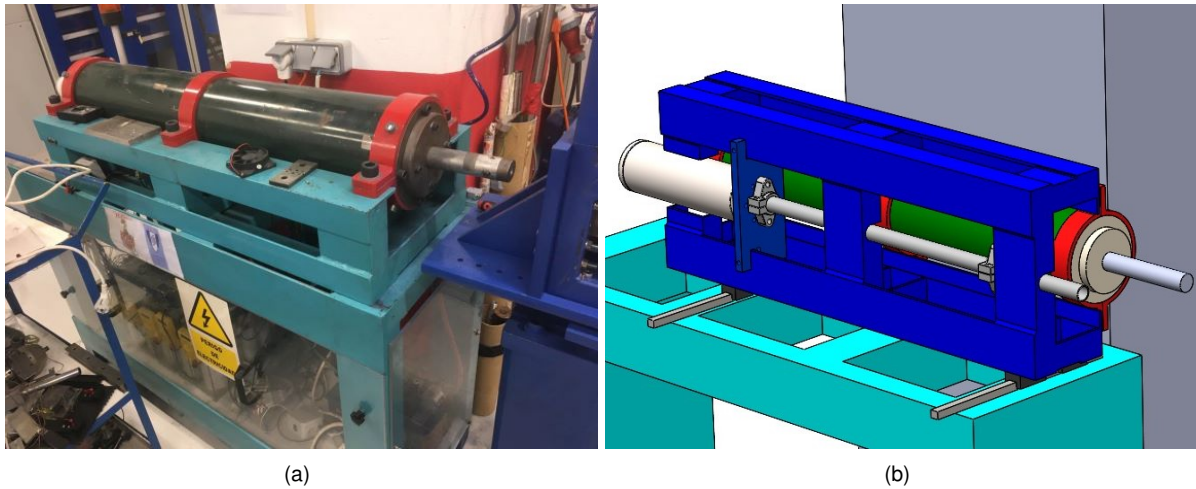


Figura 3.4: Bancada do atuador eletromagnético: (a) Estrutura do atuador eletromagnético; (b) Modelo CAD da montagem

Durante esta montagem foi necessário especial cuidado com o alinhamento das guias e rolamentos, para assegurar o alinhamento das barras projéteis com a barra incidente.

Um fator limitante desta instalação é o curso do carro móvel, tendo em conta que a bancada se encontra fixa ao chão do laboratório e encostada a um pilar estrutural do mesmo. Com esta limitação, o projeto da estrutura a ser fabricada foi feito com especial cuidado para que os atuadores que acabam por ser nela instalados fiquem o mais próximos possível. Neste sentido, a estrutura existente foi cortada de forma a acomodar o tanque de pressão e o cano do atuador pneumático reduzindo ao máximo a saliência do mesmo.

Devido também a esta limitação de espaço foi necessário projetar a fixação do atuador pneumático à estrutura de forma flexível. Ou seja, além do movimento no sentido horizontal, o atuador pneumático é facilmente afastado no sentido axial por forma a permitir a montagem do atuador hidráulico que dá ao aparato a capacidade de realizar ensaios quasi-estáticos.

Na figura 3.5 observa-se a instalação mencionada nas suas duas configurações: (a) configuração em que pode ser selecionado o atuador pneumático (velocidades de deformação elevadas $\dot{\epsilon} \geq 1000s^{-1}$) ou o atuador eletromagnético (velocidades de deformação médias $10s^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 1000s^{-1}$); (b) configuração para ensaios quasi-estáticos ($\dot{\epsilon} \sim 0, 1s^{-1}$).

3.3.2 Barra Dissipadora

Com o novo carro móvel para a instalação do atuador pneumático torna-se possível a extensão da viga de suporte da barra, o que permitiria a utilização de uma barra transmissora mais comprida.

Optou-se, no entanto, pela introdução de uma nova barra, denominada de barra dissipadora, em que o princípio seria o de transferir a onda de pressão da barra transmissora para esta barra, esperando

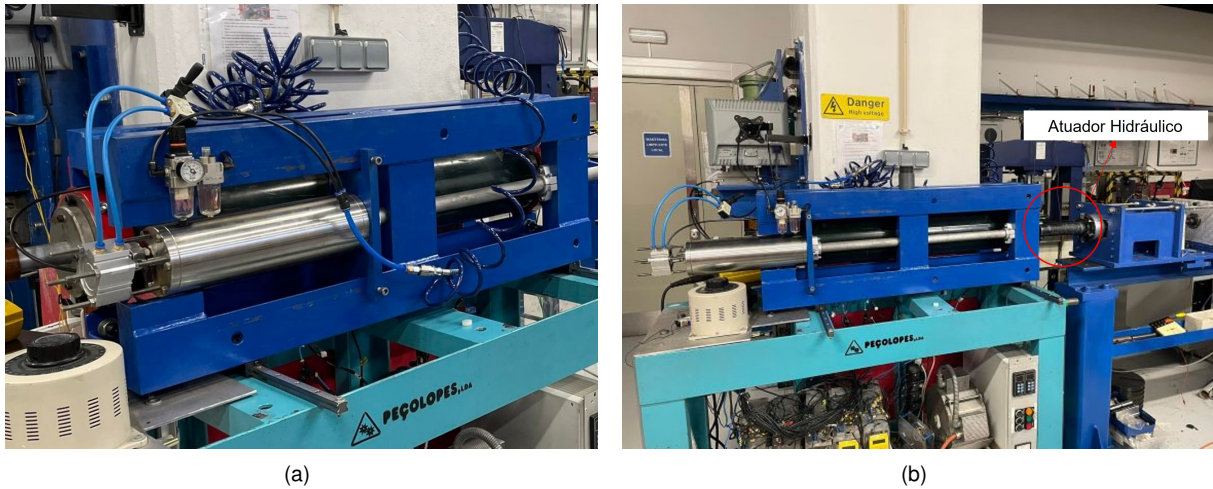


Figura 3.5: Carro móvel de atuadores: (a) Configuração para alta e média velocidade; (b) Configuração para baixa velocidade

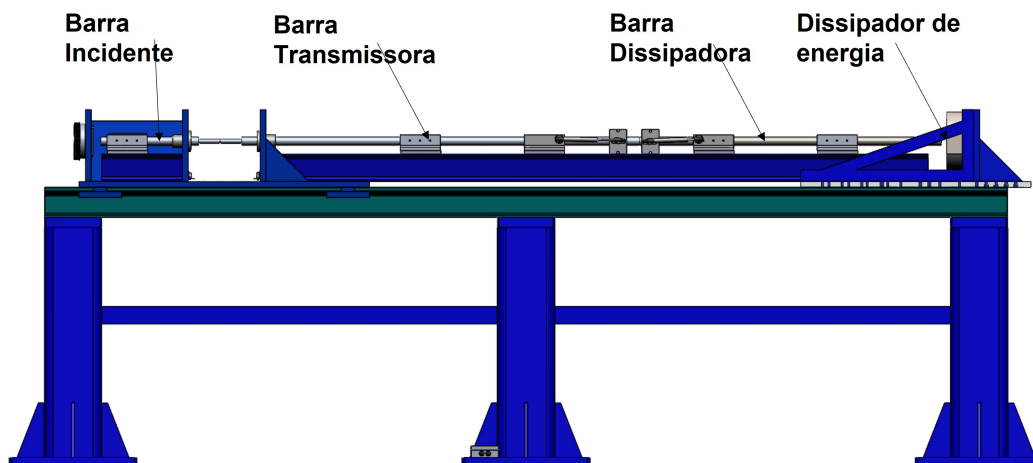


Figura 3.6: Projeto CAD do aparato a desenvolver

uma dissipação mais rápida da onda e possivelmente eliminando o ruído captado pela célula de carga. A configuração final da máquina, projetada em CAD pode ser observada na figura 3.6.

Esta nova barra, igualmente com 30mm de diâmetro e 950mm de comprimento foi fabricada na mesma liga de titânio das restantes (Fig. 3.7 (b)).

Para a montagem desta nova barra foi também necessário o fabrico de uma nova viga de suporte mais comprida (Fig. 3.7 (a)) e a introdução de dois novos rolamentos lineares iguais aos utilizados anteriormente.

Ao realizar ensaios preliminares e com recurso a imagens em câmara lenta, observou-se que a nova barra não funcionava como era desejado pois, com o sistema de amortecimento antigo, observável na uma vez que esta se encontrava encostada à massa dissipadora em pré-carga, logo após o impacto esta acabava por funcionar como uma mola, deformando elasticamente e empurrando a barra transmissora para trás. Este fenómeno adicionava vibrações indesejadas e piorava o problema que se pretendia resolver da reflexão da onda captada pela célula de carga.



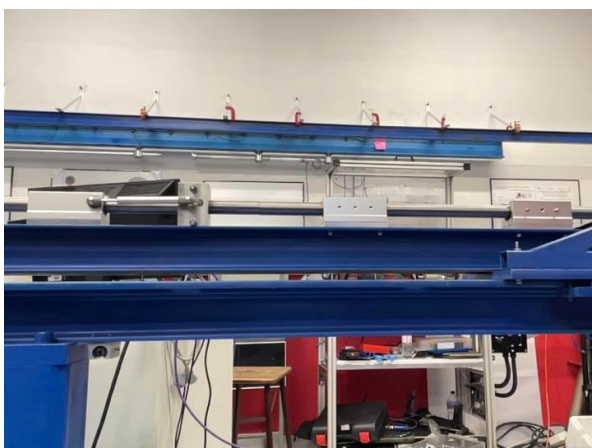
(a)



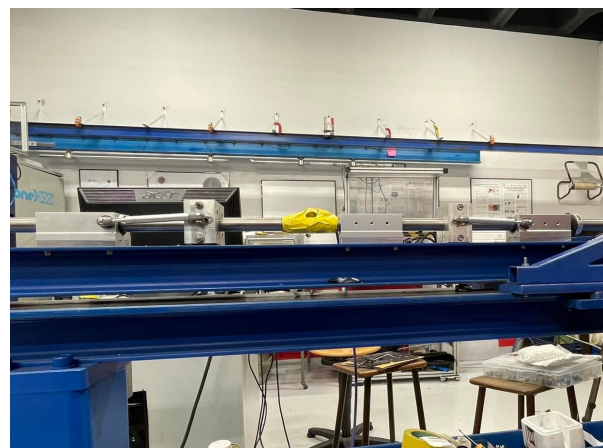
(b)

Figura 3.7: Processos de fabrico dos componentes no Núcleo de Oficinas (NOF): (a) Fresagem da viga suporte; (b) Torneamento da Barra Dissipadora

Para combater este efeito optou-se por introduzir um novo sistema de amortecimento, similar ao já existente e apresentado anteriormente a atuar em sentido contrário como pode ser verificado na figura 3.8 em que se observa o sistema de amortecimento original (Fig. 3.8 (a)) e o sistema desenvolvido pelo autor (Fig. 3.8 (b)).



(a)



(b)

Figura 3.8: Interface das barras transmissora e dissipadora: (a) Sistema de amortecimento antigo; (b) Sistema de amortecimento desenvolvido

Com esta adição, as barras podem ser colocadas "em vazio", em pré-carga uma contra a outra e sem

estarem em pré-carga na massa dissipadora no momento do impacto, o que permitiria que as barras funcionassem como uma só barra, não havendo a reflexão da onda na interface e posteriormente, com o afastamento das barras causado pela colisão, os primeiros sinais de onda refletida a serem captados seriam muito tempo depois de estar concluída a compressão do provete. Isto permitiria a obtenção de um sinal para a força aplicada muito mais claro e sem interferências do que o obtido anteriormente.

Recorrendo novamente a imagens em câmara lenta, observou-se que, como esperado, logo após a energia ser transmitida da barra transmissora para a barra dissipadora, estas afastam-se durante uma fracção de segundos, tempo este que espera-se ser suficiente para a interrupção ou atraso da onda refletida para que esta não comprometa os dados adquiridos.

Com o intuito de verificar este fenómeno e se, de facto, o sinal captado pela célula de carga tornou-se mais nítido, instrumentou-se a barra dissipadora com uma célula de carga semelhante à instalada na barra transmissora por forma a comparar os sinais obtidos.

A instalação deste sensor é descrita com mais detalhe na secção 3.5 e a sua posição pode ser observada na figura 3.8 (b), na interface entre as duas barras.

3.4 Componentes Auxiliares

3.4.1 Forno Elétrico

O aparato desenvolvido permite a execução de ensaios a altas temperaturas, para isto, a zona de ensaios é capaz de acomodar um forno elétrico quando necessário. Este forno consiste numa câmara refratária onde se encontram as resistências elétricas e um furo passante nas laterais que permitem a passagem das barras do aparato.

No trabalho desenvolvido anteriormente [15] desenvolveu-se um circuito elétrico customizado para a utilização e controlo do forno elétrico, essa utilização implicava um especial cuidado com a tensão providenciada ao forno pelo transformador variável e a utilização de outros equipamentos para monitorização e manutenção da temperatura desejada. Eram utilizadas canetas indicadoras de temperatura, uma sonda termopar e uma pistola pirométrica, este circuito de controlo com muita intervenção do operador retirava alguns graus de confiança às verdadeiras condições de temperatura dos ensaios realizados.

Para colmatar esta limitação, no presente trabalho optou-se por reparar e adaptar o controlador comercial do forno de forma a que seja possível implementá-lo no aparato, facilitando todo o processo de utilização do forno. Na bancada do carro móvel de atuadores foi construída uma espécie de prateleira e gaveta para acomodar o controlador e o forno quando este não está a ser utilizado, durante os ensaios à temperatura ambiente. Esta instalação pode ser observada na figura 3.9.

Desta forma, a tensão fornecida ao forno para atingir e manter a temperatura do forno elétrico apenas necessita do utilizador que selecione a temperatura desejada na interface do controlador e instale a sonda térmica no interior do forno para fechar o ciclo de controlo com feedback negativo.

Esta melhoria elimina uma série de procedimentos que introduzia erros e demoras aquando da realização de ensaios de compressão a altas temperaturas.



Figura 3.9: Forno elétrico e respetivo controlador

3.5 Aquisição de Dados

Os componentes mecânicos descritos anteriormente de nada servem se deles não for possível adquirir dados importantes para o estudo dos materiais. Neste sentido foram implementados um conjunto de sensores e equipamentos que permitem a captação das grandezas físicas necessárias para que se consiga retirar dos ensaios de compressão resultados comparáveis com os conhecidos e interpretáveis. Para um ensaio de compressão uniaxial são estas grandezas a altura instantânea do provete e a força aplicada ao mesmo. Foram instalados então sensores de deslocamento de dois tipos e células de carga descritos abaixo.

3.5.1 Sensores de Deslocamento

O método de medição da altura instantânea do provete durante o ensaio, ou seja, a distância entre pratos de compressão, varia consoante o conjunto de barras incidente e transmissora utilizado. Nos ensaios à temperatura ambiente utilizou-se um sensor indutivo, já nos ensaios a temperaturas elevadas, dados os constrangimentos impostos pelo forno elétrico, foi utilizado um sistema de potenciômetros lineares.

Sensores Indutivos

Os sensores indutivos desenvolvidos por Santos (2019) baseiam-se no princípio da indução eletromagnética entre bobines. É montado um suporte em plástico na extremidade da barra transmissora e copo com o mesmo formato na extremidade da barra incidente. A bobine, excitada por um gerador de sinais, gera um campo eletromagnético que é afetado pelo copo de alumínio consoante a distância entre os pratos. Desta forma, obtém-se um sinal diferente à medida que se afastam ou aproximam os pratos. Uma vez que a placa de aquisição de dados apenas lê sinais em DC, é necessário retificar o sinal AC proveniente da bobine.

O retificador consiste numa ponte de 4 díodos semicondutores em silício. Em trabalhos anteriores adicionou-se um condensador ao circuito de forma a uniformizar o sinal, no entanto, para o presente trabalho, considerou-se que este contribuía muito pouco para a estabilidade do sinal e o atraso temporal que causava era prejudicial no sentido em que dificultava e multiplicava o tempo dispendido no tratamento de dados, além de, em ensaios a velocidades elevadas poder retirar a segurança dos resultados obtidos. Observou-se também que a utilização de placas de PCB para as conexões do circuito causava algumas perturbações no sinal.

Desenvolveu-se então um novo retificador, composto apenas pela ponte de díodos ligada diretamente a conectores BNC dentro de uma caixa de zinco fechada, capaz de isolar ao máximo o circuito de perturbações externas. Na figura 3.10 apresenta-se o circuito desenvolvido bem como instalação que permitiu melhorar significativamente o sinal obtido.

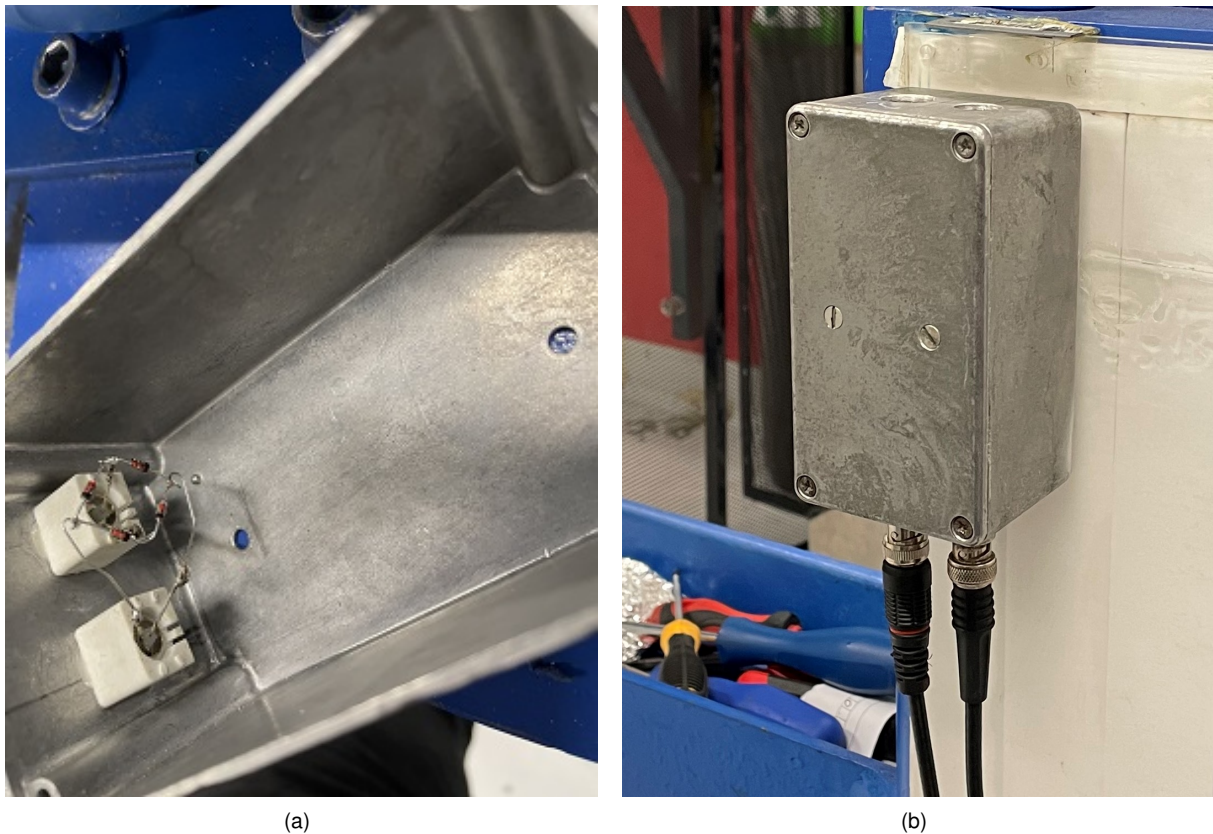


Figura 3.10: Implementação do retificador desenvolvido: (a) Ponte de Díodos; (b) Caixa Isoladora

Estes sensores, apesar de serem de fácil utilização e alta precisão, têm que ser substituídos para os ensaios a alta temperatura pois a sua instalação é incompatível com a instalação do forno, neste caso utilizam-se os potenciômetros lineares.

Potenciômetros Lineares

Os potenciômetros lineares, apresentados na figura são montados diretamente nos rolamentos lineares utilizando a furação existente no seu topo. Os potenciômetros estão aparafusados a uma placa de alumínio e esta placa é a aparafusada aos rolamentos de forma a que a patilha dos potenciômetros entre numa caixa previamente aberta no conjunto de barras destinado a ser usado para os ensaios a alta temperatura, sendo este o único conjunto de barras compatível com este tipo de sensores.

Os sensores são alimentados com uma fonte de tensão de 5V, o movimento da patilha altera o seu valor de resistência, alterando assim a tensão à saída que é depois adquirida.

Utilizando amostras calibradas entre os pratos de compressão e entre a barra transmissora e dissipadora, obtém-se a curva de calibração dos potenciômetros que transforma o valor lido em V para mm .

A gama de calibração tem em consideração a altura inicial e final dos provetes utilizados regularmente nos ensaios, antes e após compressão, eliminando procedimentos de extrapolação das curvas de calibração que possam comprometer a qualidade dos dados experimentais registados.

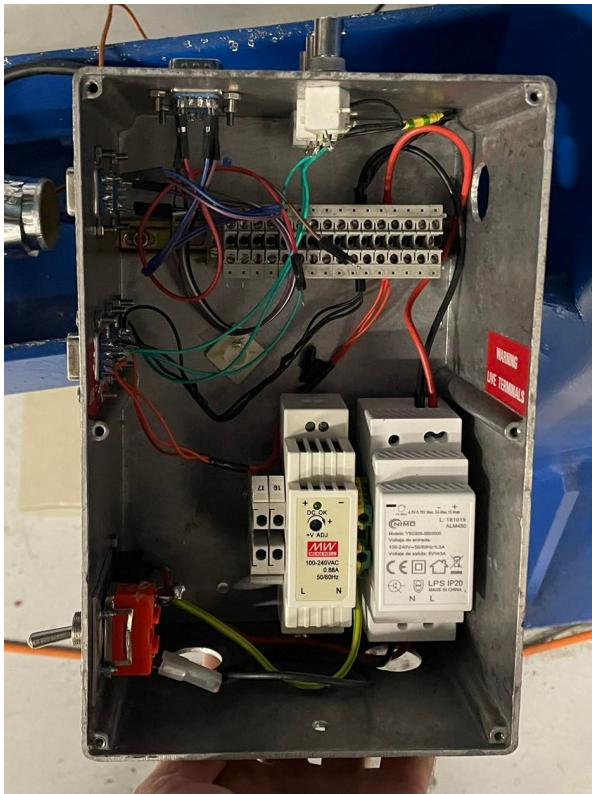
De forma a simplificar o processo de conexão e aquisição de dados, desenvolveu-se uma caixa de aquisição de dados onde foram instalados os conectores e a fonte de tensão, componentes necessários à correta utilização dos sensores. Instalaram-se também conectores DB diretamente nas placas suporte dos potenciômetros de forma a evitar danos indesejados aos cabos durante a sua utilização.

O circuito desenvolvido no interior da caixa, que pode ser observado na figura 3.11 (a), facilita a organização dos cabos necessários para a aquisição de dados e, no universo dos sinais, funciona como o elo de ligação entre o aparato e a placa de aquisição de dados. Todos os sinais lidos pelos sensores são direcionados para as entradas da caixa (lado esquerdo da figura apresentada) bem como a potência necessária para alimentar os potenciômetros e posteriormente direcionados para a placa de aquisição através dos canais de saída da mesma (face superior na figura apresentada). A instalação dos potenciômetros na barra é apresentada na figura 3.11 (b).

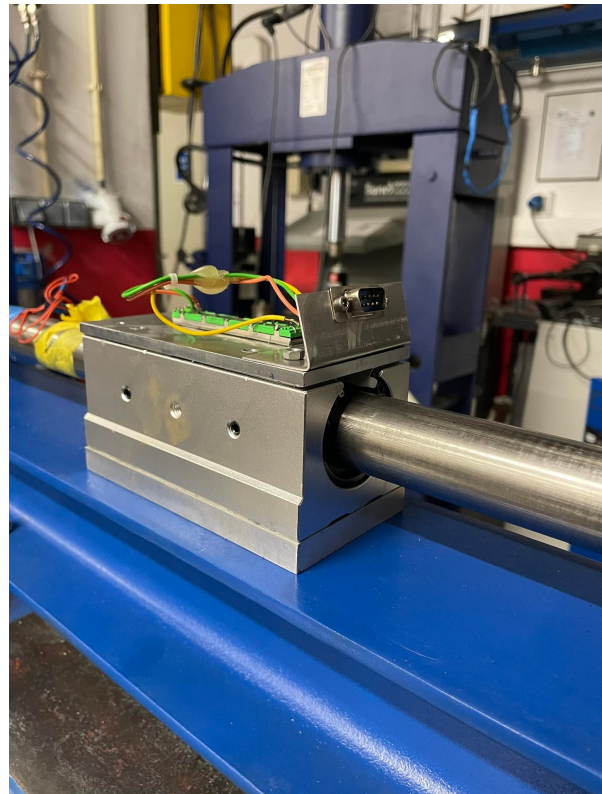
3.5.2 Célula de carga

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

Devido à elevada sensibilidade dos extensómetros, a sua aplicação tem que ser extremamente cuidada. Numa fase inicial prepara-se a superfície da barra, passando uma lixa fina e retirando a gordura



(a)



(b)

Figura 3.11: Sistema de aquisição de dados: (a) Caixa de aquisição de dados; (b) Instalação dos potenciômetros lineares

com acetona, de seguida os extensómetros são colados com cola de cianoacrilato com especial cuidado para que não se deixem bolsas de ar entre o extensómetro e a barra. Após a fixação e verificação do correto funcionamento da célula de carga, o circuito é revestido com resina epoxídica 3.12 (a) e fita isoladora para sua proteção 3.12 (b).

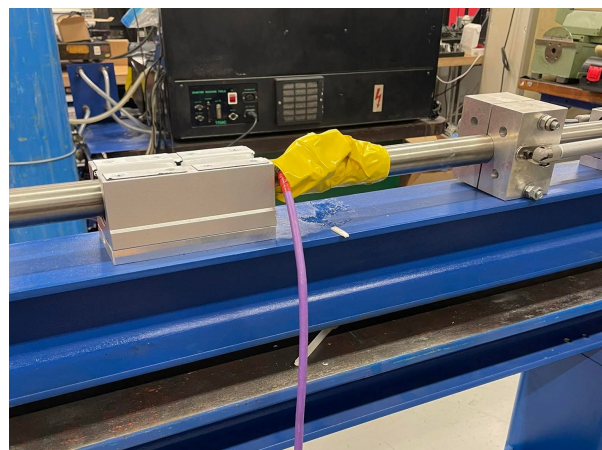
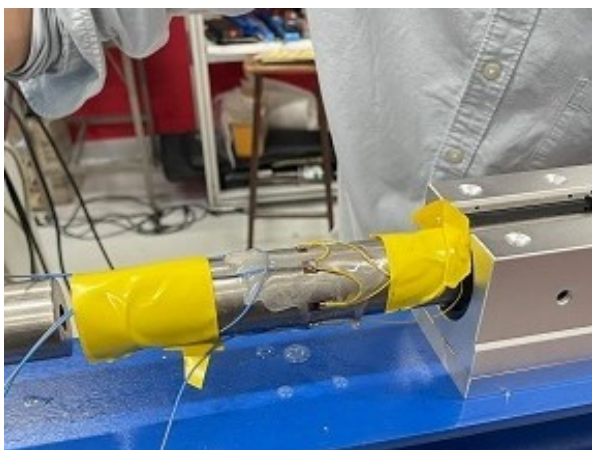


Figura 3.12: Ponte de Wheatstone instalada

A ponte de Wheatstone é excitada com $10V$ e o seu sinal amplificado com um fator de ganho de 500 através de um amplificador de sinais.

As curvas de calibração das células de carga desenvolvidas são obtidas através de uma célula de

carga comercial cuja curva de calibração é conhecida.

Esta célula de carga é instalada entre os pratos de compressão recorrendo a uns discos de alumínio fabricados para este propósito e aplica-se a força recorrendo ao atuador hidráulico. Os dados de tensão das duas células de carga são registados e, com a calibração conhecida da célula de carga comercial, obtém-se a calibração da célula de carga desenvolvida.



(a)



(b)

Figura 3.13: Calibração da carga comercial: (a) Alavanca de calibração e pesos; (b) Instalação da célula de carga

Para efeitos de confirmação e uma vez que a última calibração obtida para a célula de carga comercial tinha sido feita há 1 ano, optou-se por realizar uma nova calibração recorrendo à alavanca de calibração existente no laboratório e desenvolvida por Pedro Barros (2021). A utilização deste aparato pode ser observada na figura 3.13 e consiste na multiplicação da carga aplicada utilizando o braço da alavanca e pesos calibrados de $32,8\text{kg}$ seguindo o procedimento em anexo.

3.5.3 Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados, é necessário aliar aos sensores referidos anteriormente uma placa de aquisição de dados. Nesta implementação utilizou-se uma placa de aquisição de dados do fabricante National Instruments, modelo PCI 6115, que permite a aquisição simultânea de 4 canais até 10 MHz, 16MS, 12bits até 42V. Esta placa foi conectada por cabo, bidireccionalmente, a uma caixa de ligações do fabricante National Instruments, modelo BNC-2120, que permite a utilização dos cabos coaxiais vindos dos sensores de deslocamento e do sensor de força.

Os dados são depois visualizados e registados recorrendo ao software LabView com recurso a programas desenvolvidos pelo autor.

Os sistemas necessários à aquisição e tratamento de dados foram acomodados num carrinho móvel apresentado na figura 3.14, onde se pode observar o PC e a placa de conexões utilizados, bem como o amplificador de sinais, a caixa com os instrumentos necessários às calibrações e carbonetos extra e o dossier de procedimentos.



Figura 3.14: Carrinho móvel de aquisição de dados

3.6 Disposição final do aparato

No fim de todos os procedimentos referidos anteriormente concluiu-se com sucesso a construção de um aparato experimental capaz de realizar ensaio de compressão uniaxiais com uma vasta gama de velocidades de deformação e de temperaturas.

O resultado final do trabalho desenvolvido ao longo deste projeto pode ser observado na figura 3.15 na sua configuração para ensaios Quasi-Estáticos 3.15 (a) e na configuração para ensaios dinâmicos 3.15 (b).



Figura 3.15: Configuração final do aparato experimental: (a) Ensaios Quasi-estáticos, (b) Esaios Dinâmicos

Capítulo 4

Demonstração de Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da presente investigação. Sendo que o objetivo era o de desenvolver uma máquina de ensaios de compressão uniaxial a diferentes velocidades, inicia-se por fazer a validação do aparato recorrendo a ensaios com material cujo comportamento encontra-se já documentado. De seguida analisam-se os resultados obtidos do estudo feito à onda de pressão obtida na célula de carga depois de introduzidas as melhorias descritas na secção 3.3.

4.1 Validação do Aparato Experimental

Para efeitos de validação do aparato desenvolvido, optou-se em primeira instância por realizar ensaios de compressão uniaxial em materiais cujo comportamento é conhecido na bibliografia. Optou-se em primeira instância pela liga de alumínio AA1050-O, para a qual o trabalho de Reis (2016) [18] foi utilizado como referência no caso dos ensaios Quasi-Estáticos. No caso dos ensaios dinâmicos, o trabalho de dos Santos et al. (2017) [19] foi a referência. Os provetes foram fabricados com o mesmo processo, torneamento convencional, e sujeitos a um recozimento a 500°C durante 2h.

Para validar o aparato em materiais com maior resistência mecânica optou-se também por realizar ensaios a provetes de aço AISI 1045, obtidos do mesmo varão e com o mesmo processo do trabalho de Gregório (2017) [16], trabalho este que foi usado como referência para esta validação.

Para ambos os casos são utilizados provetes cilíndricos de $6.3 \times 6mm$, ou seja, diâmetro inicial, $\phi_0 = 6mm$ e altura inicial $h_0 \simeq 6.3mm$. Assegurando assim o valor de esbelteza igual 1, para minimizar os efeitos mencionados na secção 2.3.1. A interface de contacto entre os provetes e as hastes de compressão é lubrificada com pasta de grafite.

Nos gráficos das figuras 4.1 e 4.2, apresenta-se a preto o resultado da presente investigação e em tons de cinzento as referências utilizadas para cada material e condições.

4.1.1 Alumínio AA1050-O

O resultado obtido para os ensaios de compressão da liga AA1050-O é apresentado na figura 4.1 em que se pode observar a concordância das curvas obtidas com os resultados disponíveis na bibliografia.

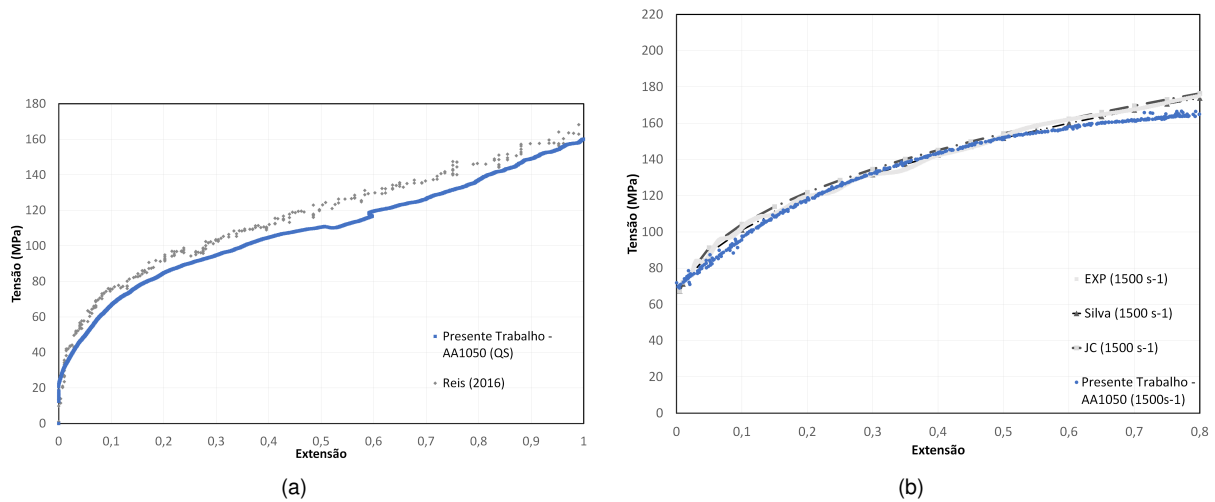


Figura 4.1: Curvas tensão-extensão para a liga de alumínio AA1050-O: (a) Ensaio de compressão Quasi-Estático; (b) Ensaio de compressão com $\dot{\epsilon} = 1500s^{-1}$

4.1.2 Aço AISI 1045

Análogamente ao apresentado para o alumínio 1050, as curvas tensão-extensão obtidas para o CK45, nas quais se observa novamente uma boa convergência com o obtido anteriormente no trabalho de Gregório (2017) são apresentados na figura 4.2

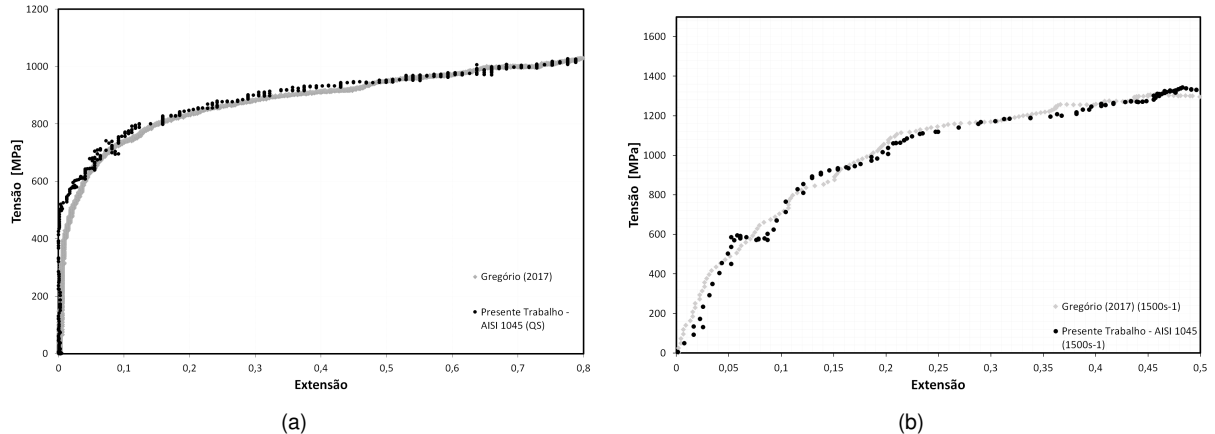


Figura 4.2: Curvas tensão-extensão para Aço AISI 1045: (a) Ensaio de compressão Quasi-Estático; (b) Ensaio de compressão com $\dot{\epsilon} = 1500s^{-1}$

Os resultados apresentados nas secções 4.1.1 e 4.1.2 são obtidos recorrendo a algum tratamento dos dados devido à assinatura do sinal obtido pela célula de carga aliado a dificuldades da calibração correta dos sensores de deslocamento.

4.2 Estudo do sinal captado e ruídos

Tendo observado que o sinal registado continuava a apresentar uma assinatura atípica e de forma a conseguir, em trabalhos futuros, servir como orientação para a melhoria do aparato, optou-se por fazer um estudo do sinal recebido.

Usaram-se os dados obtidos para um Ensaio no aço AISI 1045, uma vez que este é um material com maior resistência mecânica, onde se esperam mais dificuldades de interpretação, com o projétil de 250g e 8bar de pressão na câmara do atuador pneumático. Estas foram as condições escolhidas para o estudo devido à elevada velocidade do projétil e o facto de este ser o mais curto, com 45mm, o que se traduz num pulso mais também mais curto (da equação (2.11)), permitindo assim a separação das ondas o que facilita a sua interpretação.

Ao estudar a onda conseguiram-se identificar 5 picos de onda refletida captados nos primeiros 1000µs após o impacto, identificados no gráfico da figura 4.3

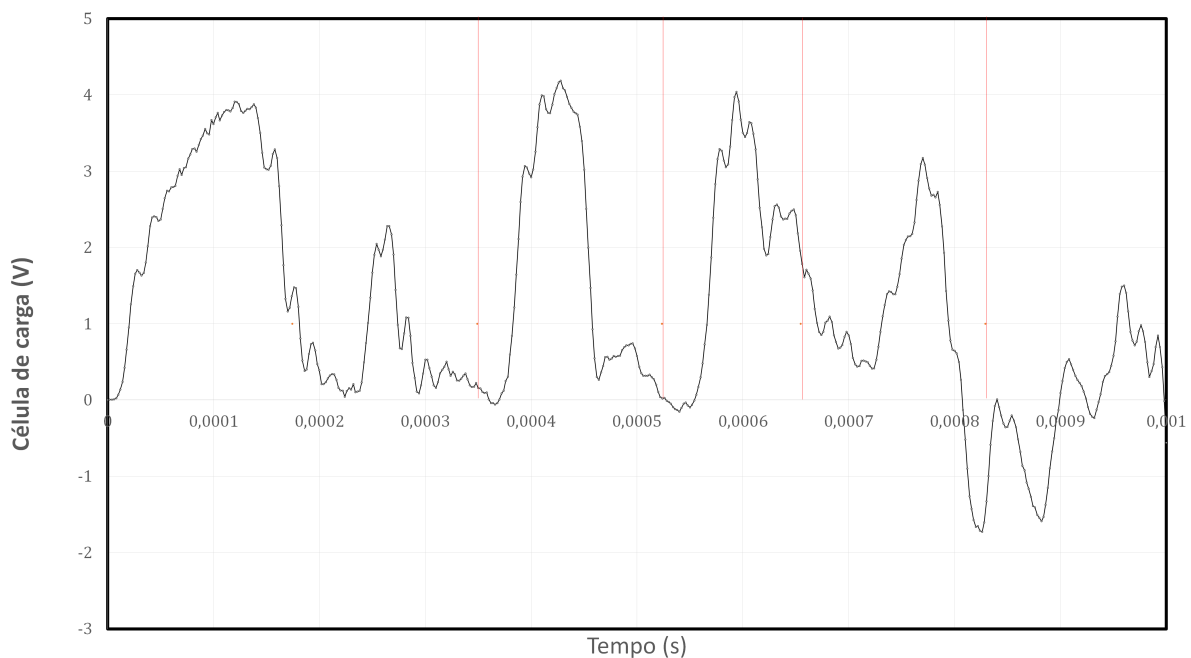


Figura 4.3: Ensaio de compressão em aço ck45 com $\dot{\epsilon} = 4000s^{-1}$

De forma a perceber a origem destas reflexões, fez-se o diagrama da figura 4.4 com a propagação das ondas ao longo da instalação desenvolvida no presente trabalho ao longo do tempo. Consideraram-se as interfaces das barras como possíveis pontos de reflexão e ignorou-se a influência dos carbonetos de tungsténio presentes nas interfaces das barras junto ao provete. No diagrama distinguem-se então 5 possíveis ondas refletidas que possam estar a ser captadas pela célula de carga em instantes diferentes. Recorrendo ao diagrama a distância percorrida por cada onda é facilmente obtida, resta então saber a velocidade de propagação da onda para poder obter os instantes considerados no diagrama.

Da bibliografia sabe-se que a velocidade do som na liga Ti6Al4V é de 4987m/s [20] , no entanto, uma vez que se sabe que esta velocidade pode variar consoante o estado do material, o tratamento térmico, a temperatura e muitos outros fatores e, aproveitando o facto de se ter instrumentado a barra dissipadora optou-se por obter experimentalmente a velocidade de propagação da onda na barra em questão.

Analisando um ensaio feito com o sinal captado pelas duas células de carga, apresentado no gráfico

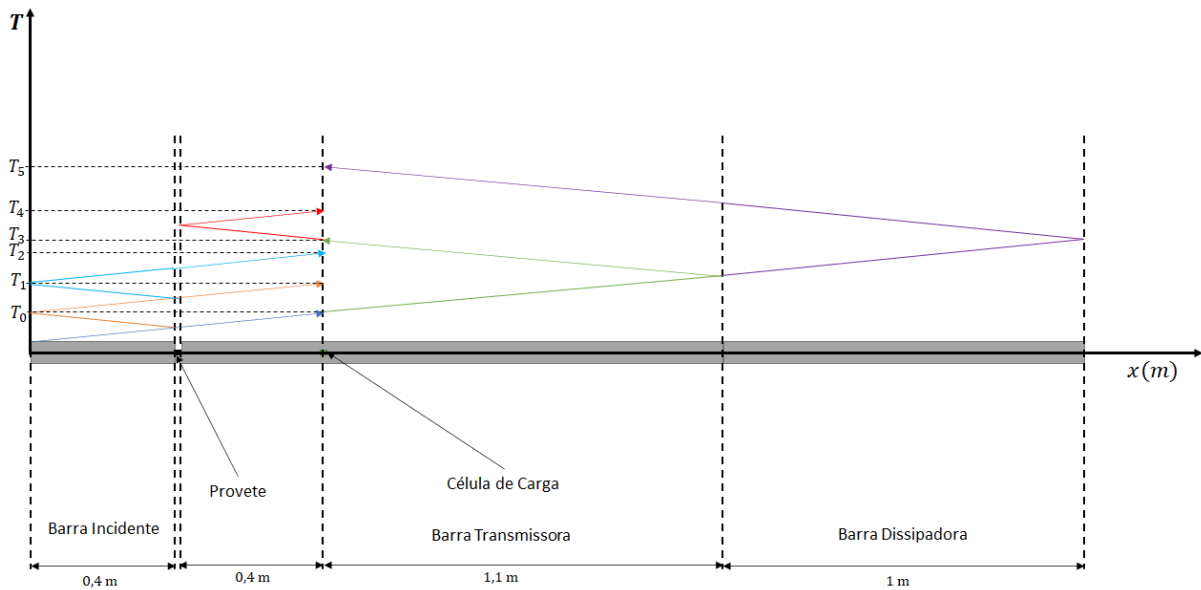


Figura 4.4: Diagrama de propagação da onda

da figura 4.5 sabendo que estas distam $d = 1,1m$ uma da outra e verificando que a diferença temporal entre a frente da onda captada pelas duas células de carga era de $\Delta t = 240\mu s$, obtém-se uma velocidade $c_b = 4583,33m/s$, através da expressão:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Calcularam-se então os instantes apresentados no diagrama da figura, apresentam-se os resultados na seguinte tabela:

Picos	Distância (m)	Tempo (μs)	Tempo após T_0 (μs)
T_0	0,8	174,55	0
T_1	1,6	349,09	174,55
T_2	2,4	523,64	349,09
T_3	3	654,55	480,00
T_4	3,8	829,09	654,55
T_5	5	1090,91	916,36

Tabela 4.1: Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas

em que a distância, d é a distância percorrida pela onda, determinada recorrendo ao diagrama de propagação e somando os percursos, o tempo é obtido usando a velocidade de propagação determinada anteriormente, $c_b = 4583,33m/s$ através de: $T = \frac{d}{c_B}$ e o tempo após T_0 é $T - T_0$, obtendo assim os instantes em que seria esperada uma onda refletida partindo do T_0 que é o instante em que a frente de onda do sinal desejado é captado pela célula de carga.

Identificando estes instantes no gráfico da figura 4.3 com linhas verticais vermelhas em $T = T_i$, obtém-se o apresentado na figura 4.6.

Observa-se que, apenas com um erro máximo de $\approx 50\mu s$ em alguns casos, as ondas refletidas captadas no sinal acima podem ser explicadas pelo descrito acima e representado no diagrama da

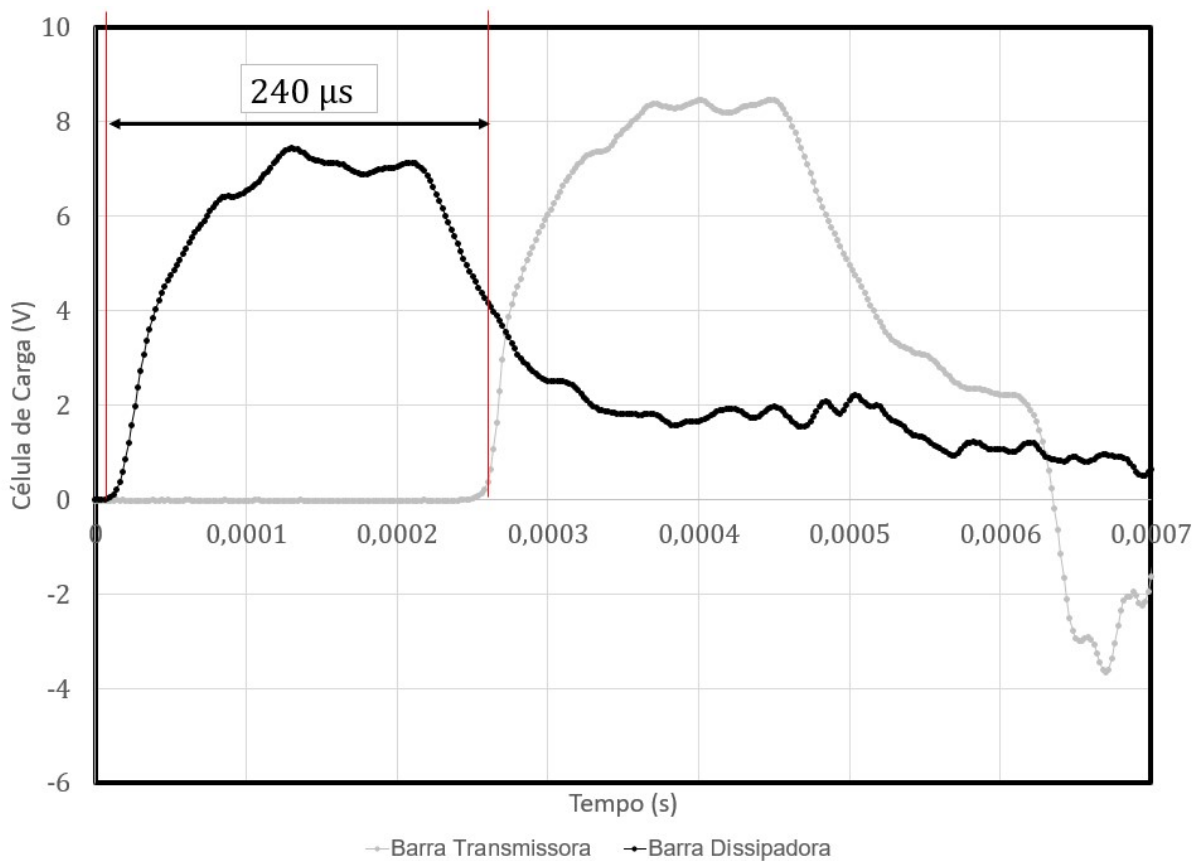


Figura 4.5: Sinal das duas pontes de Wheatstone: ensaio em provete rígido para estudo do sinal

figura 4.4, considerando que os erros se devem à influência das hastes de compressão que foram desprezados neste estudo ou também por alguma latência no sistema. Isto permite então a teorização de verdadeiras melhorias a serem efetuadas no aparato em futuros trabalhos que devem ser consideradas.

4.2.1 Possíveis Melhorias

Barra Transmissora

Em primeiro lugar nota-se que o mecanismo dissipador composto pela barra dissipadora e os amortecedores hidráulicos não funcionou como previsto, esperava-se que as barras em pré-carga uma contra a outra apresentassem um comportamento similar a uma barra maciça e que não houvesse reflexão na sua interface, o que não se verificou e acaba por causar o pico de onda dos instantes T_3 e T_4 .

Considerando que se tinha instalado uma barra maciça em vez da barra dissipadora, o diagrama equivalente para o estudo da propagação da onda seria o apresentado na figura 4.7

Implementando esta solução infere-se logo pelo diagrama que se eliminariam duas ondas refletidas captadas nos instantes (T_3 e T_4). Esta, apesar de ser uma melhoria significativa, não assegura a separação da onda para projéteis mais compridos, ou seja, com tempos de pulso maiores e velocidades menores. Isto significa que para ensaios com velocidades de deformação mais baixas, o sinal seria sempre afetado pelos ruídos dos instantes T_1 e T_2 .

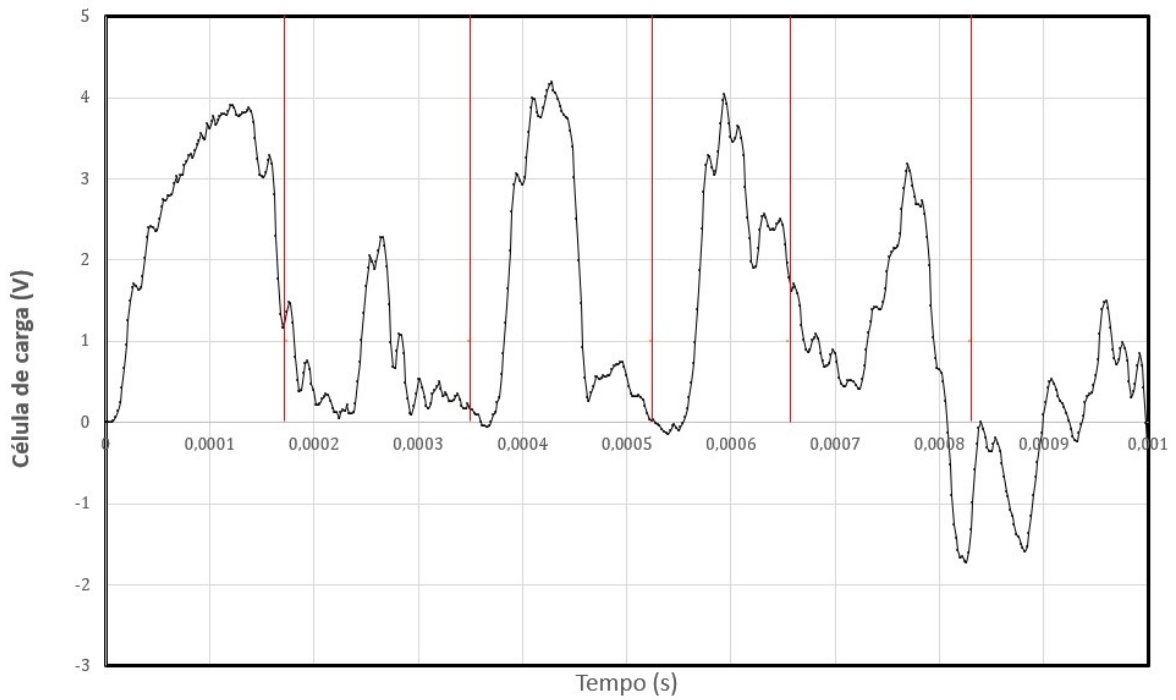


Figura 4.6: Ensaio de compressão em aço ck45 com $\dot{\epsilon} = 4000s^{-1}$. A vermelho estão os instantes calculados na tabela 4.1

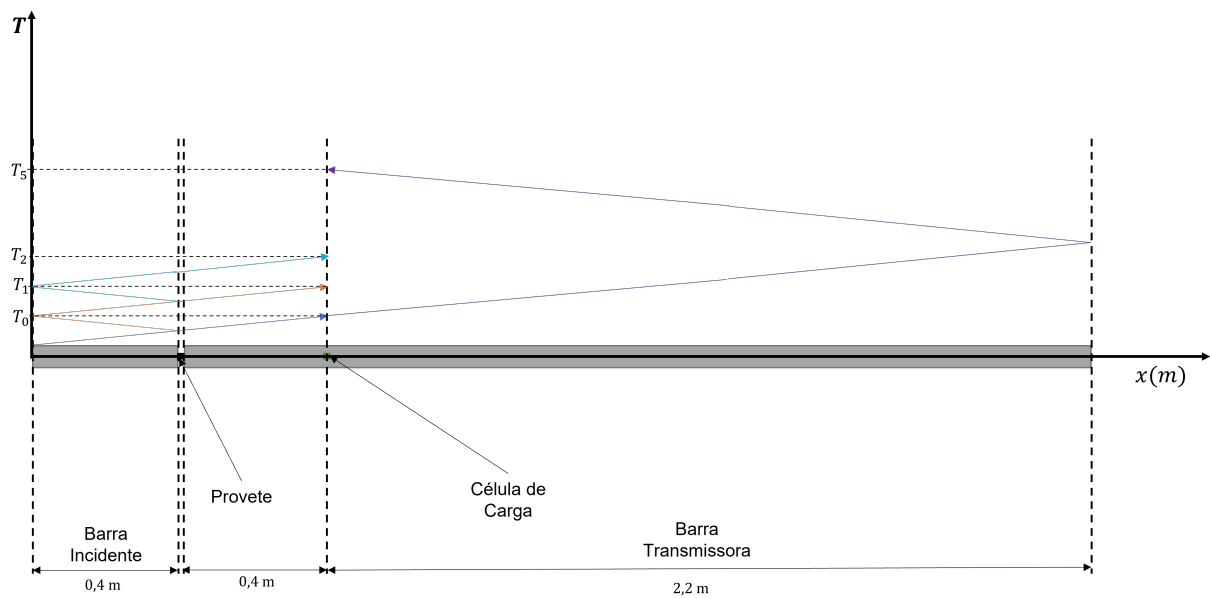


Figura 4.7: Diagrama de propagação da onda introduzindo a barra maciça

Barra incidente

Nota-se então que, o maior ganho seria tido, se se conseguisse evitar, ou atrasar, a distorção da onda causada pela reflexão na barra incidente. Seria uma grande melhoria proceder ao aumento do comprimento da barra transmissora uma vez que o facto de esta ser tão curta é a causa dos picos refletidos dos instantes T_1 e T_2 .

Considerou-se para efeitos de verificação, mantendo a barra transmissora maciça como no diagrama da figura 4.7 e aumentando o comprimento da barra incidente para 1m. Elaborou-se o diagrama análogo aos anteriores para o estudo da propagação das ondas neste caso, apresentado na figura 4.8

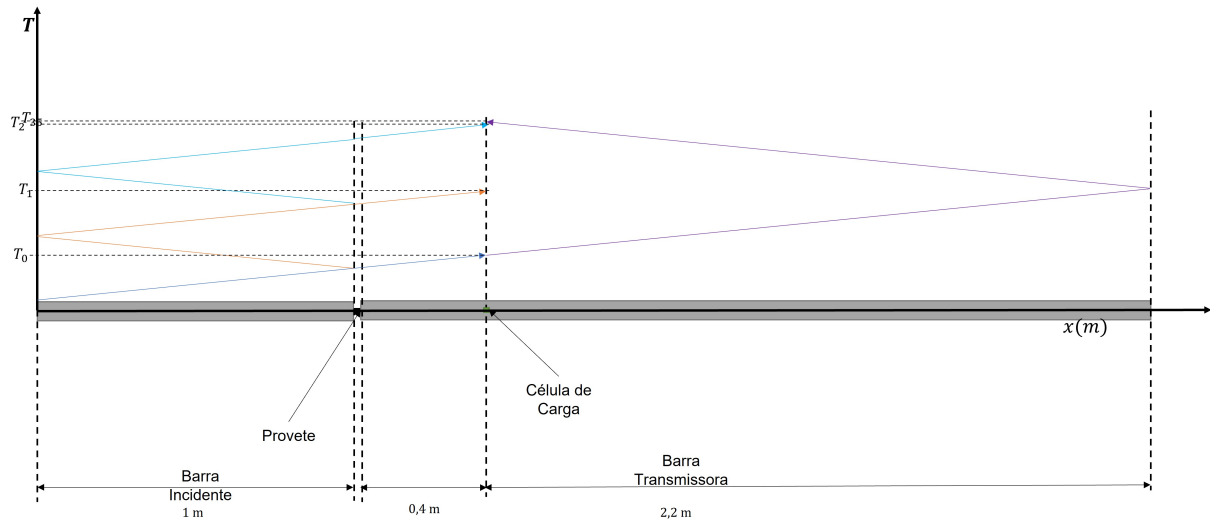


Figura 4.8: Diagrama de propagação da onda introduzindo a barra incidente mais comprida

Os cálculos para os instantes em que seria captada uma onda refletida foram feitos novamente como anteriormente e são apresentados na tabela 4.2.

Picos	Distância (m)	Tempo (μs)	Tempo após T_0 (μs)
T_0	1,4	305,45	0
T_1	3,4	741,82	436,36
T_2	5,4	1178,18	872,73
T_3	5,8	1265,46	960,00

Tabela 4.2: Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas no aparato melhorado

Com os resultados obtidos demonstra-se o pretendido atraso do primeiro pico refletido, que seria uma melhoria significativa à validade do sinal resultantes dos ensaios. O instante T_1 para esta configuração acontece num intervalo de tempo 3 vezes maior do que o obtido na tabela 4.1 para a configuração atual. Ou seja, o sinal não seria afetado por ruídos durante os primeiros $436\mu s$ após o impacto permitindo assim a execução, com segurança em relação aos dados obtidos, de ensaios com velocidades mais baixas e projéteis cujo tempo de pulso poderia ser 3 vezes maior do que o possível na configuração atual.

Isto traduz-se na execução, com segurança nos resultados obtidos de ensaios com menores velocidades de deformação.

Posição da célula de carga

Estudou-se também o efeito da posição da célula de carga no sinal e que possíveis vantagens ou desvantagens poderiam ser trazidas. Em primeira instância espera-se que, mantendo a configuração descrita acima com as melhorias propostas nesta secção, o tempo até se verificar o primeiro pico

refletido em relação ao sinal inicial não seja alterado. Ou seja, a melhoria do sinal nos instantes considerados, não seria significativa.

Elaborou-se o diagrama de propagação da onda, apresentado na figura 4.9

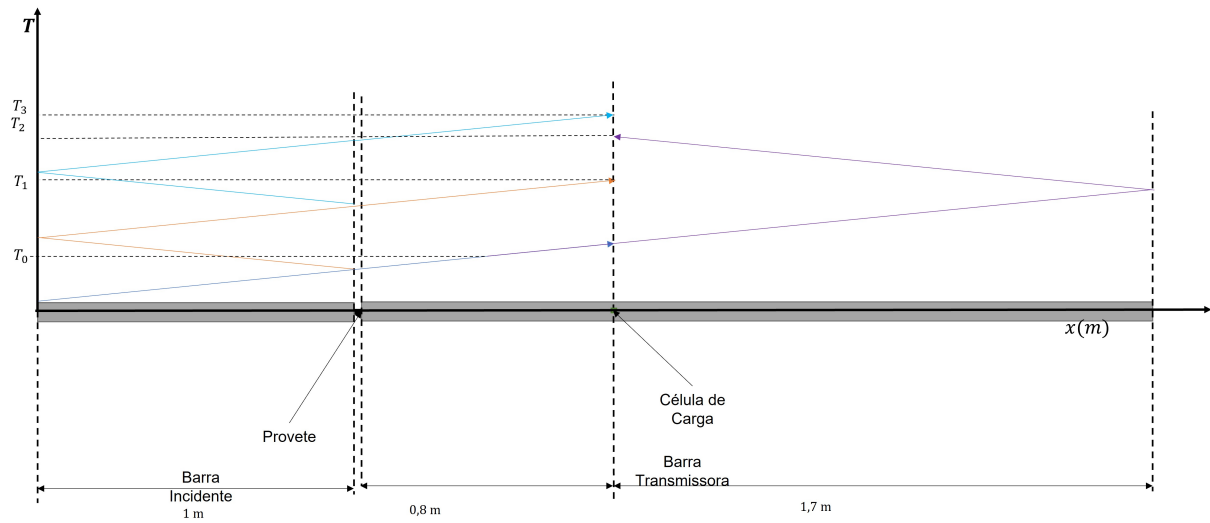


Figura 4.9: Diagrama de propagação da onda variando posição da célula de carga

E realizaram-se os cálculos, apresentados na seguinte tabela:

Picos	Distância (m)	Tempo (μs)	Tempo após T_0 (μs)
T_0	1,8	392,73	0
T_1	3,8	829,09	436,36
T_2	5,2	1134,55	741,82
T_3	5,8	1265,46	872,73

Tabela 4.3: Cálculo do tempo esperado para as ondas refletidas com diferente posição da célula de carga

Como esperado, o instante T_1 para esta configuração não sofre nenhuma alteração de maneira que o efeito da alteração da posição da célula de carga não introduz grandes melhorias ao sinal no intervalo de tempo desejado.

As melhorias aqui propostas tiveram em consideração os constrangimentos de espaço que existem no LabM3, onde o aparato se encontra instalado.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados da investigação tendo em conta os objetivos traçados inicialmente bem como perspectivas de trabalho a ser desenvolvido em futuros projetos.

O desenvolvimento do equipamento experimental e posterior validação com sucesso permitem concluir que o objetivo principal desta investigação foi cumprido. Os desenvolvimentos implementados permitem a utilização do mesmo aparato, mesmos sensores, mesmas técnicas de aquisição e tratamento de dados para ensaios de compressão uniaxiais numa gama muito abrangente de velocidades. Estas condições de testagem representam um avanço significativo em relação ao existente no Instituto Superior Técnico.

O sistema mecânico desenvolvido para dissipar a onda de pressão e facilitar a interpretação do sinal da célula de carga não provou ser eficaz, no entanto, como demonstrado pelos resultados apresentados, a presente investigação permitiu o estudo e teorização de algumas melhorias que provavelmente seriam muito significativas no futuro deste aparato. Uma perspectiva de trabalho de futuro seria então a introdução de algumas das melhorias mecânicas apresentadas anteriormente, principalmente o aumento do comprimento da barra incidente. Estas melhorias seriam um passo importante no que toca a possibilitar a total capacidade do aparato desenvolvido.

A versatilidade e facilidade de utilização deste equipamento são os seus pontos fortes a nível mecânico, no entanto, no que toca a aquisição de dados, como mostrado anteriormente há diversos parâmetros a melhorar. O aparato beneficiaria de sensores com uma interpretação mais fácil especialmente no que toca ao deslocamento e a altura instantânea do provete, sendo esta uma perspectiva de trabalho futuro. Uma melhoria do procedimento de calibração dos sensores indutivos por exemplo recorrendo a sensores lineares também seria uma melhoria significativa.

Por constrangimentos temporais não foi possível fazer um estudo abrangente de caracterização do comportamento de vários materiais. Este estudo seria de extrema importância para validar com um maior grau de segurança o funcionamento correto do aparato e encontrar possíveis problemas e melhorias que ainda poderiam ser necessárias e que o autor não tenha encontrado, sendo esta também uma perspectiva de trabalho futuro.

Referências

- [1] W. Callister and D. Rethwisch. *Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition*. Wiley, 2009. ISBN 9780470941669. URL <https://books.google.pt/books?id=0aIbAAAAQBAJ>.
- [2] R. Jones. *Deformation Theory of Plasticity*. Bull Ridge Pub., 2009. ISBN 9780978722319. URL <https://books.google.pt/books?id=kiCVc3AJhVwC>.
- [3] G. T. (Rusty) Gray. High-Strain-Rate Deformation: Mechanical Behavior and Deformation Substructures Induced. *Annual Review of Materials Research*, 42(1):285–303, 2012. doi: 10.1146/annurev-matsci-070511-155034. URL <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070511-155034>.
- [4] 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>.
- [5] J. H. Hollomon. Tensile deformation. *Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 162:268–277, 1945.
- [6] 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>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617300122>.
- [7] L. M. Alves, C. V. Nielsen, and P. A. F. Martins. Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test. *Experimental Mechanics*, 51:1565–1572, 2011. ISSN 1741-2765. doi: 10.1007/s11340-011-9480-5. URL <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9480-5>.
- [8] H. Czichos, T. Saito, and L. Smith. *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 9783540303008. URL <https://books.google.pt/books?id=81ANaR-Pqi4C>.
- [9] F. Bagusat and I. Rohr. The role of the modified taylor impact test in dynamic material research. *EPJ Web of Conferences*, 94:01026, 01 2015. doi: 10.1051/epjconf/20159401026.

- [10] J. Field, S. Walley, W. Proud, H. Goldrein, and C. Siviour. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30 (7):725–775, 2004. ISSN 0734-743X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.03.005>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X04000521>. Fifth International Symposium on Impact Engineering.
- [11] K. T. Ramesh. *High Rates and Impact Experiments*. Springer US, Boston, MA, 2008. ISBN 978-0-387-30877-7. doi: 10.1007/978-0-387-30877-7_33. URL https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7_33.
- [12] J. M. G. T. Pinto. Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2009.
- [13] J. Malachowski, P. Baranowski, R. Gieleta, D. Koodziejczyk, K. Damaziak, and L. Mazurkiewicz. Numerical study for determination of pulse shaping desing variables in shpb apparatus. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 61:459–466, 06 2013. doi: 10.2478/bpasts-2013-0045.
- [14] E.-H. Wong and Y.-W. Mai. 12 - rate-dependent stress–strain properties of solders. In E.-H. Wong and Y.-W. Mai, editors, *Robust Design of Microelectronics Assemblies Against Mechanical Shock, Temperature and Moisture*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pages 411–446. Woodhead Publishing, 2015. ISBN 978-1-84569-528-6. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-528-6.00012-5>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695286000125>.
- [15] M. E. L. Saragoça. Desenvolvimento de Máquina para Ensaios de Impacto a Alta Velocidade de Deformação e Elevada Temperatura. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2020.
- [16] A. J. d. V. L. Gregório. Ensaios de Impacto e Elevadas Velocidades de Deformação. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2017.
- [17] P. M. G. Santos. Ensaios de Compressão Uniaxial: Desenvolvimento de Máquina e Aplicação a Metais e Ligas Metálicas. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2019.
- [18] A. P. d. Reis. Efeito de Escala na Resistência Mecânica de Materiais. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2016.
- [19] T. dos Santos, J. C. Outeiro, R. Rossi, and P. Rosa. A New Methodology for Evaluation of Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Procedia CIRP*, 58:481–486, 2017. ISSN 2212-8271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.258>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117304419>. 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (16th CIRP CMMO).
- [20] L. MatWeb. Material Properties Database. URL http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=b350a789eda946c6b86a3e4d3c577b39.

Anexo A

Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais seguidos nesta investigação são aqui apresentados.

Procedimentos de calibração

Calibração da célula de carga comercial

1. Ligar o sistema de aquisição de dados
2. Ligar a célula de carga comercial ao sistema
3. Colocar a célula de carga na base da estrutura de suporte – Figura 1, retângulo 1;
4. Baixar a alavanca e centrar o parafuso com a célula de carga;
5. Colocar a massa calibrada pretendida na extremidade da alavanca – Figura 2, retângulo 2;
6. Registrar valores de tensão obtidos;
7. Aumentar massa e registrar novos valores;
8. Repetir até à massa pretendida;

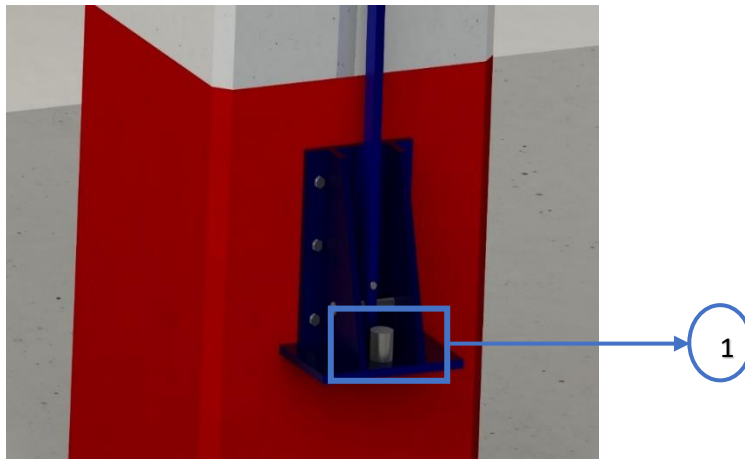


Figura 1-Estrutura de Suporte

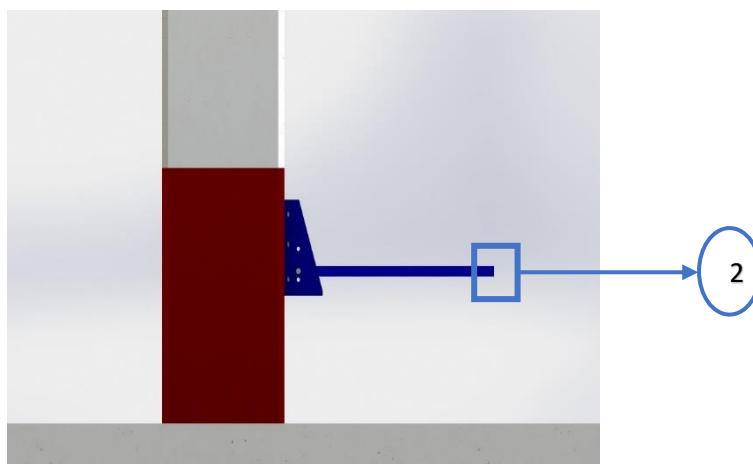


Figura 2-Alavanca sobre a célula de carga

Calibração da célula de carga

1. Ligar o sistema de aquisição de dados
2. Ligar a célula de carga comercial ao sistema
3. Instalar o atuador hidráulico
4. Recorrendo aos discos de alumínio existentes na caixa de madeira, instalar a célula de carga comercial entre os pratos de compressão
5. Abrir o programa de calibração e zerar os sinais no amplificador de sinais
6. Iniciar gravação dos dados
7. Acionar pedal do atuador
8. Parar gravação e guardar o ficheiro
9. Guardar a célula de carga e discos na caixa
10. Comparar os dados obtidos para a célula de carga comercial com a célula de carga da barra e obter a curva de calibração (Tipicamente linear)

Calibração dos potenciómetros lineares

1. Ligar o sistema de aquisição de dados
2. Abrir o programa de calibração e verificar se os potenciómetros se encontram no regime linear
3. Da caixa de madeira retirar os provetes calibrados
4. Colocar o provete entre:
 - a. Os pratos de compressão para calibração do P1
 - b. As barras incidente e transmissora para calibração do P2 e P3
5. Registrar valor obtido
6. Repetir do passo 4 para todos os provetes
7. Obter a curva de calibração (Linear com declive $\approx 5,15$)

Calibração dos sensores indutivos

1. Ligar o sistema de aquisição de dados
2. Esperar 30 a 45min para o sistema atingir o regime estacionário
3. Abrir o programa de calibração e registar o 0 (Pratos de compressão encostados)
4. Colocar os provetes calibrados entre os pratos
5. Registrar valor obtido
6. Repetir para todos os provetes
7. Obter a curva de calibração (Polinomial de 3º grau)