

# **Desenvolvimento de Aparato Experimental para Caracterização da Tenacidade à Fratura Dúctil**

**Vítor Rafael Afonso Martins**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. José Carlos Martins Outeiro

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Eng. Afonso José de Vilhena Leitão Gregório

**Outubro 2020**



## Agradecimentos Pessoais

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

Agradecer aos meus orientadores, Prof. Pedro Rosa e Prof. José Carlos Outeiro, pelos desafios colocados, motivação e orientação que em muito contribuiu para a minha formação.

Agradecer a todos os colegas com quem partilhei o espaço onde passei grande parte dos últimos meses, o Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3), em especial ao Pedro Santos por toda a ajuda, apoio e conhecimento transmitido.

Agradecer ao Sr. Farinha do Laboratório de Tecnologia Mecânica, por todo o apoio, por todo o conhecimento técnico transmitido e pela infindável paciência e disponibilidade em todas as vezes que necessitei de fabricar algum componente ou fazer alguma alteração.

Agradecer aos amigos que me acompanharam durante todos estes anos, em especial ao Sebastião Perdigão e ao Manuel Vicente, que me acompanharam dentro e fora do Técnico.

Por fim gostaria de agradecer a toda a minha família, que sempre me acompanhou, em especial aos meus pais e aos meus irmãos, que sempre me acompanharam e tornaram toda esta jornada possível.

## Institutional Acknowledgments

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

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

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

Co-financed by:



Laboratory of **Machining**  
& **Micro-Manufacturing**

## Resumo

O corte por arranque de apra envolve a formação e a propagação controlada de fissuras, essenciais para a remoção de material e a formação da superfície maquinada. Este mecanismo de separação consome energia adicional ao trabalho plástico e contribui para elevar a pressão específica de corte. Este aumento pode ser estimado com base na tenacidade à fratura do material e utilizado para melhorar as previsões teóricas dos processos de maquinagem. O valor da tenacidade à fratura depende do carregamento aplicado no material fazendo com que a sua caracterização experimental deva considerar o estado de tensão com um parâmetro operativo.

Atualmente, os métodos existentes para quantificar a tenacidade à fratura sob diferentes estados de tensões são lentos e dispendiosos, uma vez que para cada estado de tensão é necessário utilizar máquinas de ensaios, geometria de provetes e metodologias diferentes. Esta investigação tem por objetivo desenvolver uma metodologia experimental que permita a calibração da tenacidade à fratura dos materiais em modo II para diferentes estados de tensão. Esta metodologia assenta na utilização duma única geometria de provetes, mas cujo estado de tensão pode ser predefinido nos parâmetros da máquina de ensaios.

## Palavras Chave

Maquinagem; Corte por arranque de apra; Mecânica da fratura; Triaxilidade; Máquina de ensaios; Tenacidade à fratura

## Abstract

Crack initiation and propagation is essential in metal cutting. This separation mechanism is essential for the formation of new machined surfaces and requires additional energy promoting the specific cutting pressure. This increase can be predicted using the fracture toughness, whose mechanical characterization is essential for more accurate theoretical predictions. It is known that fracture toughness is influenced by the stress state, making this a key parameter in mechanical testing.

Currently, characterizing fracture toughness under different stress states is time-consuming and expensive, since different stress states require different testing machines, specimen geometries, and experimental methodologies. This thesis presents the development of an experimental methodology to characterize fracture toughness (mode II) under different stress states based on a universal specimen and a stress state previously configured on the testing machine.

## Keywords

Machining; Chip removal machining; Fracture Mechanics; Triaxiality; Test machine; Fracture toughness

# Índice

Agradecimentos Pessoais .....	I
Institutional Acknowledgments .....	II
Resumo .....	III
Palavras Chave .....	III
Abstract .....	IV
Keywords.....	IV
Lista de Tabelas .....	VIII
Lista de Figuras .....	IX
Abreviaturas .....	XI
Nomenclatura .....	XII
1. Introdução.....	1
2. Mecânica da Fratura .....	3
2.1. Tenacidade à Fratura .....	3
2.1.1. Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE).....	4
2.1.2. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) .....	6
2.2. Triaxilidade .....	8
2.3. Estudos de Caracterização da Tenacidade à Fratura .....	10
3. Modelo Numérico .....	11
3.1. Comportamento do Material.....	11
3.2. Comparação de Simulação 2D e 3D em Fratura .....	13
3.3. Análise de Sensibilidade da Malha .....	15
4. Desenvolvimento do Aparato Experimental .....	17
4.1. Máquina de Ensaios.....	17
4.1.1. Força da Máquina .....	18
4.1.2. Cadeia Pneumática .....	20
4.2. Ferramenta de Testes .....	21
4.2.1. Conjunto Punção/Matriz .....	22
4.2.2. Força Normal ao Plano de Corte (FNPC) .....	22
4.2.3. Suportes para Instrumentação .....	22
4.3. Instrumentação e Aquisição de Dados .....	23

4.3.1. Força do Punção .....	24
4.3.2. Deslocamento.....	25
4.3.3. Força Normal ao Plano de Corte.....	26
4.3.4. Aquisição de Dados .....	27
4.3.5. Aquisição de Imagem.....	28
5. Materiais e Métodos .....	29
5.1. Provete e Material .....	29
5.2. Plano de Ensaios .....	30
5.3. Calibração e Verificação do Aparato Experimental .....	31
5.3.1. Posição do Suporte do Carro Móvel e Força de Corte Máxima .....	32
5.3.2. Sensores .....	35
6. Resultados e Discussão de Resultados.....	38
6.1. Simulação Numérica .....	38
6.1.1. Influência da Secção Resistente na Força de Corte.....	38
6.1.2. Influência da Força Normal ao Plano de Corte na Força de Corte.....	39
6.2. Resultados dos Ensaios.....	41
6.2.1. Ensaios de Corte Puro .....	41
6.2.2. Ensaios de Corte Sob Carga Normal.....	45
7. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro .....	49
8. Referências .....	51
Anexos.....	54
A.I- Procedimento para Simulação no ABAQUS .....	55
A.II- Montagem e Desmontagem da Ferramenta.....	57
A.II.1- Procedimentos de Montagem da Ferramenta.....	57
A.II.2- Procedimentos de Desmontagem da Ferramenta .....	57
A.III- Montagem e Desmontagem do Provete.....	58
A.III.1- Procedimento de Montagem do Provete .....	58
A.III.2- Procedimento de Desmontagem do Provete.....	58
A.IV- Procedimento Experimental .....	59
A.V- Laboratório Virtual .....	60
A.VI- Documentos Técnicos de Equipamentos.....	61

A.VII- Desenhos 2D das Peças Fabricadas; ..... 64

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Características dos modos de deformação elementares; .....	9
Tabela 2- Especificações originais da prensa, descritas pelo fabricante; .....	17
Tabela 3- Dimensões da rótula alterada; .....	20
Tabela 4- Dimensão dos provetes a usar no estudo, em mm; .....	31

## Lista de Figuras

Figura 2.1- Modos de Fratura.....	4
Figura 2.2- Critério de Griffith para placa fixa (Griffith, 1921, 1924): a) Placa fissurada com extremidades fixas; b) energia elástica.....	5
Figura 2.3.- Geometria dos provetes entalhados carregados ao corte (Leuser, 1998);.....	7
Figura 2.4.- Mecanismos de fratura no espaço da triaxilidade (Brünig e Gerke,2011);.....	9
Figura 3.1- Malha do provete, punção e matriz utilizado na validação do comportamento do material;.....	11
Figura 3.2-Comparação entre curva tensão-extensão real (laranja), introduzida como lei do material na simulação, e resultados da simulação (azul);.....	13
Figura 3.3- Distribuição do campo de tensões no provete deformado, na simulação 2D (a) e 3D (b);.....	14
Figura 3.4- Gráficos força-deslocamento resultante de simulação em 2D (azul) e em 3D (amarelo) e gráfico 2D com fator de correção (laranja);.....	14
Figura 3.5- a) Relação entre dimensão média da malha e força de arrombamento máxima; b) Relação entre dimensão média da malha e tempo despendido na simulação;.....	15
Figura 3.6- a) Malha grosseira, onde é possível ver a forma dos elementos na malha e diferentes regiões; a) Malha utilizada; b) Pormenor da malha na zona de corte, onde se observa as diferentes regiões da malha;.....	16
Figura 3.7- a) Relação entre dimensão média da malha e força de corte, para uma malha com duas secções distintas; b) Relação entre dimensão média da malha e tempo despendido na simulação, para uma malha com duas secções distintas;.....	16
Figura 4.1- a) CAD da prensa com os diferentes componentes identificados; b) Disposição inicial da prensa no laboratório;.....	18
Figura 4.2- a) CAD e esquematização da rótula original; b) Esquema da rótula proposta; c) Decomposição vetorial da rótula com vetores de forças;.....	19
Figura 4.3- Comparação da curva de funcionamento teórica da rótula com a curva resultante da simulação do ensaio do provete de 1mm, colocado a várias distâncias do PMS;.....	20
Figura 4.4- a) Esquematização do sistema pneumático; b) Fotografia da prensa com ferramenta e cadeia pneumática;.....	21
Figura 4.5- a) Porta ferramentas; b) Vista geral da ferramenta criada para este estudo; c) Corte da ferramenta, na duas configurações, compressão (direita) e tração (esquerda);.....	21
Figura 4.6- a) Corte da célula de carga e punção inseridos no casquilho; b) Montagem da célula de carga e da câmara na ferramenta; c) Montagem da câmara e sensor de deslocamento na ferramenta;.....	23
Figura 4.7- a) Célula de carga; b) Fonte de alimentação de 24V; c) Amplificador de sinal Krenel;.....	24
Figura 4.8- a) Montagem para a calibração da célula de carga; b) Curva de calibração da célula de carga;.....	25

Figura 4.9- Curva de calibração do sensor de deslocamento; .....	26
Figura 5.1- a) Desenho do provete; b) Localização dos furos no provete a usar na tabela 4; ...	29
Figura 5.2- a) Provete o utilizar no estudo, antes da marcação da grelha; b) Secção resistente de dimensão correta; c) Secção resistente com defeito. Notar a marcação a laser da grelha de 200 microns. ....	30
Figura 5.3- Curva de funcionamento teórica da prensa na configuração alterada, que relaciona a força exercida (kN) com a distância ao PMS (mm);.....	32
Figura 5.4- Ligação entre corpo da prensa e suporte do carro móvel, com travão para prevenir escorregamento;.....	33
Figura 5.5- Comparação entre curva de funcionamento real (laranja) e a curva de funcionamento teórica (azul), da prensa após a alteração;.....	33
Figura 5.6- a) Esquema da rótula após ultrapassar o PMI; b) Curva de funcionamento real da prensa alterada, a 10bar, com distinção entre o comportamento antes do PMI (amarelo) e o comportamento após o PMI (azul); .....	34
Figura 5.7- Gráfico força-tempo (laranja) e deslocamento-tempo (azul) do teste de sincronização dos sensores; .....	36
Figura 5.8- Ensaio de arrombamento na prensa hidráulica; .....	37
Figura 5.9- a) Gráfico força-deslocamento do ensaio em prensa hidráulica; b) Pormenor do gráfico força-deslocamento do ensaio em prensa hidráulica;.....	37
Figura 6.1- Gráfico força-deslocamento para provetes livres de diferentes secções resistentes; .....	39
Figura 6.2- a) Gráfico força-deslocamento do provete sob diversas forças transversais de tração; b) Gráfico força-deslocamento do provete sob diversas forças transversais compressivas;.....	40
Figura 6.3- Curvas de força e deslocamento experimentais em função do tempo do ensaio do provete de 0,5mm; .....	42
Figura 6.4- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 0,5mm; ....	43
Figura 6.5- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm; .....	44
Figura 6.6- Imagem de provete danificado antes da realização do ensaio; .....	45
Figura 6.7- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm colocado sob tração;.....	46
Figura 6.8- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm colocado sob compressão; .....	47
Figura 6.9- Comparação das curvas força-deslocamento dos ensaios do provete de 1mm sob uma força normal ao plano de corte de tração de 1,7kN (verde), sob uma força normal ao plano de corte compressiva de 1,9kN (amarelo) e sem FNPC (azul); .....	48

## Abreviaturas

CNC- Computer Numeric Control

CAD- Computer Aided Design

FEM- Finite Element Method

2D- Duas dimensões

3D- Três Dimensões

PMI- Ponto Morto Inferior

PMS- Ponto Morto Superior

SCM- Suporte Carro-Móvel

USB- Universal Serial Bus

MFLE- Mecânica da Fratura Linear Elástica

MFEP- Mecânica da Fratura Elásto-Plástica

CTOD- Crack Tip Opening Displacement

FNPC- Força Normal ao plano do corte

## Nomenclatura

R- Tenacidade à fratura;

FT- Fator de triaxilidade;

$\sigma$ - Tensão;

$\varepsilon$ - Extensão;

F- Força;

$F_{pneu}$ - Força pneumática;

$F_c^f$ - Força de compressão final;

$F_t^f$ - Força de tração final;

A- Área;

$A_0$ - Área inicial;

$A_{emb}$ - Área do embolo;

$A_c$ - Área do embolo à compressão;

$A_t$ - Área do embolo à tração;

P- Pressão;

$P_{ar}$ - Pressão do ar;

h- Altura;

$h_0$ - Altura inicial;

# 1. Introdução

A compreensão dos mecanismos de fratura é fundamental para evitar a falha de materiais e mecanismos dos quais dependemos diariamente. No entanto, o estudo da fratura não se cinge apenas a prevenir a falha dos componentes mecânicos. A propagação controlada das fissuras tem igual ou maior importância na transformação dos materiais em bens de consumo. A abertura de fissuras é um dos mecanismos base de muitas tecnologias de fabrico, tais como, os processos de maquinagem. Compreender este mecanismo é importante para permitir controlar o processo e melhorar a qualidade dos componentes produzidos, nomeadamente a integridade superficial e as tensões residuais, o rigor geométrico e dimensional, e até mesmo outras defeitos introduzidos indiretamente por vibrações ou variações térmicas.

A otimização dos processos de corte, de modo a melhorar o desempenho da produção e a qualidades dos produtos é o principal objetivo da investigação em tecnologias de fabrico. Uma das técnicas usadas atualmente, para melhorar estes processos, é a simulação numérica. Esta técnica consiste na criação de modelos computacionais capazes de reproduzir o comportamento mecânico dos materiais e utilizar essa informação para a simulação do processo de fabrico. Esta informação é obtida através de ensaios experimentais onde o material é submetido a determinadas condições de carregamento. Estes estudos devem de ser feitos de forma rápida com reduzido impacto no custo do produto final mas sem condicionar a qualidade da modelação matemática do comportamento mecânico.

Um fator que tem grande relevância no comportamento do corte é o estado de tensões a que o material está sujeito. As metodologias existentes para testar a tenacidade à fratura de um material sob diferentes estados de tensões são lentas e dispendiosas, necessitando de uma grande diversidade de provetes e máquinas.

É então o objetivo deste trabalho criar uma máquina de ensaios capaz de exercer uma força de corte no provete e, simultaneamente, colocar o provete sob diferentes estados de tensões. Este aparato experimental permitirá o desenvolvimento de uma nova metodologia experimental que permita prever qual a alteração causada pela variação do estado de triaxilidade nos mecanismos de fratura, para um dado material, de forma mais rápida e menos dispendiosa, que as técnicas usadas atualmente.

A validação funcional desta máquina de ensaios foi realizada através da realização de ensaios que tiveram como objetivo testar as capacidades desta máquina e criar uma metodologia experimental a aplicar em estudos futuros. Ao longo desta dissertação iremos ver quais os passos tomados no seu desenvolvimento, culminando na realização de quatro ensaios e conseqüente comparação destes com as previsões teóricas.

Este documento encontra-se dividido em sete partes, nas quais serão abordadas as diferentes etapas deste processo.

No capítulo 2, “Tenacidade à Fratura”, onde será feita uma breve apresentação dos conceitos fundamentais da mecânica da fratura, em especial o mecanismo de fratura dúctil. Serão também

aprofundados conceitos como a triaxialidade e de que modo estes influenciam os fenómenos acima referidos.

No capítulo 3, “Desenvolvimento Teórico”, será apresentado o modelo numérico a utilizar no estudo. Estas previsões numéricas servem o propósito do dimensionamento da ferramenta e da máquina de ensaios, e servir de ponto de comparação com os ensaios reais de modo a melhorar previsões futuras.

O capítulo 4, “Desenvolvimento do aparato experimental”, apresenta uma síntese do desenvolvimento e funcionamento da ferramenta, da máquina de ensaios e de toda a instrumentação necessária à aquisição dos dados experimentais.

O capítulo 5, “Materiais e Métodos”, é apresentada a geometria do provete e o plano de ensaios a realizar. Este capítulo também apresenta os passos tomados na calibração dos sensores e na afinação da força da máquina. Esta calibração teve também como objetivo a verificação do funcionamento da máquina, uma vez que para se cumprir a calibração de sensores e afinação da máquina é necessário assegurar o funcionamento correto da máquina.

No capítulo 6, “Resultados e Discussão de Resultados”, serão apresentados os resultados teóricos e experimentais e será feita uma breve discussão dos mesmos.

No capítulo 7, “Conclusões e Trabalhos Futuros”, serão apresentadas as conclusões retiradas deste estudo e sugestões para o melhoramento da metodologia proposta nesta tese.

## 2. Mecânica da Fratura

Neste capítulo serão abordados conceitos básicos da mecânica da fatura e parte da história que levou à compreensão atual destes fenômenos. Serão também abordados outros conceitos, nomeadamente a triaxialidade.

### 2.1. Tenacidade à Fratura

A mecânica da fratura é a área da mecânica que estuda os mecanismos físicos que estão na origem da iniciação e propagação de fissuras e outros defeitos, responsáveis pela diminuição da secção resistente e consequente rotura estrutural. Utiliza métodos analíticos da mecânica dos sólidos para calcular a energia necessária para a progressão da fissura e métodos da mecânica experimental para caracterizar a resistência do material à fratura.

A falha de um material metálico pode ser classificada em três categorias, dependendo se ocorre na presença de deformação plástica. A fratura pode ser do tipo dúctil, do tipo frágil, ou uma combinação dos dois tipos.

A fratura dúctil caracteriza-se pela ocorrência de uma elevada deformação plástica na zona de falha. Esta fratura ocorre de forma lenta e controlada, pois é estável, necessita de um aumento de tensão aplicada para que haja progressão. É assim, o principal causador deste tipo de fratura, a aplicação de tensões demasiado elevadas. A fratura dúctil cria uma superfície irregular e fibrosa no plano de fratura. A fratura dúctil é característica de metais mais dúcteis e com maior tenacidade.

A fratura frágil caracteriza-se pela ausência de deformação plástica na zona de falha. Esta fratura ocorre de forma abrupta, ocorrendo sem gradual aumento de tensão aplicada, isto é, é instável. Este tipo de fratura é característica de metais de elevada dureza e baixa tenacidade e de materiais cerâmicos. A fratura frágil pode, também, ocorrer em metais dúcteis a baixas temperaturas.

No início do século XX os ensaios de impacto de Charpy e Izod (Broek, 1984) permitiram caracterizar o comportamento à fratura dos materiais. Estes ensaios, embora úteis, permitiam um conhecimento limitado dos fenômenos da mecânica da fratura. Durante a Segunda Guerra Mundial casos como o dos *Liberty Ships* mostrou a importância que a compreensão destes fenômenos teria na indústria (Anderson, 2005). No período pós-guerra foram realizados estudos e estabelecidos os fundamentos teóricos da mecânica da fratura. Foram propostas metodologias experimentais para o estudo das tensões e energias envolvidas na propagação das fissuras, nomeadamente testes para caracterização da tenacidade à fratura. A tenacidade à fratura é a capacidade que um determinado material tem para absorver energia até ao momento exatamente antes de ocorrer a fratura. Esta propriedade pode ser determinada sob regime elástico linear ou regime elasto-plástico, dependendo do material e das condições a que este está submetido.

Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) descreve o comportamento do material à fratura quando a deformação não linear é restrita a uma pequena região junto à frente da fissura, estando o resto do material sob deformação elástica, ou linear. Esta teoria apenas descreve fenômenos de fratura frágil, quando aplicada a fenômenos de fratura dúctil surgem sérias limitações. Nestes casos o uso da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) é a opção mais indicada.

### 2.1.1. Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

Como visto anteriormente a MFLE descreve fratura onde a maioria do material se encontra sob deformação elástica, podendo esta ocorrer de três modos distintos, como mostra a figura 2.1.

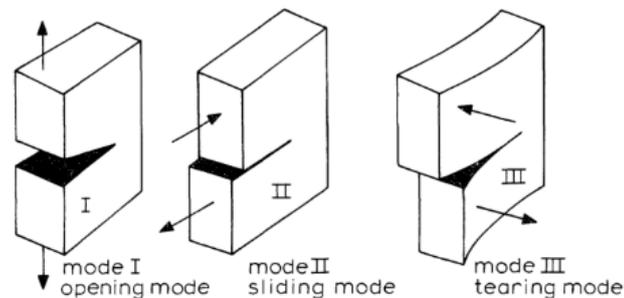


Figura 2.1- Modos de Fratura

Estes três modos, e a sua sobreposição, descrevem os casos mais gerais da fratura dos materiais. No modo, “modo de abertura”, as tensões são normais ao plano de falha e provocam um deslocamento das superfícies perpendicular a este plano. No modo II, “modo de escorregamento”, a tensão é de corte em relação ao plano de falha, provocando um deslocamento das superfícies ao longo deste plano e perpendicular ao bordo principal da fissura. No modo III, “modo de rasgar”, as tensões exercidas são de corte em relação ao plano de falha, com direção paralela ao bordo principal de falha, provocando um deslocamento das superfícies ao longo deste plano, com direção equivalente à das tensões aplicadas. Neste estudo o modo que melhor descreve a falha é o modo II.

#### *Critério de Griffith*

Uma das equações mais importantes no domínio da mecânica da fratura foi desenvolvida por Griffith, em 1921. O estudo que levou a esta equação teve como objetivo solucionar um dos problemas mais básicos relacionados com a propagação de fissuras e fratura de materiais, o da propagação de

uma fissura com comprimento  $2a$ , numa placa infinita, de espessura unitária, onde é exercida uma tensão  $\sigma$ , transversal a esta fissura, como mostra a figura 2.2.

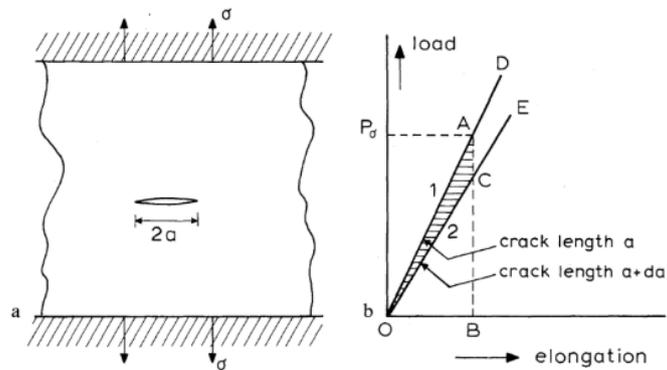


Figura 2.2- Critério de Griffith para placa fixa (Griffith, 1921, 1924): a) Placa fissurada com extremidades fixas; b) energia elástica.

A energia elástica contida na placa é representada pela área  $OAB$ . Se a fissura se alastrar  $da$ , a rigidez da placa irá decrescer (linha  $OC$ ), o que significa que parte da tensão será aliviada, uma vez que as extremidades estão fixas. Consequentemente, a energia elástica contida na placa irá decrescer para um valor representado pela área  $OCB$ . A propagação da fissura de  $a$  para  $a+da$  resultará numa libertação de energia elástica igual ao valor da área  $OAC$ .

Se uma maior tensão fosse aplicada na placa, maior seria o crescimento da fissura e maior seria a quantidade de energia libertada. Griffith afirmou que para que exista propagação da fenda a energia libertada na iniciação da fenda tem de ser suficiente para alimentar a continuação do crescimento desta. Assim, caso não ocorra a propagação da fenda a tensão exercida na placa tem de aumentar. O triângulo  $ODE$  representa a quantidade de energia disponível se a fenda crescer.

A condição para o crescimento de fenda é então (Broek, 1984):

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad (1)$$

Nesta equação  $U$  representa a energia elástica e  $W$  a energia necessária ao crescimento da fissura. Baseado nos cálculos de campo de tensões para uma falha elíptica, de Inglis (1953):

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (2)$$

Assim obtemos  $dU/da$  por unidade de espessura, onde  $E$  representa o módulo de Young. Usualmente  $dU/da$  é representado por  $G$ , conhecida de “taxa de libertação de energia elástica” por frente de fenda.

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (3)$$

A energia consumida na propagação da fenda é definida por  $R=dW/da$ , designada de tenacidade à fratura. Numa primeira aproximação pode-se assumir que a energia requerida para criar a fenda (quebra de ligações atômicas) é a mesma para cada incremento de  $da$ . Isto significa que  $R$  é constante.

A condição energética da equação (4) diz que  $G$  tem de ser pelo menos igual a  $R$  antes que possa ocorrer propagação da fenda. Sendo  $R$  constante,  $G$  tem de exceder um certo valor crítico para que ocorra propagação da fenda,  $G_{Ic}$ .

$$\frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} = G_{Ic} \text{ ou } \sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{Ic}}{\pi a}} \quad (4)$$

Esta equação é a equação de *Griffith* para fratura frágil. Nas suas experiências, *Griffith*, relacionou a força medida em hastes de vidro com falhas de tamanhos diferentes na superfície. Para um pequeno  $\sigma$  era muito elevado e em quase todos os filamentos de vidro com  $a$  muito pequeno,  $\sigma$  aproximava-se do valor teórico da tensão do vidro (aproximadamente  $E/10$ ). Esta equação sugere a existência de uma carga crítica para a propagação da fenda, que varia diretamente com o módulo de *Young* e inversamente com o comprimento de fenda. Uma interpretação alternativa da equação é a existência de um tamanho crítico de fenda para determinada tensão, onde não existirá propagação de fenda se apenas existirem fissuras com dimensões inferiores à crítica.

### 2.1.2. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)

Para materiais dúcteis, onde a zona de deformação plástica é de dimensão semelhante ou superior à dimensão da frente de fenda, a MFLE não consegue descrever na perfeição os fenómenos que levam à fratura, havendo, nestes casos, a necessidade de aplicar a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). À semelhança da MFLE, a MFEP utiliza diversos critérios para caracterizar os mecanismos de fratura, recorrendo a diversos estudos experimentais e analíticos para os quantificar.

*Atkins* (2000) procurou definir a tenacidade à fratura,  $R$ , de barras ao corte, com o objetivo de clarificar se a “força de arrombamento” do material corresponde à tensão na qual se inicia a cedência, a tensão que causa a fratura do material ou na qual ocorre o corte causado por uma instabilidade de

carga. Neste estudo, *Atkins* utilizou barras duplamente entalhadas, semelhantes às usadas neste estudo, como mostra a figura 2.3.

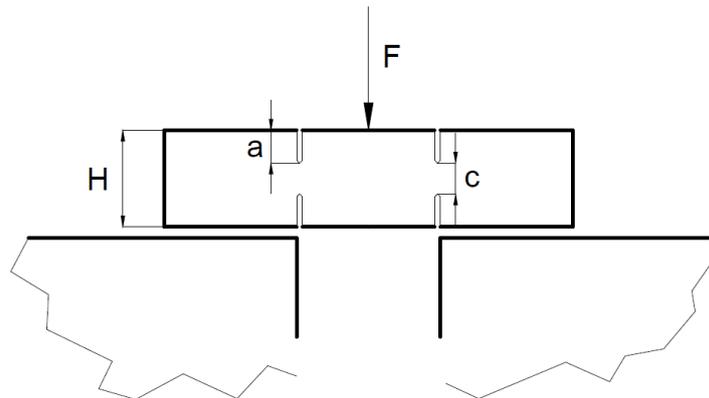


Figura 2.3.- Geometria dos provetes entalhados carregados ao corte (Silva, 2007);

Para estes provetes é considerado que a carga aplicada  $F$ , antes de ocorrer a fissuração, é dada pela equação (5).

$$F = F_0 \left[ 1 - \frac{2a}{H} \right] \left[ \frac{\delta}{H} \right]^n \quad (5)$$

Nesta equação  $n$  representa o encruamento, considerando como lei do material  $\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n$ ,  $a$  é a dimensão do entalhe,  $H$  é a altura do provete e  $\delta$  é o parâmetro CTOD (Crack Tip Open Displacement). O parâmetro CTOD corresponde ao deslocamento plástico verificado na ponta da fissura segundo a direção perpendicular ao seu eixo, (Wells, 1961).

O trabalho da força  $F$  até se dar início à fissura é dado pela expressão:

$$U = \int F d\delta = \frac{F_0 H}{(n+1)} \left( 1 - \frac{2a}{H} \right) \left( \frac{\delta}{C} \right)^{n+1} \quad (6)$$

Supondo que, antes de ocorrerem fissuras, a deformação total de plasticidade de Henky coincide com a elasticidade não linear, (Gurney, 1971) obtemos a seguinte equação para a tenacidade.

$$R = \frac{-\partial U}{4B\partial a} = \frac{F_0 H}{2(n+1)B} \left( \frac{\delta}{C} \right)^{n+1} \quad (7)$$

Na equação (7)  $B$  representa a espessura do provete, i.e. dimensão perpendicular ao plano. A equação mostra, também, que  $R$  é independente de  $\frac{a}{H}$  e que o momento onde se iniciam as fissuras é determinado por  $\delta$ , independentemente do comprimento inicial da fenda  $\frac{a}{H}$ .

Para a solução da MFEP a tenacidade é constante, apresentando-se como linhas verticais num diagrama  $F - \delta$ . No início da fissuração, alternativamente,  $R$  pode ser representado por,

$$R = \frac{\eta U_{init}}{B b_0} \quad (8)$$

onde  $U_{init}$  representa o trabalho até ao momento de formação da fenda e  $b_0$  é a dimensão da secção resistente inicial, que pode ser obtido através da equação (9).  $\eta$  designa-se por “fator de Turner” e igualando as equações (6) e (7), vimos, que neste caso tem um valor unitário.

$$b_0 = 2(H - 2a_0) \quad (9)$$

## 2.2. Triaxilidade

A triaxilidade do estado de tensões tem grande influência na quantidade de deformação plástica a que um material pode ser submetido antes de ocorrer fratura dúctil. De modo a avaliar os critérios de fratura e verificar as suas aplicações na indústria os efeitos da triaxilidade sobre a fratura e falha dos materiais têm de ser conhecidos. Segundo *Zhang (2007)*, a triaxilidade é um dos principais fatores que influenciam o crescimento e coalescência de vazios.

Segundo *von Mises* a cedência de um material depende da combinação das tensões principais. Algo semelhante acontece com a mecânica de fratura, onde os fenómenos são dependentes não só da tensão no sentido da força de corte, mas também das restantes tensões existentes no material. O fator de triaxilidade (FT) é o fator que relaciona a influencia destas tensões e como elas se relacionam entre si, sendo definido como o quociente entre a tensão hidrostática e a tensão equivalente de *von Mises* ou *tensão de corte ortogonal* (*Bhadauria, 2012*).

$$TF = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eqv}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (10)$$

O *FT* irá ter influência no modo como acontece a fratura, influenciando o tipo de fissuras que se formam ou mesmo se ocorre fratura do material, como é o caso de um material dúctil submetido a uma tensão hidrostática, uma vez que não ocorre deformação plástica (Bao e Wierzbicki, 2005).

Tabela 1- Características dos modos de deformação elementares;

Modo de deformação	Trajétória de deformação ( $\beta$ )	Estado de tensão	Tensão média ( $\sigma_m$ )	Coefficiente de triaxilidade ( <i>FT</i> )
Tração uniaxial	$-\frac{1}{2}$	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	$\frac{\sigma_1}{3}$	$\frac{1}{3}$
Deformação plana	0	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$ $\sigma_3 = 0$	$\frac{\sigma_1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
Corte puro	-1	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = -\sigma_1$ $\sigma_3 = 0$	0	0
Expansão equi-biaxial	1	$\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$	$\frac{2\sigma_1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Compressão uniaxial	-2	$\sigma_2 < 0$ $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$	$\frac{\sigma_1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

Na tabela 1 estão apresentados os estados de tensão mais comuns e como as diferentes grandezas variam, consoante o modo de tensão a que o material está submetido. Esta tabela apenas apresenta estados de tensão onde  $\sigma_3 = 0$ , isto é, condições de tensão plana. Nesta tabela,  $\beta$  representa a trajetória de carregamento, que relaciona  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , segundo a equação:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (11)$$

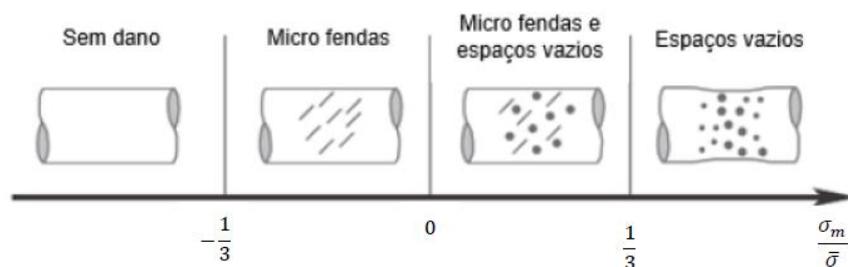


Figura 2.4.- Mecanismos de fratura no espaço da triaxilidade (Brünig e Gerke, 2011);

Na figura 2.4. é apresentado o tipo de defeitos que se formam no material segundo diferentes *FT*. Na figura observa-se que não se formam fendas em materiais sujeitos a compressão uniaxial.

### 2.3. Estudos de Caracterização da Tenacidade à Fratura

Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de estudos que têm como objetivo a caracterização da tenacidade à fratura dos materiais sob diferentes estados de tensões. Estes estudos utilizam uma grande variedade de técnicas e aparatos de modo a colocar o provete sob os diversos estados de tensão. O tipo de estudo mais comum, para fazer a caracterização da tenacidade à fratura do material usa provetes entalhados submetidos a uma força de corte.

Ao longo dos anos foram feitos estudos sucessivos, que tiveram como objetivo fazer esta caracterização de forma mais eficiente e precisa. No início foram utilizados provetes entalhados, circulares (Meyer and Manwarning, 1986) e paralelepípedicos, a partir dos quais foi desenvolvida uma metodologia experimental para a caracterização da tenacidade à fratura (Atkins, 2000). Ao longo dos anos estas metodologias foram aperfeiçoadas, resultando em provetes cada vez mais complexos, como o mostrado na figura 2.5 (a) (Astakhov et al., 2013). Esta geometria, embora extremamente precisa, apenas permitem colocar o material sob um estado de tensões, para cada tipo de provete. Isto, aliado ao elevado custo de produção, faz com que este tipo de estudo seja bastante dispendioso.

O trabalho realizado por Ezequiel (2010), teve como objetivo a caracterização da tenacidade à fratura de uma liga de alumínio ao corte em modo II. Neste trabalho foi usado um provete paralelepípedo, duplamente entalhado, que foi montado num conjunto punção/matriz, como mostra a figura 2.5 (b). De modo a variar o estado de tensão a que o provete está sujeito foi aplicada uma força lateral *F*.

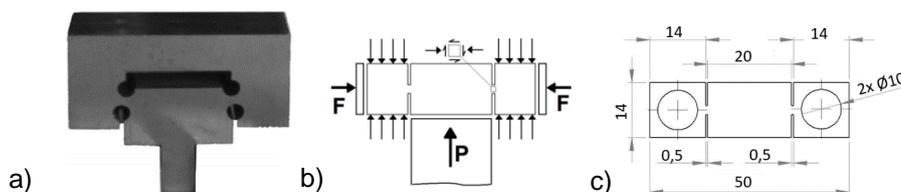


Figura 2.5- b) Provette usado por Astakhov (2013); b) Montagem do trabalho realizado por Ezequiel; c) Provette a usar neste estudo;

O uso de uma geometria simples, aplicada numa máquina de ensaios versátil, que possibilita colocar o provete sob diversos estados de tensões, permite fazer este tipo de estudos de uma forma mais rápida e menos dispendiosa. No entanto, nesta configuração apenas é possível colocar o provete sob um estado de tensão compressivo. De modo a colocar o provete sob estados de tensão de tração, foram feitas alterações a este estudo. Estas alterações serão discutidas no capítulo 5.1, resultando no provete da figura 2.5 (c).

### 3. Modelo Numérico

As especificações técnicas para a máquina de ensaios foram estimadas com base no método dos elementos finitos (FEM), através da utilização do software ABAQUS, versão ABAQUS/CAE 2017. Para isso foram simulados os ensaios de fratura e estimadas a carga e deslocamento máximos requeridos para a realização dos testes experimentais. Estes modelos servirão, também, como ponto de comparação entre o modelo do material utilizado e os resultados obtidos experimentalmente, permitindo avaliar o quão próximas estão as previsões da realidade.

Foram desenvolvidos dois modelos numéricos: (i) compressão uniaxial para validação da modelação matemática da curva de escoamento e (ii) fratura bidimensional em condições de deformação plana. No anexo I é possível ver um guia passo a passo de como foi feita a simulação.

#### 3.1. Comportamento do Material

A resposta mecânica do AISI1045 obtida por Gregório (2017) foi modelada no programa de elementos finitos. O modelo utilizado considera um comportamento do material elásto-plástico em condições quasi-estáticas compatível com a assinatura mecânica da prensa de rótula. Para a deformação elástica foram usados dados provenientes de uma biblioteca de características de materiais, de onde se obteve o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

De forma a verificar se o modelo teórico reproduz corretamente os resultados experimentais, foi feita uma simulação onde se reproduziu um ensaio de compressão análogo ao que originou estes dados. Para esta simulação foi simulado um cilindro com 7mm de altura e 6mm de diâmetro. Esta análise foi feita cumprindo o procedimento descrito no anexo I, usando a opção de axi-simetria, uma vez que esta opção permite reproduzir com maior precisão o ensaio, sem que isto represente um grande incremento na utilização de recursos computacionais.

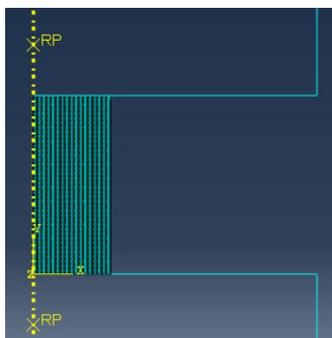


Figura 3.1- Malha do provete, punção e matriz utilizado na validação do comportamento do material;

Neste modelo foram usados elementos quadráticos com uma dimensão média de 0,05 mm, do tipo “tensão axissimétrica”, resultando numa geometria com 8723 elementos, como mostra a figura 3.1., na qual está representada a geometria utilizada nesta simulação. Colocou-se uma condição de fronteira de encastramento na matriz e ao punção foi imposto um deslocamento vertical a velocidade constante, segundo o qual se estabeleceu a condição de final da simulação, onde a simulação termina quando o punção atingir um deslocamento de 5mm. Estas especificações resultam num tempo de calculo baixo, apenas 1 minuto, no entanto verificou-se que um refinamento superior da malha é desnecessário, uma vez que não se verifica diferença nos resultados.

Da simulação retirou-se o valor do deslocamento e da força exercida pelo punção, que foi convertido em tensão e extensão, seguindo as equações:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (13)$$

Notar que tanto a tensão como a extensão são efetivas, pelo que nos cálculos são utilizados os valores de área e altura do provete instantâneos. Assim  $F$  e  $h$  correspondem aos valores instantâneos de força e altura do provete, respetivamente, e  $A_0$  e  $h_0$  corresponde aos valores da área e da altura do provete no momento inicial, respetivamente. O material é considerado incompressível, logo o seu volume é constante ao longo de todo o ensaio. Assim sendo a área instantânea pode ser calculada através da expressão:

$$A = A_0 \frac{h_0}{h} \quad (14)$$

A tensão pode então ser calculada da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{F}{A_0 \frac{h_0}{h}} = \frac{F}{A_0} (1 - \varepsilon_E) \quad (15)$$

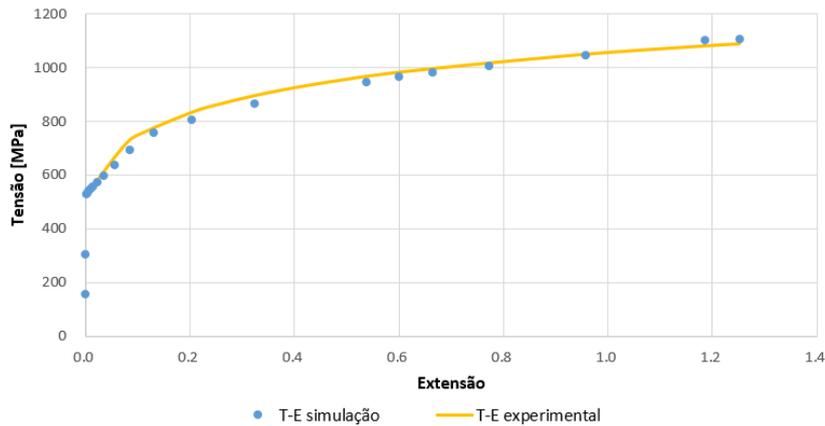


Figura 3.2-Comparação entre curva tensão-extensão real (laranja), introduzida como lei do material na simulação, e resultados da simulação (azul);

No gráfico da figura 3.2 está representada a curva obtida experimentalmente por Gregório (2017), a laranja, que descreve o comportamento elasto-plástico do material. Como referido anteriormente, esta curva foi utilizada como lei do material, no modelo numérico. Sobreposta a esta curva está a curva resultante do ensaio (azul) onde este modelo numérico foi aplicado. Verifica-se que esta curva reproduz na perfeição a curva obtida por Gregório. Isto significa que o modelo numérico usado reproduz de forma correta o comportamento do material. Assim, este foi o modelo usado nas restantes simulações deste estudo.

### 3.2. Comparação de Simulação 2D e 3D em Fratura

O modelo numérico implementado nesta investigação assume que todo o provete se encontra no estado de deformação plana. Apesar de uma região próxima da superfície do provete estar no estado de tensão plana, aplica-se esta simplificação, considerando a baixa espessura desta zona. Esta simplificação faz com que o modelo aplicado não simule na perfeição o comportamento real do material. Assim, foi feita uma comparação entre um modelo 2D em deformação plana e um modelo 3D, que tem em conta as regiões em tensão plana e deformação plana.

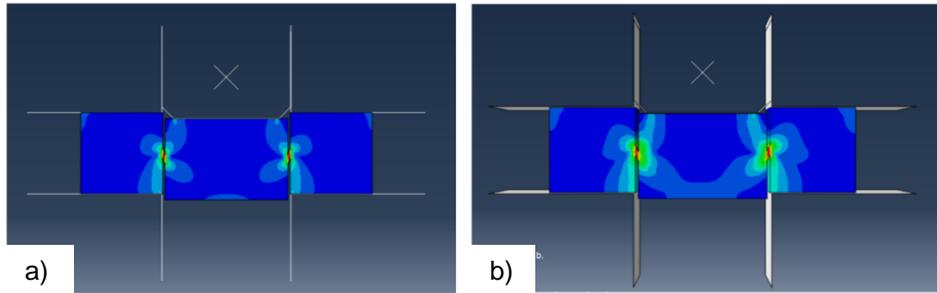


Figura 3.3- Distribuição do campo de tensões no provete deformado, na simulação 2D (a) e 3D (b);

De modo a fazer esta comparação, foram feitas duas simulações semelhantes, uma em 2D, outra em 3D, como visto na figura 3. 3. Ambas seguiram o protocolo descrito no anexo I, usando o provete paralelepípedo, semelhante ao usado na parte experimental, com uma espessura de entalhe de 1mm, e uma secção resistente de  $16 \text{ mm}^2$ .

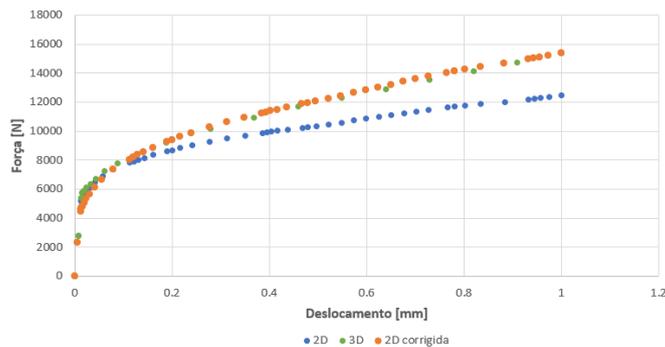


Figura 3.4- Gráficos força-deslocamento resultante de simulação em 2D (azul) e em 3D (amarelo) e gráfico 2D com fator de correção (laranja);

A figura 3.4 mostra a diferença entre resultados de uma simulação 2D e 3D. Verifica-se que o modelo 2D apresenta resultados diferentes do modelo 3D, o que indica que este não reproduz corretamente o comportamento do material, sendo o valor de força no modelo 2D inferior ao do modelo 3D. No entanto, no decorrer desta comparação, verificou-se que a simulação 3D é muito dispendiosa em recursos computacionais, o que faz da simulação 2D a única opção viável a este estudo. Assim, de forma a colmatar esta diferença entre resultados é necessário aplicar um fator multiplicador aos resultados 2D de forma a obter resultados mais próximos da realidade. Da comparação de ambos os resultados obteve-se a equação (16), onde  $F$  é o valor da força resultante da simulação 2D,  $F_c$  é o valor de força com a correção e  $d$  é o valor do deslocamento. Este fator multiplicativo permite aproximar a simulação 2D da 3D, que melhor representa a realidade, no entanto este fator foi obtido através de um método de comparação dos dois resultados, pelo que apenas se aplica ao modelo utilizado neste estudo.

$$F_c = F * (1.23 * d^{1/12}) \quad (16)$$

### 3.3. Análise de Sensibilidade da Malha

De modo a otimizar o uso dos recursos computacionais, foi feita uma análise de sensibilidade à malha, onde se utilizou a força máxima de corte como fator de avaliação à convergência. Nesta análise foram feitas simulações onde se variou o número de elementos de malha utilizados. Foi avaliada a influência deste parâmetro na força máxima de corte e no tempo de cálculo. Como critério de fim da simulação foi utilizado o deslocamento do punção, terminando a simulação quando este atingisse um deslocamento de 1mm. O modelo aplicado nestas simulações foi feito em concordância como descrito no anexo I, apenas variando o número de elementos.

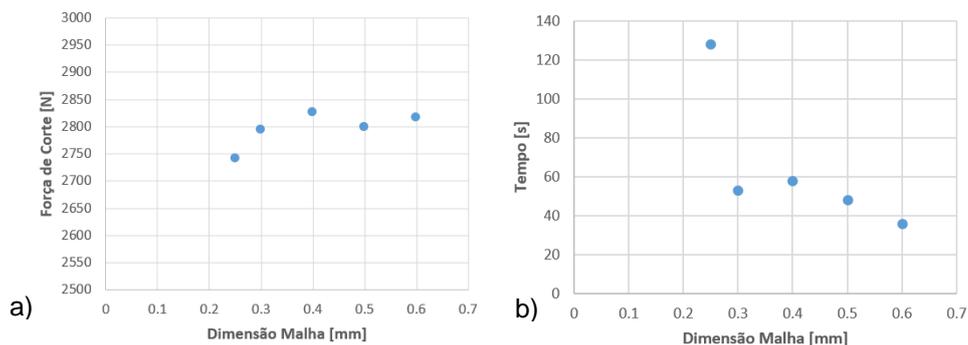


Figura 3.5- a) Relação entre dimensão média da malha e força de arrombamento máxima; b) Relação entre dimensão média da malha e tempo despendido na simulação;

Como é possível ver na figura 3.5, ainda não se verificou uma convergência no valor da força de corte, pelo que, o processo de refinamento da malha tem de ser continuado. Isto não apresenta nenhum problema a nível computacional pois, como se pode ver na figura, o tempo por simulação é baixo, para este número de elementos. No entanto, verifica-se que apenas os elementos na vizinhança do plano de corte sofrem deformação, o que faz com que o refinamento da malha em todo o provete seja desnecessário. Assim, criou-se uma partição da malha que separa a região que sofre grande deformação, onde será necessária maior densidade de elementos, do restante provete, onde se manteve a dimensão media de elemento de 0,2mm. Esta nova geometria de malha irá diminuir o tempo de cálculo para refinamentos futuros.

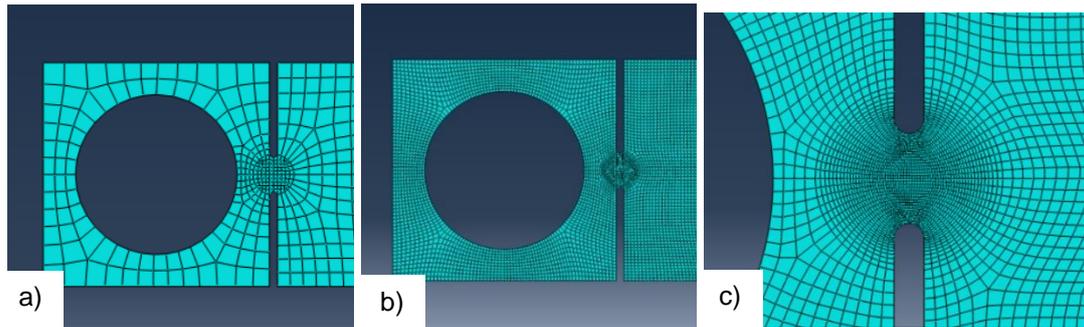


Figura 3.6- a) Malha grosseira, onde é possível ver a forma dos elementos na malha e diferentes regiões; a) Malha utilizada; b) Pormenor da malha na zona de corte, onde se observa as diferentes regiões da malha;

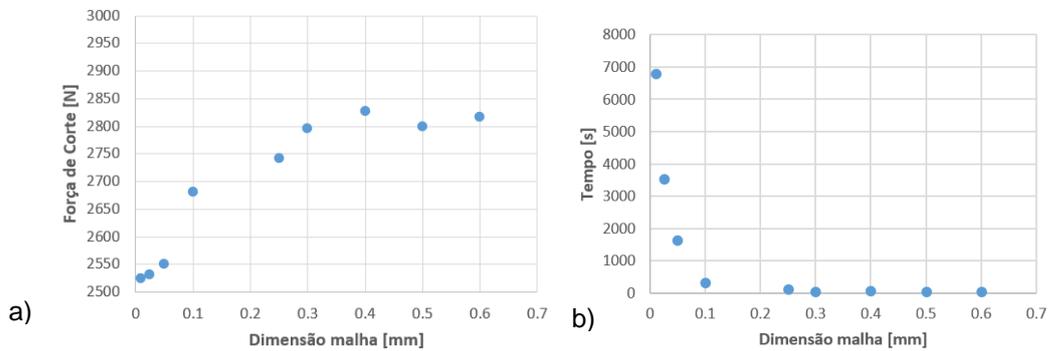


Figura 3.7- a) Relação entre dimensão média da malha e força de corte, para uma malha com duas secções distintas; b) Relação entre dimensão média da malha e tempo despendido na simulação, para uma malha com duas secções distintas;

Como mostra a figura 3.7 após atingir uma dimensão de elemento de 0,05 mm começa a surgir uma tendência de estabilização da força de rutura. É também a partir deste ponto que se verifica uma grande subida no tempo de simulação. Atendendo a estes dois fatores definiu-se como tamanho ideal de elemento 0,05 mm nas regiões que contêm os planos de corte e 0,2 mm nas restantes regiões do provete.

## 4. Desenvolvimento do Aparato Experimental

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da máquina de ensaios constituída por uma prensa de rótula e uma ferramenta multi-axial. A ferramenta foi desenhada de modo a permitir a aplicação controlada de carga normal à secção resistente dos provetes durante a realização do ensaio de fratura. A prensa de rótula foi otimizada de forma a permitir valores de carregamentos mais elevados sem prejuízo da rigidez estrutural. O capítulo também aborda a instrumentação e a aquisição de dados.

### 4.1. Máquina de Ensaio

Os resultados da simulação numérica mostram ser necessária a utilização de uma prensa com carga nominal superior a 20kN e um curso efetivo superior a 1mm. Estes indicadores serão apresentados em maior detalhe na secção 6.1.1. Foi escolhida uma prensa disponível no laboratório, do fabricante *SCHMIDT*, modelo *Steuerung Typ 32*. A prensa é uma prensa do tipo rótula, de acionamento pneumático e as suas especificações estão descritas na tabela 2. Apesar da força indicada ser de 15kN, a uma pressão de 8bar, verificou-se só ser possível atingir cerca de 11kN, com esta pressão.

*Tabela 2- Especificações originais da prensa, descritas pelo fabricante;*

N. do Fabricante	9-403-B5-D9	Tipo de prensa	32
Ano de construção	1989	Força Nominal	15 kN
Pressão Nominal Máxima	8 bar	Tempo de Avanço	65 ms
Curso	15 mm	Distância de Segurança	110mm
Raio do Embolo	32 mm		

De forma a testar o comportamento da prensa quando submetida a uma pressão mais elevada, foi feito um teste a 10bar, elevando a força exercida para 12kN, sem que se verificasse grande sobrecarga na estrutura da prensa ou no atuador pneumático. É importante notar que ambas as forças foram medidas à mesma distância do ponto morto inferior do carro móvel, o mais perto possível do ponto morto inferior (PMI), uma vez que a posição a que é exercida a força tem influência no seu valor máximo, como será visto com mais pormenor na secção 5.3.1. Estes resultados mostram a necessidade de melhorar a cadeia cinemática e a componente estrutural da prensa.

A utilização da pressão acima das especificações da prensa, pode ser perigoso, uma vez que os seus componentes não estão dimensionados para pressões tão elevadas. O uso prolongado da prensa a esta pressão pode causar danos permanentes na máquina e pode colocar o utilizador em risco, pelo que o uso de ar comprimido acima dos 8 bar deve ser evitado.

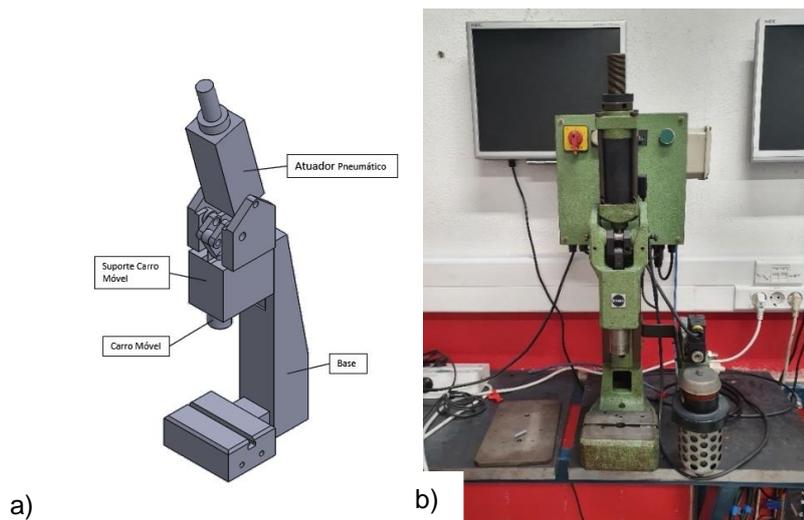


Figura 4.1- a) CAD da prensa com os diferentes componentes identificados; b) Disposição inicial da prensa no laboratório;

#### 4.1.1. Força da Máquina

A força exercida pode ser aumentada através de dois métodos, substituição do atuador por um capaz de exercer uma maior força ou alteração da cadeia cinemática responsável pela conversão do movimento em força. A primeira opção seria a mais indicada, uma vez que não colocaria o circuito pneumático em sobrecarga, no entanto esta opção é a mais dispendiosa e poderia provocar sobrecarga sobre a restante cadeia cinemática da prensa. A segunda opção tem como desvantagem a diminuição do curso da prensa, podendo fazer com que a prensa não tenha curso suficiente para a realização do ensaio.

A força exercida por um atuador pneumático é diretamente proporcional à área do embolo e à pressão do gás, regendo-se pela equação (17). Desta equação conclui-se que para aumentar a força exercida pelo atuador pneumático basta aumentar a pressão do ar ou aumentar a área do embolo.

$$F_{pneu} = A_{emb} * P_{ar} \quad (17)$$

As fontes de ar comprimido disponíveis restringem-se a duas opções: (i) a rede de ar comprimido existente no laboratório com elevado caudal, mas onde a pressão do ar varia entre os 5 e 6 bar, ou (ii) um compressor de baixa potência mas onde a pressão pode atingir um valor máximo de 10bar. Para além da baixa pressão da rede do laboratório, esta ainda apresenta flutuações de valor dificultando a implementação da ferramenta multi-axial onde a carga será controlada pela pressão do ar-comprimido. Assim, foi decidido que usar o compressor como fonte de ar comprimido dedicada à ferramenta multi-axial. Mesmo assim, a carga que é possível alcançar é ainda insuficiente. Para

ultrapassar estas limitações pode-se (i) adquirir uma fonte de pressão com maior capacidade, o que implicaria a compra de um novo compressor e um gasto de dinheiro muito além do orçamento deste trabalho, ou (ii) a modificação da cadeia de conversão de movimento de modo a aumentar a multiplicação da força disponível em detrimento do seu curso.

O mecanismo de conversão de movimento tem por base o conceito de alavanca de rótula, equivalente ao esquematizado da figura 4.2, que permite multiplicar a força exercida pelo atuador pneumático. O fator de multiplicação da rótula é variável, sendo dependente da posição onde esta se encontra. As posições extremas do carro-móvel são (i) o ponto morto superior (PMS) onde o atuador se encontra completamente recolhido e (ii) o ponto morto inferior (PMI), onde AB e BC se encontram colineares e a prensa se encontra na sua extensão máxima.

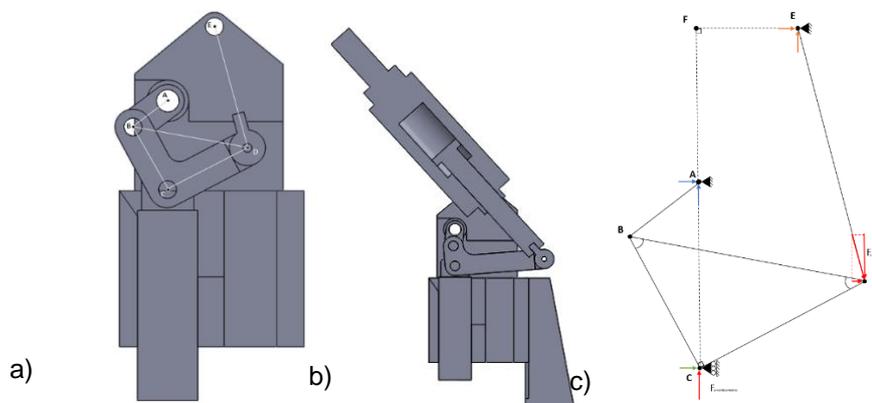


Figura 4.2- a) CAD e esquematização do mecanismo; b) Esquema do mecanismo; c) Decomposição vetorial da rótula com vetores de forças;

Como mostra a curva de funcionamento da figura 4.3, a força exercida pela prensa não é constante. A sua assinatura tem uma evolução teórica exponencial onde a força tende para infinito junto ao PMI. Na figura 4.3 é sobreposta a curva de funcionamento teórica da prensa (azul) e as curvas resultantes da simulação do ensaio do provete com entalhe de 1mm de espessura, colocado a várias distâncias do PMS. Verifica-se que apenas no provete colocado a maior distância do PMS é possível exercer forças suficientes ao corte, concluindo que este mecanismo não é o mais indicado a esta aplicação. Conclui-se que, embora a força disponível pela prensa sejam suficiente para fraturar o provete, o curso da prensa onde estas zonas são geradas é muito reduzido. Este problema vai ser exacerbado por um fenómeno abordado na secção 5.3.1, a inversão da rótula, que vai limitar o funcionamento da prensa.

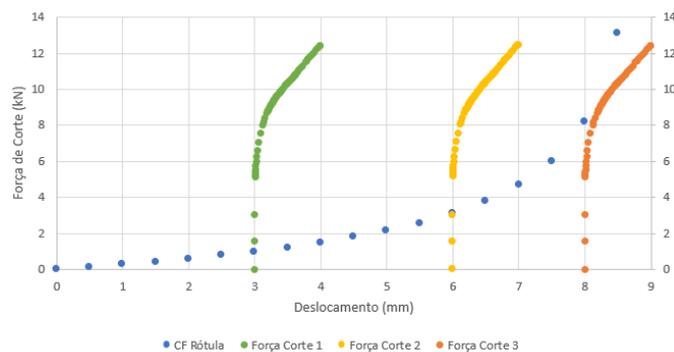


Figura 4.3- Comparação da curva de funcionamento teórica da rótula com a curva resultante da simulação do ensaio do provete de 1mm, colocado a várias distâncias do PMS;

Foram explorados métodos alternativos de multiplicação da força, onde a curva de funcionamento tivesse um comportamento que se assemelhasse ao pretendido. Concluiu-se que manter o mecanismo de rótula seria o melhor compromisso técnico e económico.

A alteração do mecanismo consistiu em redimensionar os seus componentes de forma a que esta apresentasse uma curva de funcionamento mais favorável a esta aplicação. De modo a definir as dimensões ideais para a alteração foi feita uma análise estática. Esta análise foi feita com o carro móvel a 2mm do PMI, assegurando que após se atingir a força de corte necessária a prensa ainda tem curso suficiente para realizar o corte. Desta análise resultou a geometria descrita na tabela 3.

Tabela 3- Dimensões da rótula alterada;

Braço	$\overline{AB}$	$\overline{BC}$	$\overline{CD}$	$\overline{AF}$	$\overline{EF}$
Dimensão [mm]	20,5	25	110	50	31

Esta nova geometria aumenta a força exercida pela prensa para 21,8kN. Com esta alteração espera-se que seja possível realizar todos os ensaios necessários deste estudo. Esta alteração requer o fabrico de três novos componentes. As peças foram feitas em aço, AISI1045, utilizando métodos de maquinagem convencionais. A geometria destes componentes é apresentada no anexo VII.

#### 4.1.2. Cadeia Pneumática

Originalmente a prensa era acionada através de uma electroválvula efetiva até 8bar. Como visto anteriormente para este estudo será utilizada uma pressão de 10bar, o que impossibilitará o uso da electroválvula. Além disso, o uso de uma electroválvula limitaria o uso futuro da prensa, uma vez que para além de uma fonte de ar pressurizado, fará com que seja necessária uma fonte de corrente adicional. Optou-se pelo uso de uma válvula pneumática convencional AirTAC, modelo 4H210-08. Esta

válvula permite o controlo do atuador através de um manípulo, podendo alternar entre as duas posições do atuador.

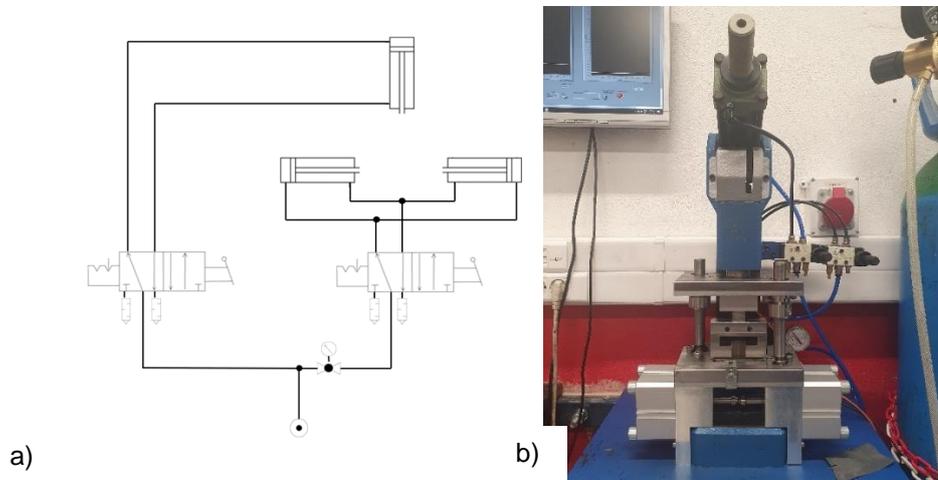


Figura 4.4- a) Esquemática do sistema pneumático; b) Fotografia da prensa com ferramenta e cadeia pneumática;

## 4.2. Ferramenta de Testes

As funções a cumprir pela ferramenta podem dividir-se em três tipos: conter o conjunto punção/matriz que irá suportar o provete e transmitir a força criada pela prensa; exercer e aplicar no provete a força normal ao plano de corte de compressão ou tração; suportar os sensores necessários à monitorização dos parâmetros básicos do ensaio, sem interferir com as leituras feitas por estes. Ao longo deste capítulo será abordado o desenvolvimento desta ferramenta e as soluções encontradas para resolver estes desafios.

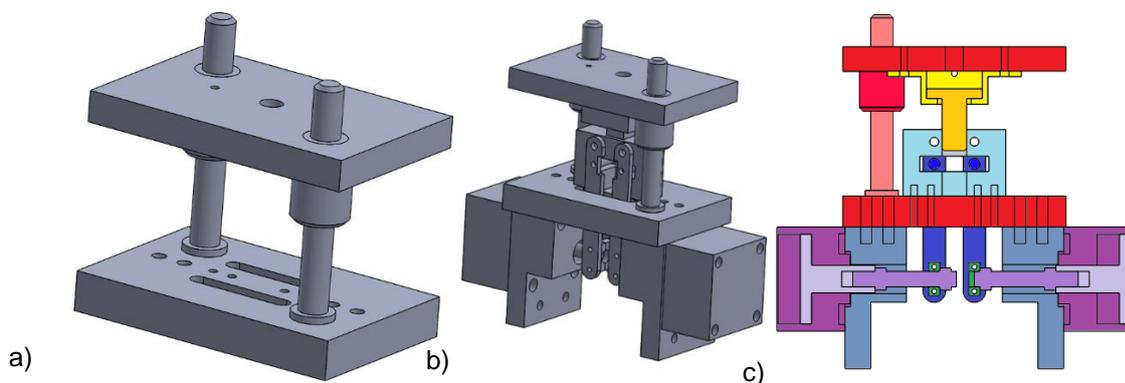


Figura 4.5- a) Porta ferramentas; b) Vista geral da ferramenta criada para este estudo; c) Esquemática da ferramenta, na duas configurações, compressão (direita) e tração (esquerda);

#### 4.2.1. Conjunto Punção/Matriz

A ferramenta será composta por um conjunto matriz/punção, feitos em aço AISI1045, recorrendo a técnicas de fabrico convencional, maquinaria de controlo numérico e de electro-erosão por fio. É importante garantir o guiamento do punção na matriz, sem que estes se toquem, garantindo que a força é aplicada na vertical e que a influência do atrito no resultado da força exercida é mínima. De modo a garantir este guiamento foi criado um porta-ferramenta, composto por uma base e um teto sólido feito em aço, onde são montadas, na base, duas colunas de guiamento que, em conjunto com os respetivos casquilhos, montados no teto, irão garantir o paralelismo e alinhamento entre as placas, como representado na figura 4.5 (a).

#### 4.2.2. Força Normal ao Plano de Corte (FNPC)

A força normal ao plano de corte terá de ser aplicada independentemente da força exercida pela prensa. Esta força terá, também, de ser constante ao longo do ensaio e terá de ser regulável, com uma capacidade de atingir uma força que permita exceder a tensão de cedência do material.

Para um aço AISI1045 a tensão de cedência é 450MPa. O maior provete a usar neste estudo tem uma área de secção resistente de  $16 \text{ mm}^2$ . Segundo a equação (18) a força normal ao plano de corte terá de ser superior a 7.2kN.

$$F = \sigma * A \quad (18)$$

Atendendo aos recursos disponíveis no laboratório optou-se pelo uso de dois atuadores pneumáticos, que para uma pressão de 10bar conseguem exercer uma força de 3,1kN no avanço (área do embolo de  $3,12 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ) e uma força de 2,8kN ao contraírem (área do embolo de  $2,8 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ). Os atuadores não têm capacidade de exercer a força necessária, logo não é possível aplicarem essa força diretamente. Por isso foi projetado um sistema de alavanca de modo a multiplicar a força, como mostra a figura 4.5 (c). Este sistema permite uma multiplicação de 6,2 vezes, permitindo exercer uma força de 19kN na compressão e 17kN na tração. A demonstração destes valores será feita com maior pormenor na secção 4.3.3.

#### 4.2.3. Suportes para Instrumentação

O terceiro desafio a solucionar pela ferramenta é o de incorporar na ferramenta toda a instrumentação necessária à recolha de dados, sem interferir com a leitura das grandezas a medir. Este estudo requer a monitorização da força e do deslocamento do punção e recolha de vídeo da zona de fratura. Para a recolha destes dados foi utilizada uma célula de carga extensométrica, um sensor de deslocamento extensométrico e uma câmara de vídeo com iluminação própria.

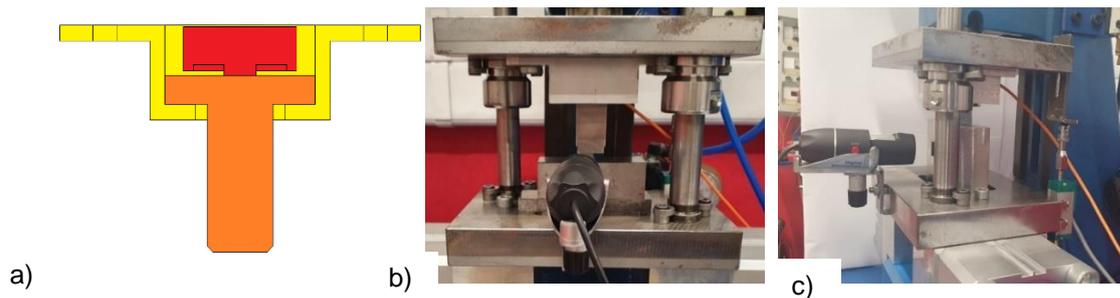


Figura 4.6- a) Corte da célula de carga e punção inseridos no casquilho; b) Montagem da célula de carga e da câmara na ferramenta; c) Montagem da câmara e sensor de deslocamento na ferramenta;

De modo a não influenciar a força exercida no provete e a fazer uma medição correta, a célula de carga foi montada em série com o punção. Foi fabricado um casquilho, que aloja a célula de carga, como mostra a figura 4.6 (a). O uso deste casquilho permite recuar o punção, quando o carro móvel recua, sem afetar o avanço do punção, uma vez que neste sentido o casquilho deixa de estar em contacto com o punção. Adicionalmente, este casquilho assegura o guiamento da célula de carga, garantindo a concentricidade desta com o punção, sem interferir na leitura da força.

O sensor de deslocamento foi montado em paralelo com o punção. O sensor de deslocamento terá, também, de estar paralelo ao movimento do punção, para garantir uma leitura correta do deslocamento. Como é possível observar na figura 4.6 (c), o sensor de deslocamento foi montado na base da ferramenta, onde vai interagir com um batente montado no teto da ferramenta, onde a superfície de contacto é perpendicular ao movimento do punção.

A câmara seleccionada para a captura de imagem inclui um suporte, sendo apenas necessário fixar este suporte à ferramenta. Como mostra a figura 4.6 (c), foi fabricado um suporte que usa duas peças em L fixas entre si, através de uma ligação aparafusada, que é fixo à base da ferramenta e ao suporte da câmara. Este suporte permite ajustar a posição e inclinação da câmara, facilitando o foco e o posicionamento da imagem.

### 4.3. Instrumentação e Aquisição de Dados

Para a realização deste estudo foi necessário monitorizar os principais parâmetros físicos do ensaio. Com esse intuito utilizaram-se vários tipos de sensores e métodos de aquisição de dados. Ao longo deste capítulo será feita uma descrição dos sensores e do seu funcionamento, bem como a forma de recolha dos dados por eles produzidos.

### 4.3.1. Força do Punção

A força de corte foi medida com uma célula de carga extensométrica da DAYSENSOR, modelo DYHW-116, com capacidade de medição até 5000kg, ou aproximadamente 49kN, como mostra a figura 4.7 (a). Esta célula extensométrica usa quatro extensómetros montados numa configuração de ponte de Wheatstone para fazer a medição e requer uma tensão de excitação de 10VDC. De forma a fornecer a tensão de excitação à célula e a aumentar o sinal por ele produzido, foi necessário um amplificador de sinal. Foi utilizado um amplificador CEL10-A da Krenel. Este amplificador necessita que lhe seja fornecida uma corrente de 24VDC, permitindo fornecer à célula de carga uma corrente de excitação de 10VDC e aumentar o sinal de saída da célula de carga com uma sensibilidade de 2mV/V. A célula de carga emite um sinal que varia entre 0 e 20mV, onde 0V corresponde à ausência de força e 20mV a carregar a célula com 49 000 N. O amplificador tem a capacidade de aumentar o sinal de saída até 10V, logo permite cobrir todo o espectro da célula de carga.

A alimentação do amplificador de sinal foi feita através de uma fonte de sinal MEANWELL, modelo DR-15-24, que com uma entrada de corrente elétrica da rede nacional gera uma saída de 24VDC e 0,63A.



Figura 4.7- a) Célula de carga; b) Fonte de alimentação de 24V; c) Amplificador de sinal Krenel;

Antes de usar a célula de carga neste estudo é necessário fazer a calibração do instrumento. Para isto a célula de carga foi carregada com massas de valor conhecido e foi medida a sua resposta. De forma a aumentar a gama de forças exercidas na calibração uma alavanca foi utilizada, como mostra a imagem 4.8 (b), que permite aumentar a força exercida pelos pesos. A força exercida na célula de carga depende da sua posição ao ponto de charneira e da massa colocada na extremidade da barra. Dos ensaios de calibração retirou-se a reta de calibração, como mostra a figura 4.8 (b).

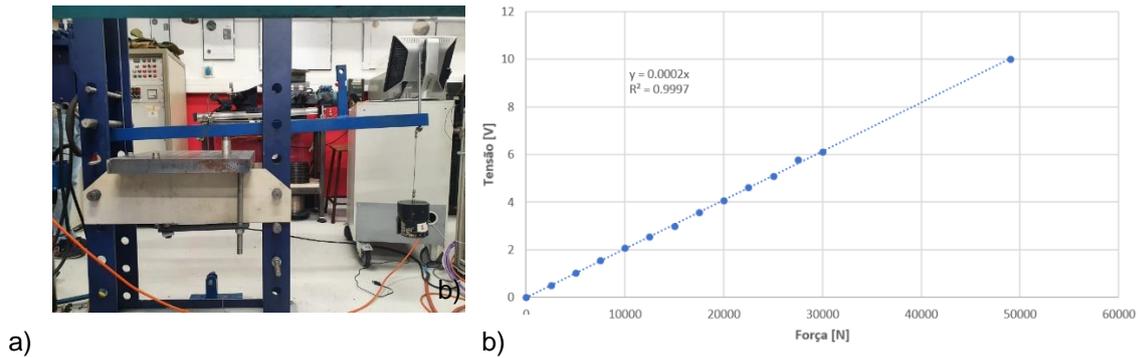


Figura 4.8- a) Montagem para a calibração da célula de carga; b) Curva de calibração da célula de carga;

A reta de regressão permite definir a relação entre a força exercida e a voltagem, segundo a equação, onde  $F$  representa a força em Newtons e  $F_e$  representa o potencial, em Volts, do sinal emitido pelo amplificador de sinal:

$$F[N] = 4900 * F_e[V] \quad (19)$$

Este valor vai de encontro ao esperado teoricamente, uma reta com o declive de 4900N/V, que corresponde a um valor de saída de 10V para uma carga de 49 000 N.

Embora seja esta a equação de calibração da reta, um passo adicional é necessário para a calibração do amplificador de sinal. Para a calibração é necessário regular dois parâmetros, o zero e a gama do amplificador. Para o ajuste do zero coloca-se a célula de carga em repouso e através do uso dos parafusos designados por “ZERO” ajusta-se o sinal apresentado para que coincida com o zero do gráfico. Para o ajuste da gama de amplificação colocou-se a célula de carga sob uma carga conhecida e através do parafuso “SPAN” ajusta-se para a voltagem pretendida. Preferencialmente a carga a utilizar neste último passo é de 5 toneladas. Esta calibração deve anteceder a curva de calibração da célula de carga, calculando o valor da voltagem objetivo através do valor de calibração teórico.

### 4.3.2. Deslocamento

De forma a quantificar o deslocamento do punção foi utilizado um sensor de deslocamento comercial KTR-10mm, da SONSEIKO. Este sensor é do tipo indutivo e necessita de uma tensão de excitação de 5V, permitindo medir uma deslocamento até 10mm. Esta tensão de excitação foi fornecida por uma fonte de sinal MEANWELL, modelo DR-15-5, que fornece 5VDC e 2.4A.

À semelhança da célula de carga, foi preciso fazer a calibração deste sensor. Assim, com o uso de calços calibrados, de dimensões conhecidas, foi avaliada a resposta do sensor. A curva resultante é a curva de calibração do sensor, de onde se retirou a reta de calibração:

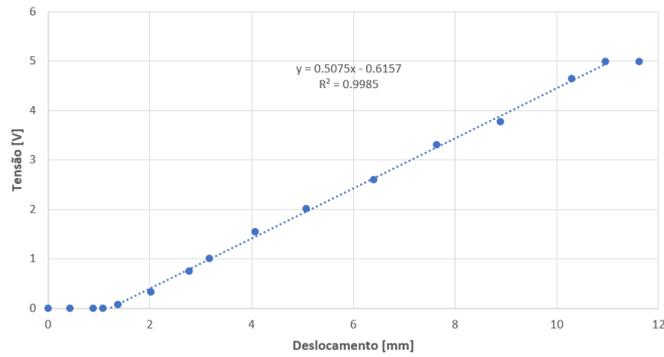


Figura 4.9- Curva de calibração do sensor de deslocamento;

Da reta resultante, da curva de calibração, é retirada a seguinte relação de conversão para o deslocamento, onde  $d$  representa o deslocamento do punção e  $d_e$  o potencial emitido pelo sensor de deslocamento:

$$d[\text{mm}] = 2 * d_e [\text{V}] \quad (20)$$

O resultado obtido vai de encontro ao resultado esperado, que seria uma reta com declive 2mm/V, o que corresponde à sensibilidade do sensor. É importante referir que este sensor apenas mede 10mm, no entanto tem um curso de 12mm, o que origina duas “zonas mortas” no início e no fim do curso, onde não obtemos alteração da leitura. Por este motivo é necessário ajustar a posição do sensor até chegar à zona onde a sua resposta é linear.

### 4.3.3. Força Normal ao Plano de Corte

Ao contrário do que acontece com a força exercida pelo punção a força normal ao plano de corte é constante, dispensando monitorização. No entanto é preciso um mecanismo que permita ajustar a força exercida. Com este propósito foi adicionada uma válvula reguladora de pressão, de modo a controlar a força exercida pelos atuadores pneumáticos, controlando a pressão do ar dentro da câmara.

É importante notar que a área do embolo difere dependendo do sentido da força. Para um ensaio com um pré-tensionamento compressivo a área do embolo, designada como  $A_c$ , é a área total. Quando o atuador está na configuração de tração a área do embolo é menor, pois é preciso subtrair a área da haste do embolo. As áreas para as duas configuração são:

$$A_c = 3117.25 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

$$A_t = 2803.09 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Resultam, assim, as duas expressões que relacionam a força exercida pelos atuadores com a pressão pneumática:

$$F_c = P * 3117.25 [N] \quad (23)$$

$$F_t = P * 2803.09 [N] \quad (24)$$

Nas equações 22 e 23,  $F_c$  e  $F_t$  correspondem ao valor da força de compressão e tração dos atuadores em Newtons, para uma pressão  $P$  em MPa.

A força exercida pelos atuadores não é suficiente para uma aplicação direta, havendo a necessidade de criar um sistema de alavanca. Assim para chegar a um valor da força de transversal suficiente, foi feita uma alavanca, como descrita na secção 4.2.2, que multiplica a força feita exercida pelo atuador em 6,2 vezes o original, resultando nas seguintes expressões:

$$F_c^f = 19327 * P [N] \quad (25)$$

$$F_t^f = 17379 * P [N] \quad (26)$$

#### 4.3.4. Aquisição de Dados

De modo a recolher os sinais elétricos analógicos produzidos pelos sensores foi necessário o uso de uma placa de aquisição de dados (DAQ), que fará a ligação ao computador e transformará o sinal em digital. A placa utilizada é uma placa *National Instruments*, modelo NI-USB 6008, com 8 entradas, 12-bit e com uma frequência máxima de captura de 10000Hz.

O processamento do sinal transmitido ao computador, pela DAQ, é feito através do programa *Labview*, como se pode ver no anexo V. Este laboratório virtual permite o controlo da placa e o registo dos dados, produzidos pelos sensores, num ficheiro em formato *.txt*. Na recolha destes dados não foi utilizado qualquer filtro, sendo a filtragem de possíveis perturbações feita no pós-processamento.

#### 4.3.5. Aquisição de Imagem

De modo a capturar um vídeo dos ensaios usou-se uma câmara digital com iluminação incorporada, Jiansu Atacade, com ligação USB. Para visualizar a imagem através do computador e para efetuar a gravação do vídeo do ensaio foi utilizado o programa AMCAP. Este programa permite definir a resolução e o *framerate* da captura de imagem, tendo sido seleccionados o máximo disponível, uma vez que a zona a gravar é muito reduzida e a fratura acontece muito rápida. A resolução seleccionada foi 1080x720 com 30 *frames* por minuto, no entanto verificou-se que tanto a resolução de imagem como a frequência de captura são inferiores às seleccionadas no software e desejadas.

## 5. Materiais e Métodos

Concluída a máquina de ensaios foi necessário verificar se esta cumpre os requisitos necessários à realização dos ensaios que, mais tarde, serão utilizados para a caracterização da tenacidade à fratura sob diferentes estados de tensão. Ao longo deste capítulo será apresentado o plano de ensaios para a validação do aparato experimental. Estes ensaios também foram úteis no desenvolvimento da metodologia experimental que será usada em estudos futuros, descrita nos anexos III e IV.

### 5.1. Provette e Material

A necessidade de criar uma máquina capaz de fraturar um provete e simultaneamente variar o seu estado de tensões, surge de um estudo realizado por Ezequiel (2010), onde se procurava entender qual a influência da velocidade de deformação e da tensão normal na tenacidade à fratura de um material. Foi utilizada uma prensa eletromagnética para gerar a força de corte e uma carga compressiva normal ao plano de corte, de modo a variar o estado de tensões, no entanto, devido às limitações do aparato experimental, apenas foi possível aplicar uma força de compressão. Assim, a metodologia experimental utilizada na verificação da máquina baseia-se no trabalho de Ezequiel (2010).

No presente estudo, é utilizado um provete paralelepípedo, com espessura de 8mm, duplamente entalhado, que é submetido a uma força de corte e uma força transversal ao plano de corte, que irão provocar a fratura de modo II sob diferentes estados de tensões, em condições quasi-estáticas, à semelhança do que foi feito por Ezequiel (2010). No entanto, os provetes usados por Ezequiel apenas possibilitam colocar o provete sob um estado de tensões compressivas, não permitindo exercer uma força normal ao plano de corte de tração, pelo que estes teriam de sofrer alguma alteração de modo a permitir exercer tanto compressão, como tração. Deste modo decidiu-se adicionar aos provetes dois furos, um em cada extremo, onde passará um veio que permitirá exercer os dois tipos de força. Esta transformação resultou na seguinte geometria:

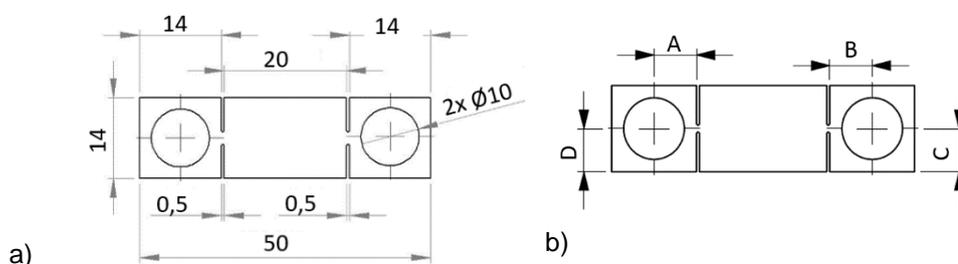


Figura 5.1- a) Desenho do provete; b) Localização dos furos no provete a usar na tabela 4;

O material usado neste estudo teria de ser um material com grande disponibilidade no laboratório e com propriedades que permitisse testar os limites da máquina/ferramenta. Assim selecionou-se o aço AISI1045 como o material a usar nos provetes. Os provetes foram fabricados usando técnicas de fabrico convencionais, com a exceção dos entalhes, que foram feitos através de maquinagem por electro-erosão por fio, controlado por CNC. No entanto durante o processo de fabrico alguns desvios foram introduzidos na geometria dos provetes, resultando em erros dimensionais. Estes desvios apenas se manifestam nas partes do provete fabricadas através de métodos convencionais de maquinagem, neste caso, tratando-se apenas da localização dos furos.

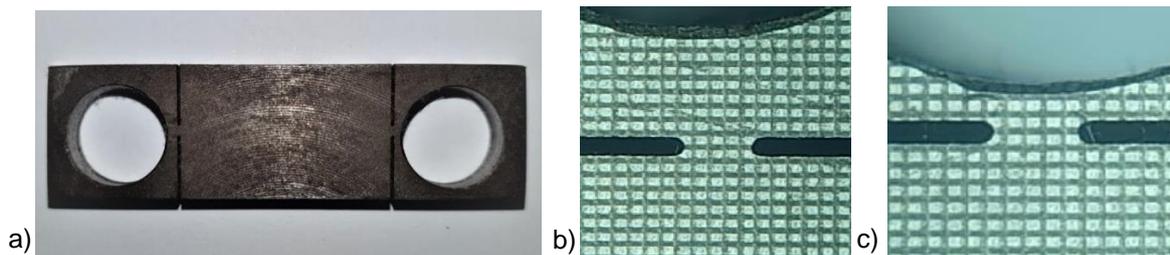


Figura 5.2- a) Provette o utilizar no estudo, antes da marcação da grelha; b) Secção resistente de dimensão correta; c) Secção resistente com defeito. Notar a marcação a laser da grelha de 200 microns.

Estes desvios da geometria ideal podem resultar em geometrias como a apresentada na figura 5.2 (c), onde o furo se encontra demasiado próximo do entalhe, resultando numa secção entre furo e entalhe menor que a suposta secção resistente. Esta nova geometria vai alterar as condições de fratura, alterando a zona de deformação plástica e alterando o modo de fratura e, em casos extremos, como o representado acima, podendo mesmo alterar a localização do plano de falha. Estes desvios da geometria original terão de ser considerados quando feitas as simulações numéricas para validação da metodologia, impossibilitando a utilização de uma geometria transversal a todos os ensaios. Assim, para cada simulação, é criado o modelo geométrico que se aproxima o mais possível do provete a usar no ensaio correspondente.

## 5.2. Plano de Ensaios

Devido a restrições de tempo e de número de provetes disponíveis, com dimensões desejadas, determinou-se que o plano de ensaios seria o menos extenso possível, sendo apenas feitos os ensaios necessários à validação da máquina de ensaios, isto é, verificar que esta tem a capacidade de executar ensaios com todas as dimensões de provetes. Além do objetivo principal o plano de ensaios terá, também, dois objetivos secundários, o de criar um procedimento a usar futuramente na metodologia experimental, como referido anteriormente, e de comprovar que é possível recolher todos os dados experimentais necessários ao estudo. Atendendo a essas limitações foi criado um plano de ensaios, onde apenas se usaram quatro provetes.

Com o objetivo de provar a capacidade da montagem foram usados dois provetes, ambos com uma espessura de 8mm, como referido na secção anterior, onde um tinha um entalhe com uma altura de 1mm, com o objetivo de verificar o requisito máximo de força, e o outro provete tinha um entalhe com altura de 0,5mm, com o objetivo de testar a capacidade de recolha de dados em ensaios que ocorram mais rapidamente. Com estes dois ensaios também será possível ver qual a influência da espessura da secção resistente na força de corte.

Na segunda parte do plano de ensaios serão utilizados três provetes idênticos. Os provetes terão todos uma espessura de 8mm e uma altura de entalhe de 1mm. Os três provetes estarão submetidos a diferentes estados de tensão inicial, compressão, nula e tração, de modo a ver qual a influência do estado de triaxialidade na força de arrombamento. O provete que se encontra em repouso está sob as mesmas condições ao utilizado na primeira parte do plano de ensaios, pelo que não será necessário realizar novo ensaio. O provete à compressão e o provete à tração foram sujeitos a uma força de 1,9kN e 1,7kN, respetivamente, como definido na secção 4.2.2.

Como visto na secção anterior os provetes a usar neste estudo possuem desvios dimensionais, pelo que é esperado algum desvio dos resultados, em relação ao esperado. A tabela 4 mostra as dimensões reais dos diversos provetes a usar neste estudo.

*Tabela 4- Dimensão dos provetes a usar no estudo, em mm;*

	A	B	C	D
Geometria Ideal	7,00	7,00	7,00	7,00
Ensaio Livre, 1mm	7,25	8,50	7,25	6,50
Ensaio Livre, 0,5m	8,25	7,50	7,25	7,00
Ensaio de Compressão	8,50	7,00	7,00	6,50
Ensaio de Tração	8,50	7,00	6,50	7,50

### 5.3. Calibração e Verificação do Aparato Experimental

Antes de se iniciar um estudo é necessário verificar que todos os sistemas da máquina estão a funcionar devidamente. Assim, como preparação à fase experimental é preciso fazer a calibração e um teste de todos os sistemas da máquina. No caso da máquina de ensaios desenvolvida neste estudo é preciso fazer duas calibrações, a posição do SCM, de modo a que a prensa exerça a força máxima para as dimensões do provete a usar e a calibração dos sensores, de forma a garantir que a leitura que estes fazem é correta.

A calibração feita neste estudo terá também como objetivo validar o funcionamento da máquina em vazio, uma vez que foi a primeira vez que este sistema mecânico modificado funcionou. Neste capítulo

será abordado o processo de calibração em conjunto com o processo de verificação, sendo o último dispensável em utilizações futuras da máquina de ensaios.

### 5.3.1. Posição do Suporte do Carro Móvel e Força de Corte Máxima

A força máxima que a prensa é capaz de exercer é um fator de elevada importância por ser o parâmetro limitador da presente investigação experimental, cujo valor limita a dimensão do provetes e o tipo de materiais que podem ser testados. Assim o primeiro passo para a validação da máquina foi comprovar se a força exercida pela máquina na realidade atinge os valores desejados e qual será a curva de funcionamento da máquina. Como visto na secção 4.1.1, a força que a prensa é capaz de exercer varia consoante a distância ao PMI, e conseqüentemente com a distância ao PMS. Assim o primeiro passo para a validação da máquina será a comparação da curva de funcionamento real com a curva teórica. A figura 5.3 mostra a curva de funcionamento teórica da prensa. Estes valores foram obtidos através da análise estática do sistema da prensa e foram apresentados em forma gráfica, onde a origem do referencial corresponde ao PMS.

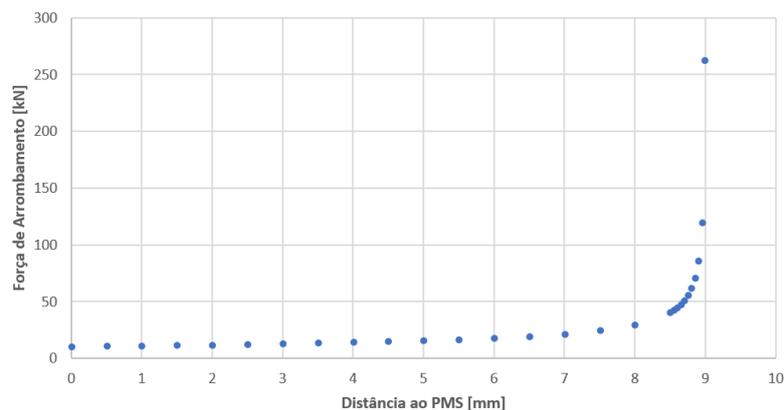


Figura 5.3- Curva de funcionamento teórica da prensa na configuração alterada, que relaciona a força exercida (kN) com a distância ao PMS (mm);

De modo a obter a curva de funcionamento real da prensa foi retirada a ferramenta da montagem e foi colocado um conjunto de calços calibrados de diversas dimensões de modo a variar a distância ao PMI. Foi colocada uma célula de carga em série com o carro móvel da prensa e os calços de modo a obter o valor da força exercido para cada distância. Imediatamente vários problemas surgiram. O primeiro problema a ser detetado foi o escorregamento do suporte do carro móvel em relação à base da prensa. A ligação entre estes dois componentes é feita através do aperto de duas placas existentes no suporte do carro móvel, feita por dois parafusos, numa guia presente na base da prensa. De modo a corrigir este problema foi feito um reforço da ligação entre os dois componentes, adicionando mais ligações aparafusadas.

Após a realização dos ensaios verificou-se que apenas o reforço da ligação não seria suficiente para prevenir o deslizamento do suporte. A solução encontrada foi colocar uma ligação aparafusada ao topo da base da prensa, que irá impedir o deslizamento, como mostra a figura 5.4. Esta nova fixação irá limitar a capacidade de regular a altura do suporte do carro móvel, diminuindo as posições possíveis e dificultando este processo. Este novo travão consiste numa placa suportada em ambos os lados da fixação original do SCM. Por sua vez esta placa é fixa ao topo da base da prensa usando um parafuso. Após novos testes verificou-se que o novo mecanismo previne o escorregamento do SCM em relação à base da prensa. Com esta alteração a prensa passou a apresentar a curva de funcionamento apresentada na figura 5.5. Embora se tenha solucionado este problema, a nova curva de funcionamento continua diferente do esperado. Um novo conjunto de testes foi feito de modo a identificar a proveniência desta diferença. Após estes testes verificou-se que ao aplicar a força existia uma elevada deformação na estrutura da prensa, visível a olho nu.



Figura 5.4- Ligação entre corpo da prensa e suporte do carro móvel, com travão para prevenir escorregamento;

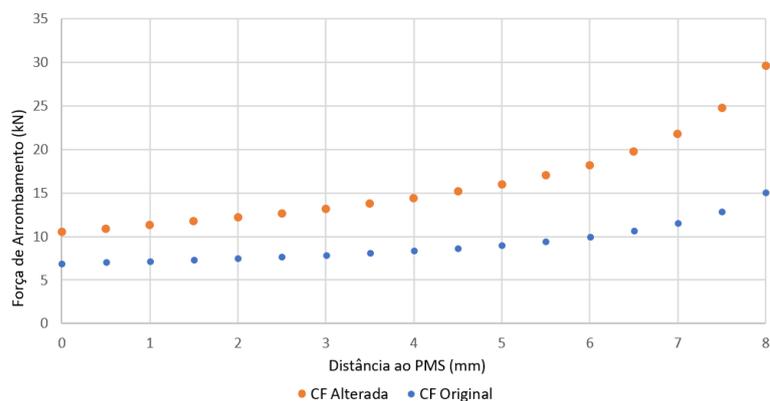


Figura 5.5- Comparação entre curva de funcionamento real (laranja) e a curva de funcionamento teórica (azul), da prensa após a alteração;

A prensa tem um perfil aberto, em forma de C, que abre quando são aplicadas tensões elevadas, devido à deformação da estrutura. Esta deformação não é significativa quando aplicadas forças baixas, que não só provocam uma deformação reduzida, como ocorrem longe do PMI, o que significa que ainda resta curso do carro móvel. No entanto, para forças mais elevadas a deformação da estrutura é superior, provoca uma maior “abertura do C”. Isto aliado ao facto de as forças mais elevadas ocorrerem quando o carro móvel se encontra próximo do PMI, permite que ocorra uma inversão da rótula, fazendo com que ocorra uma reversão do movimento junto ao PMI. Este fenómeno irá interferir tanto na força máxima que a prensa exerce no provete, bem como no curso efetivo da prensa.

A inversão da rótula ocorre quando uma força elevada é exercida no provete, provocando, simultaneamente, a deformação do provete e da prensa que irá aumentar até que seja atingida a falha do provete ou até que seja atingido o PMI. Se o PMI for atingido antes que se dê a falha do provete ocorre a inversão da rótula, como mostra a imagem 5.6 (a), pois o atuador continua a avançar para lá deste ponto. Este movimento continuará até o atuador atingir o final do seu curso, onde a única força exercida no provete se deve à deformação elástica armazenada na estrutura da prensa.

Para resolver este problema uma maior rigidez terá de ser conferida à estrutura da prensa, através da adição de reforços ou através da adição de um elemento que fecharia o perfil em C, tornando-o num perfil em O. Foi decidido não fazer nenhuma destas alterações à prensa, pois não foi atingida nenhuma solução que solucionasse o problema e mantivesse todas as funcionalidades da máquina e, para este estudo, a força atingida é suficiente.

Fez-se assim a calibração da altura do suporte do caro móvel de modo a maximizar a força que é possível exercer em provetes com uma altura de 14mm, obtendo a curva de calibração da figura 5.6 (b).

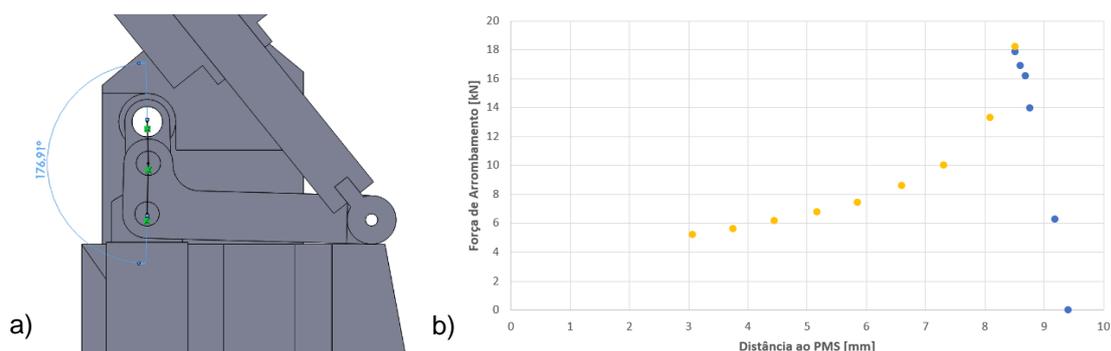


Figura 5.6- a) Esquema da rótula após ultrapassar o PMI; b) Curva de funcionamento real da prensa alterada, a 10bar, com distinção entre o comportamento antes do PMI (amarelo) e o comportamento após o PMI (azul);

No gráfico da figura 5.6 (b), a “Distância ao PMS” refere-se à distância a que o topo do provete está do PMS no início do ensaio e a “Força de Arrombamento” é a força de corte máxima que a prensa consegue exercer quando o provete se encontra nessa posição. É possível observar que quando o

provete se encontra a uma distância superior a 8,5mm é atingido o máximo de força de corte que a prensa consegue exercer. Após este ponto ocorre a inversão da rótula e a força máxima exercida pela máquina diminui.

Com esta calibração, a máquina de ensaios fica otimizada a trabalhar com provetes de 14mm, pois esta é a altura dos provetes a usar neste estudo. No entanto, é possível usar provetes com alturas diferentes em ensaios futuros, sendo apenas necessário fazer os devidos ajustes à fixação da SCM e fazer nova calibração para a altura do provete desejada.

### 5.3.2. Sensores

Ambos os sensores utilizados neste estudo foram previamente calibrados, garantindo a precisão da medida. No entanto após a sua montagem na ferramenta é necessário comprovar que nada influencia essas leituras. Assim, foram feitos vários testes para confirmar o bom funcionamento dos sensores.

De modo a testar o sensor de deslocamento este foi montado na base da ferramenta e o batente foi montado no teto. A ferramenta foi desconectada da máquina e, com o auxílio de calços calibrados, a distância entre as duas placas foi variada. Verificou-se que a variação medida no sensor correspondia à variação de altura entre calços. Assim concluiu-se que o sensor estava bem posicionado, perpendicular às pacas que suportam a ferramenta, e que não sofre nenhuma interferência, o que resulta numa leitura adequada.

Para a célula de carga foram feitos vários testes de modo a verificar o bom funcionamento deste sensor. O primeiro parâmetro a testar foi se toda a força registada no sensor era a aplicada no provete, isto é, se não existiam atritos significativos nas componentes móveis da ferramenta. O primeiro teste, para avaliar este parâmetro, teve como objetivo verificar o correto guiamento do punção na matriz. Para isso a força exercida a uma determinada distância do PMI foi medida. De seguida a matriz foi retirada da montagem e um calço foi colocado de modo a medir a força à mesma distância do PMI. Verificou-se que as forças com e sem matriz eram iguais, concluindo que não existem forças de atrito entre o punção e a matriz. O segundo teste teve como objetivo testar o conjunto punção/casquilho, verificando se a interação entre estes elementos não influencia a leitura. Para este teste mais uma vez a matriz foi retirada da montagem, uma vez que não é possível colocar a célula de carga na ranhura onde se encontraria um provete, e uma nova célula de carga, previamente calibrada, à semelhança da usada neste estudo, foi colocada no seu lugar.

Após alguns testes deste tipo tornou-se evidente a importância da concentricidade da célula de carga com o punção. De modo a garantir esta concentricidade uma pequena indentação foi feita no centro do punção e espaçadores foram colocados entre a célula de carga e as paredes do casquilho. Novos testes verificaram que ambas as células de carga apresentavam valores de força iguais, verificando que a célula de carga faz um correta leitura dos dados.

Como último teste de verificação dos sensores um ensaio foi feito usando um provete equivalente aos usados no estudo. Este teste permitiu verificar que ambos os sensores estão sincronizados e que nenhum outro fator imprevisto irá afetar os ensaios finais e não existirá desperdício de provetes. Como é possível ver na figura 5.7 ambos os sensores estão sincronizados, pois o ponto de rutura é facilmente identificável em ambas as curvas e ocorre simultaneamente.

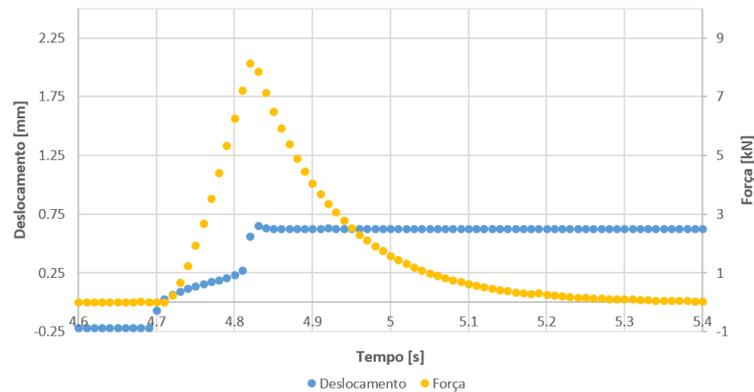


Figura 5.7- Gráfico força-tempo (laranja) e deslocamento-tempo (azul) do teste de sincronização dos sensores;

A análise destas curvas revela um comportamento inesperado na curva de força. Após a falha do material a força deveria sofrer um decréscimo abrupto, no entanto tal não se verifica. Ao analisar a curva da força é possível verificar que após o ponto de falha a curva sofre um decréscimo gradual. Este fenómeno pode ter duas origens: físico, proveniente de um atrito ou ponto de contacto não detetado nos testes anteriores, que provoca o armazenamento de energia potencial que se liberta gradualmente após a falha do provete; eletrónico, proveniente de um “amortecimento” conferido ao sinal pelo equipamento.

De modo a excluir a proveniência física deste fenómeno realizou o corte de um provete usando uma prensa hidráulica. O uso da prensa hidráulica permite um melhor controlo do carro móvel após o momento da falha, uma vez que o fluido utilizado é incompressível. Estas propriedades da prensa hidráulica permitiram que após a fratura do provete o carro móvel da prensa permaneça no mesmo local, provocando uma descarga imediata do provete após a fratura. Para este teste foi usado o conjunto matriz/punção na sua configuração normal, no entanto retirou-se o casquilho da célula de carga, ficando a célula de carga em contacto direto com o carro móvel, como mostra a figura 5.8. Esta montagem garante que nenhum fator externo interfira na leitura de forças após a fratura.



Figura 5.8- Ensaio de arrombamento na prensa hidráulica;

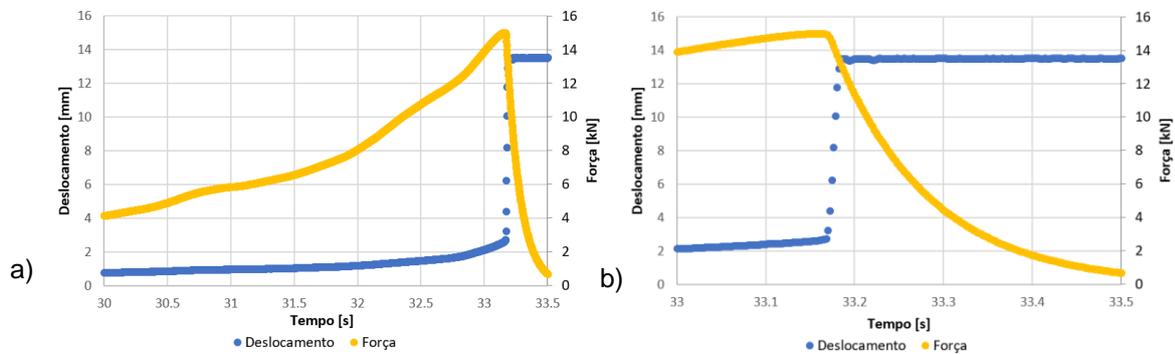


Figura 5.9- a) Gráfico força-deslocamento do ensaio em prensa hidráulica; b) Pormenor do gráfico força-deslocamento do ensaio em prensa hidráulica;

Na figura 5.9 verifica-se que o fenómeno de descarga se mantém presente, o que exclui a hipótese de este fenómeno se dever à má montagem da célula de carga na ferramenta. Assim conclui-se que a proveniência deste erro é do próprio equipamento, isto é, um amortecimento do amplificador de sinal incapaz de acompanhar a resposta física da fratura. Verificando as especificações da célula de carga nenhuma referência é feita à existência de um atraso no seu tempo de resposta. No entanto uma consulta à folha de especificações do amplificador de sinal revela a existência de um condensador que gera um atraso no tempo de resposta de 1,5s. Este atraso condiz com o observado na curva da força, estando assim atribuído o motivo deste fenómeno. É de interesse notar que este amortecimento apenas ocorre na descarga, aparentemente não tendo influência na leitura do carregamento, uma vez que o modulo do declive da curva de carregamento é superior ao da curva de descarregamento.

## 6. Resultados e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios que levaram à validação da máquina-ferramenta. A análise destes resultados deve considerar as limitações dimensionais dos provetes e ser conduzida no sentido do desenvolvimento e validação de uma metodologia experimental que mais tarde será usada em estudos para a caracterização da tenacidade à fratura do AISI1045, e outros materiais. São igualmente apresentadas estimativas teóricas obtidas pelo método dos elementos finitos utilizadas no projeto da máquina de ensaios.

### 6.1. Simulação Numérica

O modelo numérico desenvolvido considera apenas a teoria matemática da plasticidade clássica, não acoplando os fenómenos envolvidos no mecanismo de geração de novas superfícies. Deste modo, é esperado que os resultados da simulação numérica não consigam reproduzir, com precisão, os resultados observados durante os testes experimentais. Ainda assim, podem ser obtidas conclusões quantitativas importantes, relativamente à influência da secção resistente e da FNPC na força de corte.

O principal resultado das simulações está associado à evolução da força de corte com o deslocamento da ferramenta. Tipicamente a força de corte aumenta com o deslocamento da ferramenta até um valor máximo após o qual começa a descer até ao ponto de rutura. Este valor de máximo está associado ao efeito combinado do encruamento mecânico do material e da redução da secção resistente do provete. É importante fazer notar que este decréscimo em nada está relacionado com os mecanismos de fratura e que a separação física do material é esperada ter ocorrido para um deslocamento significativamente inferior ao ligamento entre entalhes.

Nas simulações seguintes foi utilizado o modelo descrito no anexo I e no capítulo 3, com a geometria teórica, como mostra a figura 5.1, apenas fazendo as alterações necessárias, conforme as especificações da simulação.

#### 6.1.1. Influência da Secção Resistente na Força de Corte

De modo a avaliar a influência da dimensão da secção resistente sobre a força de arrombamento foram simulados vários provetes, onde a área resistente total varia. Cada provete tem dois entalhes, pelo que a área resistente total é o dobro da área resistente em cada entalhe, tendo sido simulados provetes com as seguintes áreas:  $8 \text{ mm}^2$  (proвете com 8mm de espessura e entalhes de 0,5mm);  $16 \text{ mm}^2$  (proвете com 8mm de espessura e entalhes de 1mm);  $32 \text{ mm}^2$  (proвете com 8mm de espessura e entalhes de 2mm).

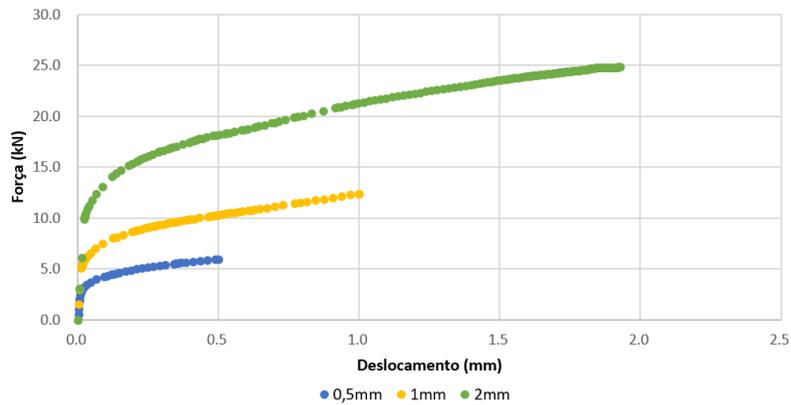


Figura 6.1- Gráfico força-deslocamento para provetes livres de diferentes secções resistentes;

Na figura 6.1 é possível ver como a secção resistente influencia a força de corte. Como esperado, a secção resistente tem um efeito positivo na força de corte, sendo esta maior quanto maior for a secção. Não é possível quantificar ao certo esta relação, devido às limitações do modelo anteriormente referidas. No entanto, assume-se que quando se atinge um deslocamento igual à espessura do entalhe já ocorreu fratura, sendo este deslocamento para a fratura de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm, para os provetes com espessura de entalhe de 0,5 mm, 1mm e 2 mm, respetivamente. Este ponto também é útil pois serve como um ponto de referência onde a extensão de todos os provetes é igual, por isso estão à mesma “distância” do corte, o que permite estabelecer uma comparação grosseira da força de corte, entre eles. Conclui-se que a força de corte é diretamente proporcional à área da secção.

Estas simulações permitem, também, estabelecer um objetivo relativamente à força que terá de ser exercida pela prensa. Para o provete de maior dimensão a usar no plano de ensaios, provete com uma espessura de entalhe de 1 mm. A simulação mostra que para um deslocamento igual à espessura do entalhe a força de corte é de 12,62 kN. No entanto, como apresentado na secção 3.1.2, a simulação foi feita segundo um modelo 2D, pelo que é necessário aplicar o fator de correção, resultando numa força de corte máxima de 15,52 kN.

Neste plano de ensaios existem ensaios onde se prevê que a força de corte possa ser superior ao do ensaio livre, uma vez que o estado de tensões se altera, podendo aumentar a força necessária. Atendendo a esta suposição e ao facto de haver possíveis defeitos na máquina que possam provocar perdas de energia, como atritos ou fugas no sistema pneumático, estabeleceu-se como meta, de força a exercer pela prensa, 20 kN.

### 6.1.2. Influência da Força Normal ao Plano de Corte na Força de Corte

De modo a avaliar a influência que a força normal ao plano de corte tem sobre a força de arrombamento, foram feitas várias simulações. Foi utilizando um provete com uma espessura de secção de 1mm (área total de secção de  $16 \text{ mm}^2$ ), onde se aplicaram diferentes forças transversais,

tanto compressivas como de tração. Esta FNPC será aplicada antes e no decorrer da ação da força de corte.

Estas simulações numéricas seguiram o método utilizado na secção anterior, em concordância com o descrito no anexo I, sendo a única alteração a adição de uma FNPC, impondo uma condição de força nos veios que passam os furos do provete, variando o seu sentido e magnitude conforme as especificações do ensaio.

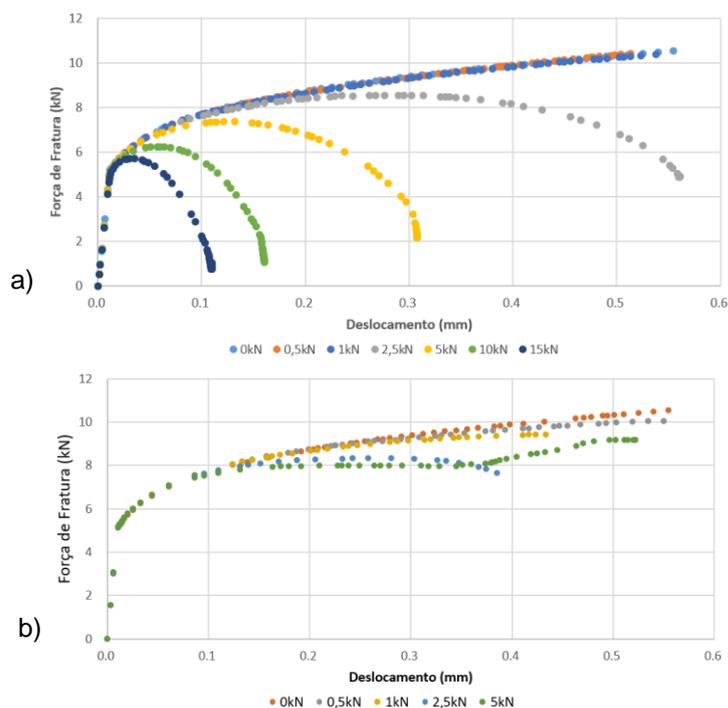


Figura 6.2- a) Gráfico força-deslocamento do provete sob diversas forças transversais de tração; b) Gráfico força-deslocamento do provete sob diversas forças transversais compressivas;

Na figura 6.2 estão representados dois gráficos de força-deslocamento, que mostram a influência da força normal ao plano de corte sobre a força de corte. Na figura a) é possível observar como a força de arrombamento varia quando o provete se encontra sob uma FNPC de tração. Neste gráfico verifica-se que, nestas condições, a força de arrombamento diminui, sendo mais baixa quanto maior for o valor da FNPC.

A figura 6.2 (b) mostra que, à semelhança do que acontece para forças de tração, quando o provete está submetido a uma FNPC compressiva a força de arrombamento diminui, sendo tanto mais baixa quanto maior for a força de compressão. Este resultado vai contra o que era esperado, que seria acontecer o oposto, a força de arrombamento aumentar na presença de uma FNPC compressiva.

Estas simulações tiveram também como objetivo determinar quais serão os valores de FNPC a utilizar nos ensaios. Definiu-se que, para os ensaios onde seria aplicada uma FNPC, seria fornecido aos atuadores uma pressão de 1bar, o que resulta numa FNPC com o valor de  $F_t = 1,9 kN$  para o

ensaio com compressão e uma força com o valor de  $F_t = 1,7 \text{ kN}$  para o ensaio com tração, uma vez que estes valores de força já têm uma influência significativa sobre o valor de força de arrombamento necessária e a pressão exata permite uma fácil monitorização.

## 6.2. Resultados dos Ensaios

A realização do plano de ensaios ficou limitada pela existência de desvios geométricos nos provetes. No entanto, os resultados obtidos foram suficientes para a validação da máquina e da ferramenta de ensaios, assim como, da metodologia experimental a utilizar em estudos futuros. Os diferentes ensaios oferecem, também, uma maior compreensão acerca da relação entre as simulações e a realidade, permitindo detetar discrepâncias entre os resultados de ambas.

### 6.2.1. Ensaios de Corte Puro

Como referido no capítulo 5.2, foram feitos dois ensaios onde não foi aplicada qualquer força normal ao plano de corte, apenas foi aplicada força de corte. Estes ensaios tiveram dois objetivos, compreender a influência da secção de corte na força de arrombamento e verificar a capacidade da máquina de gerar uma força de arrombamento suficiente para fazer o corte de todos os provetes.

#### *Proвете com entalhe de 0,5 mm*

O primeiro ensaio realizado foi ao provete com um entalhe de 0,5mm de altura, área resistente de  $8\text{mm}^2$ . Este foi o menor provete a utilizar neste estudo, logo é esperado que seja o provete que necessitará de menor força de corte para que seja atingida a falha. Uma vez que os provetes têm geometrias distintas, como visto na secção 5.2, é necessário fazer uma simulação numérica onde a geometria do provete a utilizar neste ensaio seja precisamente reproduzida, conforme na tabela 4. Esta simulação seguiu o método descrito no anexo I. Desta simulação resulta a curva força-deslocamento teórica, representada a azul na figura 6.4. Esta curva teórica será comparada à curva força-deslocamento experimental, representada a amarelo na figura 6.4, que é obtida experimentalmente, seguindo o procedimento experimental do anexo IV. Espera-se que através da comparação destas curvas sejam tiradas conclusões em relação ao sucesso da simulação e do ensaio. Este provete não apresenta um grande desafio em termos de força exercida pela prensa, uma vez que se espera que a força de arrombamento necessária para o fraturar esteja muito abaixo da força máxima exercida pela máquina. O desafio apresentado por este ensaio é o de registar corretamente o dados fornecidos pelo sensor, uma vez que o corte ocorre muito mais abruptamente que nos restantes casos, quase instantaneamente, após o acionamento do atuador. Após a realização deste ensaio obtiveram-se os seguintes resultados:

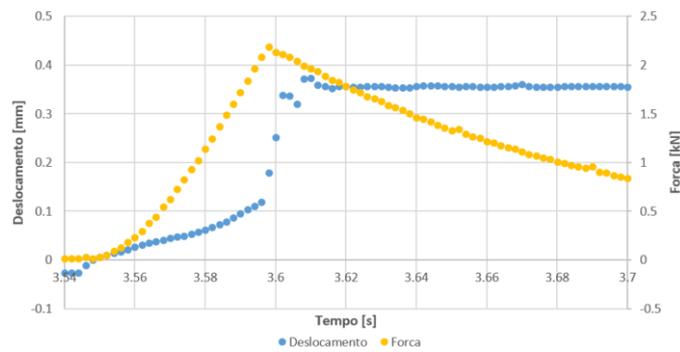


Figura 6.3- Curvas de força e deslocamento experimentais em função do tempo do ensaio do provete de 0,5mm;

Na figura 6.3 estão representadas as respostas dos sensores no tempo. De uma primeira análise das curvas conclui-se que estas descrevem corretamente o que aconteceu experimentalmente. O ensaio pode ser dividido em quatro partes, onde o deslocamento do carro-móvel e a força exercida no provete têm comportamentos distintos.

A primeira fase é a fase onde o carro-móvel ainda não entrou em contacto com o provete, não existindo força de corte. No entanto, nesta fase já existe um deslocamento, uma vez que a prensa se encontra em movimento.

A segunda fase inicia-se quando o punção entra em contacto com o provete. Esta fase é caracterizada pelo aumento da força de corte e por um aumento pequeno do deslocamento. Esta fase é a mais lenta, ocupando a maioria do tempo do ensaio.

A terceira fase é quando se dá a fratura do material. Esta fase é quase instantânea e caracteriza-se por um aumento abrupto do deslocamento até ao seu valor máximo. Nesta fase também devia ocorrer uma queda abrupta da força, no entanto, devido ao amortecimento existente na leitura feita pela célula de carga na descarga, abordado anteriormente, esta queda é mais lenta. Após a fratura verifica-se que existe um ressalto no deslocamento, antes deste estabilizar no valor final. Este fenómeno deve-se à inercia do sensor de deslocamento.

A quarta fase inicia-se após a fratura, onde o deslocamento é constante e a força baixa gradualmente até zero. Mais uma vez a força devia ser sempre zero, nesta fase, mas devido ao amortecimento da célula de carga, esta descida não é imediata.

A figura 6.3 mostra que estas fases ocorrem em simultâneo nas duas curvas. Isto significa que os sensores se encontram bem sincronizados, nenhum deles está atrasado em relação ao outro.

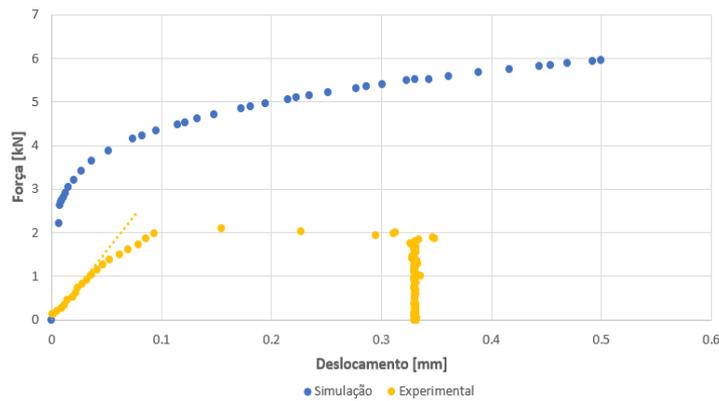


Figura 6.4- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 0,5mm;

A compilação dos dados da figura 6.3 resulta na curva força-deslocamento deste ensaio, representada a amarelo na figura 6.4. Nesta curva é possível identificar três das quatro fases, apenas não é possível identificar a primeira, que é aquela que não tem interesse para este estudo. Na segunda fase é possível distinguir uma deformação linear, onde o provete está num estado de deformação elástica, e uma fase não linear, onde o provete se encontra em deformação plástica. Esta fase termina quando se dá a falha, onde o deslocamento do provete é aproximadamente 0,1mm, e é seguida pela terceira e quarta fase. Nesta curva, também é possível observar o ressalto no deslocamento e o amortecimento da leitura da célula de carga.

Verifica-se que a força máxima ocorre depois do momento de falha. Isto revela que não foi captado o momento exato onde ocorreu a falha, devido à reduzida frequência de captação dos sensores. Assim, para ensaios futuros sugere-se uma frequência superior à utilizada neste ensaio, de 500Hz. Uma vez que não foi captado a força de corte máxima suportada pelo provete teve de ser estimada, segundo o comportamento da curva. Estima-se que o valor máximo de força de corte neste ensaio seja de 2,24kN.

#### Provete com entalhe de 1mm

À semelhança do que foi feito para o provete com entalhe de 0,5mm, foi feita uma simulação numérica com a geometria exata do provete com 1mm de espessura, a usar neste ensaio. Novamente foi seguido o procedimento do anexo I, resultando na curva força-deslocamento teórica deste ensaio, representada a azul na figura 6.5.

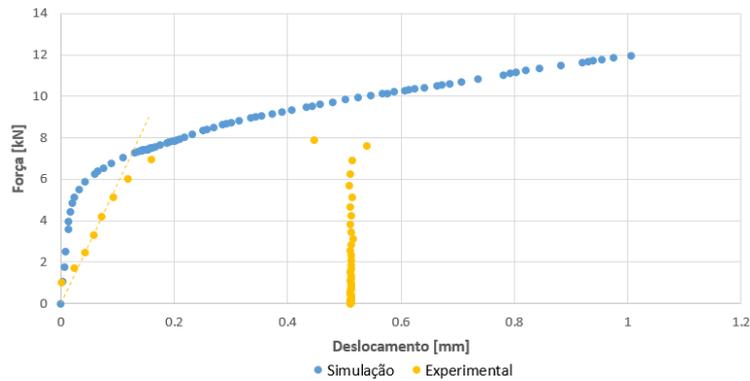


Figura 6.5- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm;

A curva força-deslocamento teórica foi comparada com a curva experimental, representada a amarelo na figura 6.5. Os dados experimentais foram obtidos através do ensaio de fratura do provete com uma espessura de entalhe de 1mm (área de secção de  $16\text{mm}^2$ ), seguindo o procedimento do anexo IV. Esta curva apresenta o mesmo comportamento da curva do provete de 0,5mm, mostrando as mesmas fases, apenas variando os valores. Nesta curva também é possível identificar a zona de deformação elástica, deformação plástica, o momento de falha, que ocorre por volta dos 0,2mm de deslocamento, e a zona final, onde se vê o ressalto no deslocamento e o amortecimento da célula de carga. Mais uma vez verifica-se que a frequência de aquisição de dados é insuficiente, uma vez que não foi possível captar o ponto de falha, ou o ponto de força máxima. No entanto, à semelhança do ensaio anterior, a força de arrombamento máxima pode ser estimada, aproximadamente 8kN.

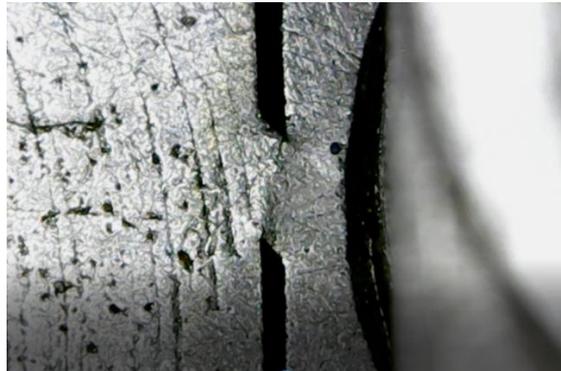
#### Análise de resultados

Da comparação entre as curvas força-deslocamento teóricas e práticas é possível retirar algumas conclusões relativas ao sucesso das simulações e dos ensaios. A primeira conclusão retirada é que, tal como as previsões teóricas indicavam, a força de corte necessária para fraturar o material depende da área da secção resistente, sendo maior quanto maior for a secção resistente. A segunda conclusão que pode ser retirada da análise das figuras 6.4 e 6.5 é que a fratura ocorre para um deslocamento muito inferior ao previsto. A previsão feita é que a fratura se daria perto de um deslocamento igual à espessura do entalhe, no entanto verifica-se que a fratura ocorre aproximadamente para um deslocamento igual a um quinto da dimensão do entalhe.

Por fim, verifica-se que as previsões feitas pela simulação, em relação à força de corte, não traduzem bem a realidade. Como esperado a simulação não prevê na perfeição o comportamento do material, uma vez que o modelo usado não engloba os mecanismos de fratura, existindo uma diferença entre as curvas. No entanto, verificam-se diferentes graus de sucesso nas previsões feitas em relação à força de corte máxima do ensaio. A simulação feita para o ensaio do provete de 1mm faz um bom papel na previsão da força de corte máxima, obtendo uma previsão igual ao resultado experimental, no

entanto tal não acontece para o ensaio do provete de 0,5mm. Para este ensaio a previsão de força máxima é duas vezes superior à obtida no ensaio.

Atribui-se esta diferença de resultados a danos adquiridos pelo provete antes do ensaio. Devido à dimensão reduzida do entalhe é muito fácil, inadvertidamente, danificar o provete no seu manuseamento durante o fabrico e preparação do ensaio. A figura 6.6 mostra um provete antes do ensaio, que está bastante danificado. Algo semelhante pode ter acontecido ao provete utilizado neste ensaio, que fez diminuir a sua tenacidade à fratura. No entanto as provas disponíveis não são conclusivas, sendo preciso uma maior número de ensaios para ter a certeza.



*Figura 6.6- Imagem de provete danificado antes da realização do ensaio;*

### 6.2.2. Ensaios de Corte Sob Carga Normal

Para verificar que a máquina de ensaios tinha a capacidade de colocar o provete sob diferentes estados de tensões, aplicou-se uma força normal ao plano de corte, no provete. Para esta validação foram realizados dois ensaios, onde se aplicaram forças de tração e forças de compressão. Nesta secção serão apresentados os resultados destes ensaios.

#### *Provete sujeito a Tração*

No primeiro ensaio, um provete com um entalhe de 1mm, semelhante ao utilizado anteriormente, foi submetido a uma força de tração transversal de 1,7kN. Como feito para ensaios anteriores, os resultados experimentais foram comparados à simulação numérica correspondente a este ensaio, de modo a validar o procedimento experimental. De modo a obter a curva força-deslocamento teórica, foi feita uma simulação, onde foi usado um modelo numérico como descrito no anexo I e um modelo geométrico o mais próximo possível da realidade, como se encontra na tabela 4. Desta simulação resultou a curva a azul da figura 6.7. A curva experimental foi obtida através de um ensaio onde um provete com um entalhe com 1mm de espessura foi submetido a uma força de tração

de 1,7kN, e se seguiu o procedimento experimental do anexo IV. Daqui resultou a curva força-deslocamento experimental, representada a amarelo na figura 6.7.

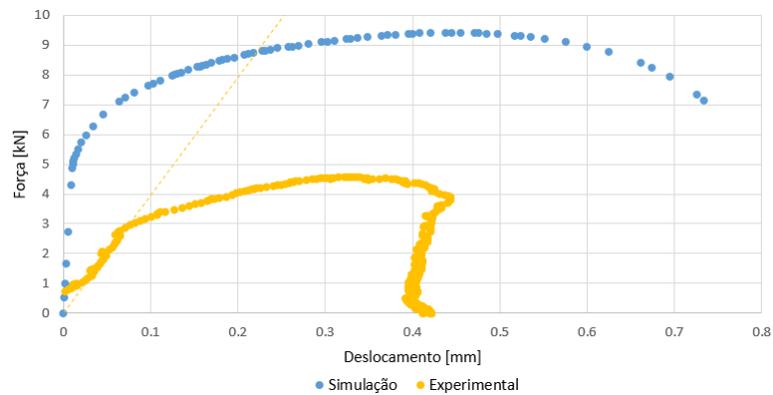


Figura 6.7- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm colocado sob tração;

A curva obtida experimentalmente apresenta alguns comportamentos diferentes dos casos vistos anteriormente. Para este caso, as diferentes etapas não são tão visíveis como nos casos anteriores. É fácil identificar a zona linear, onde o provete está sob deformação elástica. No entanto, na zona de deformação plástica, observa-se dois acontecimentos inesperados. O primeiro fenómeno é o momento da falha não ser de fácil identificação, tendo este de ocorrer após ser atingida o ponto de força de corte máxima. Porém após este ponto não se verifica nenhum salto repentino do deslocamento, o que impossibilita a identificação deste ponto. O segundo fenómeno é a força de corte diminuir antes de se atingir a fratura. Este fenómeno deve-se á ação da força normal ao plano de corte, que provoca uma maior deformação da zona resistente, causando uma maior diminuição da área resistente. É possível observar no gráfico a presença de um ruído, que não foi possível eliminar na preparação do ensaio, nem no tratamento dos dados, sem alterar significativamente os resultados apresentados. No entanto não se achou necessária a realização de um novo ensaio, uma vez que o número de provetes disponível é bastante limitado e que, para os propósitos deste estudo, o ruído não impede a obtenção dos resultados pretendidos. Também é possível verificar que a frequência de captação de dados definida para este ensaio não é ideal, mas por motivos contrários aos apresentados anteriormente. Neste caso a densidade de pontos é demasiado elevada, dificultando a identificação das diversas fases. Para ensaios futuros recomenda-se o uso de uma frequência de captação de dados de 1000Hz.

## Provete sujeito a Compressão

No segundo ensaio desta secção foi utilizado um novo provete com dimensão de entalhe de 1mm, no qual será aplicada uma FNPC compressiva de 1,9kN. Mais uma vez, os resultados obtidos no ensaio foram comparados com os obtidos através de simulação numérica e foram tiradas algumas conclusões em relação ao sucesso do ensaio e das previsões. Para obter a curva de força-deslocamento teórica foi feita uma simulação, seguindo os paços do anexo I, onde foi adicionada uma força normal ao plano de corte de 1,9kN. O modelo geométrico utilizado nesta simulação é o mais perto possível da geometria real do provete, resultando numa geometria com as dimensões descritas na tabela 4. A curva resultante encontra-se representada a azul na figura 6.8.

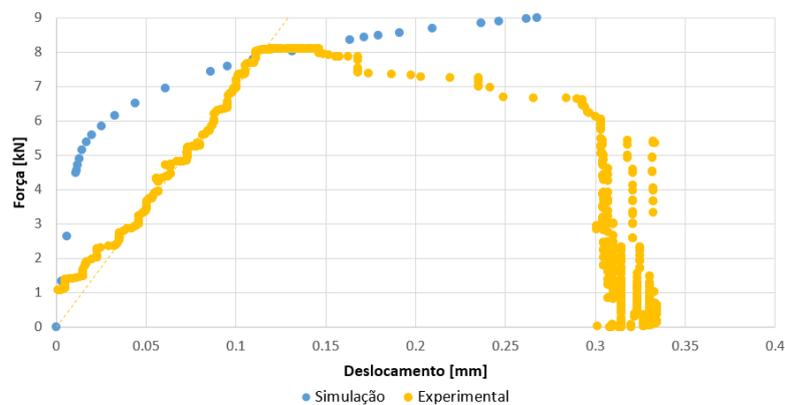


Figura 6.8- Sobreposição da curva experimental e da curva teórica, do provete de 1mm colocado sob compressão;

A curva força-deslocamento experimental foi obtida através do procedimento experimental descrito no anexo IV, onde foi aplicado no provete a força normal ao plano de corte com o valor de 1,9kN. Neste caso as diferentes fases do ensaio são mais facilmente identificáveis, colocando o ponto de falha quando o deslocamento é igual a 0,168mm. Também é possível identificar o ponto de força máxima, 8,1kN. Como mostra o gráfico o ponto onde a força de corte é máxima não corresponde ao ponto onde se dá o corte, havendo uma diminuição da força de corte que antecede a falha, tal como acontece no ensaio onde foi aplicada um FNPC de tração.

## Discussão de Resultados

Das comparações feitas nesta secção podem ser tiradas algumas conclusões referentes ao modo como os ensaios foram realizados e à veracidade das previsões feitas. As previsões feitas para o ensaio onde se aplicou uma força de compressão, figura 6.8, não replicaram na perfeição o comportamento da curva experimental, porém a previsão da força de corte esteve muito perto da realidade, acertando na previsão da força no momento em que a força no caso experimental é máxima. Após este ponto a previsão falha, uma vez que não se verifica uma diminuição na força teórica. As previsões feitas para o ensaio onde foi aplicada um FNPC de tração, figura 6.7, não tiveram tanto sucesso, como no caso discutido anteriormente. Mais uma vez, as previsões feitas, em relação à força de corte, são o dobro dos resultados obtidos no ensaio. À semelhança do que aconteceu no ensaio de 0,5mm, atribui-se esta diferença a danos adicionados ao provete antes do ensaio, pois, embora a secção resistente não seja tão pequena, qualquer defeito que introduzido no plano de corte tem grande relevância, num ensaio com estas condições, uma vez que o estado de tensões potencia a propagação e formação de fissuras.

Nas curvas de força-deslocamento dos ensaios verifica-se que existe uma diferença entre a região de deformação linear da curva teórica e da curva experimental. Esta diferença foi atribuída à falta de rigidez do aparato experimental.

A comparação das curvas experimentais obtidas nos ensaios desta secção com a curva experimental do ensaio ao provete de 1mm onde não foi aplicada nenhuma FNPC, permite tirar algumas conclusões. A figura 6.16 mostra a sobreposição destas curvas. Nesta comparação verifica-se que as previsões teóricas são cumpridas, no entanto, não de uma forma muito explicita. Verifica-se que a força de corte máxima para o ensaio onde não foi aplicada nenhuma FNPC foi superior aos restante. No entanto para a curva de tração esta diferença é maior que a esperada e para a curva de compressão a diferença não é muito clara, uma vez que o ponto de força máxima não é visível na curva a azul. Também é possível verificar, na figura 6.9, que as curvas têm todos comportamentos diferentes. Todas elas apresentam as fases referidas na secção 6.2.1, mas todas elas têm formas diferentes.

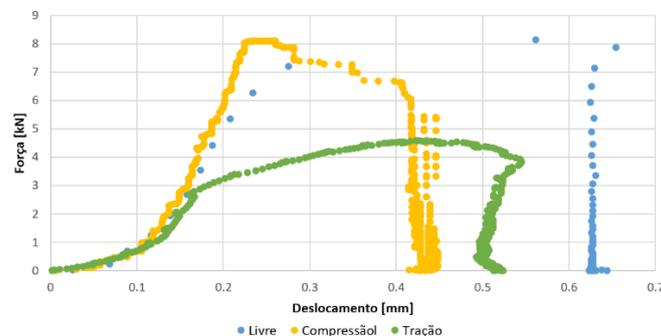


Figura 6.9- Comparação das curvas força-deslocamento dos ensaios do provete de 1mm sob uma força normal ao plano de corte de tração de 1,7kN (verde), sob uma força normal ao plano de corte compressiva de 1,9kN (amarelo) e sem FNPC (azul);

## 7. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

A presente investigação teve como principal contribuição o desenvolvimento duma máquina de ensaios e a proposta de uma metodologia experimental para a caracterização da tenacidade à fratura com estado de tensão imposto. Durante o desenvolvimento deste trabalho inúmeros problemas e desafios foram surgindo. As estratégias e os compromissos adotados para solucionar estes problemas e os resultados do trabalho desenvolvido foram abordadas ao longo deste documento. Ao longo deste capítulo será feito um apanhado dos sucessos e fracassos deste estudo, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros. Estas conclusões dividem-se em três categorias.

### *Conjunto Máquina Ferramenta*

Ao longo do capítulo 4 foram apresentados alguns problemas relativos à máquina. O principal problema encontrado é a inversão da rótula, quando se opera a prensa a forças elevadas. Este problema faz com que não seja possível atingir a força que seria esperada após a alteração da prensa. No entanto este problema não afeta os propósitos deste estudo, sendo a prensa capaz de criar uma força suficiente aos requisitos impostos. No entanto este fenómeno irá limitar a utilidade do conjunto em testes futuros, impossibilitando o uso de provetes que requeiram uma força de corte superior. Ao longo dos ensaios detetou-se que o atuador pneumático da prensa não funcionou devidamente em todas as ocasiões, mostrando-se, por vezes, incapaz de gerar a força esperada. A origem deste problema foi atribuída ao extenso uso deste atuador, prévio a este estudo, que terá causado a degradação de alguns componentes do atuador, afetando o seu funcionamento. Este problema torna, ainda mais perigoso o uso da prensa a uma pressão superior a 8bar. A outra parte deste conjunto, a ferramenta, comportou-se exatamente como esperado, executando todas as tarefas previstas com sucesso. A única dificuldade encontrada no decorrer deste estudo foi a de controlar a FNPC com a precisão necessária.

### *Método Experimental*

Ao longo deste estudo foram referidos alguns problemas no que se refere à metodologia experimental, sendo o principal a falta de precisão no fabrico dos provetes. Os desvios dimensionais nos provetes impedem a realização deste tipo de estudo, uma vez que introduzem muitas variações nos resultados de ensaios entre provetes supostamente iguais. Para além deste problema com a falta de rigor na geometria este estudo revelou também que esta geometria não é a mais indicada a este estudo. A presença do furo tão perto do entalhe faz com que a secção entre o furo e o entalhe seja menor que a secção resistente, isto afeta o modo como o provete reage à deformação, que por sua vez influencia a força de corte.

Este estudo revelou também que os parâmetros utilizados nas simulações são insuficientes para fazer uma previsão geral do comportamento do provete, pois, tal como visto as previsões criadas

apenas tiveram sucesso em prever o comportamento de alguns ensaios. Além da falta de precisão nas previsões, verifica-se também que o número de provetes testado neste estudo é bastante reduzido, o que dificulta distinguir um erro de previsão, de um erro experimental. Em estudos futuros terá de ser utilizada uma maior quantidade de provetes. Com um maior número de provetes os resultados serão mais conclusivos e uma maior diversidade de geometrias permitirá melhor avaliar a influência da dimensão da secção resistente e do estado de tensões na tenacidade do material à fratura plástica. Verificou-se também que a existência de defeitos introduzidos por mau manuseamento, tem grande influência nos resultados obtidos.

### *Trabalhos Futuros*

Atendendo a todos estes problemas alguns trabalhos futuros são propostos, bem como algumas sugestões para estudos futuros. De modo a solucionar a falta de força exercida pela prensa é imperativo solucionar o problema de falta de rigidez da estrutura. Com este objetivo propõe-se o reforço da estrutura, acrescentando um suporte na parte frontal da máquina, fechando a estrutura. No entanto outras soluções podem ser encontradas, sendo o principal objetivo eliminar a elevada deformação que ocorre na prensa. Esta intervenção também irá aumentar o tempo de vida da prensa. Caso não seja do interesse a estudos futuros despende dos recursos necessários a esta alteração uma outra hipótese existe quando necessário fazer ensaios a provetes que requerem uma maior força de arrombamento. A ferramenta é uma estrutura autossuficiente, que apenas necessita de algo que exerça uma força de corte e uma fonte de ar comprimido. Assim, para ensaios que o requeiram, a ferramenta pode ser, pontualmente, montada na prensa hidráulica do laboratório, capaz de exercer uma maior força de arrombamento, sem necessidade de se fazer qualquer alteração à ferramenta.

Em estudos futuros é aconselhado, quando possível, a redução da pressão pneumática no atuador da prensa, de modo a não sobrecarregar este componente. Idealmente, se existirem meios, aconselha-se a substituição dos componentes mais desgastados. De modo a solucionar a dificuldade em regular a pressão do ar nos atuadores que exercem a FNPC sugere-se a implementação de uma válvula de regulação de pressão mais precisa. Isto permitirá ter um maior controlo sobre o valor da FNPC.

Por fim sugere-se uma alteração ao desenho dos provetes. Esta alteração consiste em aproximar os dois entalhes do centro do provete, aumentando o espaçamento destes aos furos. Um maior controlo dimensional no fabrico dos provetes também seria benéfico a futuros ensaios, pois diminuiria a variabilidade dimensional entre eles, que aleado a um plano de ensaios mais extenso, irá aumentar a convergência de resultados entre ensaios, permitindo retirar conclusões mais definitivas. Aconselha-se também um manuseamento mais cuidado dos provetes, são deformados com relativa facilidade, o que irá influenciar os resultados.

## 8. Referências

- Achenbach U., Klingbeil S., Prah U., Dahl W. and Bleck W., "Proceedings of ECF 12, Fracture from defects", Vol II, pp. 877-881, Brown M.W., de la Rios E.R. and Miller K.J. (Eds.), EMAS, Publishing, Sheffield, 1998
- Anderson, T.L., Fracture Mechanics, CRC Press, Florida, 1991
- Anderson, T.L., Fracture Mechanics- Fundaments and Applications, 3ª edição, Taylor & Francis, 2005
- Astakhov V., Abushawashi Y., Xiao X., "A novel approach for determining material constitutive parameters for a wide range of triaxiality under plane strain loading conditions", 2013, Materials Science International Journal of Mechanical Sciences
- Atkins, G., Ductile Fracture Mechanics, Key Engineering Materials Vol. 177-180,, Trans Tech Publications, Switzerland, 2000
- Atkins A.G., Chen Z, Cottrell B., "The essential work of fracture and JR curves for the double cantilever beam specimen: An examination of elasto-plastic crack propagation", Proceedings of the Royal Society London; A454:815-33, 1998
- Atkins, A. G., Modeling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems, Int. J. Mech. Sci., 45, 2003
- Atkins A.G., "Toughness and cutting: a new way of simultaneously determining ductile fracture toughness and strength", Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, UK, 2005
- Atkins A. G., Mai Y.W., Elastic & Plastic Fracture, Chichester, Ellis Horwood, 1985
- Atkins AG, Mai Y-W., "Elastic and plastic fracture", Chichester: Ellis Horwood/John Wiley; 1988
- Bao Y. e Wierzbicki T., On the cut-off value of negative triaxiality for fracture, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, pp. 1049-1069, 2005
- Bhadauria, S., Pathak, K., & Hora, M., Determination of critical stress triaxiality along yield locus of isotropic ductile materials under plane strain condition, Materials Science-Poland, 2012
- Branco, C.M., Mecânica dos Materiais, Fundação Calouste Gulbenkian, 3rd ed., Portugal, 1998
- Bridgman P.W., "Studies in large plastic flow and fracture", McGraw Hill, New York, 1952
- Broberg, K. B., On stable crack growth. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1975
- Broberg KB, "Critical review of some methods in nonlinear fracture mechanics", Engng Fract Mech, 1995

Brocks W, Klingbeil D, Kunecke G, Sun DZ, Application of the Gurson model to ductile tearing resistance, In: Kirk MT, Bakker A, editors, "Constraint effects in fracture, theory and applications", ASTM STP1244, American Society for Testing of Materials, 1995, pp. 232-52

Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff, Netherlands, 1984

Brünig M., Gerke S., "Simulation of damage evolution in ductile metals undergoing dynamic loading conditions", International Journal of Plasticity, 2011

Cristino, V. A., Martins, P. A. F., *Tecnologia Mecânica Vol 4 - Tecnologias da Deformação Plástica e Corte*, Escolar Editora, Lisboa, Portugal, 2013

Cockcroft MG, Latham DJ., "A simple criterion for fracture for ductile-fracture of metals", National Engineering Laboratory, Report No. 240, 1966

Ezequiel V.L.R.L., Influência da velocidade de deformação e da tensão normal na tenacidade à fratura da liga de alumínio AA1050, Instituto Superior Técnico, 2010

Gregório, Afonso J. V. L., Ensaios de impacto a elevadas velocidades de deformação, Instituto Superior Técnico, 2017

Griffith A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids", 1921

Gurney, K. M. Ngan, Proc. Roy. Soc. A325, 1971

Inglis C. E., Stresses in plate due to the presence of cracks and sharp corners, Trans Inst. Naval Architects, 55 (1953) pp.219-241

Leuser D., Leblanc m., Riddle B., Jogensen B., "Modeling of Shear Localization in Materials", 1998

Meyer LW, Manwaring S. Critical adiabatic shear strength of low alloyed steel under compressive loading. In: Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. Marcel Dekker; 1986. p. 657-74

McClintock FA, Kaplan SM, Berg A., "Ductile fracture by hole growth in shear bands", International Journal of Fracture, Mechanics, 1966

McClintock, F.A., A criterion for ductile fracture by the growth of holes, *Journal of Applied Mechanics - Transactions ASME*, 35, 1968

Morris DM, Reaugh JE, Morgan B, Quinones DF., "A plastic-strain, mean stress criterion for ductile fracture", Journal of Engineering Materials and Technology, 1978

Oyane M, Sato T, Okimoto K, Shima S., "Criteria for ductile fracture and their application", Journal of Mechanical Working Technology, 1980

Rice JR, Tracey DM., "On the ductile enlargement of voids on triaxial stress elds", Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1969

Rosa P. A. R., Martins P. A. F. and Atkins A. G., 'Ductile Fracture Mechanics and Chip Separation in Cutting', International Journal of Machining and Machinability of Materials, (2007)

Ruggieri C, Pantoin TL, Dodds RH, "Numerical modeling of ductile crack growth in 3D using computational cell elements", Int J Fract, 1996

Silva, M.B., Isik, K., Tekkaya, A.E., Atkins, A.G., Martins, P.A.F., Fracture toughness and failure limits in sheet metal forming. J. Mater. Process. Technol. 234, 249–258, 2016

Silva C.M.A., "Influência da velocidade de deformação na tenacidade à fractura do chumbo-tecnicamente puro", MSc Tese, Universidade Técnica de Lisboa, outubro, 2007

von Mises, R., "Mechanik der festen Koerper in plastisch deformablem zuztand", Goett. Narch. Math. Phys., KI., 1913

Wells, A.A., "Crack Propagation Symposium", Proc. CCA, vol. 1, pp.210, 1961

Zhang, Y. & Chen, Z., On the Effect of Stress Triaxiality on Void Coalescence, Springer Science + Business Media B. V., 2007

## Anexos

A I- Procedimento para Simulação no ABAQUS;

A.II- Procedimento de Montagem/Desmontagem da Ferramenta;

A.III- Procedimento de Montagem/Desmontagem do Provete;

A.IV- Procedimento Experimental;

A.V- Laboratório Virtual;

A.VI- Documentos Técnicos de Equipamentos;

A.VII- Desenhos 2D das Peças Fabricadas;

## A.I- Procedimento para Simulação no ABAQUS

1. Abrir ABAQUS/CAE 2017;
2. Criar um modelo Standard /Explícito selecionando a opção "Create Model Database With Standard/Explicit Model";
3. Importar o 2D do provete em formato .dxf, recorrendo ao menu File/Import/Sketch;
4. Selecionar o módulo "Part";
5. Escolher a opção "Create Part" e selecionar "Modeling Space/ 2D Planar", "Type/Deformable" e "Base Feature/ Shell";
6. Selecionar "Add Sketch" e escolher o *sketch* do provete desejado;
7. Criar plano de simetria no provete, recorrendo a "Create Datum Plane: Offset From Principal Plane";
8. Selecionar "Part/ Create Part", para criar a matriz, punção e ambos os pernos;
9. Selecionar "Modeling Space/ 2D Planar", "Type/Discrete rigid", "Base Feature/ Wire" e desenhar o componente desejado;
10. Selecionar o módulo "Assembly";
11. Em "Create Instance" selecionar todos os componentes da montagem e recorrendo ao "Translate Instance" colocar as peças nos locais corretos;
12. Selecionar o módulo "Property";
13. Definir um ponto de referência para as estruturas rígidas recorrendo ao menu "Tool/Reference Point" e selecionando um ponto em cada componente;
14. Criar o material do provete recorrendo ao botão "Create Material". Nesta simulação apenas se definiu os comportamentos mecânicos elásticos e plásticos. Para o comportamento elástico do aço AISI1045 definiu-se o módulo de Young,  $E=210000\text{MPa}$ , e o coeficiente de Poisson,  $\nu=0.3$ . Para o comportamento plástico aplicou-se uma seleção de pontos da curva tensão-extensão;
15. Criar uma secção recorrendo ao botão "Create Section" e aplicar a secção em todo o provete recorrendo ao botão "Assign Section";
16. Selecionar o módulo "Mesh";
17. Em cada elemento, definir uma malha adequada, definindo primeiro o número de nós por aresta, recorrendo ao botão "Seed Part Instance" ou "Seed Edges", e de seguida gerar malha clicando em "Mesh Part Instance". Antes de gerar a malha verificar, recorrendo ao botão "Assign Mesh Controls", que está definido o uso de elementos quadráticos e que "Algorithm/Medial axis/ Minimize the mesh transition" está selecionado. Verificar, também, que as partes rígidas têm malhas coerentes com a malha da matriz nas zonas onde vão estar em contacto;
18. Recorrendo ao botão "Assign Element Type" selecionar "Plane Strain" no menu "Family" e selecionar os elementos do provete;
19. Selecionar o módulo "Interaction";

20. Em "Create Interaction Property" criar uma interação do tipo "Contact". Definir comportamento "Mechanical/Thangencial Behavior", com "Friction formulation: Penalty", com coeficiente de fricção de 0.1;
21. Para criar as interações entre superfícies selecionar "Create Interaction", escolher opção "Surface-to-Surface contact (Standard)" e escolher quais as superfícies e de seguida escolher a interação criada em "Contact Controls". Repetir este processo para todas as interações entre componentes;
22. Repetir o procedimento anterior, mas em alternativa a escolher "Surface-to-Surface contact (Standard)", escolher "Self-contact (Standard)" e selecionar as faces do entalhe no provete e as faces superiores e inferiores;
23. Selecionar o módulo "Step" e criar novo step em "Create Step";
24. Em "Edit Step" ativar "Nigeom" e "Automatic Stabilization: Specify dissipated energy fraction"= 0.0002 e ativar "adaptative stabilization". No separador "Incrementation" definir "Increment Size: Initial"=0.1, "Increment Size: Minium"= 1E-5 e "Increment Size: Maximum"= 1;
25. Selecionar o módulo "Load";
26. Criar condições de fronteira na opção "Create Boundary Conditions". Seleccionar "Desplacemete /Rotation" e o step pretendido. De seguida, definir a condição de fronteira, selecionando o ponto de referencia do componente desejado:
  - a. Selecionar RP da matriz, step inicial, fixar em U1, U2 e UR3;
  - b. Selecionar RP do punção, step inicial, fixa em U1 e UR3;
  - c. Selecionar RP do punção, step criado (step\_1), selecionar U2 e definir o deslocamento do punção, 2mm;
27. Para criar o plano de simetria do provete selecionar "Create Boundary Conditions: Symmetry/Antisymmetry/Encastre", no step inicial, selecionar o plano de simetria do provete e selecionar a opção "XSYMM";
28. Caso se aplique à simulação, para definir uma FNPC exercida pelos pernos selacionar "Create Load", step criado, "Concentrated Force" e selecionar o RP do perno desejado e adicionar em "CF2" o valor da força desejada, em N;
29. Selecionar módulo "Job";
30. Criar *job* em "Create Job" e submeter;
31. Para tirar o valor de força exercida pelo punção e do deslocamento deste a cada step, ir para resultados, módulo "Visualization", selecionar "Create XY Data", "ODB field output";
32. Na janela que surgiu escolher opções "Position: Unique Nodal". De seguida selecionar as opções "RF: RF2" e "U: U2" e no separador "Elements/Nodes" selecionar o RP do punção;
33. Recorrendo ao menu "Report/ XY..." selecionar os valores a guardar, atribuir o nome desejado e clicar em "Apply", e os dados ficam gravados, em formato compatível com Excel, na diretoria de trabalho;

## A.II- Montagem e Desmontagem da Ferramenta

### A.II.1- Procedimentos de Montagem da Ferramenta

1. Apertar o suporte da ferramenta à base da máquina;
2. Apertar os parafusos do carro móvel;
3. Apertar os parafusos da base do carro móvel ao suporte da ferramenta;
4. Colocar o sensor de carga dentro do casquilho, bem como os espaçadores que permitem o centrar do sensor;
5. Apertar todos os parafusos da matriz e do casquilho;
6. Apertar a base da máquina à mesa de suporte;
7. Colocar o sensor de deslocamento do suporte;
8. Colocar o suporte da câmara;
9. A máquina deve estar desligada e descarregada;

### A.II.2- Procedimentos de Desmontagem da Ferramenta

1. Verificar se a máquina se encontra descarregada e na posição superior;
2. Desligar o compressor da máquina;
3. Colocar a máquina no estado de desmontagem do provete;
4. Remover o suporte da câmara;
5. Remover sensor de deslocamento;
6. Desapertar todos os parafusos da matriz e do casquilho e remover os componentes (por exemplo o sensor de carga);
7. Desapertar os parafusos da base da máquina;
8. Desapertar os parafusos do carro móvel;
9. Desapertar os parafusos do suporte da ferramenta;

## A.III- Montagem e Desmontagem do Provete

### A.III.1- Procedimento de Montagem do Provete

1. Começar com a ferramenta na posição montada;
2. Verificar se a máquina se encontra na posição de descarregada e desligada;
3. Verificar a posição dos interruptores dos atuadores;
4. Montar os braços traseiros com o ponto de charneira;
5. Colocação dos batentes traseiros com 4 parafusos tipo M5x50mm;
6. Colocação dos batentes frontais;
7. Colocação do provete na zona de ensaio;
8. Colocação dos veios laterais de suporte do provete (são estes veios que permitem a tração ou compressão do provete);
9. Montagem dos braços frontais com entalhe retangular para o interior;
10. Aperto à mão dos 8 parafusos de fixação dos braços (4 porcas M4 dos batentes, 2 porcas M8 do ponto de charneira e 2 parafusos com anilhas M4 para ajuste dos veios do provete).  
**Nota:** ter em atenção para as anilhas do suporte do provete não cobrirem o ponto de focagem da câmara;
11. Depois dos apertos verificar o alinhamento do provete na matriz e se necessário ajustá-lo;
12. Fixar a câmara no suporte de encaixe.

### A.III.2- Procedimento de Desmontagem do Provete

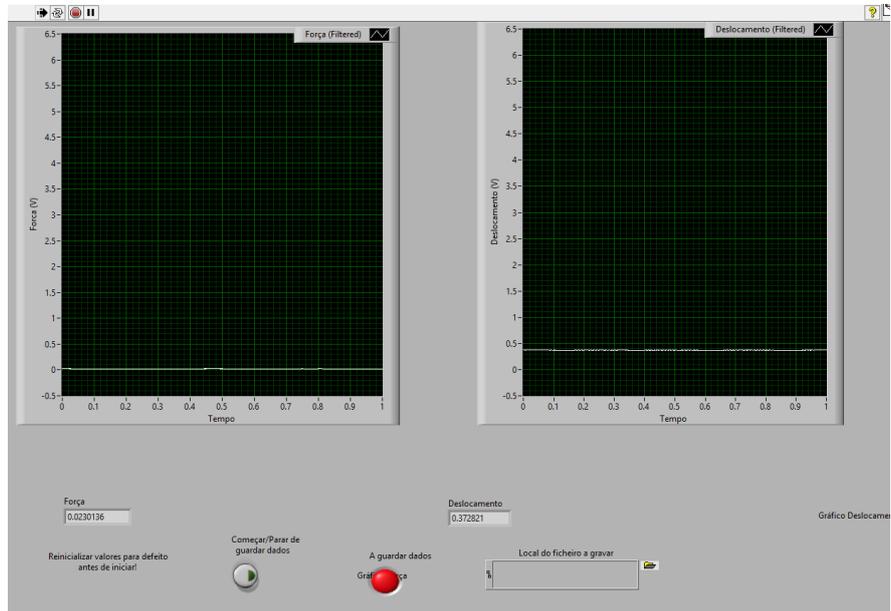
1. Retirar a câmara do suporte de encaixe;
2. Desapertar dos 8 parafusos de fixação dos braços (4 porcas M4 dos batentes, 2 porcas M8 do ponto de charneira e 2 parafusos com anilhas M4 para ajuste dos veios do provete);
3. Retirar os braços frontais;
4. Retirar todos os pedaços do provete danificado;
5. Verificar a posição dos interruptores dos atuadores;
6. Verificar se a máquina se encontra na posição de descarregada e desligada;

## A.IV- Procedimento Experimental

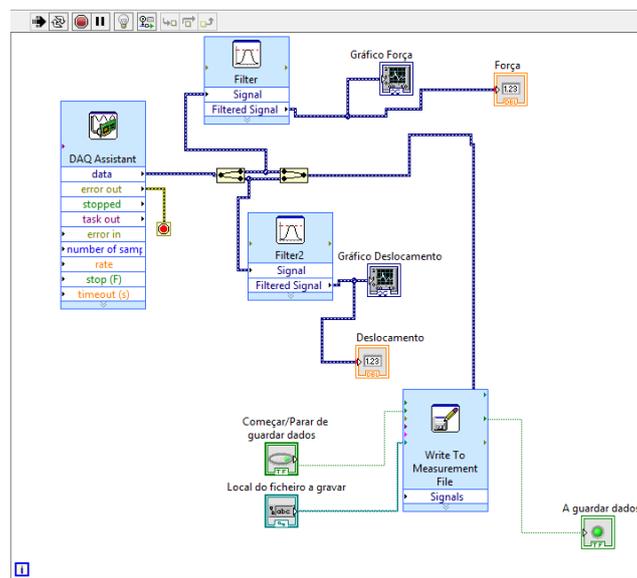
1. Abrir o programa *LabView* no diretório correto;
2. Abrir o programa *AMCap* e selecionar a câmara;
3. Colocar a câmara no suporte e ajustar o ponto de focagem de acordo com a zona que se pretende gravar e quando atingido esse ponto fixar através do parafuso do suporte;
4. Colocar o punção manualmente e com **elevado cuidado** a tocar no provete;
5. Ajustar o batente do sensor de deslocamento de modo a registar um pequeno valor e, deste modo, poder retirar um valor para o offset.
6. Subir o punção manualmente;
7. Verificar que os interruptores dos atuadores estão nas posições corretas: se em tração ou compressão e descarregado (estes devem estar na posição contrária ao tipo de ensaio que se vai realizar);
8. Ligar a máquina ao compressor;
9. Carregar o compressor até à pressão desejada (cerca de 9 ou 10 bar);
10. Iniciar a captura de dados, imagem e sensores;
11. Regular a pressão nos atuadores que fazem a tração ou compressão;
12. Dependendo do tipo de ensaio experimental, deve ou não se acionar os atuadores;
13. Acionar o punção;
14. Recolher o punção;
15. Parar a recolha de dados;

# A.V- Laboratório Virtual

## Painel de Controlo



## Diagrama de Blocos

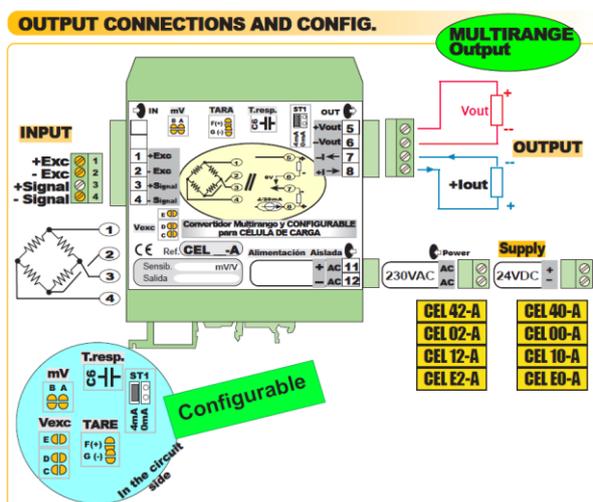


## A.VI- Documentos Técnicos de Equipamentos

Especificações da prensa:



Especificações da célula de carga:



Especificações do sensor de deslocamento:



Fontes de alimentação:



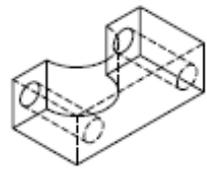
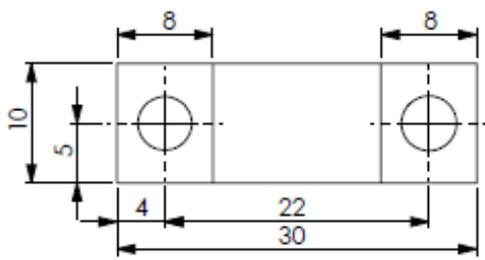
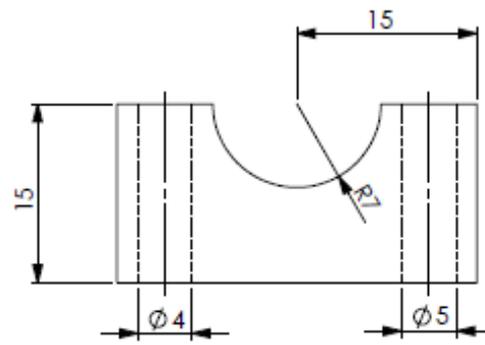
Placa de aquisição de dados:



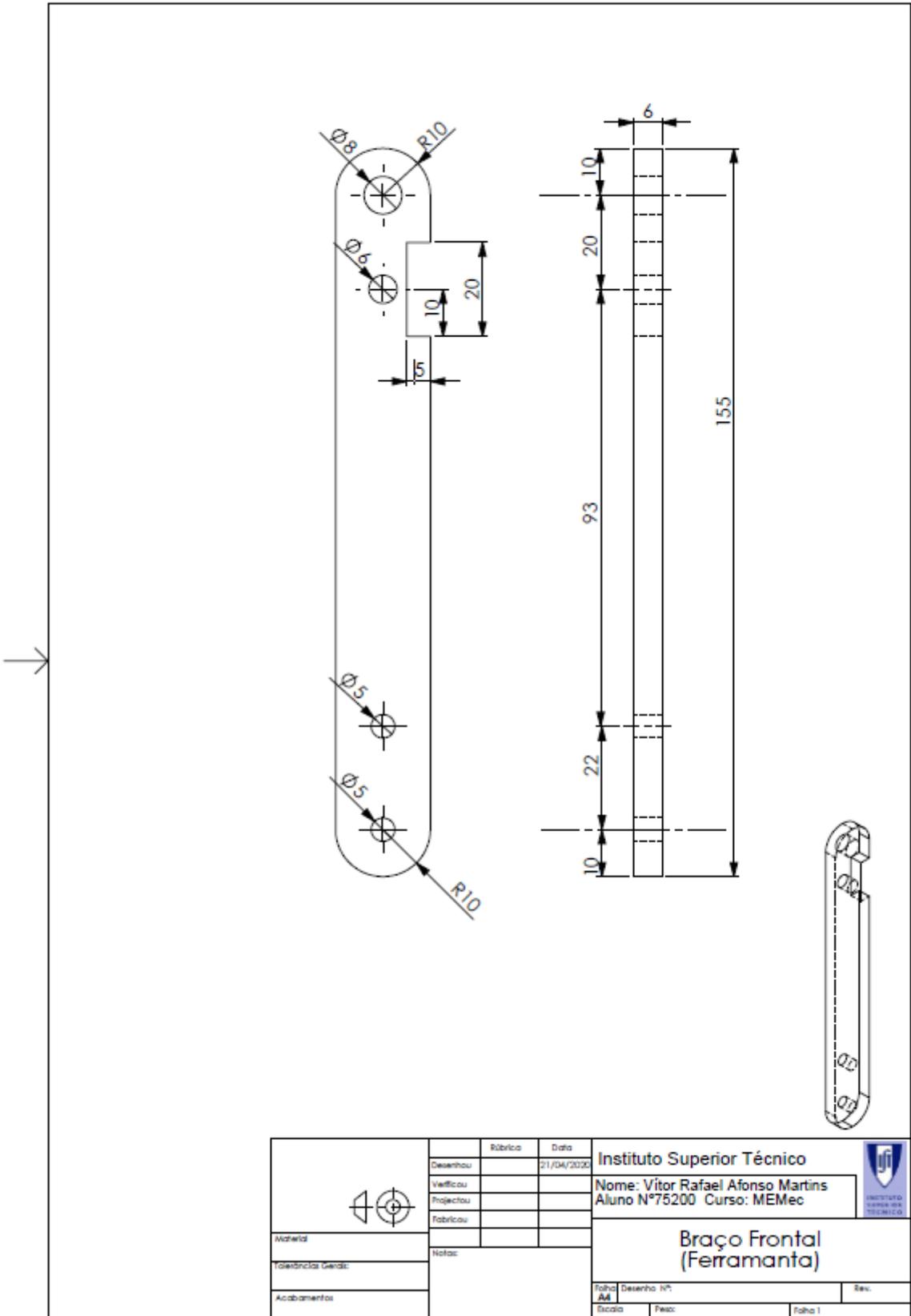
Especificações dos cilindros laterais:

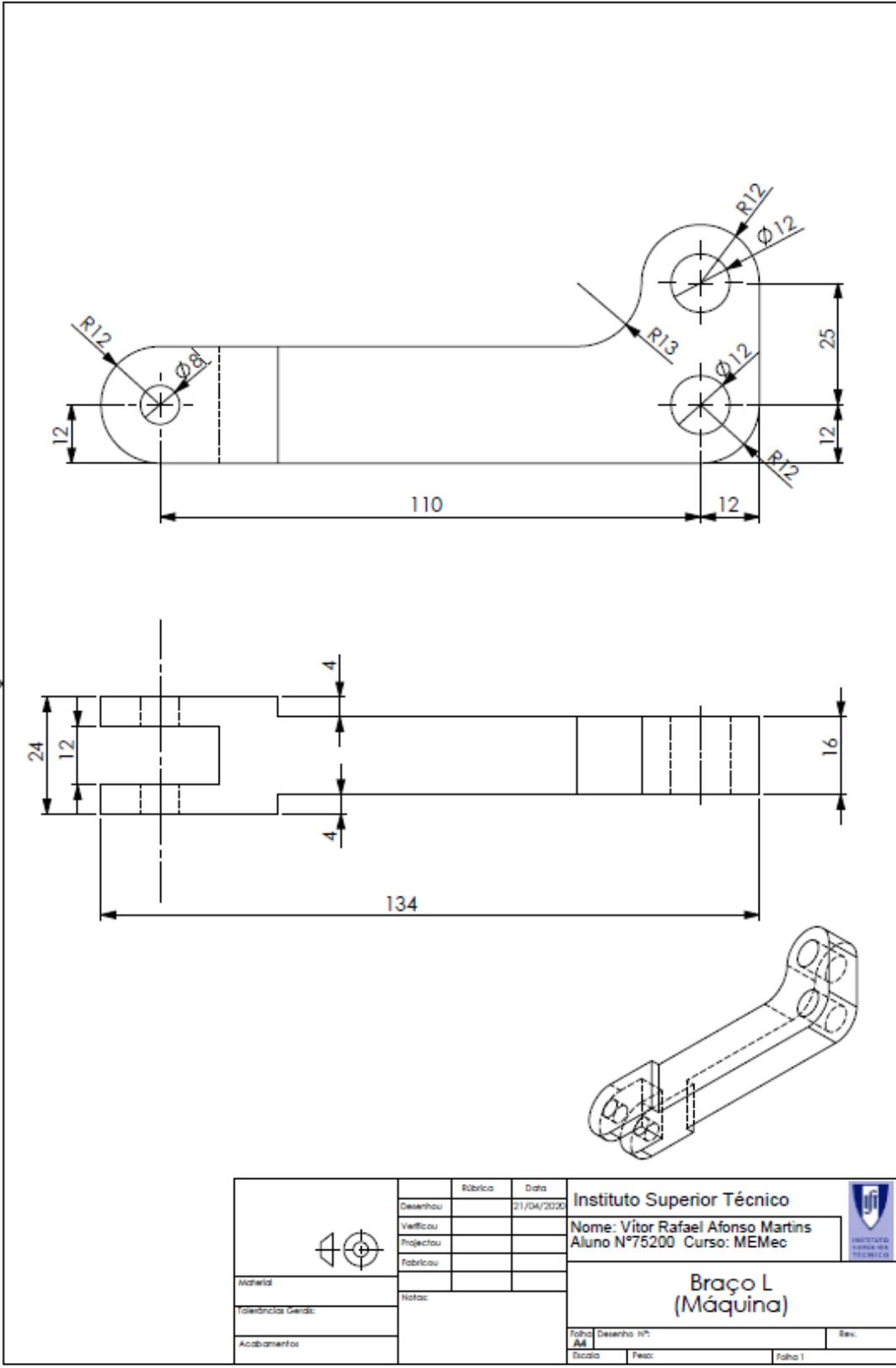
Parameter	Unit	Technical Specifications	Parameter	Unit	Technical Specifications
Sensitivity	mV/V	1.0-2.0	Protect grade		IP67
Comprehensive error	≤%F.S	±0.2%	Operating temperature range	°C	-30°C ~ +70°C
Creep	≤%F.S	±0.5%	Input resistance	Ω	400±10Ω
Zero balance	≤%F.S	±1%	Output Resistance	Ω	350±10Ω
Zero temperature effect	≤%F.S/10	±0.5%	Safe Overload	≤%F.S	150% F.S
Output temperature effects	≤%F.S/°C	±0.05%	Insulation resistance	MΩ	≥2000MΩ
Excitation voltage	V	5V-15V	Maximum excitation voltage	V	15

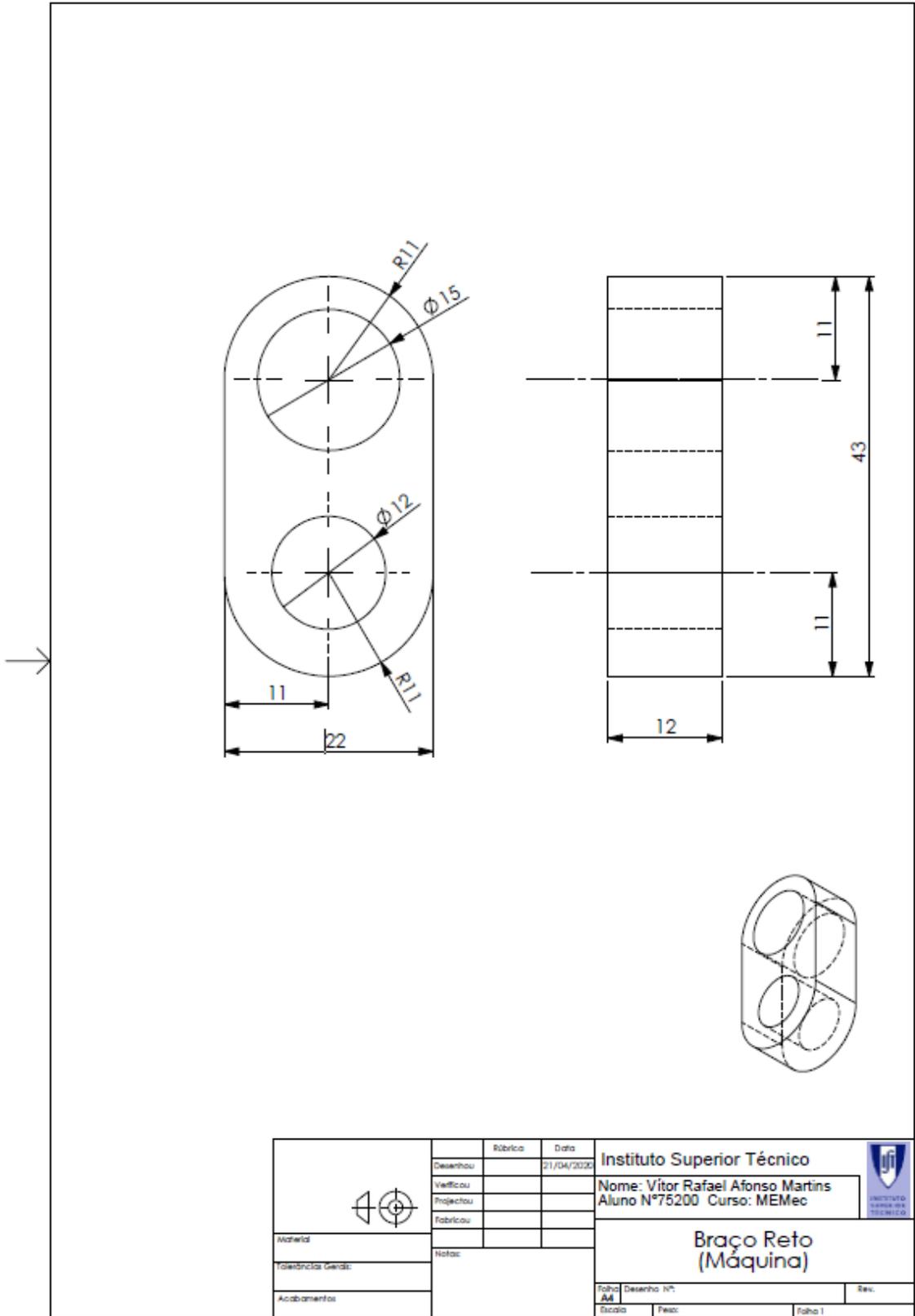
## A.VII- Desenhos 2D das Peças Fabricadas;

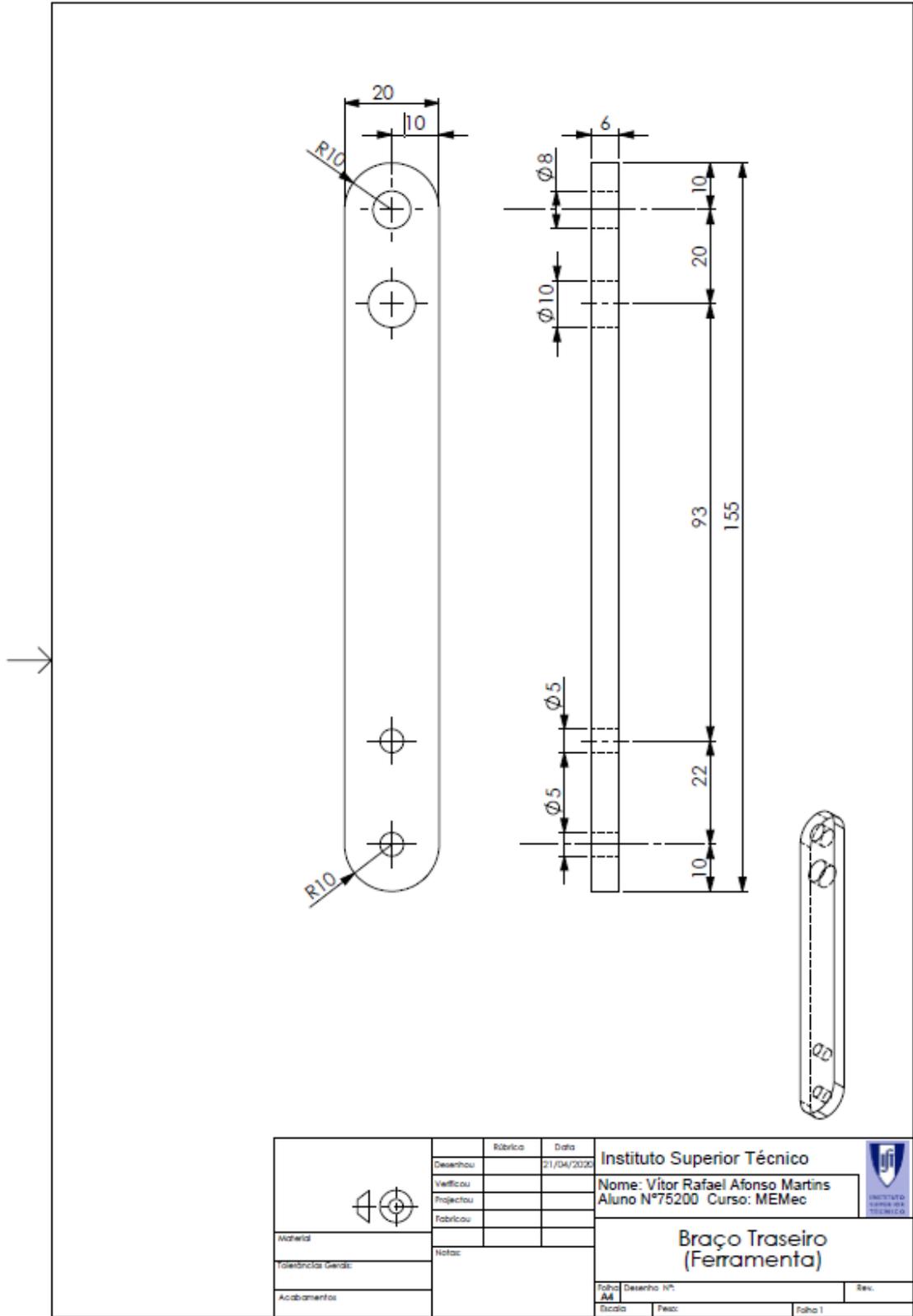


	Desenhou	Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vitor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec	
	Verificou		21/04/2020		
	Projectou				
	Fabricou				
	Notas				
Materia				<b>Batente (Ferramenta)</b>	
Tolerâncias Gerais					
Acabamentos					
Folha	Desenho N°			Rev.	
AA		Escala	Paço:	Folha 1	

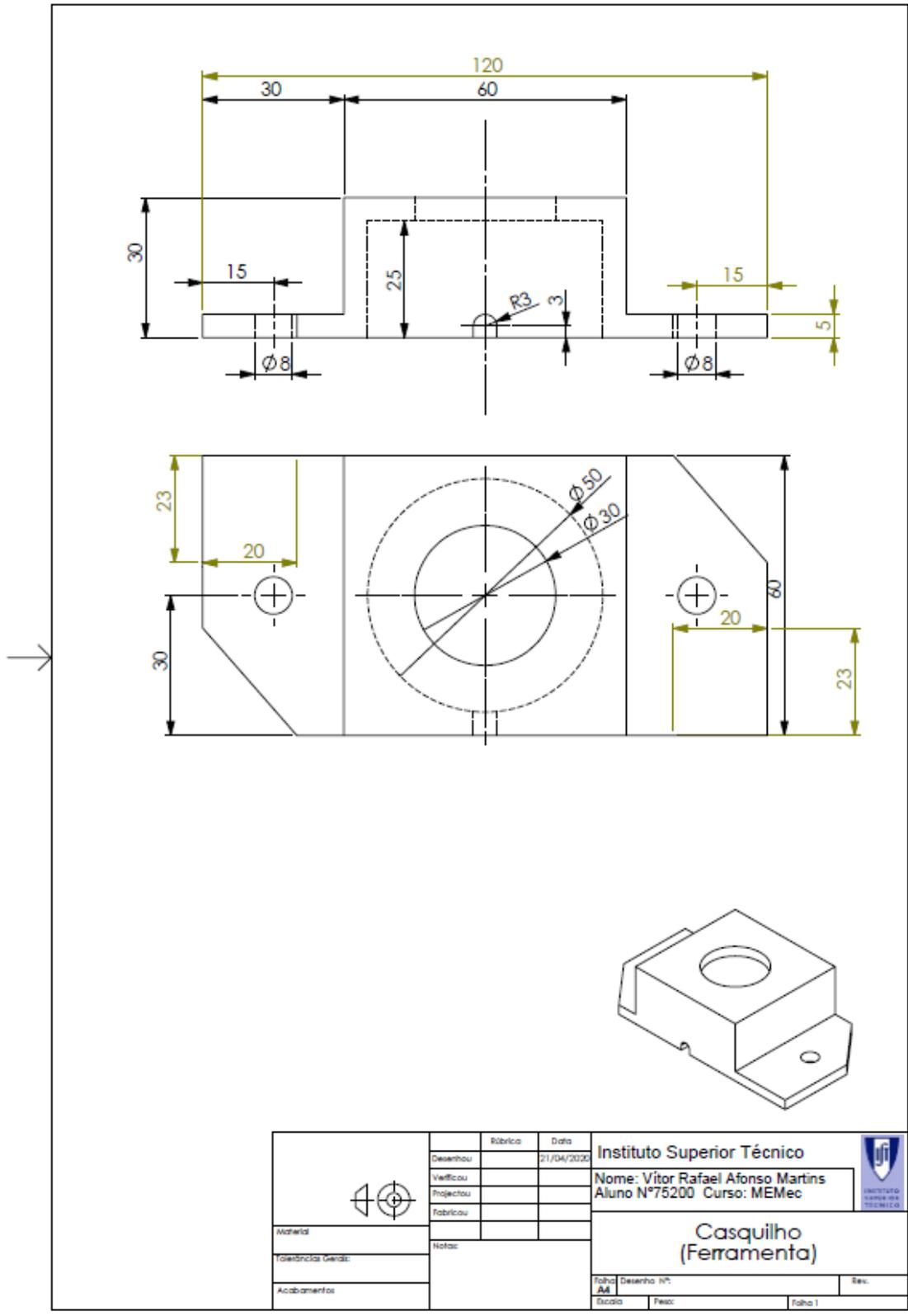




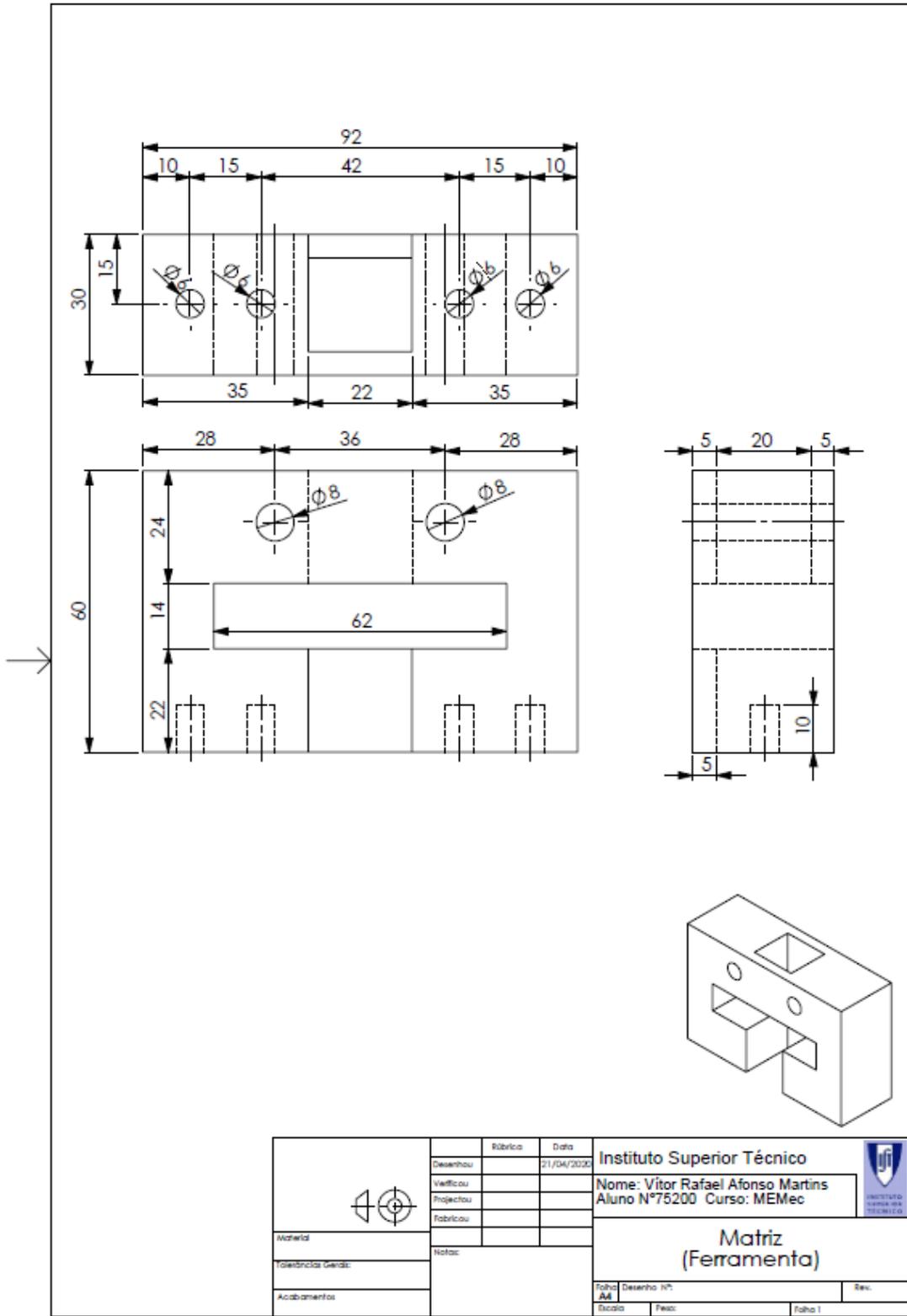




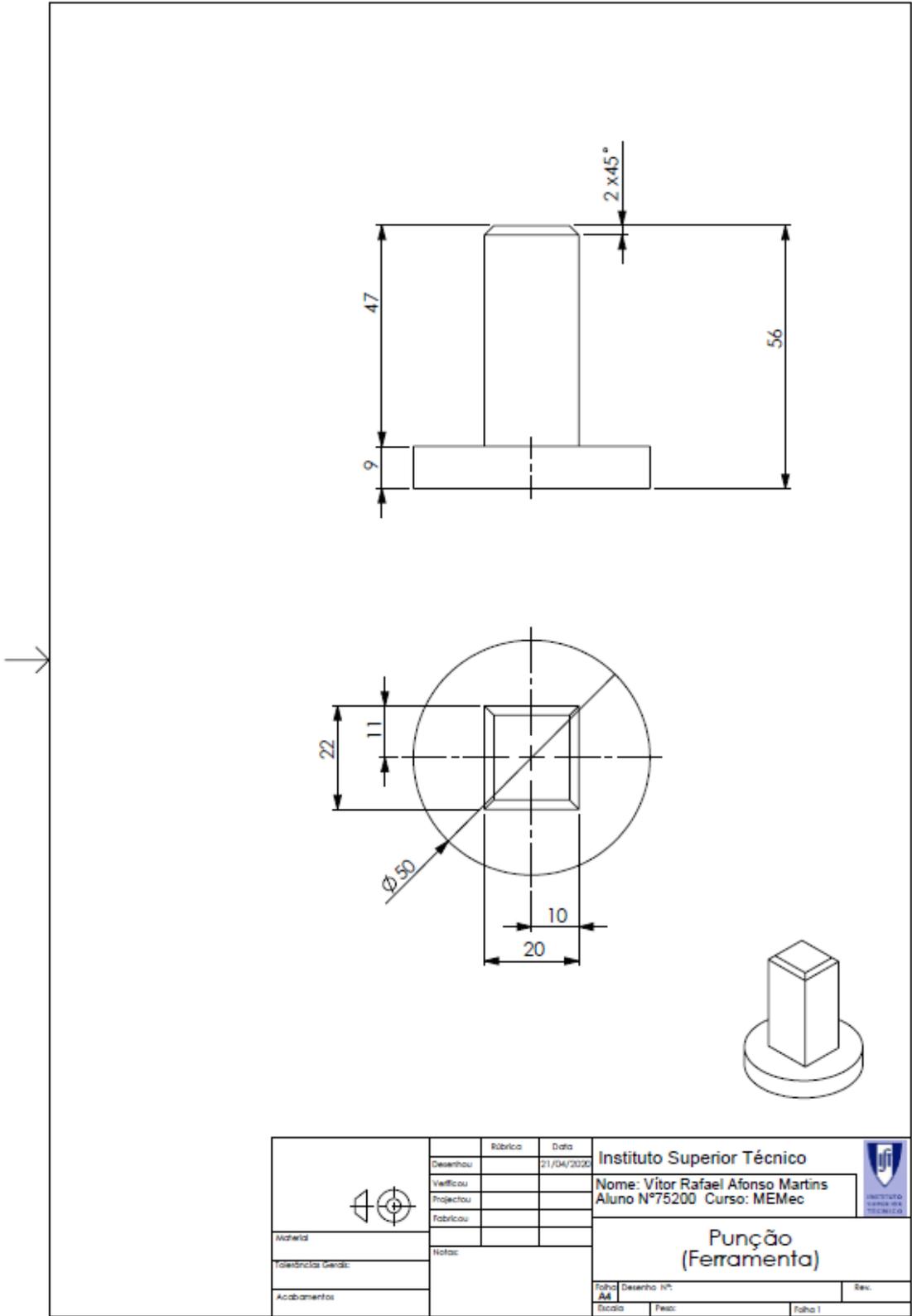
	Desenhado	Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vítor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec	
	Verificado		21/04/2020		
	Projectado				
	Fabricado				
	Notas				
Material				<b>Braço Traseiro (Ferramenta)</b>	
Tolerâncias Gerais				Folha	Desenho N°
Acabamentos				Escala	Fez:
					Rev.
					Folha 1



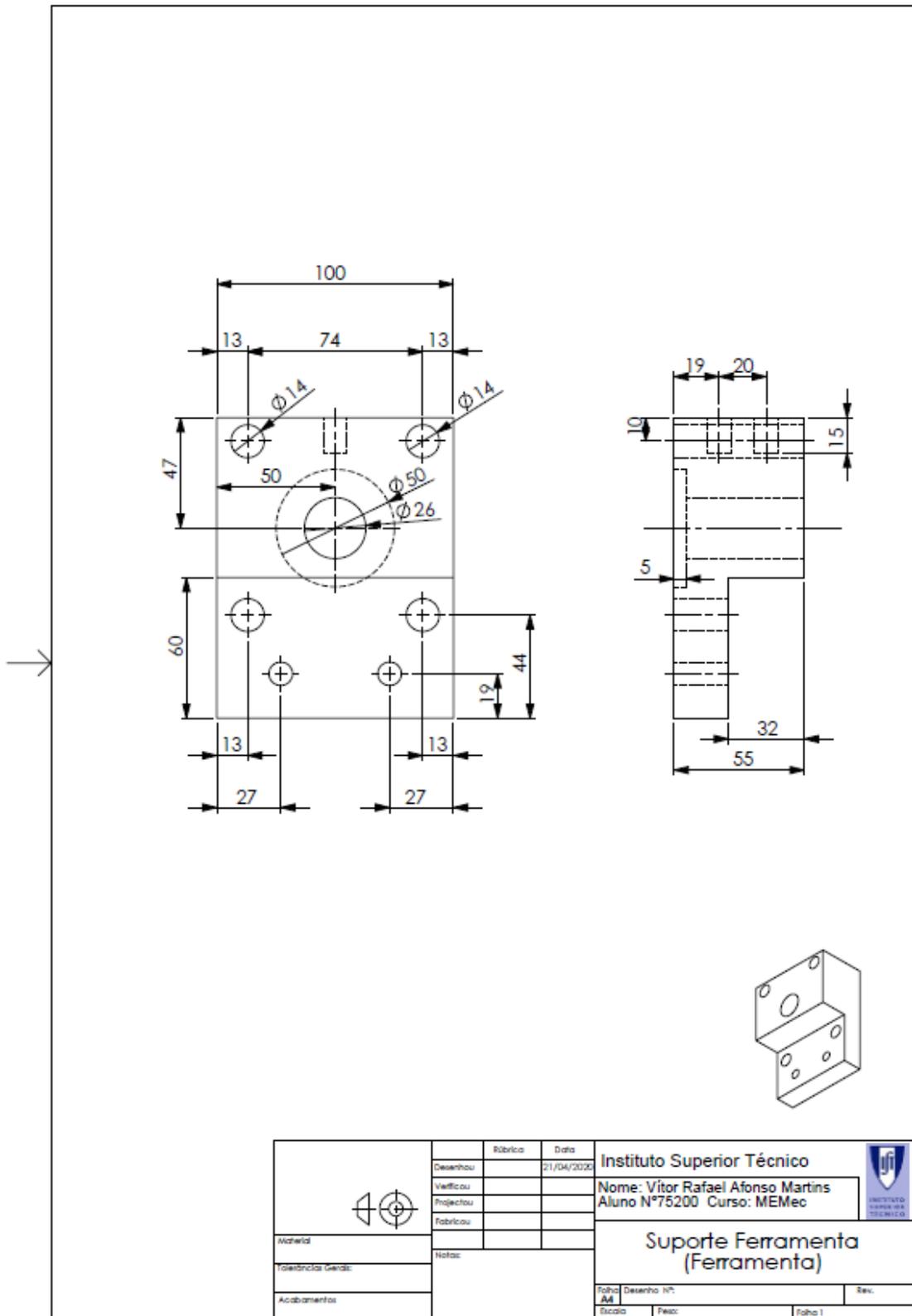
	Elaborado	Revisado	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vítor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec	
	Desenhado		21/04/2020		
	Verificado				
	Projectado				
Material				<b>Casquilho (Ferramenta)</b>	
Tolerâncias Gerais	Notas:			Folha	Desenho N°
Acabamentos				AA	Rev.
				Escala	Folha 1

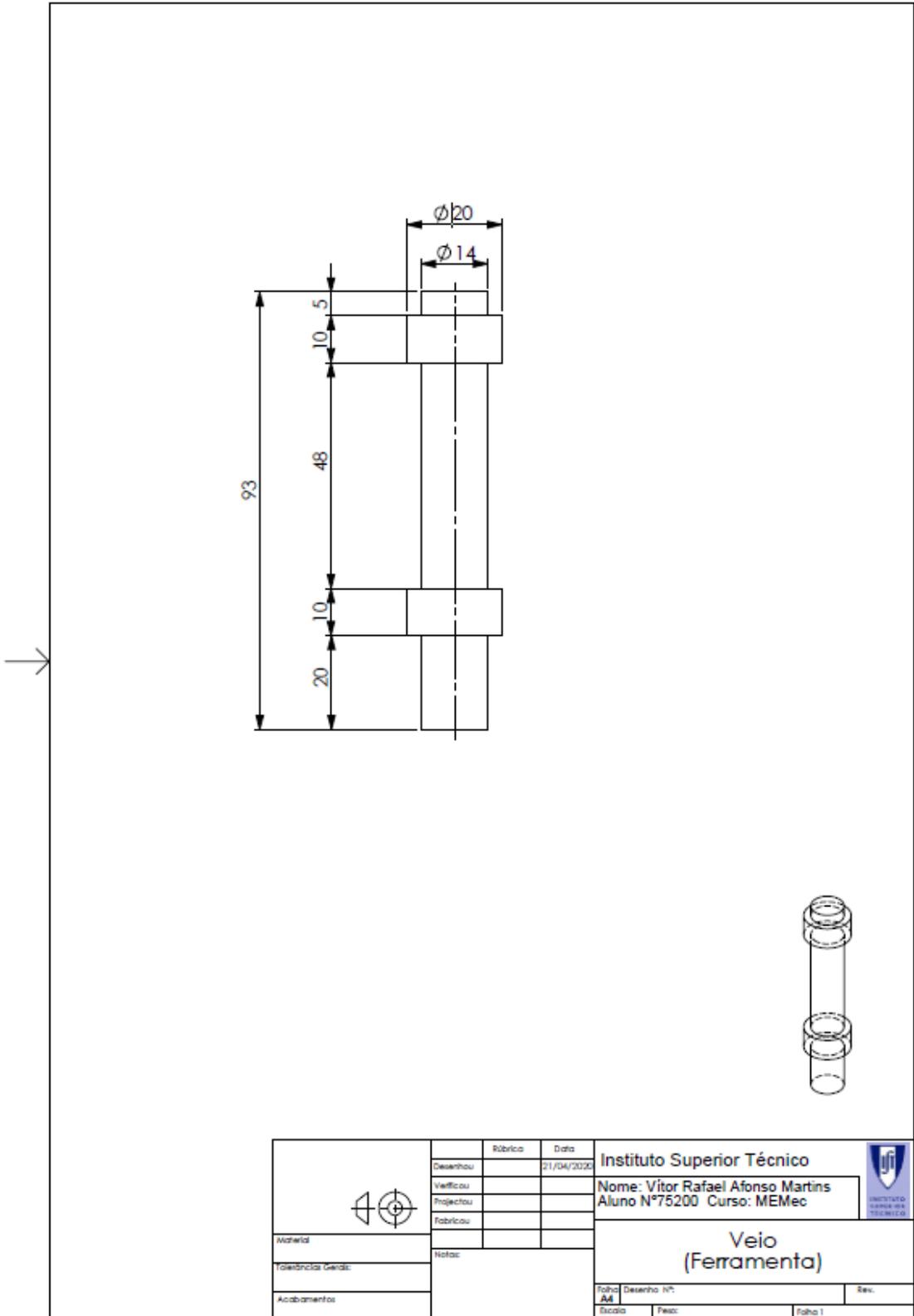


		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vítor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec	
	Desenhou		21/04/2020		
	Verificou				
	Projectou				
	Fabricou				
Materiais	Notas			<b>Matriz (Ferramenta)</b>	
Tolerâncias Gerais				Folha Desenho N°	Rev.
Acabamentos				Escala	Folha 1



	Desenhado	Rabirica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vítor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec		
	Verificado		21/04/2020			
	Projectado					
	Fabricado					
Materia	Notas:			<b>Punção (Ferramenta)</b>		
Tolerâncias Gerais:						
Acabamentos						
				Folha	Desenho N°	Rev.
				AA		
				Escala	Feito:	Folha 1





		Rabisco	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Vitor Rafael Afonso Martins Aluno N°75200 Curso: MEMec	
	Desenhou		21/04/2020		
	Verificou				
	Projectou				
	Fabricou				
Materia	Notas:			<b>Veio (Ferramenta)</b>	
Tolerancias Gerais:				Folha	Desenho N°
Acabamentos				AM	Rev.
				Escala	Folha 1